

## **CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LA CUENCA DEL RÍO CALERA, PROVINCIA DE TUCUMÁN, REPÚBLICA ARGENTINA**

**Mónica Rodríguez<sup>(1)</sup>, Carlos D'Urso<sup>(2)</sup>, Graciela Rodríguez<sup>(2)</sup>, José Pablo López<sup>(2)</sup>,  
Adriana Sales<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> Facultad de Bioquímica, Química y Farmacia. Universidad Nacional de Tucumán.  
Ayacucho 471. S.M. de Tucumán. CP:4000. Tel.: 4107203. E-mail: [monanni@fbqf.unt.edu.ar](mailto:monanni@fbqf.unt.edu.ar)

<sup>(2)</sup> Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Tucumán.

### **RESUMEN**

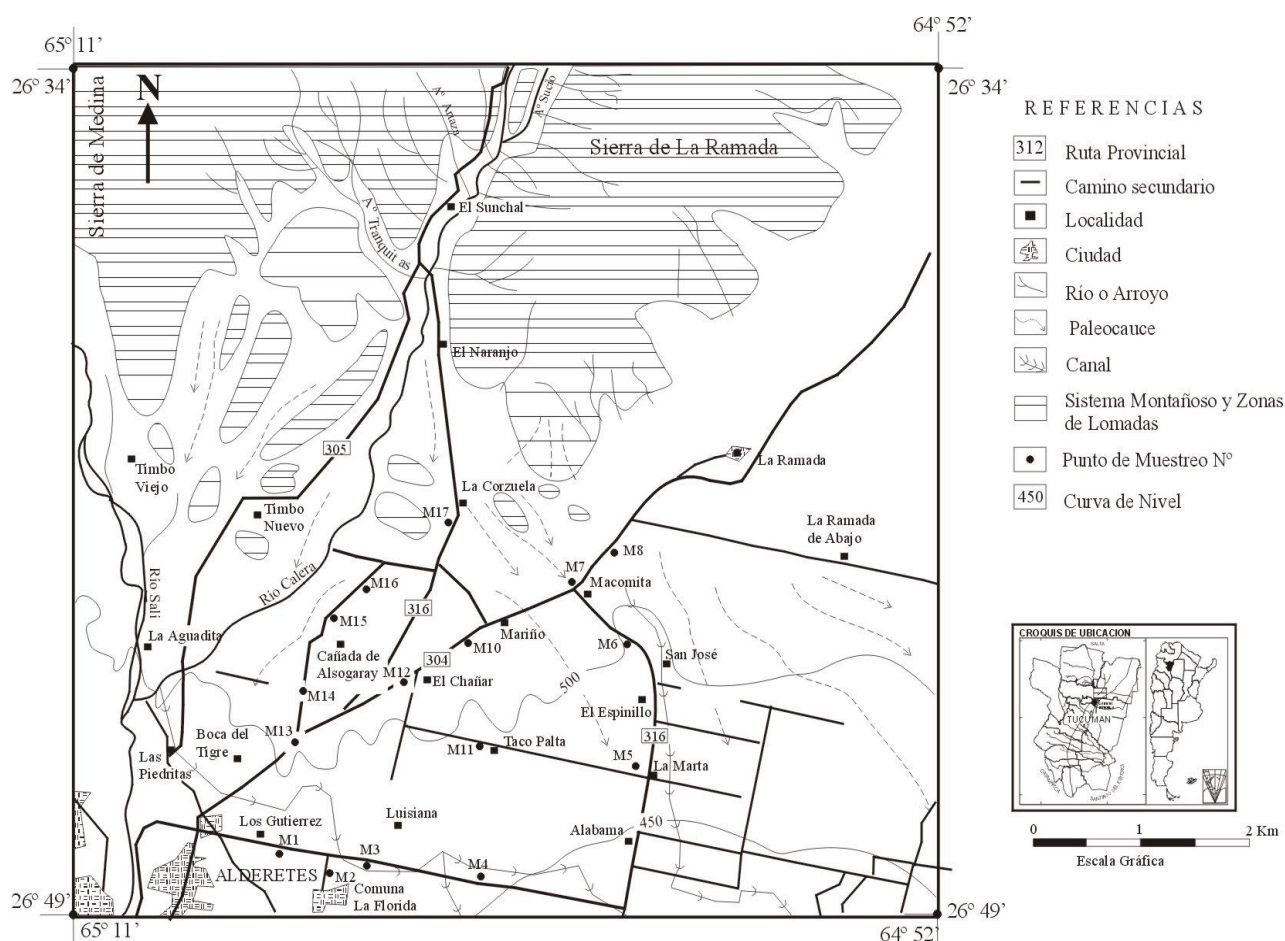
**El presente trabajo tiene como finalidad caracterizar los acuíferos pertenecientes a la Cuenca del río Calera, ubicada al noreste de la provincia de Tucumán, Argentina. Para ello se analizó el comportamiento y evolución de los distintos iones presentes en las muestras de agua del sector considerado, relacionando iones que tienen cierta similitud mediante el empleo de Diagramas Hidroquímicos de Dispersión y se caracterizó químicamente a los acuíferos mediante el empleo del Diagrama de Piper. Esta investigación complementa a otras que se realizaron en la zona, en las cuales se determinaron la calidad del agua para riego y el contenido de arsénico. Se realizó el análisis físicoquímico de dieciséis muestras de agua de pozos de distintos puntos del área, de las cuales doce corresponden a pozos profundos (entre 80 m y 444 m) y cuatro a pozos freáticos. Las determinaciones realizadas sobre las aguas estudiadas incluyeron los análisis químicos de las especies  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , sólidos totales, conductividad y pH, para los que se usaron técnicas normatizadas.**

**El estudio de las facies de aguas de la cuenca ha llevado a establecer una zonación para los acuíferos confinados y otra para los freáticos. Las aguas profundas pueden ser clasificadas como bicarbonatadas (aguas jóvenes con poca circulación) en el piedemonte y sulfatadas en la región central y en algunas áreas del piedemonte, cercanas a depósitos evaporíticos. Mientras que las aguas freáticas se caracterizan por ser bicarbonatadas sódicas, bicarbonatada – sulfatada cálcica – magnésica, bicarbonatada – sulfatada sódica y sulfatada cálcica. Las diferentes facies presentes en el área se deben a la gran heterogeneidad litológica, que hace que las aguas subterráneas no sigan una evolución geoquímica normal, en especial en el acuífero libre.**

**Palabras claves: Hidrogeoquímica, Río Calera, Tucumán.**

## INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Calera se ubica en el extremo noreste de la provincia de Tucumán abarcando una superficie aproximada de 460 Km<sup>2</sup>. Se accede al área a través de la ruta provincial N° 304, que comunica la ciudad capital con la localidad de El Chañar, Mariño, Macomita y La Ramada, la ruta provincial N° 305 que conduce al Timbó y El Sunchal y la ruta provincial N° 316 que une Boca del Tigre con El Naranjo. Además, numerosos caminos vecinales y privados permiten las observaciones geológicas e hidrogeológicas. El mapa de la zona se muestra en la Figura 1.



**Figura 1- Mapa de ubicación de la zona.**

El área presenta dos cordones montañosos de rumbo NNE-SSO, el occidental está representado por la sierra de Medina mientras que el cordón oriental, separado del anterior por el valle del río Calera, está representado por la sierra de La Ramada. Al sur y este, el relieve se caracteriza por lomadas suavemente acolinadas de origen terciario con una cobertura cuaternaria. Entre estas lomadas se desarrollan numerosas cañadas de orientación meridiana (Santillán de Andrés *et al.*, 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 faldeo occidental de la sierra del Nogalito, con rumbo aproximado norte-sur. Con el nombre de río

Medina, recorre un estrecho valle tectónico hasta la altura de la quebrada de Las Huaschas, desviándose hacia el este en la localidad de Las Tipas. Al norte de El Sunchal, retoma su dirección original norte-sur uniéndose al arroyo Sucio, donde recibe el nombre de río Calera.

El río Calera es el único afluente de la margen izquierda del río Salí y circula entre la sierra de La Ramada al oeste y la sierra de Medina al este. Tiene un trazado meridional 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 módulo es de 0,640 m<sup>3</sup>/seg y su caudal promedio en época de mínima totaliza 300 l/seg. En la sierra de La Ramada llueven de 800 a 1000 mm anuales existiendo un milimetraje similar en el faldeo 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.

La geología de la zona comienza con la depositación de la Formación Medina, que constituye los núcleos de las sierras de La Ramada y Medina. Está formada 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, constituidos 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-coluviales 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.

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), al oeste con la sierra del Aconquiya y al sur con la desembocadura del río Calera en el río Salí.

Este ambiente se caracteriza por la sedimentación aluvial influenciado 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 subordinadas provenientes de los cauces y paleocauces de los ríos y de los depósitos limo – loésico de origen eólico. Rellenan las cañadas y el fondo de la depresión formada por la cuenca. Los sedimentos terciarios, que están formados por materiales finos, limo-arcillosos con intercalaciones, poseen baja permeabilidad y moderado escurrimiento superficial.

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.

El objetivo del presente trabajo es realizar un estudio del comportamiento y la evolución de los distintos iones presentes en las muestras de agua de pozos profundos y pozos freáticos correspondientes a la cuenca del río Calera con el fin de caracterizarla desde el punto de vista hidrogeológico. Para esto se utilizaron el diagrama de Piper y Diagramas Hidrogeológicos de Dispersión entre diversos iones.

## DESARROLLO DE LA METODOLOGIA

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 satelitales 1: 100.000 y 1: 250.000 (Instituto Geográfico Militar,1998). Las unidades mapeadas fueron comprobadas en posteriores campañas.

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).

Se seleccionaron 16 (dieciséis) muestras en distintos puntos del área, de las cuales 12 (doce) corresponden a pozos profundos y 4 (cuatro) a pozos freáticos.

Las determinaciones realizadas sobre las aguas estudiadas incluyeron los análisis químicos de las especies  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ , sólidos totales, conductividad y pH. Se usaron para el análisis químico las técnicas normatizadas sugeridas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1992). Para realizar la medición del pH de las muestras se usó la técnica de potenciometría directa usando un peachímetro Mettler Delta 320 con electrodo combinado de vidrio (método N° 4500- $\text{H}^+$ ). La conductividad se midió con un conductímetro Tacussel CD 78 según método N° 2510 B. Los sólidos totales disueltos se obtuvieron en base a los valores de conductividad (método N° 2510 A). La investigación de cloruros se realizó mediante el Método argentométrico (método N° 4500- $\text{Cl}^-$  B) y la de sulfatos por el Método turbidimétrico (método N° 4500- $\text{SO}_4^{2-}$  E). La determinación de carbonatos y bicarbonatos se realizó mediante una Volumetría de Neutralización usando ácido clorhídrico 0,01990 N como solución valorante y la técnica de sucesión de indicadores, fenolftaleína y verde de bromo cresol, sugerida por Warder (Rodier, 1981). Las determinaciones de los constituyentes catiónicos sodio y potasio se llevaron a cabo por Fotometría de llama según métodos normalizados (N° 3500-Na D y 3500-K D). El contenido de calcio y magnesio se obtuvo a través de un método complexométrico usando EDTA y una combinación de indicadores, NET y murexida. (Rodier, 1981).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico de las muestras de agua estudiadas se indican en las Tablas 1 y 2. Los puntos de muestreo aparecen en el mapa de ubicación de la zona (fig. 1).

**Tabla 1- Análisis químicos de muestras de agua de pozos freáticos.**

Muestra (número)	HCO <sup>3-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Conductividad (µmhos/cm)	pH	Sólid.solubles (mg/l)
4	514,95	112,37	284,82	61,12	9,60	413,89	3,91	1418	7,90	1077
10	397,80	31,19	311,72	141,28	30,51	137,96	23,46	1067	7,48	810,9
16	707,14	55,30	44,19	27,66	14,47	275,93	7,82	998	8,44	758,5
17	634,53	56,01	209,89	98,80	20,91	229,94	7,82	1101	7,71	836,8

Referencias: M 4- Colonia 7 (Luisiana); M 10- Mariño; M 16- Cañada de Alzogaray; M 17- La Corzuela.

**Tabla 2- Análisis químicos de muestras de agua de pozos profundos.**

Muestra (número)	HCO <sup>3-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Conductividad (µmhos/cm)	pH	Sólid.solubles (mg/l)
1	347,77	64,16	213,26	147,09	29,54	160,96	11,73	1017	7,19	772,9
2	400,85	47,86	281,46	98,80	15,80	206,94	3,91	1067	7,66	810,9
3	400,85	55,30	299,23	123,65	19,94	183,95	3,91	1074	7,71	816,2
5	345,94	66,29	324,21	75,55	9,12	298,92	3,91	1204	7,94	915,0
6	396,97	31,19	158,02	45,29	7,54	206,94	3,91	801	7,98	608,8
7	342,89	76,21	787,22	279,96	5,96	367,90	11,73	1940	7,29	1474
8	418,55	76,21	694,52	233,67	33,55	298,92	7,82	1686	7,19	1281
11	218,43	117,69	407,78	95,99	10,09	436,88	3,91	1348	7,84	1024
12	510,07	38,64	270,41	78,36	24,56	275,93	7,82	1141	7,61	867,2
13	513,12	24,81	261,77	54,71	11,79	183,95	3,91	854	8,26	649,0
14	416,11	107,41	274,26	104,21	18,84	275,93	7,82	1248	7,95	948,5
15	424,65	92,87	131,60	37,07	15,80	252,93	3,91	997	8,20	757,7

Referencias: M 1- El Talar; M 2- La Florida; M 3- La Florida; M 5- La Marta; M6- Macomita; M7- Macomita; M8- La Angostura, Macomita; M11- Taco Palta; M12- El Chañar; M13- Boca del Tigre; M14- Isabel M. Mata; M15- Cañada de Alzogaray;

La clasificación de las aguas de los diferentes acuíferos estudiados se realizó mediante el diagrama trilinear de Piper Hill Langelier (Fig. 2), en base al cual se definieron las aguas de pozos profundos como:

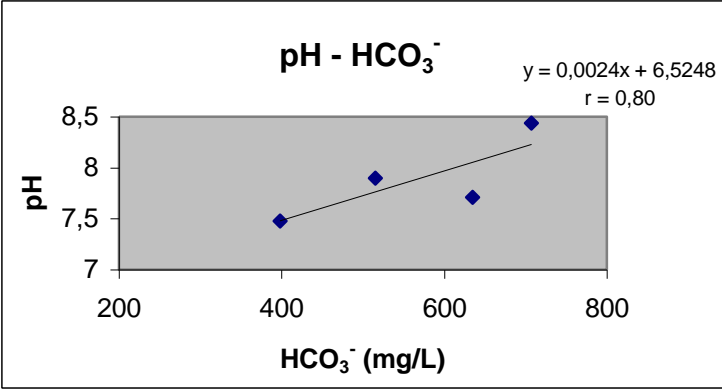
- *bicarbonatada sódica*: M15 (Esc. 242-Cañada de Alzogaray), M6 (Esc. 276-Macomita), M13 (Esc. A.Alsina-Boca del Tigre), M12 (El Chañar).
- *sulfatada y/o clorurada cálcica - magnésica*: M1 (El Talar), M8- La Angostura - Macomita.
- *sulfatada y/o clorurada sódica*: M7 (Esc 34 Macomita), M2 (La Florida- B°. La Flor), M3 (Esteban de Luca- La Florida), M11 (Taco Palta), M5 (La Marta) y M14 (Escuela 83- Isabel M. Mata).

Mientras que las aguas de acuíferos freáticos se clasificaron como:

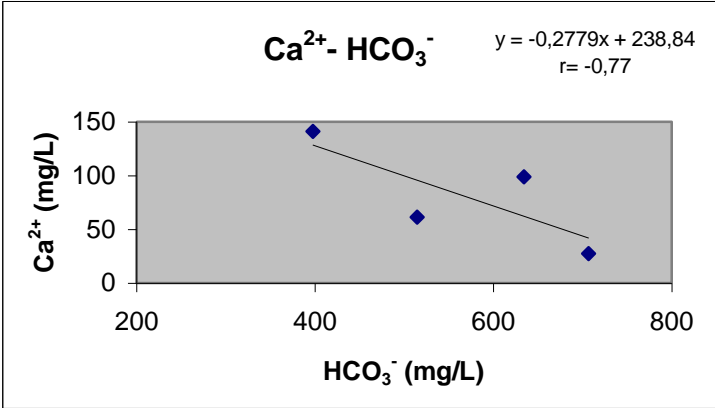
- *bicarbonatadas sódicas*: M17 (Esc.375- La Corzuela) y M16 (Cañada de Alzogaray).
- *sulfatada y/o clorurada cálcica y/o magnésica*: M10 (Mariño).
- *sulfatada y/o clorurada sódica*: M4 (Colonia 7- Luisiana).



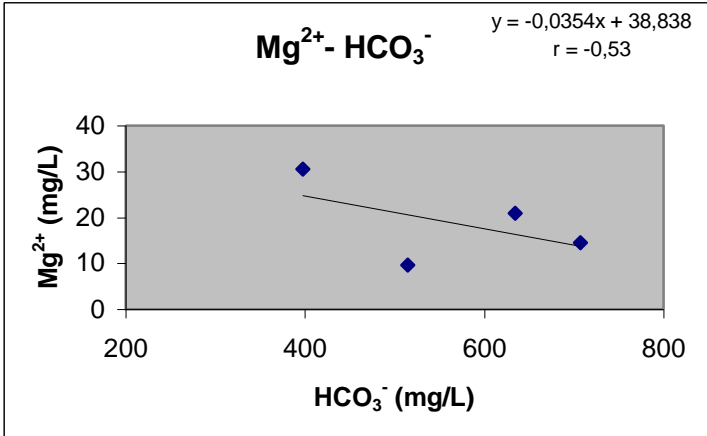
representa a una nube de puntos correspondiente a las muestras. Estos diagramas se muestran en las figuras 3 y 4.



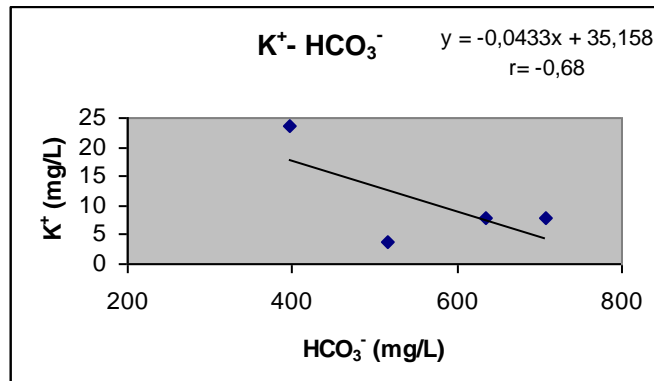
**Fig. 3-A**



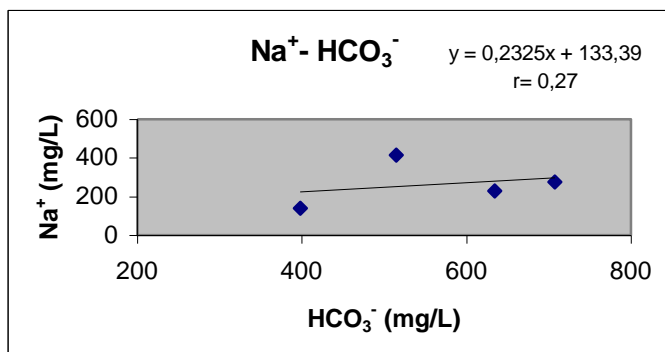
**Fig. 3-B**



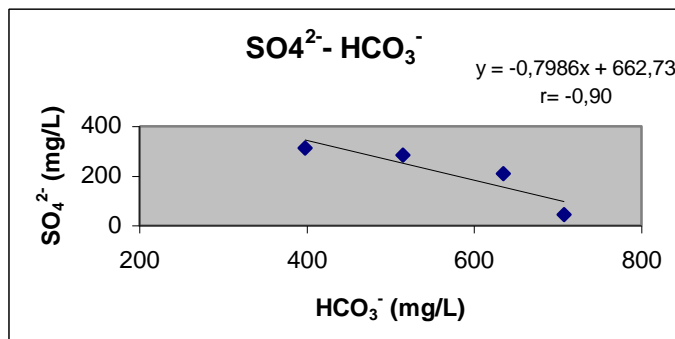
**Fig. 3-C**



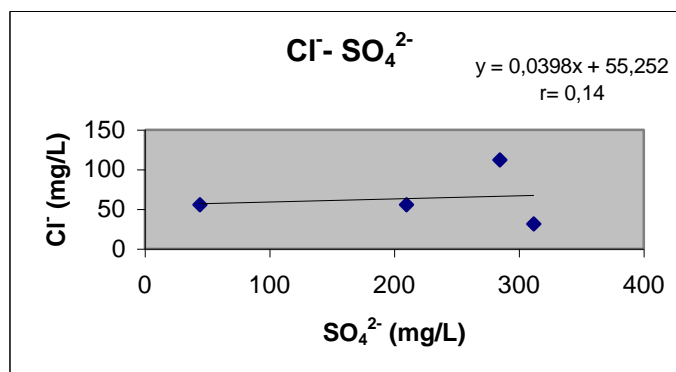
**Fig. 3-D**



**Fig. 3-E**



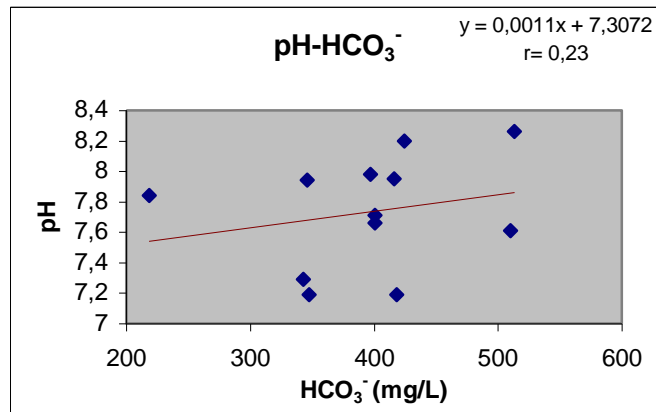
**Fig. 3-F**



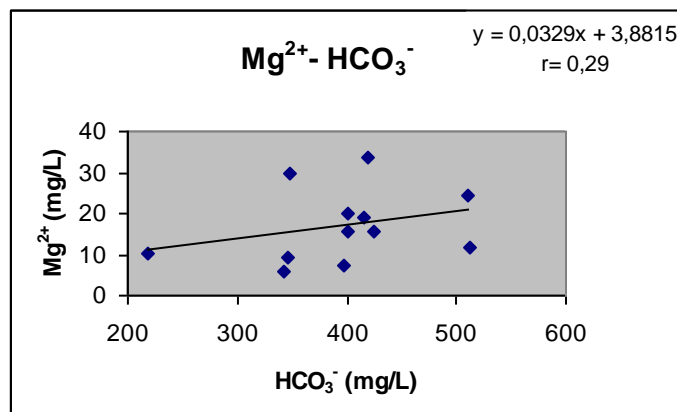
**Fig. 3-G**

**Figura 3- Diagramas de Dispersión para pozos freáticos.**

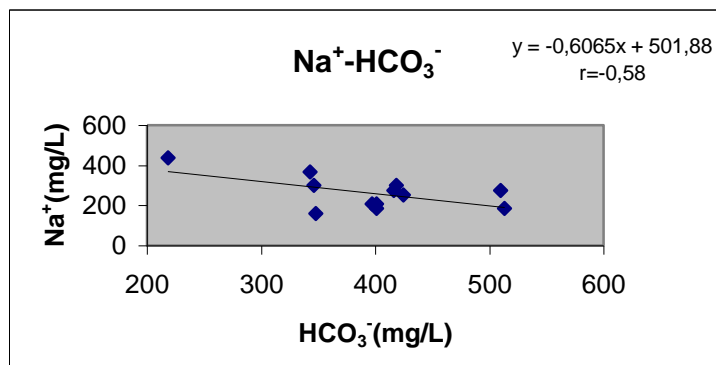




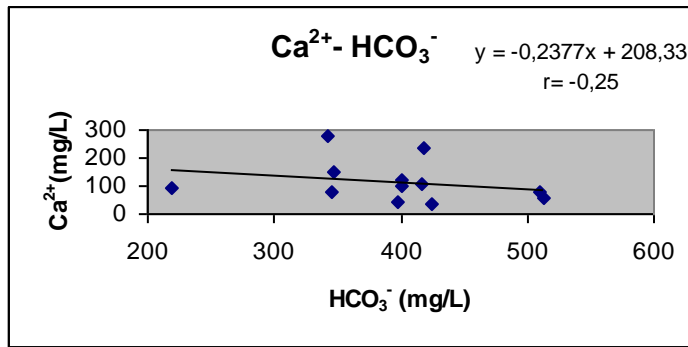
**Fig. 4-A**



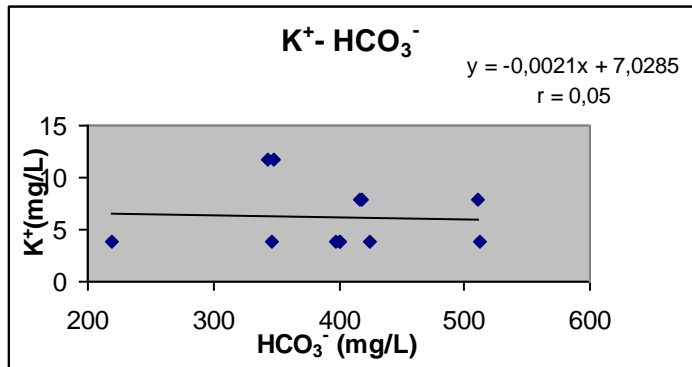
**Fig. 4-B**



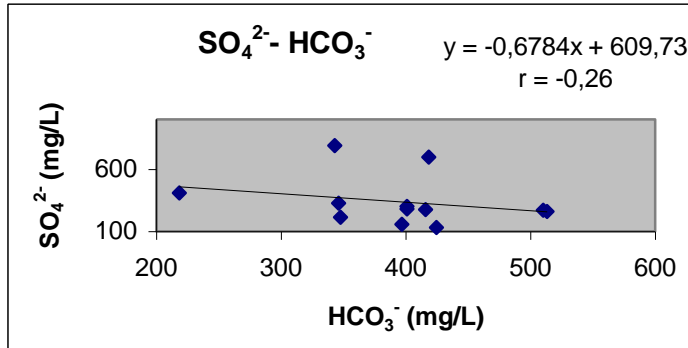
**Fig. 4-C**



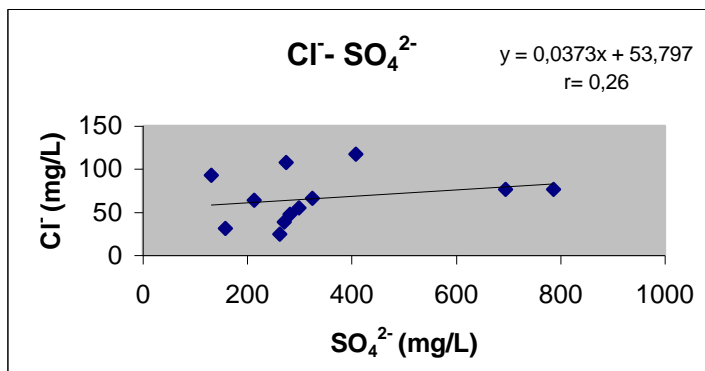
**Fig. 4-D**



**Fig. 4-E**



**Fig. 4-F**



**Fig. 4-G**

**Figura 4- Diagramas de Dispersión para pozos profundos.**

Para una mejor interpretación se analizaron las muestras en dos grupos: las muestras de agua de niveles freáticos y las de niveles profundos.

**a) Aguas de niveles freáticos:**

Como se observa en la figura 3-A, a medida que aumenta el pH (entre 7,5 y 8,5) lo hace también el contenido de  $\text{HCO}_3^-$ , determinando una correlación lineal positiva con un coeficiente de correlación (r) igual a 0,80. Esto indicaría que existe un aporte constante de  $\text{CO}_2$  al sistema que, al combinarse con el agua meteórica, disuelve las calizas de los materiales loésicos del acuífero aportando  $\text{HCO}_3^-$ .

Los cationes calcio, magnesio y potasio tienen una correlación negativa con respecto al ión  $\text{HCO}_3^-$  (figura 3-B, 3-C, 3-D), mientras que la correlación con el sodio es levemente positiva (figura 3-E) con un  $r=0,27$ . Esto significaría que los bicarbonatos que se disuelven son principalmente de sodio.

La correlación entre el  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{SO}_4^{=}$  es lineal negativa, bastante buena con un valor de  $r= -0,90$ , como es de esperarse en una evolución química normal (figura 3-F) con disminución de bicarbonato y aumento de sulfato.

El  $\text{SO}_4^{=}$  con respecto a  $\text{Cl}^-$  tiene una correlación lineal positiva bastante baja ( $r=0,14$ ) lo que indicaría que no existe una clara diferenciación química (figura 3-G).

**b) Aguas de niveles profundos:**

A medida que aumenta el contenido de  $\text{HCO}_3^-$  lo hace también el pH, al igual que en las muestras de agua de pozos freáticos, pero en este caso el valor de  $r= 0,23$  valor que indica una baja correlación lineal positiva (Figura 4-A).

El catión  $\text{Mg}^{++}$  tienen una correlación positiva ( $r= 0,29$ ) con respecto al  $\text{HCO}_3^-$  (Figura 4-B), mientras que los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{++}$  presentan una pendiente negativa (Figura 4-C y 4-D) y el catión  $\text{K}^+$  posee una muy baja correlación ( $r=0,05$ ) con una pendiente prácticamente nula (Figura 4-E). Esto indicaría que los bicarbonatos que se disuelven son principalmente de magnesio.

La correlación entre el  $\text{SO}_4^{=}$  y  $\text{HCO}_3^-$  es lineal negativa (Figura 4-F) como es de esperarse en una evolución química normal ( $r= -0,26$ ). Está relacionado con el tiempo de residencia del agua en el acuífero, las que a medida que evolucionan, disminuyen la concentración de bicarbonato y se enriquecen en sulfatos.

Los aniones  $\text{Cl}^-$  con respecto a  $\text{SO}_4^{=}$  tienen una correlación lineal positiva (Figura 4-G), que indicaría que el agua ha circulado por un sustrato rico en sales cloruradas. Este incremento en la concentración de  $\text{NaCl}$  en el agua favorece la solubilidad del yeso, hasta un cierto límite, a partir del cual disminuye (Custodio *et al.*, 1983).

## CONCLUSIONES

Se puede concluir en base al presente estudio que las aguas de la cuenca del río Calera, en la zona de recarga comienzan siendo sulfatadas cálcicas, debido fundamentalmente a que circulan por sedimentos finos del terciario con intercalaciones de yeso.

En los acuíferos freáticos de La Corzuela y Cañada de Alzogaray, los valores elevados de bicarbonato se deben a que las aguas al infiltrarse circulan por sedimentos loésicos. Estos se encontrarían desconectado del Río Calera, al encontrarse en un nivel mas alto, siendo su principal recarga el agua de lluvia.

En la zona central y oeste de la cuenca (Taco Palta y La Marta), las aguas son sulfatadas cálcicas ya que la fuente que lo aporta es una importante estructura terciaria de escasa expresión en superficie (Espolón de Tacanas) y que forma el limite este de la cuenca.

En el área de trabajo la dispersión obtenida de los iones principales y de los valores de conductividad se explicaría porque regionalmente existe una gran heterogeneidad litológica lo que da lugar a diversas fuentes que los aportan a las aguas subterráneas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al CIUNT dentro del marco de los Proyectos: “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” (Proyecto G314) y “Evaluación de los Riesgos Geológicos y Acciones Antrópicas Degradatorias en Areas Urbanas, Suburbanas y Rurales representativas de la Provincia de Tucumán” (Proyecto G323).

Además agradecen la colaboración del Geólogo Carlos Falcón de la Cátedra de Geología de Combustibles y al Instituto de Química Analítica, Facultad de Bioquímica, Química y Farmacia Universidad Nacional de Tucumán.

## REFERENCIAS

- Aceñolaza, F. G. y Toselli, A. (1981). “*Geología del noroeste argentino*”. Publ. Especial N° 1287 de la Facultad de Ciencias Naturales. Univ. Nac. de Tucumán. 212 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° Congreso Geológico Argentino. Buenos Aires. Tomo 4. 497-508.
- Bossi, G. (1969).” *Geología y estratigrafía del sector sur del Valle de Choromoro*”. Acta Geol. Lilloana, Tucumán.10 (2): 19-61.
- Custodio, E. y Díaz, E. (1983).*Calidad del agua subterránea*”. En: Hidrología subterránea (E. Custodio y M. R. Llamas, Edit.) Barcelona, España, Tomo II: 1879-1962.
- Instituto Geográfico Militar (1998). *Carta de Imagen Satelitaria de la República Argentina*. 1° Edición. E. 1: 250.000, San Miguel de Tucumán. 2766-II.
- Instituto Geográfico Militar (1998). *Carta de Imagen Satelitaria de la República Argentina*. 1° Edición. E. 1: 100.000, San Miguel de Tucumán. 2766-17.
- Rodier, J. (1981). “*Análisis de las Aguas*”. Editorial Omega, Buenos Aires, Argentina. 103-104.
- Santillán de Andrés, E. y Ricci, T. (1980). “*Geografía de Tucumán*”. Facultad de Filosofía y Letras, de la Universidad Nacional de Tucumán, Publicación N° 1299. Tucumán. 177 págs.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (1992). Ed. Díaz de Santos.
- 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. Capítulo XVII: 155-170