

Hidroquímica de la cuenca del río Calera, provincia de Tucumán, República Argentina

Hydrochemistry of the Calera river basin, province of Tucumán, Argentina

C. D'Urso¹, G. Rodríguez², A. Sales³, M. Rodríguez³

RESUMEN

La cuenca del río Calera se ubica al norte de la provincia de Tucumán, en el noroeste de Argentina. En esta región existe un asentamiento poblacional dedicado casi exclusivamente a la explotación agrícola-ganadera.

El objetivo del presente trabajo es realizar el estudio hidroquímico de la cuenca del río Calera, mediante la evaluación de sus parámetros físico-químicos, con el fin de determinar la calidad del agua para el abastecimiento humano y su aptitud para riego.

Los resultados obtenidos fueron volcados en diagramas y mapas hidroquímicos para clasificar el tipo de agua y conocer su estado evolutivo. De esta manera, se detectaron diferentes tipos de aguas, donde las sulfatadas-cálcicas predominan sobre las sulfatadas-sódicas y bicarbonatadas, tanto en las aguas superficiales, como en los acuíferos libres y semiconfinados. Los valores de los parámetros químicos obtenidos se encuentran dentro del rango de potabilidad establecido por la Organización Mundial de la Salud.

Palabras claves: Hidroquímica, río Calera, Sierra del nordeste, Tucumán, Argentina.

ABSTRACT

The Calera river basin is located at the north of Tucumán Province, northwest of Argentina. In this region, there is a population dedicated almost exclusively to cattle and agricultural exploitations.

The aim of the present work is to carry out the hydrochemical study of the Calera river basin evaluating their physical-chemical parameters, in order to determine water quality for human supply and its aptitude for irrigation.

The obtained results were plotted in hydrochemical diagrams and maps to classify the type of water and to know its evolutionary state. Different types of waters were detected. Sulphated calcic waters prevail over sodium sulphated and bicarbonated ones in all superficial waters, phreatic and semi-confined aquifers. The chemical parameters obtained in the water samples are inside the potability range established by the World Health Organization.

Key words: Hydrochemistry, Calera river, northeastern range, Tucumán, Argentina.

Introducción

La cuenca del río Calera se desarrolla en el extremo noreste de la provincia de Tucumán y abarca una superficie aproximada de 460 km², con un aporte medio anual de 17,60 hm³. Se accede al área a través de la ruta provincial N.º 304 que comunica

la ciudad capital con la localidad de El Chañar, Mariño, Macomita y La Ramada, la ruta provincial N.º 305 que conduce al Timbó y El Sunchal y la ruta provincial N.º 316 que une Boca del Tigre con El Naranjo.

En esta zona se encuentra un importante asentamiento humano distribuido en toda la cuenca.

¹ Cátedra de Hidrogeología, Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Tucumán. Miguel Lillo 205. S.M. de Tucumán (CP 4000), Argentina. E-mail: durso@csnat.unt.edu.ar

² Cátedra de Geología de Combustibles, Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Tucumán. Miguel Lillo 205. S.M. de Tucumán (CP 4000), Argentina.

³ Instituto de Química Analítica, Facultad de Bioquímica, Química y Farmacia. Universidad Nacional de Tucumán. Ayacucho 471. S.M. de Tucumán (CP 4000), Argentina.

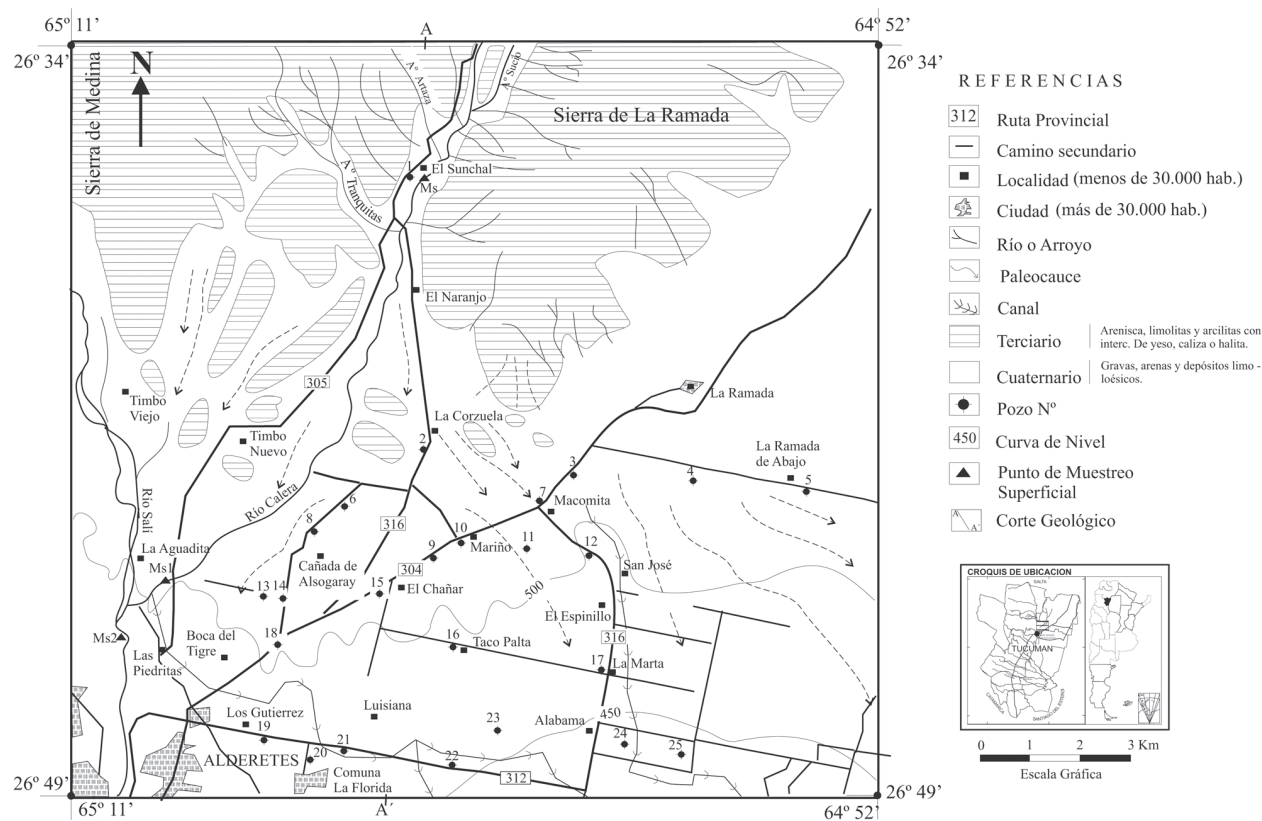


Fig. 1.—Mapa Geológico e Hidrogeológico.

Según el censo nacional del año 2001, las localidades de La Florida y Luisiana contaban con 7.737 habitantes; la localidad de El Chañar con 6.460 habitantes; El Naranjo y El Sunchal con 1.987 habitantes y la ciudad de Alderetes, que es la más importante, posee 38.466 habitantes.

La actividad económica principal es agrícola y ganadera. Los cultivos más regados son la caña de azúcar y los cítricos, de gran impacto económico regional. Como el abastecimiento de agua superficial está severamente limitado, debido al bajo caudal medio anual del río Calera y sus afluentes ($0,75 \text{ m}^3/\text{s}$), el recurso subterráneo constituye una alternativa importante.

Descripción del área estudiada

Fisiografía e hidrología

El estudio fisiográfico del área permite distinguir dos cordones montañosos de rumbo NNE-SSO. El occidental está representado por las sierras de

Medina con una altitud máxima de 2.100 m.s.n.m. en los Altos de Medina. El cordón oriental separado del anterior por el valle del río Calera, está representado por la sierra de La Ramada con una altitud máxima de 1.110 m.s.n.m en los Altos de La Botija, al norte del área de trabajo (fig. 1). Al sur y este, el relieve está representado por lomadas suavemente acolinadas de origen terciario con una cobertura cuaternaria. Entre estas lomadas se forman numerosas cañadas de orientación meridiana (Santillán de Andrés y Ricci, 1980).

La cuenca hidrográfica del río Calera se origina en los Bordos de La Lechuzita a 1.660 m.s.n.m., entre el faldeo oriental de la cumbre de Yaramí-sierra de Medina y el occidental de la sierra del Noga-lito, con dirección aproximada norte-sur. Con el nombre de río Medina, recorre un estrecho valle tectónico hasta la altura de la quebrada de Las Huascha, desviándose hacia el este en la localidad de Las Tipas. Más adelante, retoma su dirección original norte-sur donde se une al arroyo Sucio, al norte de El Sunchal, donde recibe el nombre de río Calera, fuera del área del mapa.

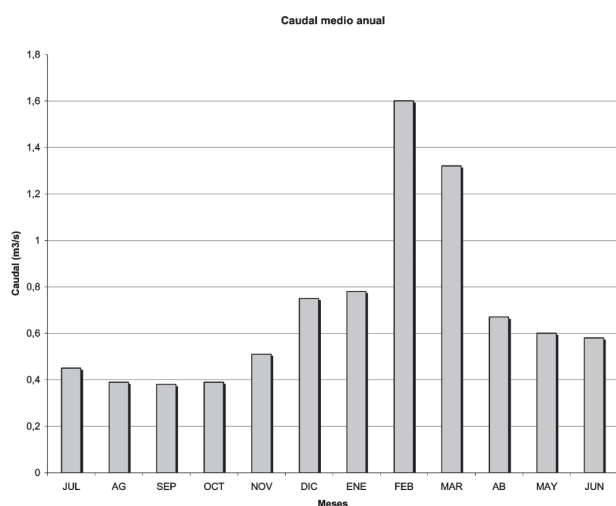


Fig. 2.—Caudal medio anual del río Calera (1947-1960).

El río Calera es el único afluente de la margen izquierda del río Salí. Circula entre la sierra de La Ramada al oeste y la sierra de Medina al este. Tiene un trazado meridional, respecto a la provincia de Tucumán, y constituye un típico río de montaña, con un valle angosto y profundo. En su recorrido, recibe el aporte de pequeños afluentes como el río Sucio por el este y los arroyos Artaza y Tranquitas por el oeste, para finalmente desembocar en el río Salí, al norte de San Miguel de Tucumán, en la cota de 480 m.s.n.m. Su caudal medio anual es de 0,75 m³/seg y su derrame medio anual de 17,60 hm³ (SRHN, 2000). Estas determinaciones fueron realizadas durante el período 1947-1963, después de esa fecha esta estación fue suspendida. En el gráfico de caudal medio anual se puede observar sus variaciones durante 15 años (fig. 2).

Clima

Por la orientación NNE-SSO de la cuenca, los vientos dominantes provienen del sur. Esto ocasiona que las precipitaciones del sector austral y suroriental de las sierras del nordeste, incluyendo la cuenca del río Calera, estén influidas por estos frentes fríos en su desplazamiento hacia el norte. En la sierra de La Ramada llueve entre 800 a 1.000 mm anuales, existiendo una precipitación similar en la ladera oriental de la sierra de Medina. Las precipitaciones disminuyen paulatinamente hacia el sur y este de la llanura, hasta alcanzar valores de 700 mm anuales (fig. 3). Las temperaturas medias anuales varían entre los

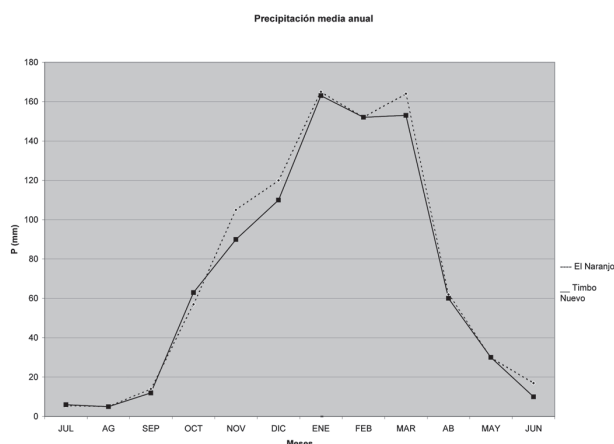


Fig. 3.—Precipitación media anual de las localidades del Naranjo y El Timbó (1951-2005).

14 °C y 18 °C, con una marcada amplitud térmica estacional, con mínimas de -3 °C en el invierno y máximas de 30 °C en el verano.

El clima en la parte media y baja de la cuenca es de tipo Cw_{ha} (Torres Bruchmann, 1978) es decir, un clima mesotermal no riguroso de pradera, con temperatura media anual mayor de 18 °C, con lluvias periódicas e invierno seco. En la parte alta de la cuenca, las serranías presentan un clima de tipo Cw_{ak} (Torres Bruchmann, 1978) es decir, un clima mesotermal con invierno seco no riguroso, de pradera y con temperatura media anual menor a 18 °C.

Geología

La unidad más antigua corresponde a la Formación Medina, que constituye los núcleos de las sierras de La Ramada y Medina. Está constituida por pizarras y filitas de bajo grado metamórfico, a la que se le asigna una edad Precámbrico superior-Cámbrico inferior (Aceñolaza *et al.*, 1981).

Superpuesto a la unidad anterior y en discordancia se encuentran afloramientos del Cretácico inferior-medio, compuestos por areniscas conglomerádicas y conglomerados brechosos. Los afloramientos rodean los núcleos de las Sierras de La Ramada y Medina.

En discordancia se apoyan los sedimentos terciarios de origen lacustre de la Formación Río Salí, constituidas en su parte basal por areniscas medianas a finas blancas bien seleccionadas, seguidas hacia arriba por una alternancia de limolitas y arcilitas donde se intercalan bancos de yeso y calizas oolíticas (Bossi, 1969). En el tramo superior de esta

unidad existen bancos discontinuos de halita interstratificados en arcilitas verdes y pardas, que por lixiviación «in situ» dan origen a las salmueras en la zona del Timbó (Avila *et al.*, 1996). Estos depósitos tienen una distribución muy amplia en las sierras, además de constituir lomadas aisladas en la zona media y baja de la cuenca.

Finaliza la secuencia con los sedimentos del Cuaternario, formados por materiales aluvio-columviales de granulometría y espesor variable. La granulometría es muy gruesa en la faja inmediata a los relieves montañosos, disminuyendo hacia el este donde las gravas son sustituidas progresivamente por sedimentos más finos.

Geología estructural

Las sierras de Medina y La Ramada pertenecen a la unidad morfoestructural de Cordillera Oriental (Mon, 1976). Se caracterizan por presentar un núcleo de rocas antiguas con una cobertura periférica de unidades sedimentarias más jóvenes.

Las sierras de Medina y La Ramada son anticlinales asimétricos en posición escalonada, con los ejes en dirección NNE-SSW y terminaciones periclinales. Estas tienen los flancos orientales empinados y fallados, mientras que los occidentales son menos inclinados y limitados por fallas menores.

La sierra de Medina está limitada al occidente por una importante estructura por donde discurre el Río Salí.

El curso del río Calera tiene un rumbo meridional fuertemente controlado por la estructura, carácter apreciable tanto en fotografías aéreas como en imágenes de satélite.

Al sur de la localidad de Timbó Nuevo, una falla de carácter regional desvía al Calera hacia el sudoeste, hasta su confluencia con el Salí.

Hidrogeología

La región se encuentra en el ambiente hidrogeológico de la llanura oriental tucumana, limitada al norte con las sierras de Medina y La Ramada, al este con el Espolón de Tacanas (Tineo *et al.*, 1984), el oeste con la sierra del Aconquija, y el sur con la desembocadura del río Calera en el río Salí.

Es un ambiente característico de sedimentación aluvial influido por el aporte de materiales finos que provienen desde las sierras del nordeste de Tucumán.

Los sedimentos cuaternarios, por su litología, poseen alta permeabilidad y bajo escurrimiento superficial. Estos provienen principalmente de la erosión de las rocas aflorantes al norte del área, de las arenas provenientes de los cauces y paleocauces de los ríos y de los depósitos limo-loésicos. Rellenan las cañadas y el fondo de la depresión formada por la cuenca.

Los sedimentos terciarios, que están formados por materiales finos, limoarcillosos con intercalaciones de yeso, de caliza o halita, poseen baja permeabilidad y moderado escurrimiento superficial.

Las precipitaciones y la geología son dos componentes del entorno geográfico que desempeñan un papel primordial en la generación de los recursos de aguas subterráneas en la región. La recarga de los acuíferos se ubica en el extremo austral de las sierras de La Ramada y Medina donde se encuentran los niveles permeables que permiten la infiltración del agua precipitada en la cuenca y el agua aportada por los ríos y arroyos.

La dirección del flujo subterráneo coincide con la pendiente regional del terreno, siendo su dirección predominante noroeste-sudeste.

En la región se pudo diferenciar tres tipos de acuíferos con características bien definidas. El acuífero libre o freático, originado principalmente por el relleno del cauce del río Calera y de las terrazas fluviales que éste forma. Está constituido por gravas con cantos de rocas metamórficas y arena rosada cuarzosa.

El acuífero semiconfinado (secuencia superior) de edad cuaternaria, está formado por gravas con cantos de rocas metamórficas y cuarzo subordinados, arenas líticas e intercalaciones de limos y arcillas pardas.

El acuífero semiconfinado (secuencia inferior) está constituido por arenas cuarzosas blanquecinas intercaladas con potentes paquetes limoarcillosos rojizos. Es probable que estos acuíferos sean de edad Cuaternaria inferior (Pleistoceno) o Terciario superior, a juzgar por la profundidad a la que se encuentran, no muy lejos del área de aporte y su proximidad a lomadas de origen terciario. Tienen elevados valores de conductividad y altos contenidos de sulfatos.

Metodología

La metodología de investigación utilizada consistió en una revisión bibliográfica y en un reconocimiento geológico-geomorfológico a partir de fotografías aéreas a escala 1: 50.000 e imágenes satelita-

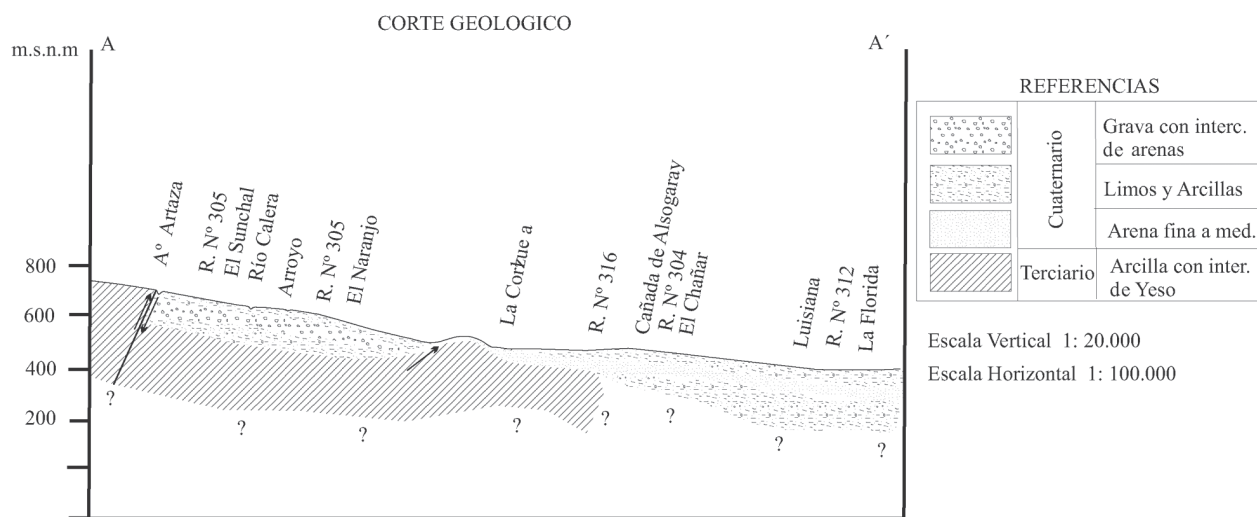


Fig. 4.—Corte geológico norte sur de la cuenca del río Calera.

les 1: 100.000 y 1: 250.000 (Instituto Geográfico Militar, 1998). Las unidades cartografiadas fueron comprobadas en posteriores campañas. Se caracterizó climáticamente la zona mediante la interpretación de datos de temperatura y precipitación, utilizando la clasificación de Koppen (Torres Bruchmann, 1978).

Se analizaron los datos de las perforaciones existentes en el área, con detalles de profundidades, litologías, niveles, caudales y calidad de agua. Posteriormente, en el campo, se ubicaron las bocas de pozo mediante posicionamiento satelital (GPS).

Con la finalidad de discriminar las distintas masas de aguas que circulan a través de la región, los principales procesos involucrados durante la interacción agua-roca y la probable evolución hidrogeoquímica de los cuerpos de agua estudiados se realizó el análisis físico-químico de 28 muestras seleccionadas en distintos puntos del área, de las cuales veinte corresponden a acuíferos semiconfinados (entre 80 m y 444 m), cinco a acuíferos libres y tres a aguas superficiales de los ríos Calera y Salí que fueron incorporadas a la red de muestreo.

Las determinaciones realizadas sobre las aguas estudiadas incluyeron los análisis químicos de las especies Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , HCO_3^- , $\text{SO}_4^{=}$, sólidos totales, Relación Adsorción de Sodio (RAS), conductividad y pH que se midieron en laboratorio. Se usaron para el análisis químico las técnicas normalizadas sugeridas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1992).

Los resultados fueron volcados en los diagramas de Piper Hill Langelier y Wilcox (Custodio *et al.*,

1976), para caracterizar sus facies y determinar su evolución química regional. Además, se realizaron mapas de isocontenidos de los iones fundamentales y de la relación iónica magnesio-calcio.

Hidroquímica

Para realizar la interpretación hidrogeoquímica se necesita tener un conocimiento previo de los acuíferos y de las interacciones agua-roca desde el punto de vista químico. Es importante conocer el flujo del agua en los sistemas acuíferos, ya que ésta representa el vehículo de transporte de sus características físico-químicas, químicas y ambientales. La observación de la distribución espacial de esas características y la explicación de sus variaciones permite obtener información sobre el movimiento del agua subterránea (recarga, circulación, almacenamiento, descarga). Por ese motivo, todas las aguas existentes en la región fueron consideradas de interés hidrogeoquímico para el presente estudio, lo que incluye el agua de los acuíferos libres, de semiconfinados y de las aguas superficiales, que pueden intervenir en la recarga o ser el resultado de descarga.

Los acuíferos freáticos y semiconfinados en algunos sectores no están relacionados, pero en otros tienen conexión debido a que presentan intercalaciones limo arcillosas (acuitardo) no muy potentes que favorecería la infiltración del agua hacia niveles inferiores (fig. 4).

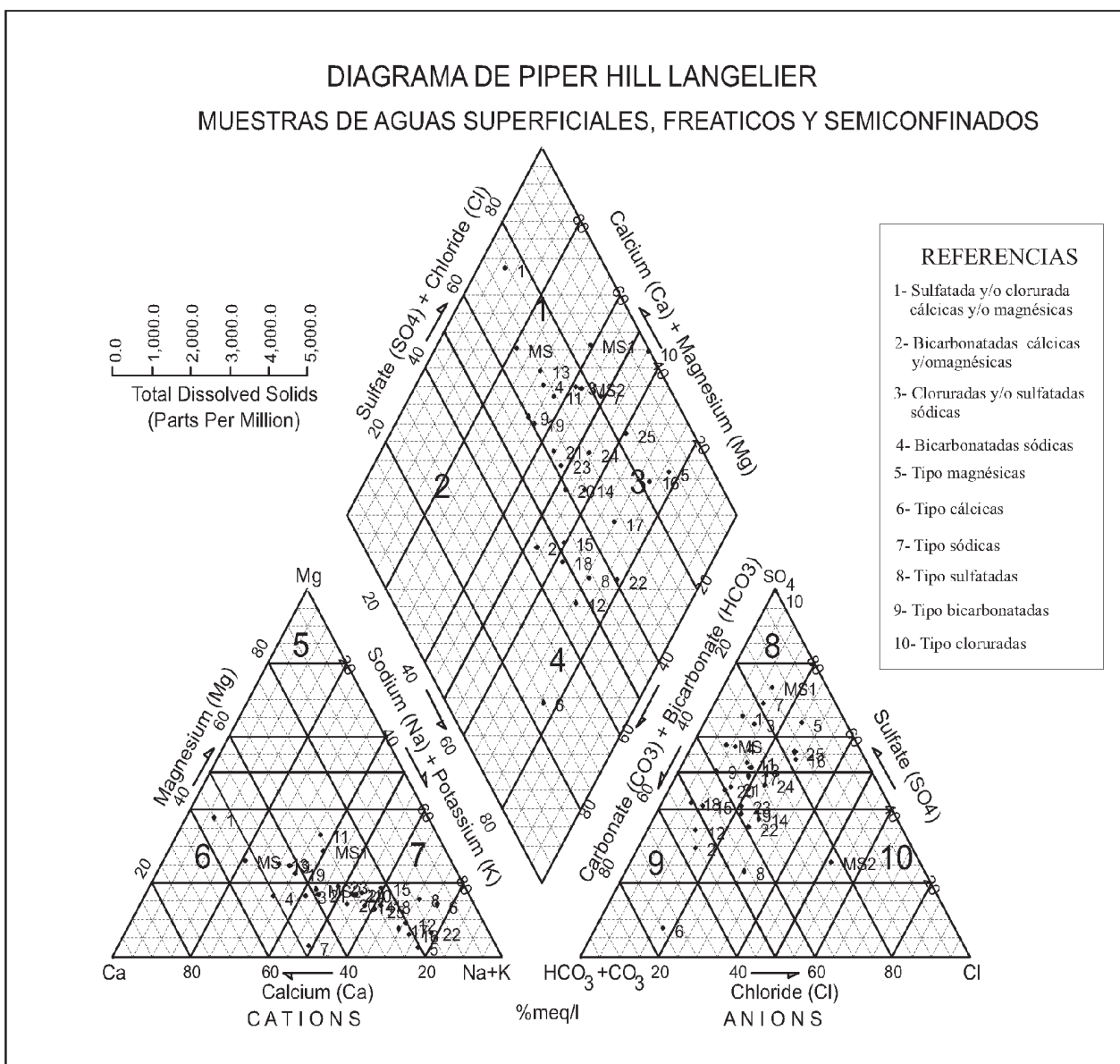


Fig. 5.—Diagrama de representación de los análisis químicos correspondientes a las aguas superficiales y subterráneas en los distintos puntos de muestreo.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos del análisis físico-químico de las muestras de agua se indican en la tabla 1. En base a los contenidos de cationes y aniones mayoritarios presentes (calcio, sodio, magnesio, bicarbonato, cloruro y sulfato) en las muestras estudiadas y mediante el empleo del diagrama trilinear de Piper Hill Langelier se clasificaron diferentes facies del agua de la cuenca (fig. 5). Las aguas semiconfinadas se definieron como bicarbonatada

sódica (Cañada de Alzogaray, Mariño, Macomita, Boca del Tigre, El Chañar), sulfatada cálcica (La Ramada), sulfatada cálcica-sódica (Las Piedritas y El Talar) sulfatada sódica-cálcica (La Angostura y El Espinillo) y sulfatada sódica (La Ramada de Abajo, Macomita, La Florida, Lousiana, Alabama, El Chañar, Taco Palta, La Marta). En base a su distribución areal (fig. 1) se establece que las aguas bicarbonatadas (aguas jóvenes con poca circulación) se ubican principalmente en el piedemonte de las sierras y las sulfatadas en la región central y en

Tabla 1.—Cuadro de los análisis físico-químicos

Nº	Lugar	Departamento	Caract.	Latitud	Longitud	pH	C.E. (*) (µmhos/cm)	Sól. Tot. (mg/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	RAS (**)
1	El Sunchal	Burruyacú	Libre	26° 36' 52.2"	65° 03' 00.5"	7.56	1.607	1.350	226	57	36	7	337	39	530	1
2	La Corzuela Esc. 375	Burruyacú	Libre	26° 42' 21.1"	65° 02' 47.3"	7.71	1.101	837	99	21	230	8	635	56	210	5
3	La Angostura Macomita	Burruyacú	Semiconf	26° 42' 54.9"	64° 59' 34"	7.19	1.686	1.281	234	34	299	8	419	76	695	5
4	La Ramada Desv. Cossio	Burruyacú	Semiconf	26° 43' 06.4"	64° 56' 50.2"	7.15	1.730	1.469	194	23	163	10	442	52	491	3
5	La Ramada de Abajo	Burruyacú	Semiconf	26° 43' 16.59"	64° 54' 16.36"	8.20	1.910	1.219	63	3	308	7	153	113	526	10
6	Cañada de Alsogaray	Burruyacú	Libre	26° 43' 29.4"	65° 04' 38.3"	8.44	998	758	28	14	276	8	707	55	44	11
7	Esc. 34 Macomita	Burruyacú	Semiconf	26° 43' 29.1"	65° 00' 09.7"	7.29	1.940	1.474	279	6	368	12	343	76	787	6
8	Esc. 242 Cañada de Alsogaray	Burruyacú	Semiconf	26° 43' 57.9"	65° 02' 43.4"	8.20	997	758	37	16	253	4	425	93	132	9
9	Mariño	Burruyacú	Libre	26° 44' 32.6"	65° 02' 43.4"	7.48	1.067	811	141	31	138	23	398	31	312	3
10	Mariño	Burruyacú	Semiconf	26° 44' 16.85"	65° 02' 06.17"	7.40	1.280	1.125	71	16	177	27	627	27	97	3
11	El Espinillo, nº 2 Pablo Padilla	Burruyacú	Semiconf	26° 44' 24.4"	65° 00' 35.7"	7.60	1.614	1.146	104	42	157	31	375	67	397	3
12	Esc. 276 S.J. Macomita	Burruyacú	Semiconf	26° 44' 31.5"	64° 59' 11.5"	7.98	801	609	45	8	207	4	396	31	158	7
13	Las Piedritas (Fca. Porcel)	Burruyacú	Semiconf	26° 45' 15.43"	65° 06' 28.04"	7.25	1.350	1.143	142	30	122	10	340	67	353	2
14	Esc. 83 Isabel M. Mata	Burruyacú	Semiconf	26° 45' 19.7"	65° 06' 02.9"	7.95	1.248	948	104	19	276	8	416	107	274	6
15	El Chañar	Burruyacú	Semiconf	26° 45' 14.2"	65° 03' 54.9"	7.61	1.141	867	78	25	276	8	510	39	270	7
16	Taco Palta	Burruyacú	Semiconf	26° 46' 20.0"	65° 02' 14.4"	7.84	1.348	1.024	96	10	437	4	218	118	408	11
17	La Marta	Burruyacú	Semiconf	26° 46' 56.6"	64° 58' 58.5"	7.94	1.204	915	76	9	299	4	346	66	324	9
18	Esc. Adolfo Alsina-Boca del Tigre	Burruyacú	Semiconf	26° 46' 14.2"	65° 06' 11.1"	8.26	854	649	55	12	184	4	513	25	262	6
19	El Talar	Burruyacú	Semiconf	26° 48' 07.8"	65° 06' 32.8"	7.49	1.017	773	147	30	161	12	348	64	213	3
20	La Florida Bº La Flor	Burruyacú	Semiconf	26° 48' 34.6"	65° 05' 35.5"	7.66	1.067	811	99	16	207	4	401	48	281	50
21	Esteban de Luca La Florida	Burruyacú	Semiconf	26° 48' 23.3"	65° 04' 45.7"	7.71	1.074	816	124	20	184	4	401	55	299	4
22	Colonia 7	Burruyacú	Libre	26° 48' 46.2"	65° 02' 20.6"	7.90	1.418	1.077	61	10	414	4	515	112	285	13
23	Lousiana, nº 1	Burruyacú	Semiconf	26° 48' 03.9"	65° 01' 16.3"	7.85	1.088	762	70	15	128	25	309	56	206	4
24	Alabama, nº 1	Cruz Alta	Semiconf	26° 48' 23.1"	64° 58' 27"	6.01	1.046	707	59	13	135	28	240	66	237	4
25	Alabama, nº 2	Cruz Alta	Semiconf	26° 48' 35"	64° 57' 10"	7.24	1.563	1.150	78	14	222	35	221	118	444	6
MS	Dique El Sunchal	Burruyacú	Superficial	26° 36' 52.4"	65° 02' 45"	8.29	797	606	136	25	69	4	264	22	280	1
MS1	Río Calera	Burruyacú	Superficial	26° 44' 51.96"	65° 08' 54.79"	8.21	1.350	1.138	104	35	168	8	174	51	555	4
MS2	Río Salí	Burruyacú	Superficial	26° 46' 6.03"	65° 09' 37.8"	7.80	962		66	12	92	12	157	121	111	3

(*) C.E.: Conductividad Eléctrica. (**) RAS: Relación de Adsorción de Sodio.

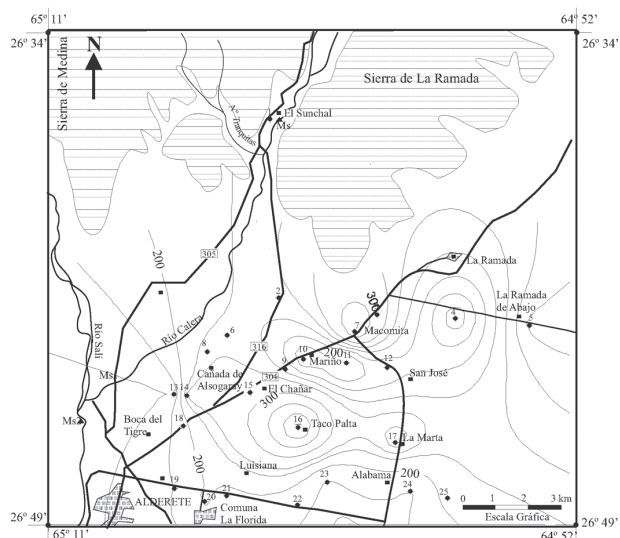


Fig. 6.—Mapa de isocontenidos de ion sodio.

algunas áreas del piedemonte, cercanas a depósitos evaporíticos.

Con respecto a los resultados obtenidos en los acuíferos freáticos, éstos pueden ser clasificados como de aguas bicarbonatadas sódicas (Corzuela y Cañada de Alzogaray), bicarbonatada-sulfatada cálcica-magnésica (Mariño), bicarbonatada-sulfatada sódica (Colonia 7) y sulfatada cálcica (El Sunchal).

En el caso de las aguas superficiales, los análisis químicos permiten clasificarlas como de tipo sulfatada cálcica en el dique el Sunchal, sulfatada sódica-cálcica en el tramo medio del río Calera y clorurada-sulfatada sódica en el río Salí, que corresponderían a aguas más evolucionadas y con mayor circulación.

Para los acuíferos semiconfinados (secuencia superior e inferior) se realizaron mapas de isocontenidos que permitieron interpretar su evolución y el comportamiento que estos iones tienen en un contexto regional.

El sodio presenta valores que varían entre 36 y 437 mg/l. En el mapa de isocontenido se observa que, en el sector centro-oeste de la cuenca las concentraciones son mayores, lo que podría deberse al aporte de las salmueras ricas en cloruro de sodio (fig. 6).

El contenido de potasio no registra variaciones notables en la concentración la cual se encuentra entre 4 y 36 mg/l. En aguas subterráneas no sobrepasa los 10 mg/l y el incremento detectado se debe a la solubilización de evaporitas.

La concentración de calcio se encuentra entre 28 y 278 mg/l. En el mapa de isocontenidos se observa

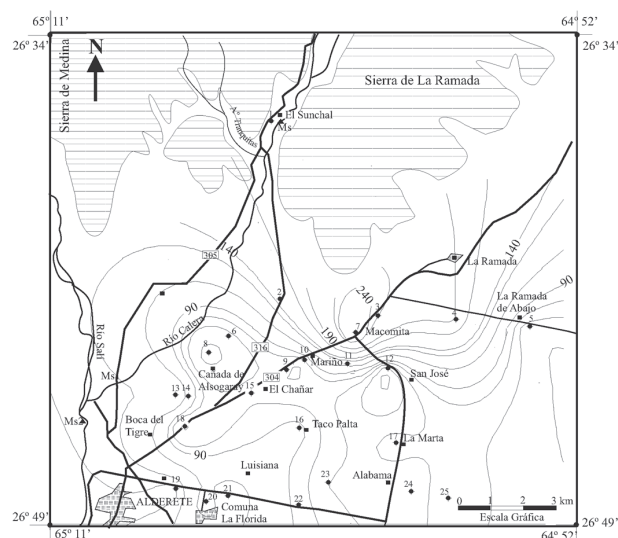


Fig. 7.—Mapa de isocontenidos de ion calcio.

un aumento en las concentraciones de calcio en las proximidades de la sierra de La Ramada; este aumento es concordante con los valores obtenidos en el dique El Sunchal, cuyas concentraciones elevadas se deben a la presencia de yeso en sedimentos terciarios (fig. 7).

El Mg es menos abundante que el Ca, con valores entre 3 y 56 mg/l. Su distribución espacial es similar a la del bicarbonato. El Mg proviene de la disolución de las rocas evaporíticas y de la alteración de los silicatos ferromagnésicos presentes en la zona serrana.

La concentración de bicarbonato presenta valores elevados cerca de la sierra de La Ramada (707 mg/l) y disminuye hacia zonas distales (221 mg/l) (fig. 8). El bicarbonato provendría de la infiltración del agua de lluvia en las calizas y en los sedimentos loésicos que coronan a los depósitos del cuaternario.

La concentración de cloruros presenta, en toda la zona, valores inferiores a los 200 mg/l. En el mapa de isocloruros se observa una distribución irregular, lo que estaría indicando la existencia de varias fuentes de aporte. Debido a la elevada solubilidad de sus sales, éste pasa rápidamente a la fase acuosa. Sin embargo, los valores muestran un moderado incremento desde 22 mg/l cerca de la sierra de La Ramada hasta mayores a 100 mg/l en Boca del Tigre, Taco Palta y Alabama, ubicadas al sur de la misma (fig. 9).

El mapa de isocontenidos de sulfato muestra, en la mayoría de los casos, concentraciones superiores a los 250 mg/l. Este ión es aportado por la disolu-

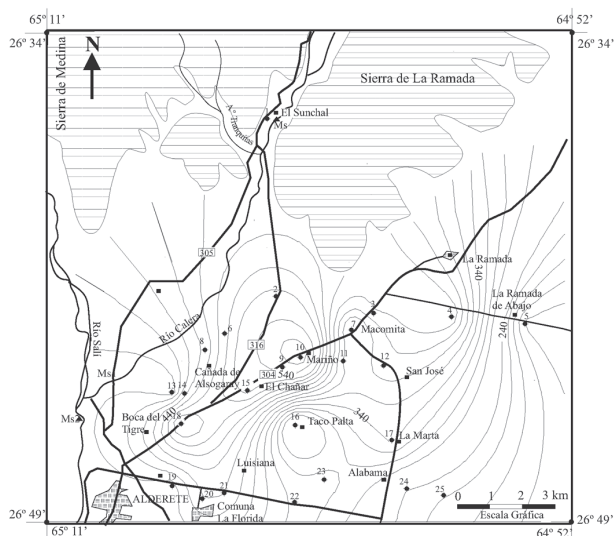


Fig. 8.—Mapa de isocontenidos de ión bicarbonato.

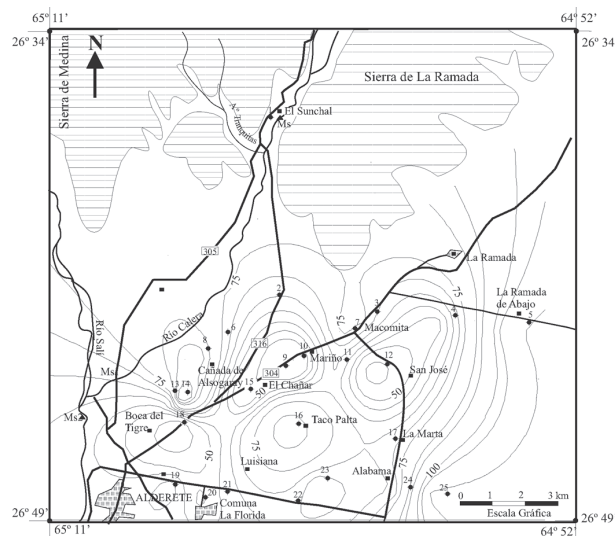


Fig. 9.—Mapa de isocontenidos de ión cloruro.

ción de sales sulfatadas (yeso) que se encuentran presentes en los sedimentos del terciario. En el límite este de la cuenca existe una importante estructura de edad terciaria semienterrada, de escasa expresión en superficie denominada Espolón de Tacanas (Tineo *et al.*, 1984), que representa otra fuente de aporte de sulfato a los pozos (La Marta, El Espinillo, Taco Palta y Alabama). Estas perforaciones, probablemente, estarían explotando niveles acuíferos del cuaternario bajo o del terciario superior (fig. 10).

Los sólidos disueltos totales varían entre 608 y 1.474 mg/l. Los valores altos reflejan aguas con altos contenidos de bicarbonato y sulfato.

La conductividad es relativamente alta en el sector norte y este de la misma. Se alcanzan valores que superan los 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las localidades de El Sunchal, la Angostura (Macomita), El Espinillo y Alabama (influenciadas por el río Calera). En el caso de las localidades de La Ramada y La Ramada de Abajo también presentan valores altos, pero se encuentran ubicadas en otro ambiente separados por el Espolón de Tacanas.

En el área de influencia del río Salí, es decir, en el sector central y oeste, este parámetro oscila entre los 800 y los 1.400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Con respecto a la relación iónica magnesio/calcio, se observó que la mayoría de los acuíferos tienen relaciones bajas y que experimentan un incremento a lo largo de la línea de flujo desde valores menores de 0,3 a mayores de 0,55. Este aumento está relacionado con el aumento de la salinidad y con el tiempo de residencia en el acuífero.

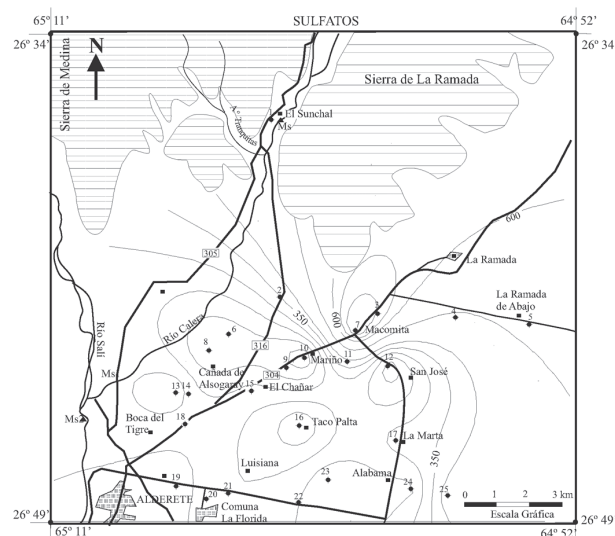


Fig. 10.—Mapa de isocontenidos de ión sulfato.

El Diagrama de Wilcox (1955) permite determinar la aptitud del agua para irrigación clasificándola de acuerdo al alto o bajo riesgo para la salinización o alcalización del suelo, en base a la conductividad eléctrica y al Índice de Adsorción de Sodio» (RAS) (fig. 11). Así se constató que las aguas estudiadas pertenecen a los siguientes grupos:

Clase III (C3 S1), salinidad alta-baja condición sódica, son aptas sólo para plantas que sean resistentes a la salinidad y no pueden usarse en suelos con drenajes deficientes. Corresponden a muestras tomadas en el río Calera y el río Salí (MS, MS1 y

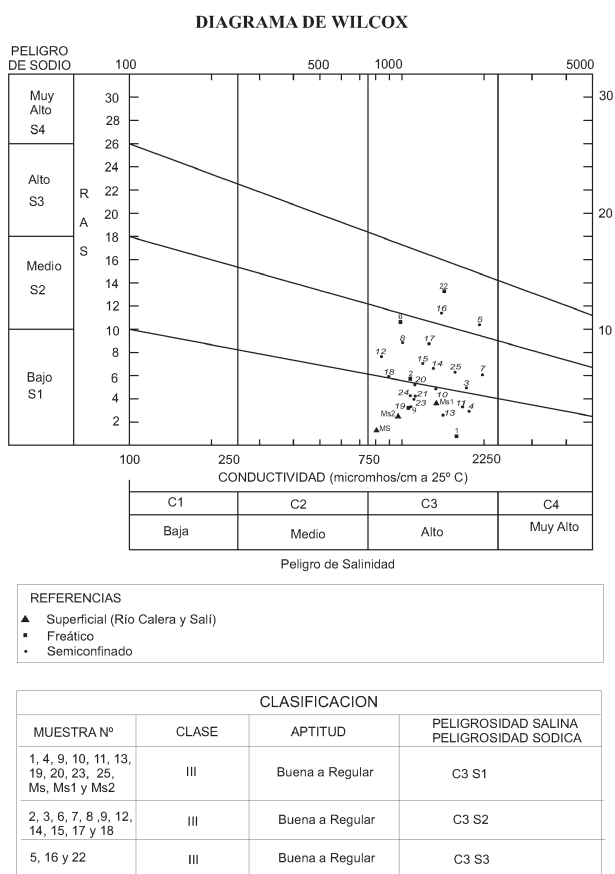


Fig. 11.—Diagrama de Calidad de aguas superficiales y subterráneas en los distintos puntos de muestreo para determinar su aptitud para riego.

MS2), a los pozos freáticos del Dique, El Sunchal y Mariño (1 y 9) y a los semiconfinados de La Ramada (Desvío Cosio), Mariño, El Espinillo N.º 2, Las Piedritas, El Talar, La Florida (B.º La Flor), Lousiana N.º 1 y Alabama (4, 10, 11, 13, 19, 20, 23 y 25).

Clase III (C3 S2), salinidad alta-media condición en sodio, son aptas para plantas resistentes a la salinidad y en suelos con muy buen drenaje. Corresponden a las muestras tomadas de los pozos freáticos de la Corzuela (Esc. 375 y Cañada de Alsogaray (2 y 6) y a los semiconfinados de La Angostura, Macomita (Esc. 34), Cañada de Alzogaray (Esc. 242), Mariño, San José de Macomita (Esc. 276), Esc. 83 Isable Mena Mata, El Chañar, La Marta y la Esc. Adolfo Alsina (3, 7, 8, 9, 12, 14, 15, 17 y 18).

Clase III (C3 S3), salinidad alta condición en sodio, son aptas para plantas muy resistente a la salinidad por lo que es preciso aplicar un exceso de agua, buen drenaje y adicionar materia orgánica. Corresponden a las muestras tomadas del pozo freá-

tico de Colonia 7 (La Florida (22) y a los semiconfinados de La Ramada de Abajo y Cañada de Alzogaray (5 y 6).

Conclusiones

Los parámetros químicos de la mayoría de los iones analizados, presentaron valores normales, dentro de los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud, con excepciones puntuales en algunas áreas, donde existen concentraciones elevadas de sulfatos y sodio de origen natural (depósitos evaporíticos).

La dispersión de los iones principales y de los valores de conductividad, se debe a que regionalmente existen varias fuentes que los aportan a las aguas subterráneas y superficiales. Este rasgo tiene importancia a la hora de caracterizar químicamente los acuíferos.

Los depósitos evaporíticos que se encuentran intercalados en las arcilitas del terciario, aportan sulfato y calcio a las aguas subterráneas que circulan por este sector, mientras que las salmueras presentes en la zona de El Timbó aportan el cloro y el sodio.

Por último, los bicarbonatos presentes en las aguas subterráneas provendrían de la infiltración del agua de lluvia en sedimentos loésicos que coronan a los depósitos del cuaternario y de las calizas del terciario.

Como regla general, se estableció que en la zona de estudio, las aguas bicarbonatadas (aguas jóvenes con poca circulación) se ubican principalmente en el piedemonte de las sierras y las sulfatadas en el sector central y en algunas áreas del piedemonte por la presencia de depósitos evaporíticos.

La evolución química es coincidente con la dirección y sentido del flujo subterráneo y superficial, salvo en los lugares puntuales mencionados anteriormente.

En la clasificación para riego se determinó que las aguas presentan un alto contenido en sodio, para lo que se recomienda drenar bien el suelo para el uso agrícola.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Dr. José P. López, director del Proyecto G314-CIUNT «Estudios Petrológicos, Geoquímicos y Estructurales en las Fajas de Cizalla de la Sierra de Velasco, Provincia de La Rioja. Implicancias en la Evolución Geotectónicas Regional» y al Geólogo Pablo Sesma, director del Proyecto G323-CIUNT «Evaluación de los Riesgos Geológicos y Accio-

nes Antrópicas Degradatorias en Areas Urbanas, Suburbanas y Rurales representativas de la Provincia de Tucumán».

Además agradecen a las Cátedras de Hidrogeología, Geología de Combustibles y al Instituto de Química Analítica, Facultad de Bioquímica, Química y Farmacia. Universidad Nacional de Tucumán. Por último, un agradecimiento especial al Dr. Juan Carlos Cerón por su revisión y sugerencias aportadas a este trabajo.

Referencias

- Aceñolaza, F. G. y Toselli, A. (1981). Geología del noroeste argentino. *Publ. Especial N.º 1287 de la Facultad de Ciencias Naturales. Univ. Nac. de Tucumán*, 212 págs.
- APHA (1992). *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater, 17th edition*. Ediciones Díaz de Santos, Madrid, 1144 págs.
- Avila J. C., Bortolotti, P. y Lutz, M. (1996). Análisis del impacto ambiental de la explotación minera del yacimiento El Timbó, Tucumán, Argentina. *13.º Congreso Geológico Argentino*, Buenos Aires, 4: 497-508.
- Bossi, G. (1969). Geología y estratigrafía del sector sur del Valle de Choromoro. *Acta Geol. Lilloana*, 10: 19-61.
- Custodio, E. y Díaz, E. (1983). Calidad del agua subterránea. En: *Hidrología subterránea* (E. Custodio y M. R. Llamas). Edit. Omega. Barcelona, España, Tomo II: 1879-1962.
- Instituto Geográfico Militar (1998). *Carta de Imagen Satelitaria de la República Argentina*. 1.ª edición. E. 1: 250.000, San Miguel de Tucumán, 2766-II.
- Instituto Geográfico Militar (1998). *Carta de Imagen Satelitaria de la República Argentina*. 1.ª edición. E. 1: 100.000, San Miguel de Tucumán, 2766-17.
- Mon, R. (1976). La tectónica del borde oriental de los Andes en las provincias de Salta, Tucumán, Catamarca, República Argentina. *Rev. Asoc. Geol. Argentina Acta*, 31: 65-72.
- Rodier, J. (1981). *Análisis de las Aguas*. Editorial Omega, Buenos Aires, Argentina, 1059 págs.
- Santillán de Andrés, E. y Ricci, T. (1980). *Geografía de Tucumán*. Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional de Tucumán, Publicación N.º 1.299, Tucumán, 177 págs.
- Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación y EVARSA (2000). *Estadística hidrológica del siglo xx*. República Argentina, 291 págs.
- Tineo, A., Fernández, R., Guerrero, C. y De la Vega, E. (1984). Hidrogeología. En: *Geología de Tucumán*. Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de Tucumán. San Miguel de Tucumán, 155-170.
- Torres Bruchmann, E. (1978). *Las clasificaciones climáticas de Koppen y Thornthwaite*. Serie Didáctica N.º 48. Facultad de Agronomía y Zootecnia Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, 27 págs.
- Wilcox, L. V. (1955). *Classification and use of irrigation water*. U.S. Department of agriculture. USA, Circular 969, 19 págs.

Recibido el 29 de junio de 2006
Aceptado el 4 de enero de 2007