

## **HIDROQUÍMICA DE UN ACUÍFERO LOÉSSICO**

**A. Guillermo Bonorino, René Albouy y Jorge Carrica**

Departamento de Geología – UNS – San Juan 670 – (8000) Bahía Blanca

### **RESUMEN**

Se efectúa la caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea en su circulación por los sedimentos loésicos que componen el acuífero freático de la región de Bahía Blanca. El estudio tiene como objetivo la definición del modelo hidrogeológico general considerando simultáneamente las características dinámicas del acuífero y las químicas del agua subterránea en el contexto geológico de todo el sistema. Se concluye que: a) los cloruros y casi todo el sulfato disueltos en el agua subterránea provienen de la evaporación del agua de lluvia, mientras que el resto de los iones se originan de la lixiviación de los minerales de los sedimentos loésicos presentes en el suelo y el sistema acuífero, b) los fenómenos modificadores más importantes del quimismo del agua son: la disolución de sales, la hidrólisis de silicatos (feldespatos), carbonatos y vidrio volcánico y el intercambio catiónico, y c) la recarga del sistema ocurre a lo largo de toda la cuenca.

**Palabras claves:** hidroquímica – agua subterránea - loess

### **ABSTRACT**

Groundwater hydrochemical characterization circulating by the loessic sediments that compose the phreatic aquifer of the Bahia Blanca region is made. The objective of this study is the definition of the general hydrogeological model simultaneously considering the dynamic of the aquifer and the groundwater chemistries in the geologic context of all the system. It is conclude that : a) the dissolved chlorides and almost all the sulphate in the groundwater come from the evaporation of the rainwater, whereas the rest of ions originates of the leaching of minerals of the loessic sediments presents in the soil and in the aquifer system, b) the more important modifiers phenomena of the chemical composition of the water are: the dissolution of salts, the hydrolysis of silicates (feldspars), carbonates and volcanic glass and the cationic exchange, and c) the recharge of the aquifer system take place in all extension of the basin.

**keywords:** hydrochemical – groundwater - loess

## **1. INTRODUCCION**

Los estudios llevados a cabo en el acuífero que se extiende en las diferentes cuencas hidrológicas de la vertiente suroccidental de las Sierras Australes, han permitido evaluar y establecer la importancia que tiene el agua subterránea como recurso hídrico para su explotación.

Más allá del rol que tiene el loess como entidad geológica, esta formación es portadora de niveles acuíferos que, en muchos casos, constituyen la única fuente de abastecimiento a núcleos urbanos y rurales. El mejor conocimiento de las condiciones químicas del agua subterránea, en este tipo de acuíferos, permitirá la optimización de su aprovechamiento, dentro de un marco de desarrollo sostenido.

## *Hidroquímica de un acuífero loésico*

El propósito del estudio es: a) fijar el estado actual de la química del agua subterránea mediante la caracterización de su composición, b) definir la distribución y las variaciones espaciales de los constituyentes en relación al flujo, c) determinar los procesos físico-químicos que puedan fundamentar la distribución y variaciones observadas, y d) establecer el modelo hidrogeológico general considerando simultáneamente las características dinámicas del acuífero y las químicas del agua subterránea en el contexto geológico de todo el sistema.

## **2. METODOLOGÍA DE TRABAJO**

Las distintas investigaciones llevadas a cabo en la última década con la finalidad de incrementar el conocimiento hidrológico e hidrogeológico de las diferentes cuencas de la región surbonaerense (Bonorino 1988, 1989, 1991, 1994, CFI 1991, Carrica *et al.*, 1992, Albouy 1994, Bonorino *et al.*, 1996, Rossi 1996, Carrica 1998) han posibilitado crear un banco de datos hidroquímicos que constituye el fundamento para el desarrollo de esta memoria.

Las cuencas involucradas y el número de muestras de agua subterránea analizadas se discriminan en la Tabla 1. Para el análisis de la información química se aplicó el siguiente orden de tareas: a) control del error analítico (Freeze y Cherry, 1979), b) cálculo de índices hidrogeoquímicos, c) construcción de diagramas semilogarítmicos de dispersión iónica complementados con el cálculo del índice de regresión lineal simple, d) aplicación de los códigos WATEVAL (Hounslow and Kelly, 1994) y WATEQ4F (Plummer *et al.*, 1976) y e) interpretación de mapas hidroquímicos.

**TABLA 1 : Cuencas involucradas en el estudio y número de análisis químicos**

DENOMINACIÓN DE LA CUENCA	SUPERFICIE [Km <sup>2</sup> ]	ANALISIS QUIMICOS
@rroyo Napostá Chico	820	54
Arroyo Napostá Grande	1237	44
Cuenca superior del Río Sauce Chico	430	27
Cuenca superior del Arroyo Chasicó	954	90

## **3. UBICACION Y CARACTERISTICAS GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS DEL AREA DE ESTUDIO**

Las cuencas involucradas en este estudio (figura 1) se ubican en la vertiente occidental de las sierras del Sistema de Ventania y corresponden a las áreas de drenaje de los arroyos Napostá Chico y Napostá Grande y las cuencas superiores del arroyo Chasicó y río Sauce Chico, las que totalizan un área de unos 3440 km<sup>2</sup>.

Geológicamente interesa la Formación La Norma (De Francesco, 1992) del Mioceno Superior-Pleistoceno inferior ya que constituye el acuífero libre y la zona no saturada de la región. Está constituida por depósitos loésicos denominados informalmente "sedimentos pampeanos" compuestos, principalmente, por limos arenosos y arenas limosas con arcillas subordinadas, cementados por carbonato de calcio, que alcanzan los 200 metros de potencia. El techo, que se encuentra en posición

aflorante o subaflorante, presenta típicos niveles de tosca de hasta tres metros de espesor y de continuidad lateral variable, que en superficie están frecuentemente fisurados, lo que les confiere un cierto grado de porosidad secundaria. Por encima de esta formación se encuentran depósitos fluviales-aluviales y eólicos modernos de escasa expresión areal y saltuaria distribución y los suelos actuales.

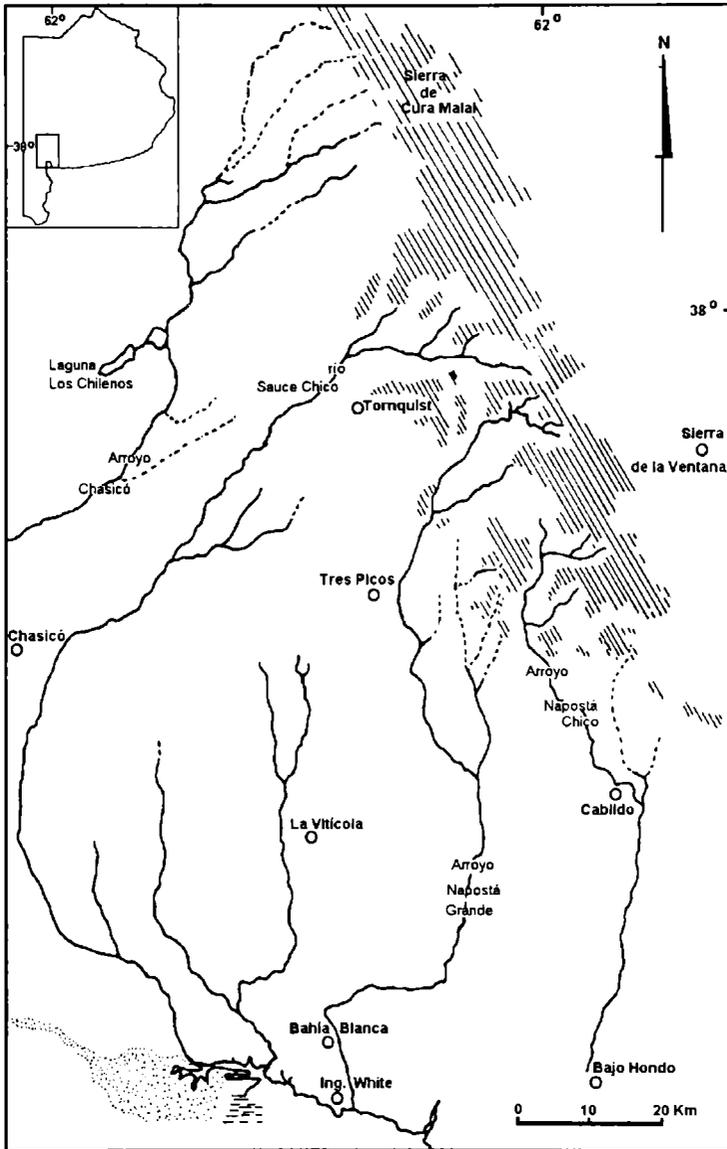


Figura 1 : Ubicación del área del estudio

El material original de los suelos que dominan el ambiente periserrano de las Sierras Australes es predominantemente loésico y reciben de éste toda su influencia (Cappannini *et al.*, 1974). En general se trata de suelos someros, de permeabilidad moderada, alcalinos y con medio a alto contenido en materia orgánica. Se clasifican en

### *Hidroquímica de un acuífero loésico*

general como hapludoles líticos y petrocálcicos, de textura franco limosa a franco arcillo-limosa. Mineralógicamente predomina el cuarzo, con abundante proporción de plagioclasa y algo menos de feldespato potásico y vidrio y en menor cantidad hornblenda, biotita y epidoto subordinado. En la fracción fina aparecen además, en orden de importancia, calcita, illita, montmorillonita, esmectita e interstratificados. La tosca se presenta en terrones y en forma concrecional.

La composición mineralógica de los "sedimentos pampeanos" contiene, en general, cuarzo, feldespatos alcalinos (plagioclasas intermedias a básicas), litoclastos de vulcanitas y vidrio volcánico; los minerales de arcilla presentes son: illita, montmorillonita y caolín y el contenido de carbonato de calcio varía entre un 10 y un 25%; en la fracción arenosa el componente más abundante es la plagioclasa, en la limosa, el vidrio volcánico y en la arcillosa la montmorillonita y zeolitas (Teruggi, 1957 y 1982, Rossi, 1996).

Los sedimentos pampeanos conforman un sistema acuífero del tipo multicapa, caracterizado por intercalaciones de acuitardos y niveles acuíferos, cuyo hidroapoyo resulta de muy difícil identificación dado el pasaje transicional de estos sedimentos a las formaciones miocénicas subyacentes. La permeabilidad del sistema está dada principalmente por porosidad secundaria (macroporos y microfisuras) y los fenómenos de drenaje diferido son frecuentes. La extensión de este acuífero tiene carácter regional y se extiende por el sur hasta el litoral marítimo.

El modelo de funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero freático de la región es el siguiente (Bonorino, 1988, Albouy, 1994, Carrica, 1998; Bonorino *et al.*, 1996): recarga a partir de los excedentes del agua de lluvia en toda la superficie de las cuencas, siendo más importante en el sector periserrano o de cabeceras, disminuyendo hacia el nivel base regional (litoral marítimo), probable aporte lateral en áreas de intercuenas y transferencia vertical hacia niveles acuíferos intermedios y profundos. El esquema de circulación regional del sistema reconoce una zona preferencial de recarga, el pedemonte, una de circulación, la llanura y el área de descarga, el litoral marítimo.

La recarga a través de los cursos solo tiene lugar en los materiales coluviales de las zonas morfológicamente más altas del piedemonte serrano y permite definir la característica influente de la red de drenaje superficial en este sector. En el resto del área el flujo local de las aguas subterráneas confluye hacia las líneas más deprimidas del relieve y alimenta los arroyos que constituyen su nivel de base; dentro de esta generalidad una situación particular se presenta en el arroyo Napostá Chico cuyo curso pierde definición por infiltración de sus aguas en el ambiente de la llanura.

Otros puntos de recarga local del acuífero se verifican a lo largo de los valles de los cursos superficiales donde la mayor permeabilidad de los depósitos fluviales cuaternarios favorecen la infiltración del agua de lluvia, generando un flujo subterráneo local que se sobrepone a otro más profundo, que constituye la descarga local del acuífero (Bonorino *et al.*, 1996). Además, aunque de menor cuantía, la presencia localizada dentro de la propia llanura de cadenas de médanos fijos y/o móviles, conforman zonas localizadas de recarga del acuífero freático.

#### 4. CARACTERISTICAS QUIMICAS DEL AGUA DE LLUVIA Y DEL AGUA SUBTERRANEA

Bonorino (1991) calculó la recarga para el área de la vertiente occidental de las Sierras Australes, en un 16,5% de la lluvia, aplicando el concepto de factor de enriquecimiento de cloruros, formulado por Mercado *et al.*, 1977 (en Rosenthal, 1987).

El agua de lluvia de la región serrana es del tipo bicarbonatada-calcomagnésica lo que señala la influencia del polvo terrígeno de la atmósfera (Bonorino, 1994). En la Tabla 2 se indica la composición iónica promedio del agua meteórica.

**TABLA 2 : Composición iónica promedio del agua de lluvia (Carrica et al., 1992)**

Ion	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
concentración en meq/l	0.280	0.045	0.094	0.071	0.041	0.147	0.131

El agua de la capa freática recogida en pozos situados a menos de dos kilómetros de los afloramientos paleozoicos de las sierras, representa un flujo de recarga reciente y corto recorrido subterráneo. La salinidad de estas aguas está comprendida entre los 30 y poco más de 570 mg/l y conservan el mismo patrón iónico que el agua de lluvia (bicarbonatado cálcico-magnésico). Las concentraciones isotópicas también se asemejan a los valores que posee el agua de lluvia de la zona, lo cual indica una infiltración rápida con una ligera evaporación, y su posterior incorporación a la freática (Bonorino *et al.*, 1996).

Las aguas de la zona de circulación denotan un aumento de la salinidad en el sentido del flujo producto de la lenta recarga de los excesos hídricos a través de potentes zonas de aireación que aportan al acuífero aguas con altos contenidos salinos producto de múltiples procesos de evaporación y consecuente concentración de sales. Como resultado de éste y de otros procesos (hidrólisis de feldespatos, intercambio catiónico) el agua se enriquece paulatinamente en cloruros y sodio hacia las zonas de descarga donde, la lenta dinámica subterránea produce, con fuerte incremento de la salinidad, aguas cloruradas sódicas.

#### 5. RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSION

##### 5.1. Evolución hidroquímica del agua de lluvia en la zona no saturada

En la zona no saturada tienen lugar los procesos de meteorización química más intensos. Tales reacciones serán particularmente importantes cuanto más intensa sea la actividad orgánica-biológica, incluyendo la abundancia de la vegetación debido a la producción de CO<sub>2</sub>, ácido carbónico y otros ácidos orgánicos.

A fin de interpretar las variaciones iónicas del agua a lo largo de su circulación por la zona edáfica, se analizaron comparativamente la composición iónica del agua de lluvia y la del agua que atravesó un perfil de suelo del área de recarga, en la cuenca superior del arroyo Chasicó. En el diagrama de la figura 2 se observa que el agua infiltrada a través del suelo se enriquece principalmente con el aporte de iones de origen terrígeno frente al de las sales representadas por los iones cloruro y sulfato los

### Hidroquímica de un acuífero loésico

que se incrementan escasamente como consecuencia del proceso de concentración por evaporación en el suelo y su transporte a la zona saturada con los excedentes pluviométricos.

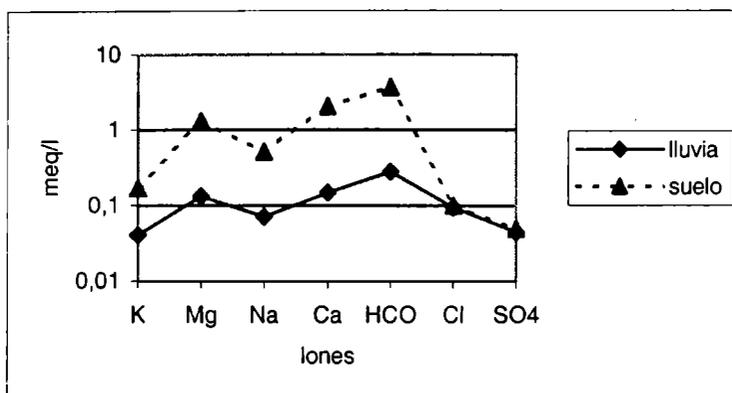


Figura 2 : Composición química del agua de lluvia y del agua del suelo

Existe un incremento proporcional de los iones bicarbonato y calcio atribuido, sustancialmente, a la hidrólisis de los carbonatos. Los materiales del suelo, ricos en  $\text{CO}_3\text{Ca}$  son atacados por el agua meteórica, levemente ácida, dando lugar a la formación de bicarbonatos y calcio solubles. Este proceso es asistido por la descomposición de la materia orgánica del suelo, lo que provoca un aumento de la acidez del medio que favorece la disolución y la rápida saturación del agua respecto al  $\text{CO}_3\text{Ca}$  en la zona no saturada durante el proceso de recarga en tránsito. El grado de saturación del agua respecto a la calcita se determinó a partir del índice Langelier (SI) con la aplicación del programa Wateq4f. Dicho índice expresa la relación logarítmica entre el producto de la actividad iónica de una solución (IAP) y el producto de solubilidad de la fase mineral analizada ( $K_{\text{sat}}$ ).

$$\text{Indice de saturación (SI)} = \log \text{IAP}/K_{\text{sat}}$$

El valor hallado fue de 0.18 e indica un agua sobresaturada respecto al mencionado mineral. Se detecta además un aumento en las concentraciones de sodio, magnesio, sílice y potasio que puede asociarse a los procesos de alteración de vidrio volcánico, intercambio iónico e hidrólisis de feldespatos. La composición química del agua resultante equivale a la del agua freática de recarga del tipo bicarbonatado cálcico. La hidrólisis de feldespatos se produce tanto en medio ácido como alcalino. En el primer caso la materia orgánica oxidada produce  $\text{CO}_2$  y ácidos orgánicos que reducen el pH del medio; como resultado hay formación de caolinita y liberación de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ , ácido silícico y bicarbonato (Hounslow, 1995). La caolinita es el mineral arcilloso más estable estructuralmente en condiciones de acidez del medio y su formación está favorecida en climas húmedos y suelos bien drenados por lo que su presencia es escasa en los suelos de la región analizada.

En el área de estudio, la hidrólisis de feldespatos en medio ácido podría verificarse en la zona edáfica mientras que el ataque en medio básico podría tener lugar en la

porción media e inferior de la zona de aereación y en el acuífero. En medio básico se produce formación de montmorillonita y liberación de Na, Ca y ácido silícico; la formación de montmorillonita está favorecida por condiciones de un drenaje pobre, pH alcalino, altas concentraciones de sílice, presencia de cationes divalentes y bajas concentraciones de potasio (Hounslow, 1995).

Respecto a los procesos en la zona no saturada, por debajo de la franja edáfica, Rossi (1996) planteó como dominante la hidrólisis de vidrio volcánico que produce arcillas del tipo montmorillonita e interestratificados de montmorillonita-illita y provoca en la solución un aumento en la concentración de  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$ , alcalinotérreos, alcalinos,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  lo que da como resultado un agua de tipo bicarbonatado cálcico.

## 5.2. Evolución hidroquímica del agua en el acuífero

### 5.2.1. Análisis de las relaciones iónicas del agua subterránea

En este apartado se analizan las principales relaciones iónicas del agua de la capa freática y de la lluvia (Tabla 3), calculadas en base a las respectivas concentraciones promedio, a fin de caracterizar la evolución química que se verifica en el agua durante la circulación en el acuífero libre; en la Tabla 4 se presenta una síntesis de la composición química del agua subterránea en las distintas cuencas.

**TABLA 3 : Relaciones iónicas del agua subterránea**

Indices iónicos	Cuenca del Arroyo Napostá Grande			A° Chasicó Cuenca superior	A° Napostá Chico	Río Sauce Chico Cuenca Superior	Agua de lluvia del área serrana
	Superior	Media	Inferior				
$r\text{SO}_4^{2-} / r\text{Cl}^-$	0,56	0,61	0,72	0,71	0,53	0,55	0,47
$r\text{HCO}_3^- / r\text{Cl}^-$	4,00	2,54	1,28	5,00	2,38	3,75	2,97
$r\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / r\text{Cl}^-$	1,95	0,85	0,38	2,25	0,70	2,60	2,95
$r\text{Ca}^{2+} / r\text{Mg}^{2+}$	1,38	1,00	0,93	1,72	1,40	1,43	1,12
$r\text{HCO}_3^- / r\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	2,05	3,00	3,36	2,26	3,30	1,44	1,00
$r\text{Na}^+ / r\text{Cl}^-$	3,49	3,32	2,63	4,62	3,36	3,00	0,75
$r\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / r\text{Na}^+ + \text{K}^+$	0,54	0,25	0,14	0,48	0,14	0,84	2,48
$r\text{K}^+ / r\text{Cl}^-$	0,09	0,04	0,02	0,10	0,03	0,10	1,19

La relación  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$  arroja un índice siempre cercano al del agua meteórica producto de un único aporte de estos iones debido a la concentración de las sales por evaporación en el suelo y su transporte a la zona saturada con los excedentes pluviométricos. En relación al origen del ión sulfato en el agua subterránea de la cuenca superior del arroyo Chasicó, un aporte adicional de este ión provendría de la disolución de yeso diseminado en el material del acuífero, lo que justificaría el alto valor relativo de la relación  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$  en esta cuenca (0,71). La presencia de cristales de yeso en algunos perfiles naturales, en el ámbito de esta cuenca, apoyarían esta idea.

*Hidroquímica de un acuífero loésico*

**TABLA 4: Síntesis de la composición química del agua subterránea en las distintas cuencas.**

Parámetro estadístico	Cuenca del Arroyo Napostá Grande Cuenca superior n= 7						Cuenca del Arroyo Napostá Grande Cuenca media n=19					
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Valor medio [mg.L <sup>-1</sup> ]	308	33,9	44,5	101	28,5	12,6	406,3	76,6	92,7	200	22,7	13,5
Valor mínimo [mg.L <sup>-1</sup> ]	101	2	8	8,4	16,8	3,8	301	24	43	96	12,6	6,4
Valor máximo [mg.L <sup>-1</sup> ]	492	103	108	250	42	20,4	607	337	355	497	39,1	29,1
Varianza	24109	1464	1362	8379	82,2	37,4	8277	6324	5271	10154	58,5	28,6
Parámetro estadístico	Cuenca del Arroyo Napostá Grande Cuenca inferior n=18						Cuenca superior Arroyo Chasicó n = 90					
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Valor medio [mg.L <sup>-1</sup> ]	488	212,8	217,7	372	23	14,9	330	37	38	114	30,8	10,8
Valor mínimo [mg.L <sup>-1</sup> ]	42,7	24	32	154	5	1,2	46	2	1	6	3	0,5
Valor máximo [mg.L <sup>-1</sup> ]	700	472	467	695	62	32,7	1377	255	192	720	77	32
Varianza	24362	14049	13605	18112	253	87	25190	1750	1541	9339	222,8	45,5
Parámetro estadístico	Cuenca Arroyo Napostá Chico (superior - media) n = 54						Cuenca superior Río Sauce Chico n = 27					
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Valor medio [mg.L <sup>-1</sup> ]	415,5	73,8	101,7	221	23,57	10,1	268	31	41,5	80,6	36	15,2
Valor mínimo [mg.L <sup>-1</sup> ]	207	5	14	35	2,8	1,9	59,7	3,8	5,5	5,1	10	4,8
Valor máximo [mg.L <sup>-1</sup> ]	663	380	346	430	66,4	25,7	509	92	120	180	119,6	29,1
Varianza	10515	5240	4890	10688	256	43,8	12562	675	801	2968	470,8	30,6

El aumento de este índice con la circulación subterránea, puesto de manifiesto en la cuenca del arroyo Napostá Grande, se originaría por la diferente composición iónica que presenta el agua de lluvia (en particular la relación  $rSO_4/rCl$ ) en el ambiente serrano y Bahía Blanca. Carrica (1998) estima un valor  $rSO_4/rCl = 0,56$  para el agua de lluvia en inmediaciones de las sierras y de 0,675 para el agua de lluvia en Bahía Blanca. En este sentido, el exceso de sulfatos provendría del contenido en yeso de las suspensiones eólicas de los suelos salinos aledaños a la depresión del salitral de La Vidriera y de los afloramientos de la Formación Chasicó ubicados al oeste de Bahía Blanca (Bonorino, 1994).

El aumento de los índices  $rHCO_3/rCl$  y  $rCa/rMg$  del agua subterránea en las cuencas superiores con respecto a las del agua de lluvia, denota el aporte de  $HCO_3^-$  y

$\text{Ca}^{2+}$  debido a la hidrólisis de los carbonatos del suelo. Como resultado de este fenómeno, las aguas en la zona de recarga, son del tipo bicarbonatado cálcico. No se descarta, además, que parte del calcio pueda provenir como resultado de la meteorización de feldespatos, fenómeno que ocurre en las zonas edáfica y no saturada. Sin embargo debido a que en el loess, la especie de plagioclasa más difundida es la andesina, junto con el incremento del calcio tendrá lugar el aumento de sodio como ha sido verificado en casi todas las aguas. El índice decae con la circulación a causa del aporte de cloruros a lo largo de la cuenca y por el control que ejerce el índice de saturación de la calcita sobre el bicarbonato.

El proceso de intercambio catiónico de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  por  $\text{Na}^+$ , en arcillas montmorilloníticas, en la fracción fina del suelo y material de las zonas vadosa y saturada, aumenta el índice  $r\text{Na}/r\text{Cl}$  y disminuye el  $r(\text{Ca}+\text{Mg})/r\text{Na}+\text{K}$ . Otro aporte significativo de  $\text{Na}^+$ , a nivel de zona no saturada y acuífero, proviene también de la hidrólisis de los feldespatos.

El proceso de adsorción de potasio por los minerales arcillosos de la zona no saturada y acuífero se observa en todos los grupos de agua analizados y se manifiesta por el decrecimiento de la relación  $r\text{K}/r\text{Cl}$ .

### 5.2.2. Diagramas bidimensionales de dispersión iónica

Se analizó la evolución química de los distintos iones disueltos en el agua con respecto al ión cloruro, mediante diagramas de dispersión iónica (figura 3). En estos diagramas se observó que los iones  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$  y  $\text{HCO}_3$  tienen un comportamiento independiente con respecto al ión cloruro. Las relaciones  $\text{C.E.}/\text{Cl}$ ,  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  y  $\text{Na}/\text{Cl}$  arrojan un índice de correlación alto y positivo ( $R^2 = 0.856$ ,  $0.843$  y  $0.776$  respectivamente); tanto el sulfato como el sodio disueltos en el agua se incrementan en el sentido del flujo subterráneo a medida que aumenta la concentración de cloruros lo que indica la permanencia, en el espacio, de los procesos generadores.

### 5.2.3. Oligoelementos flúor y arsénico

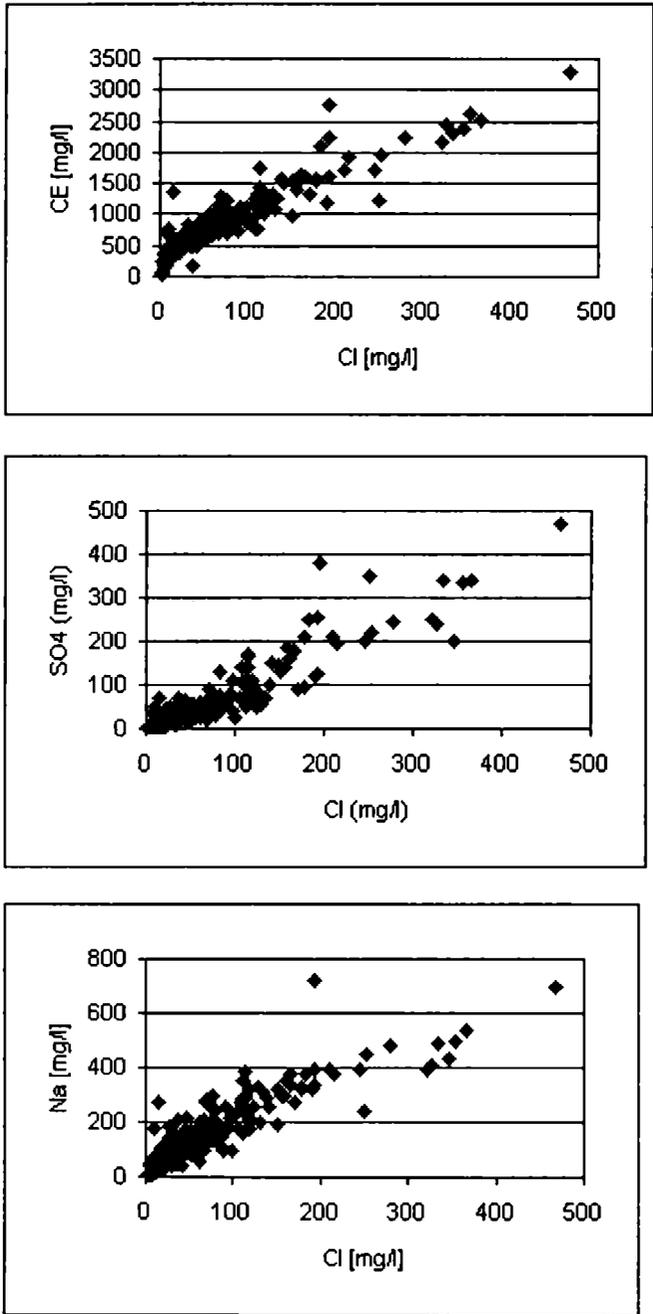
No se ha detectado ninguna asociación significativa de estos elementos traza con los iones mayoritarios del agua subterránea. Los mismos muestran una distribución espacial aleatoria que puede relacionarse con la presencia irregular de niveles de vidrio volcánico. Los estudios químicos realizados en los vidrios volcánicos del sedimento que integra el acuífero de la región, indican que los mismos son la fuente de aporte más importante de elementos trazas y dentro de ellos los más comunes son el flúor y el arsénico.

### 5.2.4. Diagramas semilogarítmicos

El diagrama utilizado en este caso (figura 4) es el denominado huella digital (Mazor, 1997); los análisis representados corresponden a pozos alineados en un mismo filete de flujo. En el mismo se han representado tres muestras que caracterizan espacialmente la composición química del agua desde la zona de recarga hasta la de descarga, en la cuenca del Napostá Grande. La evolución de la facies química parte de un tipo bicarbonatado cálcico, en zona de recarga, pasando por un intermedio

*Hidroquímica de un acuífero loésico*

bicarbonatado sódico, para finalizar con un tipo clorurado sódico en la zona de descarga. Mientras que el sodio, el cloruro y el ión sulfato se incrementan en el sentido del escurrimiento, el potasio, magnesio, calcio y bicarbonato son afectados: por adsorción en arcillas (illita), en el caso del potasio, intercambio catiónico, en los alcalino térreos y precipitación por saturación, en el caso del bicarbonato.



**Figura 3 : Diagramas bidimensionales de dispersión iónica**

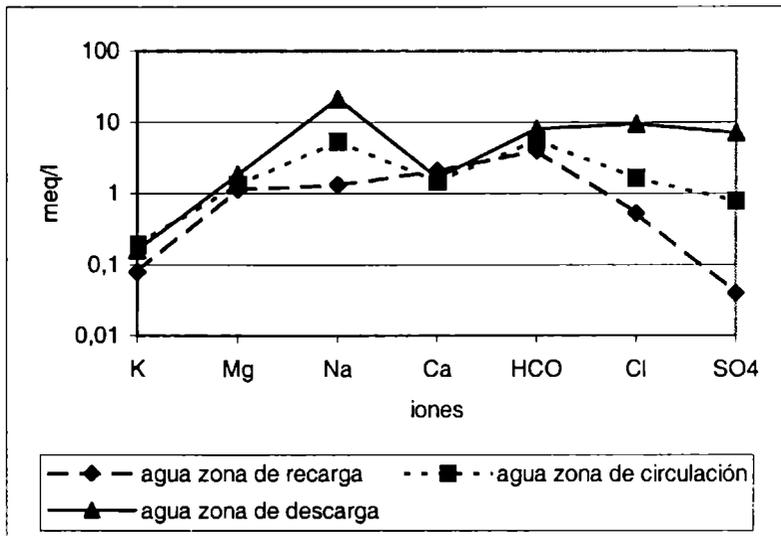


Figura 4: Evolución de la facies química

### 5.2.5. Aplicación del Código WATEVAL

El programa Wateval evalúa la calidad química del agua e incluye rutinas que permiten deducir la mineralogía del acuífero, el cálculo de mezclas de aguas y varios tipos de representación gráfica de análisis. El programa se aplicó a 32 muestras de agua con el objeto de identificar los procesos de meteorización que controlan la composición hidroquímica y comparar los resultados a lo largo de una misma línea o filete de flujo subterráneo.

Como fenómenos modificadores que afectan a todas las muestras analizadas se encuentran los siguientes: a) meteorización de vidrio volcánico, b) hidrólisis de feldespatos e intercambio catiónico en arcillas montmorilloníticas, y c) hidrólisis de carbonatos y silicatos. Otro proceso particular, detectado en algunas muestras es la alteración de minerales ferromagnesianos tales como anfíboles, micas y piroxenos.

## 6. CONCLUSIONES

Es posible generalizar, para las cuencas estudiadas, el siguiente modelo hidrogeológico:

- En la cuenca superior, los excedentes del agua de lluvia, cuyo patrón químico es bicarbonatado calcomagnésico, en su pasaje por el suelo, disuelven cloruros y sulfatos alojados en el perfil como producto de su evaporación. A medida que el agua transita hacia la zona saturada, los minerales feldespáticos son fuertemente meteorizados liberando sílice, sodio y calcio, en tanto que la hidrólisis de los carbonatos (tosca) agrega calcio que va precipitando a medida que se alcanza la sobresaturación con respecto a la fase mineral de la calcita. Otros fenómenos como la lixiviación de los vidrios volcánicos agregan al agua sílice, sodio y elementos traza como el flúor y el arsénico.

### *Hidroquímica de un acuífero loésico*

- En su circulación por la zona saturada se alternan fenómenos de intercambio catiónico con las arcillas, montmorillonita especialmente, las que toman calcio y magnesio por el sodio, con precipitación de calcita. Simultáneamente continúa la hidrólisis de las plagioclasas y al ataque de silicatos férricos y ferromagnésicos (biotita, hipersteno, augita y hornblenda). El proceso de hidrólisis de aluminosilicatos es menos intenso pero continuo y provoca la alteración a especies arcillosas montmorilloníticas.
- Al mismo tiempo, en los sectores medio e inferiores de la cuenca, los excedentes de agua, algo más salinizados como consecuencia de un balance hídrico más deficitario, siguen incorporándose a lo largo de la circulación y agregan más cloruros y sulfatos al agua subterránea. El agua que alcanza la zona de descarga adquiere así un quimismo tipo clorurado-sódico.

**Agradecimientos:** A la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por el apoyo económico otorgado para la realización de esta memoria.

### REFERENCIAS

- Albouy, E. R., 1994. Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca (inédito).
- Bonorino, A. G., 1988. Geohidrología del sistema hidrotermal profundo de Bahía Blanca. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca (inédito).
- Bonorino, A. G., 1989. Caracterización química de la lluvia en la región suroeste bonaerense. Seminario Internacional de Hidrología de Grandes Llanuras, Actas: 190-203. Buenos Aires.
- Bonorino, A. G., 1991. Evaluación de la recarga de agua subterránea en el área de la vertiente occidental de las Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. Revista de la Asociación Geológica Argentina 46 (1-2) :93-102.
- Bonorino, A.G., 1994. Geohidroquímica de la lluvia en la región del suroeste bonaerense. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 49 (1-2):93-98.
- Bonorino, A. G., Panarello, H., Carrica, J. y Albouy, R., 1996. Isótopos estables y dinámica del acuífero freático de la vertiente occidental de las Sierras Australes. XIII Congreso Geológico Argentino, Actas (4): 409-416. Buenos Aires.
- Cappannini, D. A., Scoppa, C. y Vargas Gil, J., 1974. Suelos de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires. Reunión sobre la geología de la provincia de Buenos Aires. Actas: 203-234. La Plata.
- Carrica, J. C., 1998. Hidrogeología de la cuenca del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca (inédito).
- Carrica, J., Rossi, P., Albouy, R. y Bonorino, G., 1992. Hidroquímica del agua subterránea del sector pedemontano de la vertiente sudoccidental de las Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. III Jornadas Geológicas Bonaerenses, Actas: 159-164. La Plata.
- Consejo Federal de Inversiones (CFI), 1991. Prospección geoelectrica en las cuencas superiores de los arroyos Napostá Grande, Chasicó y río Sauce Chico. Consejo Federal de Inversiones, Informe interno (inédito).
- De Francesco, F. O., 1992. Estratigrafía del cenozoico en el flanco occidental de la Sierra de Curamalal, Sierras Australes bonaerenses. III Jornadas Geológicas Bonaerenses, Actas:3-12. La Plata.

***A. Guillermo Bonorino, René Albouy y Jorge Carrica***

- Freeze, A. & Cherry, J., 1979. Groundwater. Prentice Hall, Inc. , New Jersey. pp 604
- Hounslow, A. W., 1995. Water quality data, Analysis and interpretation. Lewis Pub. pp 397
- Hounslow, A. and Kelly, D.G., 1994. Wateval: water analysis interpretation program and Piper diagram plot. Oklahoma State University, Geology Department.
- Mazor, E., 1997. Chemical and isotopic groundwater hydrology. The applied approach. 2<sup>nd</sup>. Edition. M. Dekker, Inc. 413 pp.
- Plummer, L. N., B. F. Jones & A. Truesdale, 1976. WATEQ4F - A Fortran IV version of WATEQ, a Computer Program for Calculating Chemical Equilibrium of Natural Waters. U.S.G.S. Techniques of Water-Res. Invest., 76, 70 pp.
- Rosenthal, E., 1987. Chemical composition of rainfall and groundwater in recharge areas of the best Shean-Harod multiple acuífer system, Israel. Journal of Hydrology, 89 (3/4) :329-352.
- Rossi, S. P., 1996. Evolución hidrogeoquímica del agua subterránea en la cuenca superior del arroyo Chasicó, provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca (inédito).
- Teruggi, M., 1957. The nature and origin of Argentine Loess. Journal of Sedimentary Petrology, 27(3):322-332.
- Teruggi, M., 1982. Diccionario Sedimentológico, volumen I: rocas clásticas y piroclásticas. Ediciones Científicas Argentinas Librart. Buenos Aires. 104 pp.