

HIDROGEOQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA SUBCUENCA DE APAN-TOCHAC, HIDALGO, MÉXICO

Rafael Huizar-Álvarez¹,
Teodoro Méndez-García¹, y
Rafael Madrid-Ríos²

RESUMEN

El análisis de los iones principales de 235 muestras de agua, revela la correspondencia entre la evolución hidrogeoquímica y el sistema de flujo del agua subterránea en la subcuenca Apan-Tochac, en el estado de Hidalgo. Un contenido alto de sólidos totales, mayores valores de la conductividad eléctrica (C.E.) y bajos valores del índice Ca/Mg, se asocian con los pozos ubicados en la planicie (zona de descarga), mientras que en los pozos situados en las partes altas, esas tres variables tienen valores más pequeños (zona de recarga). El análisis estadístico de los datos por el método de componentes principales permitió diferenciar: (a) un tipo de agua de menor mineralización, correspondiente a la zona de recarga, y (b) otro tipo de agua de mayor mineralización, correspondiente a la zona de descarga. De los 11 componentes calculados, los cuatro primeros explican el 86.7% de la variancia total de los datos. El componente 1 está definido por las variables C.E., Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ y Cl^- , lo que permite considerarlo como el eje de la mineralización. El componente 2 está representado por el pH y la altitud, por lo que se puede referir como componente de pH por altitud. El componente 3 está definido por NO_3^- y SO_4^{2-} , asociación que permite definirlo como el eje de la mineralización procedente de superficie. El componente 4 está asociado sólo al Cl^- , y es similar al componente anterior.

La facies hidroquímica $\text{Ca} + \text{Mg} + \text{HCO}_3$, predomina sobre la facies $\text{Na} + \text{Mg} + \text{HCO}_3$. El agua es ligeramente alcalina con sensibles problemas de salinidad variables durante el año, originada principalmente por los iones HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y Cl^- .

Palabras clave: Hidrogeoquímica, subcuenca Apan-Tochac, componentes principales, zona de recarga, flujo subterráneo, Hidalgo, México.

ABSTRACT

Major-ion analyses of 235 water samples reveal a striking relation between the hydrochemical evolution and the groundwater flow system of the Apan-Tochac sub-basin. The high content of total dissolved solids, and the low values of the Ca/Mg ratio are present in wells located on the plain (discharge zone), whereas opposite conditions are associated with wells located on higher regions (recharge zone). The statistical data analysis using the method of principal components allowed to differentiate: (a) a low-mineralization water type corresponding to the recharge zone, and (b) a high-mineralization water type corresponding to the discharge zone. From the 11 principal components calculated, the first four account for 86.7% of the total variance. Component 1 is defined by the parameters E.C., Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , Na^+ , and K^+ , reason for what it is referred to as the "mineralization axis". Component 2 is defined by pH and altitude being referred to as the pH-to-altitude component. Component 3 consists of NO_3^- and SO_4^{2-} , who define it as the axis of mineralization originated at the surface. Component 4 is associated exclusively to Cl^- , and it is similar to the previous component.

$\text{Ca} + \text{Mg} + \text{HCO}_3$, and $\text{Na} + \text{Mg} + \text{HCO}_3$ hydrochemical facies are present being dominant the former. The water is slightly alkaline having appreciable problems of salinity through the year mainly because of HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , and Cl^- ions.

Key words: Hydrogeochemistry, Apan-Tochac sub-basin, principal components, recharge zone, groundwater flow, Hidalgo, Mexico.

INTRODUCCIÓN

El área de Apan-Tochac se ubica en la parte nororiental de la cuenca de México (Figura 1); tiene 1,480 km² de superfi-

cie, y de ellos el 35% corresponde a la planicie y el 65% forma el relieve de montaña y piedemonte. La planicie se extiende de W a E, su elevación promedio es de 1,495 m s.n.m., y en ella existe una gran cantidad de pequeños cuerpos de agua artificiales que almacenan agua, tanto de lluvia como residual.

En la actualidad, esta subcuenca sustenta una actividad agrícola tradicional y pequeñas áreas de riego, y actividades de servicios, en varios poblados, cuya agua residual se vierte, sin tratamiento previo, en los arroyos por donde fluye hacia lagu-

¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D.F., México.

²Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y Sistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D.F., México.

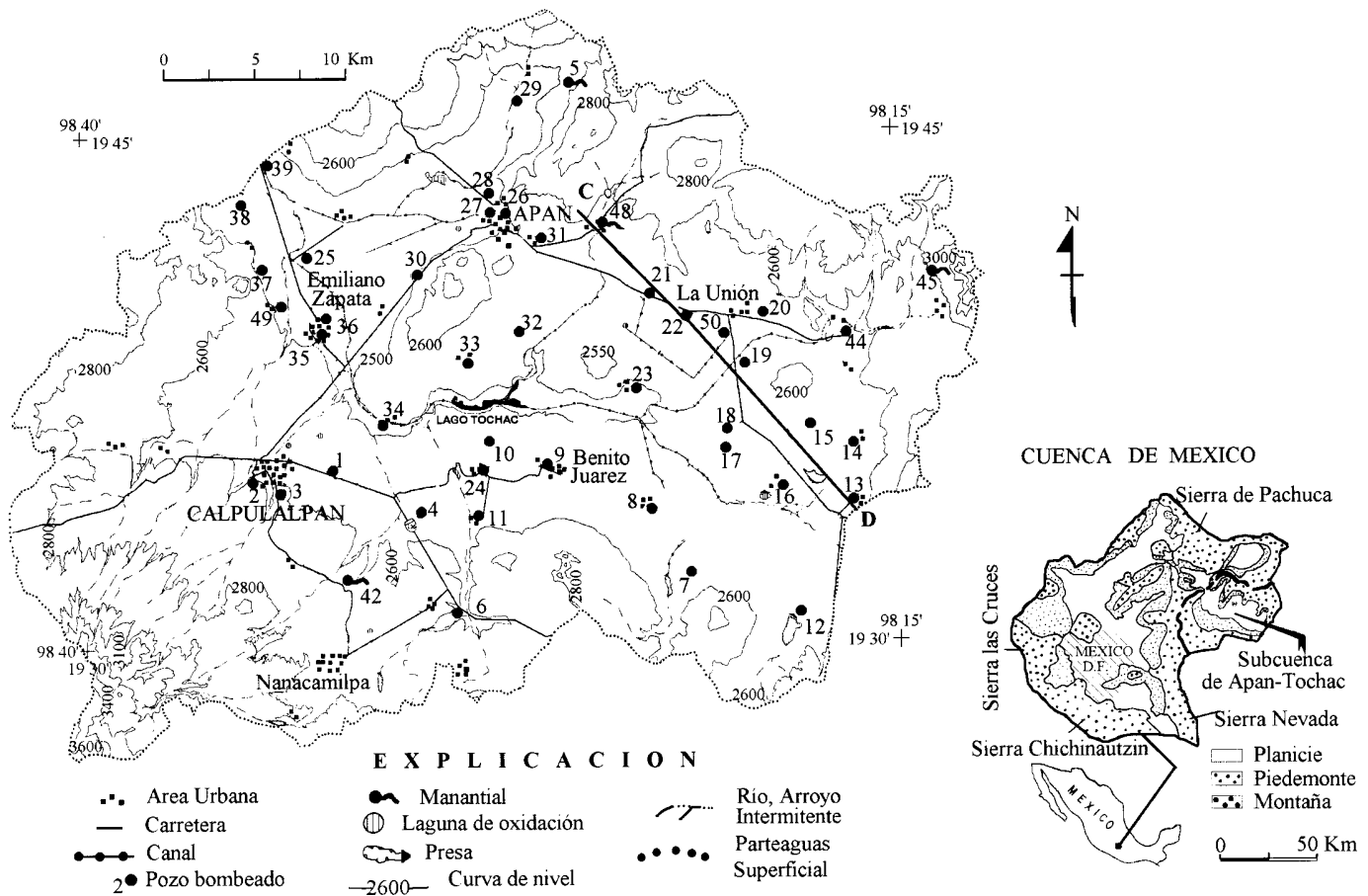


Figura 1. Mapa de localización de la subcuenca Apan-Tochac, mostrando la ubicación de los pozos para agua potable monitoreados durante este estudio.

nas de oxidación, implicando un fuerte potencial contaminante del agua subterránea de esta zona.

Por las características geológicas locales, tanto en los cauces como en las lagunas de oxidación, el agua residual se evapora, se infiltra (cantidades no calculadas para este estudio) y un promedio de $5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ se utiliza para riego, como ocurre con el agua residual de Nanacamilpa, Francisco I. Madero y Díaz Ordaz, captada en la presa Cañada Zoquiapan, utilizada para irrigar aproximadamente 15 ha aguas abajo de la presa. Lo mismo sucede con el agua residual de Calpulalpan, Cuauila, E. Zapata y Apan, entre otros poblados, que se emplea para riego al este del poblado de Irolo.

Con base en lo antes expuesto, este estudio pretende obtener la caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea y se espera con ello contribuir a definir las direcciones del flujo subterráneo de esta subcuenca.

Metodología

Las características hidrogeoquímicas del agua se obtuvieron a partir de los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos de muestras de agua de 48 sitios, de los cuales 39 corresponden a pozos, cuatro

a manantiales y cinco a norias (Figura 1); estos sitios representan el 70% de los aprovechamientos subterráneos del área y fueron seleccionados de manera aleatoria. Los períodos de muestreo (ocho en total) se realizaron trimestralmente, de noviembre de 1993 a noviembre de 1995, obteniéndose 48 muestras en cada período. Los análisis se realizaron según lo recomiendan la APHA-WWA-WPCF (1994) y la US-EPA (1984).

La temperatura, conductividad eléctrica (C.E.) y pH se midieron *in situ*, corroborándose en el laboratorio.

Parámetro analizado	Método
Ca ²⁺ , Mg ²⁺	Absorción atómica de flama
Na ⁺ , K ⁺	Flamometría
CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻	Titulación con H ₂ SO ₄ 0.01 N
Cl ⁻	Titulación empleando AgNO ₃ 0.005 N
SO ₄ ²⁻	Gravimétrico y turbidimétrico
NO ₃ ⁻	Método de la brucina

Respecto a los análisis bacteriológicos, se determinaron coliformes totales por el método del número más probable, y los mesófilos por el método de Rodier (1990). El diagrama de

Schoeller (1955) se utilizó para representar la composición química y calidad del agua para consumo humano.

El estudio geostatístico de los resultados de los análisis químicos del agua se realizó mediante el paquete estadístico CHADOC VS, del Departamento de Informática de L'UII de Niza (1986), Francia, aplicando el análisis multivariado mediante el método de componentes principales (Lefebvre, 1980).

HIDROGEOLOGÍA

La precipitación media anual en la zona es de 658 mm, alcanzando hasta los 900 mm en la cima de las montañas. La temperatura media anual oscila entre 10°C y 19°C, y la evapotranspiración real media anual representa el 84% de la lluvia.

La litología de las sierras que rodean la planicie fue cartografiada por DETENAL (1975), INEGI (1983, 1985a, 1985b) y Ledezma-Guerrero (1987); está representada por andesitas, basaltos, riolitas y piroclastos que en la planicie se interdigitan con los sedimentos aluviales y lacustres. En este conjunto de rocas volcánicas y sedimentos aluviales se reconocen los siguientes tres tipos de acuíferos:

- i. Intergranular: En el relleno sedimentario fluvial y lacustre de la planicie, cuyo espesor es superior a 200 m. Su textura varía de arcilla a conglomerado (Figura 2). Es un acuífero de tipo semiconfinado, que hacia la periferia de la planicie pasa a condiciones libres; se extiende desde Apizaco hasta Ciudad Sahagún.
- ii. Fisurado: En las rocas volcánicas que se interdigitan con los sedimentos de la planicie. Este acuífero se ubica en la base de la montaña y forma parte de la zona de recarga.
- iii. Mixto: En los sedimentos fluviales y piroclásticos que se interstratifican con derrames de lava, tiene relaciones hidráulicas con los dos acuíferos precedentes y presenta descarga por medio de pozos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de los análisis arriba mencionados muestran lo siguiente:

La conductividad eléctrica oscila de 40 a 610 µS/cm (Tabla 1). Los valores comprendidos entre 40 y 250 µS/cm pertenecen a los sitios ubicados en la zona de recarga, mientras que los valores mayores a 250 µS/cm pertenecen a los sitios de la planicie (Figura 3). Los valores de C.E. reflejan la pequeña concentración de sales presentes y la poca mineralización del agua de esta zona. En igual forma, indican la lixiviación de los cationes Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺, y los aniones HCO₃⁻, Cl⁻, y SO₄²⁻. Hacia las zonas bajas, donde, según Richardson y McSween (1989), las sales más comunes formadas pueden ser: CaHCO₃⁺, MgHCO₃⁺, NaHCO₃, NaCl, NaSO₄⁻. Para los sólidos disueltos totales (S.D.T.) predominan los valores entre 200 y 400 mg/L, lógicamente su distribución espacial se correlaciona con la distribución de la conductividad eléctrica. Estos dos parámetros, C.E. y S.D.T., manifiestan para esta zona un agua subterránea con poca mineralización.

Con base en los valores de conductividad eléctrica, sólidos totales, porcentaje de Na⁺ y contenido de rHCO₃, se pueden diferenciar las familias de agua descritas en la Tabla 2.

Las Tablas 1 y 2 muestran que los valores más bajos de mineralización corresponden a los sitios que pertenecen a la zona de recarga, mientras que los valores altos se asocian con la zona de descarga.

La interpretación de los índices geoquímicos reafirma esta interpretación; así, los valores del índice SO₄ + HCO₃/Cl, aumentan hacia la planicie, manifestando, de esta manera, la dirección del flujo subterráneo y muestra un indicio de ligeros cambios químicos de la calidad del agua en esa dirección. En casi todos los pozos de la planicie, el índice Na/Cl manifiesta la presencia de agua subterránea contemporánea que tiene relación con la infiltración de agua de lluvia, como es puesto en evidencia por los valores de 0.7-1.4.

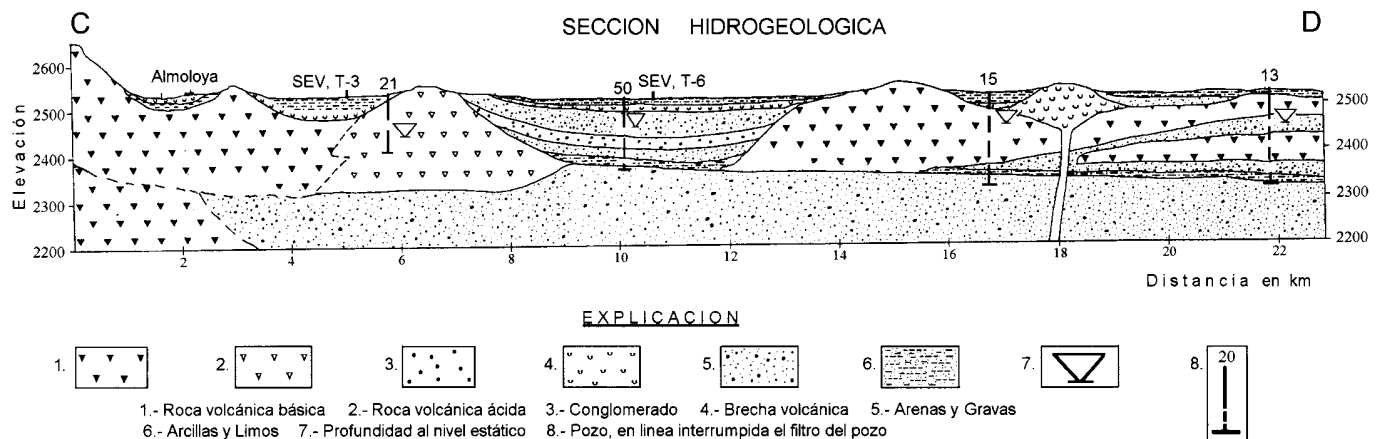


Figura 2. Sección hidrogeológica C-D en la subcuenca Tochac (para su ubicación ver Figura 1).

Tabla 1. Resultados fisicoquímicos de los análisis de agua subterránea en la subcuenca de Apan-Tochac (valores en mg/L, excepto el pH).

Sitio núm.	Temp. (°C)	pH	C.E. (μ S/cm)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	S.D.T.
1	24.5	7.5	274	25.6	20.1	19.4	8.9	179.2	29.4	0.9	2.3	294
2	25.0	7.8	195	22.5	12.9	15.2	5.8	139.1	23.5	2.3	0.3	243
3	25.7	7.8	205	22.0	14.6	15.0	5.7	137.6	26.5	2.2	0.6	209
4	20.3	7.7	244	21.5	18.2	17.4	7.0	148.3	25.0	0.4	0.7	294
5	20.0	7.7	159	17.4	10.5	10.9	5.3	121.0	11.5	0.6	0.6	190
6	16.1	7.6	403	45.1	19.1	23.3	10.8	229.1	44.3	7.4	0.1	319
7	18.0	7.8	323	36.6	17.9	22.4	8.9	220.7	25.6	0.5	0.9	329
8	19.6	7.6	371	39.1	24.6	26.1	13.8	251.6	32.9	1.3	0.4	371
9	24.0	7.7	308	38.9	12.8	22.3	9.4	202.3	32.3	1.8	0.6	389
10	23.0	7.8	313	33.1	17.0	22.7	8.6	198.3	41.5	31.5	0.0	336
11	24.0	7.4	207	43.1	30.9	18.6	7.7	326.8	30.9	1.3	0.2	241
12	22.5	8.0	374	39.1	22.5	28.9	9.3	283.1	29.2	0.7	0.3	293
13	17.8	7.9	359	27.8	16.7	27.5	8.2	175.1	31.9	2.8	3.3	264
14	21.5	8.1	238	28.6	11.6	26.0	7.4	170.8	32.1	0.6	0.6	278
15	19.0	8.1	219	25.1	18.7	20.8	6.0	162.7	31.1	1.5	0.5	264
16	20.0	7.8	436	27.0	15.0	17.6	7.3	154.8	32.6	1.4	0.3	272
17	17.8	7.6	474	42.1	26.7	38.6	18.1	362.8	39.4	4.8	0.1	410
18	19.3	7.8	348	29.8	18.8	30.7	15.8	245.6	33.8	1.4	0.9	335
19	19.5	7.4	238	31.1	15.8	20.4	6.8	162.4	23.7	1.0	1.0	295
20	21.3	7.6	325	37.4	16.7	19.3	14.1	156.0	14.1	46.2	1.5	310
21	21.8	7.7	311	31.3	18.6	27.7	9.7	193.2	29.4	5.1	0.5	371
22	20.3	7.7	273	27.6	16.4	22.8	9.1	173.1	27.1	22.1	0.8	220
23	22.0	7.8	266	28.1	15.8	21.6	11.0	166.0	25.5	0.7	0.3	242
24	20.7	7.4	333	36.8	20.4	21.6	9.8	238.7	33.4	0.4	0.5	361
25	21.0	7.7	331	37.1	18.8	26.1	9.6	244.9	27.6	0.4	0.1	313
26	22.0	7.7	373	37.1	18.6	32.9	10.7	220.0	35.3	0.4	2.3	390
27	22.0	7.9	363	33.6	17.2	32.4	10.1	192.2	35.9	16.8	0.0	318
28	21.0	7.9	375	38.6	16.9	36.4	10.7	249.1	30.0	8.9	1.9	397
29	20.6	7.8	419	39.8	18.1	43.9	10.8	277.7	38.3	6.9	2.0	402
30	23.3	7.8	294	30.5	16.1	26.1	7.5	176.1	33.3	0.7	1.8	346
31	20.7	7.6	281	31.1	14.9	24.0	8.7	211.2	32.9	0.9	0.8	319
32	19.2	7.6	549	48.1	24.9	35.3	16.1	262.4	34.3	45.4	4.8	456
33	23.7	7.7	360	39.2	23.3	31.9	11.8	248.0	35.9	23.7	1.5	419
34	19.5	7.6	273	30.9	18.8	19.1	7.5	213.1	35.8	0.4	1.2	288
35	19.8	7.8	280	29.1	15.8	22.1	7.5	200.7	23.5	25.3	0.9	183
36	19.3	7.8	201	27.8	14.0	20.3	6.1	155.1	26.4	2.4	0.7	274
37	23.8	7.7	341	36.1	19.5	22.9	8.9	233.8	34.0	0.9	0.6	352
38	21.4	7.9	356	39.8	19.3	25.1	8.2	259.1	27.7	1.2	0.5	397
39	18.3	7.9	332	34.1	18.3	28.3	10.2	235.0	25.8	11.7	0.6	348
40	21.5	8.1	347	32.1	19.5	27.7	8.9	210.0	33.9	5.3	0.6	345
41	24.3	8.1	334	35.1	16.7	29.0	9.0	225.4	31.1	0.3	0.7	261
42	16.0	7.0	329	34.1	23.0	22.0	11.2	255.1	33.5	2.8	0.0	479
44	16.8	7.7	248	32.3	10.5	18.5	6.6	159.8	25.7	2.3	1.1	307
45	10.3	7.2	184	22.7	7.3	2.6	1.1	45.7	23.6	7.8	0.0	65
48	26.0	8.1	363	38.7	17.0	57.6	8.3	235.9	47.9	9.6	2.1	240
49	24.0	7.7	291	35.1	19.1	24.4	8.8	226.0	36.2	5.3	0.2	374
50	18.0	7.4	280	32.9	13.1	23.8	7.7	156.7	39.7	33.9	0.4	281

C.E. = Conductividad eléctrica

S.D.T. = Sólidos disueltos totales

En los pozos 10, 17, 20, 32, 33, 35 y 50, destacan los valores de la relación SO₄/Cl (Figura 4); en estos sitios, el contenido de estos dos elementos es considerable; sin embargo, en ambientes volcánicos, a excepción de la existencia de condiciones termales, el contenido de SO₄²⁻ y Cl⁻ en el agua es bajo (Appelo y

Postma, 1993; Freeze y Cherry, 1979); esto permite decir que las altas concentraciones de estos aniones en esos pozos se deben a contaminación antrópica, corroborable en campo, pues los pozos no tienen contra-ademe de protección que evite la filtración de agua, en ocasiones encharcada, en las inmediaciones del pozo.

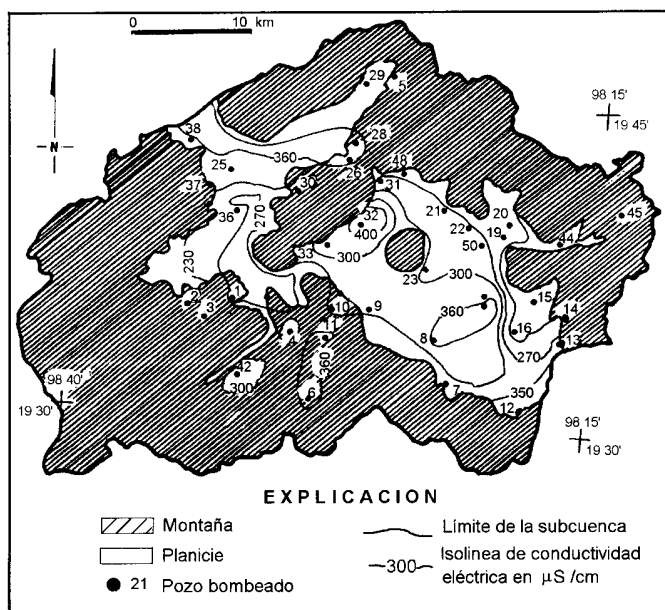


Figura 3. Distribución de la conductividad eléctrica del agua en el área Apan-Tochac.

Facies hidroquímicas

Representando los resultados de los análisis químicos en el diagrama de Schoeller (1955) (Figura 5), se identifica la facies hidroquímica bicarbonatada cálcica/magnésica (I). $rHCO_3 > rCl > rSO_4$; $rCa > rMg > rNa$; $rCa < rMg > rNa$, que presenta tendencias temporales hacia la facies bicarbonatada sódica/cálcica (II). En el diagrama de Schoeller, se aprecia para algunos periodos de muestreo, la dominancia de sodio y magnesio que influyen en la tendencia de la facies bicarbonatada cálcica/magnésica hacia las facies bicarbonatada sódico/cálcica y clorurada cálcica/magnésica.

La Figura 5 representa las diferentes facies hidroquímicas antes mencionadas; se observa en las muestras 11 y 29 una reducción de SO_4^{2-} y un aumento paralelo de HCO_3^- , lo que indica que no existe precipitación de $CaCO_3$. En las muestras 16 y 17, el agua evoluciona hacia condiciones más salinas, asimismo el incremento de SO_4^{2-} y NO_3^- en los pozos 16, 17 y 33, permite decir que en ellos existe contaminación antrópica.

La gráfica del pozo 45 muestra las características hidroquímicas del agua de la zona de recarga de esta región, los contenidos de sulfatos y cloruros corresponden a los aportados por la lluvia.

Tabla 2. Familias de agua por su mineralización.

	C.E. ($\mu S/cm$)	Sólidos totales (mg/L)	Na (%)	$rHCO_3$ (mg/L)
1.	≈ 250	≤ 250	< 50	≤ 170
2.	> 250	> 250	> 50	> 170

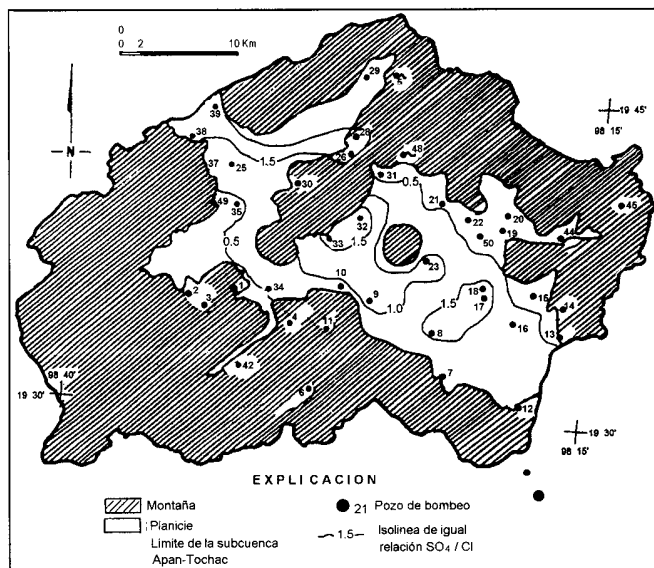


Figura 4. Variación espacial del índice hidroquímico SO_4/Cl , en la subcuenca Apan-Tochac.

Con base en la clasificación del índice RAS, el 60% de los pozos está caracterizado por tener un agua de clase C2S2 (agua media en salinidad media en sodio). Esta clase de agua es peligrosa para irrigación en suelos con deficiencias de drenaje. Los demás pozos tienen agua aceptable para riego.

La facies de agua obtenida corresponde a la de un ambiente volcánico de composición básica a intermedia en el cual, de acuerdo con Appelo y Postma (1993), Freeze y Cherry (1979), y Owen y Blair (1995), el calcio y el magnesio provienen de las plagioclasas.

Los valores de los índices Mg/Ca y Na/Cl fortalecen esta idea; además, ponen de manifiesto un cambio de bases muy activo, semejante al descrito en la zona de Chalco (Huizar-Álvarez, 1989), que en parte influye en la tendencia temporal de la facies (I) hacia la facies (II), en que el sodio contenido en el agua y en los sedimentos lacustres se combina y forma principalmente $NaCl$, posteriormente se intercambia por calcio. El calcio y el magnesio reflejan la dureza del agua y con base en la clasificación de Fletcher (1986) es un agua de tipo blando.

Análisis de componentes principales

Con el fin de caracterizar aún más el comportamiento de los sitios muestreados, en lo sucesivo "individuos", se aplicó el análisis de componentes principales a 11 variables y 46 individuos. El análisis se realizó con el paquete estadístico CHA-DOC VS.

La matriz de correlaciones entre las variables originales (Tabla 3) muestra que existe una correlación positiva de la conductividad con los cationes y los aniones, siendo de menor valor con los sulfatos y nitratos. El pH sólo tiene correlación con la altitud, y es de forma negativa. La altitud está mediana-

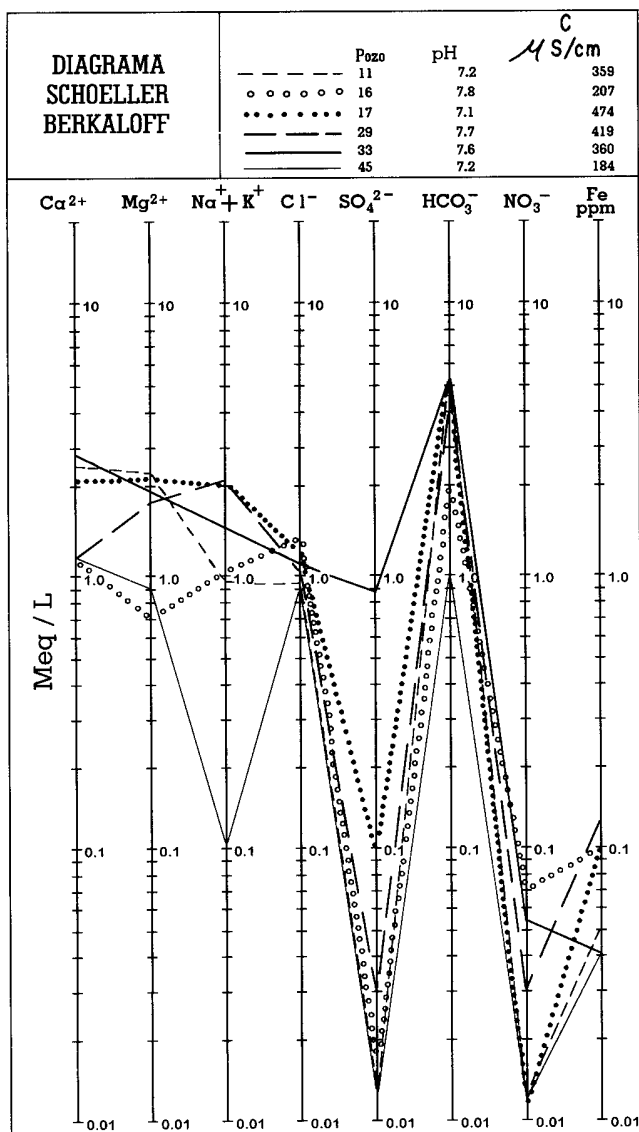


Figura 5. Representación de los resultados de análisis fisicoquímicos y facies hidroquímicas en el diagrama de Schoeller-Berkaloff.

mente correlacionada y de forma negativa respecto a calcio, conductividad, bicarbonato, potasio, sodio y pH.

Los valores propios y el porcentaje de acumulación o peso de las variables originales (Tabla 4) muestran que de los 11 componentes principales calculados, los cuatro primeros explican el 86.7% de la variancia total de los datos. Asimismo, de las correlaciones entre las variables y los componentes principales (Tabla 5), se obtienen estos cuatro nuevos componentes:

Componente 1. Lo definen, por un lado, las variables conductividad eléctrica, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , K^+ , Na^+ , y HCO_3^- , que tienen una importante correlación negativa con el componente, y por otro lado, la altitud, cuya correlación con el eje es positiva. Este componente da información de la mineralización del agua de acuerdo con la altitud en que se sitúa el individuo y permite definirlo como el eje de la mineralización.

Componente 2. Definido por el pH y la altitud, en este componente se diferencia el pH del agua de acuerdo con la altitud del individuo muestreado y se puede llamar eje del pH por altitud.

Componente 3. Lo definen NO_3^- y SO_4^{2-} , que se correlacionan negativamente al componente. La asociación de ambos aniones con este componente permite definirlo como el eje de la mineralización procedente de superficie.

Componente 4. Asociado sólo al Cl^- y, de forma negativa, es similar al punto anterior.

Círculos de correlación

En la Figura 6a, se presentan las variables en función de los ejes I-II, que explican la mayoría de la variancia, y se aprecia una vez más que el eje I agrupa a casi todas las variables, con excepción del pH y NO_3^- , al que se define como eje de la mineralización.

La Figura 6b contiene los ejes I-III. El eje III está caracterizado por los aniones NO_3^- y SO_4^{2-} , independientes a la altura en que se encuentra el sitio de muestreo. El eje IV lo caracteriza sólo el Cl, mostrando una situación similar al punto anterior.

De esto se puede decir que el eje I (Figura 6a) diferencia el agua de acuerdo con la elevación del sitio muestreado, indican-

Tabla 3. Matriz de correlación entre las variables.

	ALT	Ca	Cl	C.E.	HCO ₃	K	Mg	Na	NO ₃	pH	SO ₄
1 ALT	1.000										
2 Ca	-0.319	1.000									
3 Cl	-0.170	0.581	1.000								
4 C.E.	-0.481	0.867	0.612	1.000							
5 HCO ₃	-0.420	0.822	0.554	0.888	1.000						
6 K	-0.388	0.716	0.548	0.864	0.779	1.000					
7 Mg	-0.219	0.636	0.481	0.765	0.836	0.678	1.000				
8 Na	-0.661	0.633	0.522	0.816	0.697	0.768	0.447	1.000			
9 NO ₃	-0.239	0.196	0.130	0.394	0.045	0.265	0.096	0.428	1.000		
10 pH	-0.627	-0.109	-0.028	0.080	-0.067	0.000	-0.181	0.338	0.165	1.000	
11 SO ₄	-0.017	0.457	0.182	0.465	0.202	0.438	0.266	0.374	0.599	0.007	1.000

1, Altitud. 2, Calcio. 3, Cloruro. 4, Conductividad eléctrica. 5, Bicarbonatos. 6, Potasio. 7, Magnesio. 8, Sodio. 9, Nitrato. 10, pH. 11, Sulfatos.

Tabla 4. Valores propios de las variables.

Núm. de variable	Valores propios	Variación total (%)	Variación total acumulativa (%)
1	5.73	52.072	52.072
2	1.82	16.550	68.622
3	1.40	12.708	81.331
4	0.62	5.612	86.942
5	0.43	3.866	90.808
6	0.36	3.277	94.086
7	0.30	2.729	96.815
8	0.17	1.209	98.323
9	0.13	1.142	99.465
10	0.04	0.341	99.806
11	0.02	0.194	100.000

do que a menor altitud existe mayor mineralización del agua y viceversa.

En cuanto a la Figura 6b, la poca correlación de NO₃⁻ y SO₄²⁻ con las demás variables indica que el proceso de aporte de estos aniones al agua subterránea es distinto e independiente del que pone en movimiento al resto de los iones. En este caso, NO₃⁻ y SO₄²⁻ proceden del agua superficial.

Representación en el plano

Utilizando los componentes principales como ejes de coordenadas y el coeficiente de cada individuo respecto al eje, se han representado los datos (Figura 7a, b). Al observar la calidad de representación de los individuos y comparándola con las variables originales, se tiene lo siguiente: Algunos de los individuos se agrupan en el centro del gráfico ajustándose poco a poco a los componentes, pero se logró diferenciar cuatro grupos de población antagónicos dos a dos. El primer grupo en los cuadrantes negativos corresponde con agua más mineralizada: pozos 08, 17, 26, 28, 29, 32 y 33, en posición opuesta están en el mismo plano dos grupos de agua menos mineralizada: pozos 02, 15, 16, 36, 42, 44 y 45; al relacionar estos individuos por altitud, se observa que aquellos del lado derecho del eje I son de mayor altitud y tienen una menor mineralización y los del lado izquierdo son de menor altitud y de mayor mineralización. Resumiendo, se puede decir que en el cuadrante I hay sitios

Tabla 5. Correlación entre los componentes principales y las variables.

	CP1	CP2	CP3
ALT	0.5241	0.6651	-0.3871
Ca	-0.8651	0.2221	-0.0241
Cl	-0.6611	0.2041	0.1031
C.E.	-0.9811	0.0221	-0.0151
HCO ₃	-0.8911	0.2451	0.2831
K	-0.8931	0.0821	-0.0091
Mg	-0.7651	0.3801	0.1171
Na	-0.8601	-0.3441	0.0551
NO ₃	-0.3791	-0.4301	-0.7001
pH	-0.0961	-0.8751	0.2481
SO ₄	-0.4871	-0.0831	-0.7671

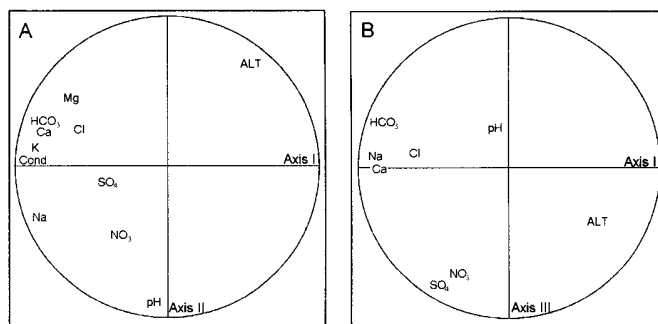


Figura 6a, b. Círculos de correlación, ejes I-II y I-III, considerando únicamente a las variables.

con agua menos mineralizada, por su elevación, que los del cuadrante II ; a su vez, en el I y el II se distinguen de los del cuadrante III por tener valores inferiores de pH.

CONCLUSIONES

Las facies hidrogeoquímica bicarbonatada cálcica/magnésica predomina en la zona y presenta tendencias temporales hacia la facies bicarbonatada sódica/cálcica, lo cual se atribuye a un cambio de bases muy activo entre los cationes Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺. El análisis de componentes principales aplicado a los parámetros químicos del agua subterránea muestra la existencia de dos familias de agua: (a) de menor mineralización en zonas de recarga, y (b) de mayor mineralización en la zona de descarga. Se muestra que la mineralización del agua en esta subcuenca tiene sensibles tendencias a aumentar conforme se desplaza desde la sierra hacia la planicie.

El principal uso del agua en esta región es doméstico y después agrícola-ganadero; el agua residual, sin previo tratamiento, fluye por los canales naturales, donde se infiltra o se evapora, y aunque la calidad química del agua aún es buena, es posible que pronto pueda presentar ligeros cambios, como lo muestra los contenidos de sulfatos o cloruros en el agua. Es ne-

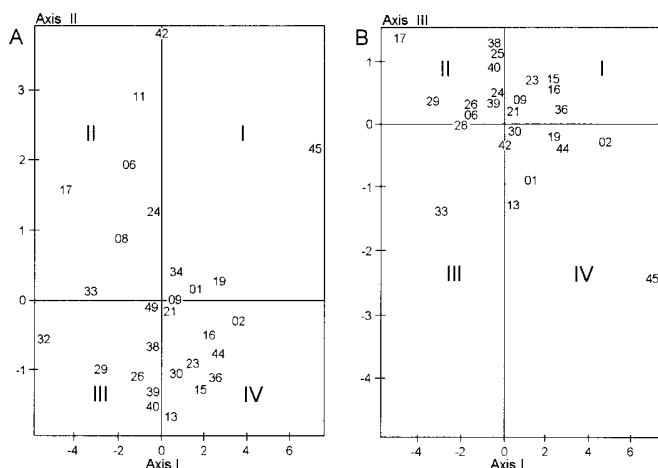


Figura 7a, b. Gráficas de los componentes principales ejes I-II y I-III representando a los individuos.

cesario que todos los poblados, por pequeños que sean, al igual que las múltiples granjas, inicien el tratamiento de su agua residual para reducir el potencial contaminante, tanto del agua subterránea como del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su reconocimiento a las autoridades del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, por el apoyo logístico y financiero para esta investigación, y a la M. en C. Kumiko Shimada, por la realización de los análisis bacteriológicos de agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA-WWA-WPCF, 1994, Standard methods for the examination water and waste water: Washington, D.C., American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Pollution Control Federation.
- Appelo, C.A.J., y Postma, D., 1993, *Geochemistry groundwater and pollution*: Rotterdam, Balkema, 537 p.
- DETENAL, 1975, [Hoja] Ciudad Sahagún (E14-B12), Hidalgo: México D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Dirección de Estudios del Territorio Nacional, Carta geológica, escala 1:50,000.
- Fletcher, G.D., 1986, *Groundwater and wells*, 2ª ed.: St. Paul, Minn., Ed. Johnson, 1089 p.
- Freeze, R.A., y Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*: Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 603 p.
- Huizar-Álvarez, Rafael, 1989, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la plaine de Chalco-Amecameca et de son bassin versant (Mexique): Francia, Université de Franche-Comté, Tesis doctoral, 160 p. (inédita).
- INEGI, 1983, [Hoja] Apan (E14-B22), Hidalgo, Tlaxcala y México: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Carta geológica, escala 1:50,000.
- , 1985a, [Hoja] Mariano Arista (E14-B32), México, Puebla y Tlaxcala: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Carta geológica, escala 1:50,000.
- , 1985b, [Hoja] Tlaxco (E14-B23), Tlaxcala: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Carta geológica, escala 1:50,000.
- Ledezma-Guerrero, Odilón, 1987, Hoja Calpulalpan 14Q-h(3), con Resumen de la geología de la hoja Calpulalpan, estados de México, Tlaxcala, Puebla e Hidalgo: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, Serie de 1:100,000, con texto explicativo que acompaña al mapa, 12 p.
- Lefebvre, J., 1980, *Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles*, 2ª ed.: Francia, Masson, 200 p.
- Owen, P.B., y Blair, F.J., 1995, Main factors affecting the composition of natural waters, *in* Trace elements in natural waters: Ann Arbor, Ed. Brit. Salbu y Eiliv Steinnes, CRC Press, Boca Ratón, Chapter 1, p.1–20.
- Piper, A.M., 1945, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses: American Geophysical Union Transactions, v. 25, pte. 6, p. 914–923
- Richardson, S.M., y McSween, H.Y., 1989, *Geochemistry*: Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, 488 p.
- Rodier, J., 1990, *Análisis de aguas (aguas naturales, aguas residuales y agua de mar)*: Barcelona, España, Omega, 1059 p.
- Schoeller, H., 1955, Géochimie des eaux souterraines—application aux eaux des gisements de pétrole: Institut Français du Pétrole et Analyses des Combustibles Liquides, Rev., 213 p.
- US-EPA, 1984, *Methods for chemical analysis of water and waste-waters*: Washington, D.C., U.S. Environmental Protection Agency, 16-74000.