

# HIPOTESIS HIDROGEOQUÍMICA COMO AUXILIAR EN LA INTERPRETACIÓN HIDRODINÁMICA DE UN ACUÍFERO FISURADO. PROVINCIA DE SANTA CRUZ. ARGENTINA

Mario A. HERNÁNDEZ<sup>1</sup>  
Nilda GONZÁLEZ<sup>2</sup>

## RESUMEN

El complejo piroclástico “*Grupo Bahía Laura*” posee amplia distribución en la Patagonia extraandina argentina. Está integrado por ignimbritas (*Fm. Chon Aique*), tobas ignimbríticas y tobas (*Fm. La Matilde*) de edad Jurásica. Aloja un importante acuífero fisurado, portador de aguas subterráneas de buena calidad, bajo un régimen árido. Pudo constatarse la presencia de más de un sistema acuífero, hecho evidenciado por diferencias en las cargas hidráulicas de sondeos de exploración próximos, dispar respuesta a los ensayos de bombeo y efectos en manantiales de fisura presentes en la comarca. Para establecer una relación entre el “overflow” y el “underflow” en el macizo fracturado y dilucidar el rol hidrodinámico de cada formación, se recurrió a la interpretación de diagramas hidroquímicos y agrupamiento por “familia de aguas”. Las aguas cloruradas-bicarbonatadas sódicas se corresponden con el material acuífero ignimbrítico y las cloruradas-sulfatadas sódicas con las tefras de la *Fm. La Matilde*, dada su afinidad con los sulfatos (Mazzoni, 1986). Pudo diferenciarse el rol de cada unidad acuífera: las ignimbritas como zona de recepción-infiltración por su fuerte diaclasamiento y las tobas como trasmisivas, por los planos de estratificación abiertos (lajosidad). Se trata respectivamente de “overflow” de carácter vertical descendente y “underflow”, de vector sub-horizontal hasta ascendente.

## ABSTRACT

The pyroclastic complex “*Bahía Laura Group*” is widespread in the Extra-Andean Patagonia of Argentina. It consists of ignimbrites (*Chon Aique Fm.*), ignimbritic tuffs and tuffs (*La Matilde Fm.*) of Jurassic age. It encloses an important fissured aquifer with good-quality groundwater under an arid regime. More than one aquifer system was detected due to hydraulic head differences in neighboring boreholes, a dissimilar response to pumpage tests and the effects in fissure springs of the region. In order to establish a relation between overflow and underflow in the fractured massif and determine the hydrodynamic role of each formation, an interpretation of hydrochemical diagrams and grouping by water families were used. The sodic chloride-bicarbonated waters are related to the ignimbritic aquifer material and the sodic chloride-sulfated waters are associated to the tephros of *La Matilde Fm* due to its sulfate affinity. The role of each aquifer unit could be differentiated: the ignimbrites correspond to the intake-infiltration zone on account of its strong jointing and the tuffs are transmissive along open bedding planes. They correspond to downward vertical overflow and sub-horizontal to upward underflow, respectively.

**Palabras clave:** Métodos de estudio en aguas subterráneas, acuíferos fisurados, hidrogeoquímica, hidrodinámica, regiones áridas (Methods for groundwater studies, fractured aquifers, hydrogeochemistry, hydrodynamic, arid regions).

## INTRODUCCIÓN

Las rocas piroclásticas de edad jurásica (Dogger-Malm) conocidas como *Grupo Bahía Laura* se hallan presentes en grandes

extensiones de la región patagónica de Argentina, bajo diferentes denominaciones estratigráficas, afectadas por una intensa fracturación consecuencia de sucesivos

<sup>1</sup> Cátedra de Hidrogeología. Universidad Nacional de La Plata – CONICET. Email mario\_h@sinectis.com.ar

<sup>2</sup> Cátedra de Hidrogeología. Universidad Nacional de La Plata – CIC. PBA. Email nilda\_h@sinectis.com.ar

episodios de diaclasamiento. En algunos ámbitos estructurales, desde el punto de vista físico se ha reconocido la existencia de por lo menos dos sistemas hidráulicos en un acuífero secundario. La escasez de estudios hidrogeológicos específicos (Hernández, 2000), dificulta el reconocimiento de la hidrodinámica en este medio, máxime en un ámbito de rocas piroclásticas, no obstante haberse verificado la aludida realidad de más de un sistema activo, durante trabajos de exploración por perforaciones y pruebas de bombeo. Dilucidar la geometría del sistema es una de las incertidumbres habituales en los medios secundarios (Black, 1994).

El hecho de haberse percibido un comportamiento hidroquímico diferente en las muestras de agua analizadas, llevó a la idea de utilizar criterios de este tipo en la diferenciación del rol de cada uno de los tipos litológicos componentes del Grupo Bahía Laura, como importante auxiliar para entender el mecanismo hidrodinámico.

La importancia de arribar al conocimiento geohidrológico de estos sistemas radica en las condiciones generales de escasez de agua dulce en una región bajo clima árido, con una media pluviométrica inferior a los 200mm/año y un elevado déficit hídrico (más de 1200mm/año).

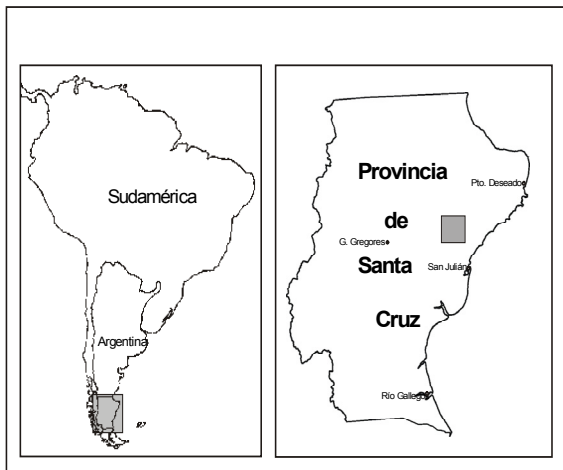


Figura 1: Mapa de ubicación

Situada en un sector central de la Pcia. de Santa Cruz con 0.01 hab/km<sup>2</sup> (Figura 1), la comarca ha tenido históricamente una regular actividad ganadera ovina, en franco retroceso por la pérdida de valor económico de la fibra de lana. El descubrimiento y puesta en actividad del importante yacimiento aurífero Cerro Vanguardia, ha significado un elevado requerimiento de aguas de baja salinidad, satisfecho a expensas del acuífero fisurado objeto de este estudio.

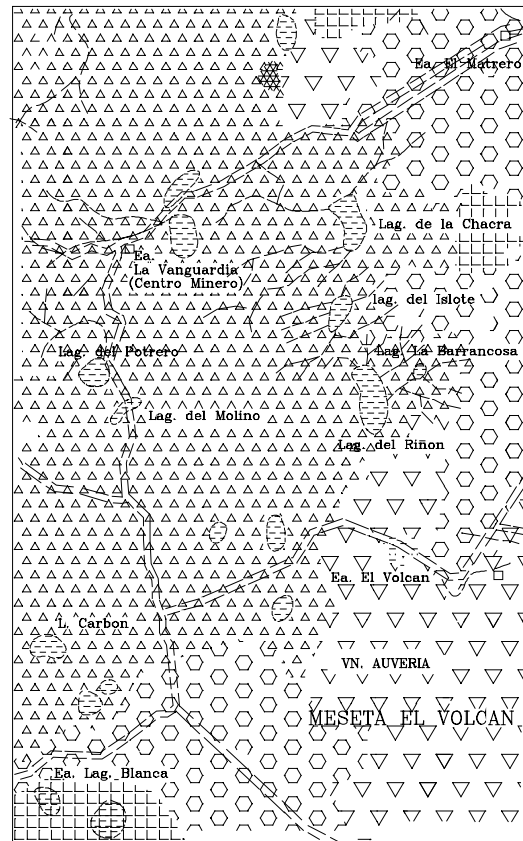


Figura 2: Mapa geológico

### GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

Los terrenos aflorantes más antiguos en la región que incluye a la zona corresponden a basaltos masivos de la *Fm. Bajo Pobre* (Dogger inferior), reducidos y localizados en posiciones bajas del relieve. Siguen los términos del **Grupo Bahía Laura** (Dogger-Malm), conformados por depósitos de nube ardiente (ignimbritas e ignimbritas riolíticas de la *Fm. Chon Aike*) y piroclastitas de caída (tobas ignimbríticas a tobas, tobas arenosas y limolitas tobáceas de la *Fm. La Matilde*). Estas rocas de hallan en distinta relación de campo, dependiendo de la distancia relativa a los antiguos centros de efusión, ocupando las tobas los sectores distales, generalmente aflorantes en bordes de bajos y valles. La *Fm. Bakeró* (Cretácico inf., Aptiano-Albiano), compuesta por areniscas, limolitas y arcillitas poco compactadas, ofrece su miembro superior en los sectores occidentales. Apoyando indistintamente sobre ésta o el **Grupo Bahía Laura**, la *Fm. Patagonia* (Eoceno-Oligoceno) de origen marino aflora hacia el Sur, Sudeste y Este con limolitas arenosas, arenas

finas y coquinas con ocasionales intercalaciones de arcillas. De amplia difusión areal son los depósitos de gravas de las **Fm. La Avenida** y **Pampa de la Compañía** (Plioceno inf.), coronando las mesetas a distintos niveles, sobre las cuales se disponen las rocas del **Basalto La Angelita** (Plioceno sup.-Pleistoceno) en aquellas más elevadas, incluyendo dos conos volcánicos (volcanes El Volcán y Auvernia). Los depósitos más modernos corresponden a episodios fluviales y eólicos desde el Pleistoceno Sup. al Reciente. En la Figura 2 se muestran las unidades aflorantes en el área específica de estudio (225 km<sup>2</sup>).

Coordenadas geográficas Fig. 2 y 3:  
 x: 48° 20' 01" / 48° 30' 29"  
 y: 68° 07' 30" / 68° 17' 50"

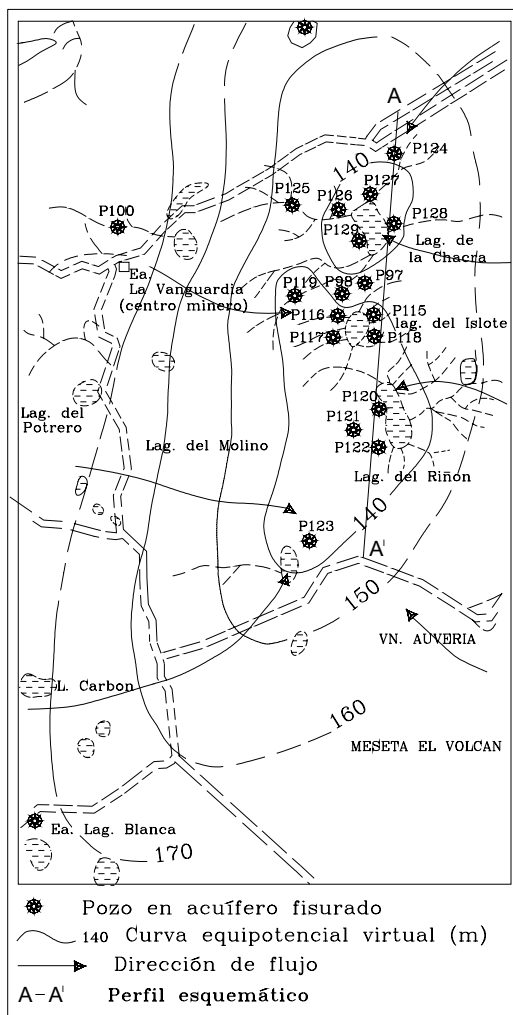


Figura 3: Mapa equipotencial

Las estructuras principales reconocidas son de **plegamiento** (braquianticlinales y braquisinclinales de muy baja inclinación) y **fallamiento** (sistemas principales N50°W, N70°W, N 40°E, N-S y W-E), además de un

profuso **diaclasamiento** que afecta principalmente a la **Fm. Chon Aike** (diaclasas abiertas, rellenas de cuarzo hidrotermal, de material secundario o cerradas por compresión en profundidad).

Los comportamientos hidrológicos varían desde **acuifugo** para la **Fm. Bajo Pobre**, **acuitardo** para la **Fm. Bakeró** y algunos términos de la **Fm. Patagonia**, **acuífero primario** para las formaciones **La Avenida** (alta permeabilidad) y **Patagonia** (baja permeabilidad) hasta **acuífero secundario** para el **Grupo Bahía Laura** (baja a media permeabilidad) y **Basalto La Angelita** (alta permeabilidad).

Desde el punto de vista geomorfológico se distinguen formas mayores **positivas** (Niveles Gradacionales Terrazados, Mesetas volcánicas, Conos volcánicos, Relieve de erosión, Remanentes de Erosión y Pedimentos de flanco) y **negativas** (Valles fluviales principal y secundarios, Bajos estructurales y estratigráficos, Ventanas lávicas). La comarca donde se realizaron mediciones, ensayos y muestreo hidroquímico se halla en un elongado Bajo estructural, enmarcado en un Relieve de erosión labrado en las formaciones **Chon Aike** y **La Matilde**, que aloja cuerpos lagunares transitorios (lagunas del Riñón, del Islole, La Chacra, El Matrero).

### HIDRODINÁMICA

La **recarga** del sistema secundario sucede fundamentalmente a partir de las escasas precipitaciones ocurrientes en el área (172 mm/año), que por infiltración rápida ingresan a la **Fm. La Avenida** a través de las grietas de disyunción del **Basalto La Angelita** o directamente por sus propias gravas. Ambas unidades yacen en las mesetas en posición subhorizontal (Hernández, 2000; Hernández et al., 2002).

Desde allí se produce la filtración profunda hacia el acuífero del **Grupo Bahía Laura**, donde las diaclasas de la **Fm. Chon Aike** y además los planos de estratificación abiertos (lajosidad) de la **Fm. La Matilde** son las vías de permeabilidad secundaria que lo caracterizan.

Existe también un mecanismo de recarga asociado, consistente en la concentración rápida del agua meteórica en las pendientes de la unidad geomorfológica Relieve de Erosión (Hernández, 2000), hacia posiciones más bajas donde puede ocurrir directamente el ingreso por las fisuras de la **Fm. Chon Aike**.

La **circulación** se produce por medio de más de un sistema de fisuras, como ha quedado demostrado durante la ejecución de los trabajos de campo. En primer lugar, por la diferencia de alturas potenciométricas entre sondeos muy próximos (la mayoría de ellos surgentes) y más

perceptible como consecuencia de ensayos de bombeo realizados, cuando en algunos pozos de observación no se registraron descensos y sí en otros más distantes del pozo de bombeo.

A fin de proporcionar una idea del sentido general de circulación, que se produce de manera centrípeta hacia las posiciones más deprimidas de la geoforma Bajo Estructural donde se localizó el estudio, se compusieron curvas equipotenciales virtuales (Figura 3) como si se tratase de un único sistema y utilizando una equidistancia que incluyera las diferencias de carga hidráulica. El relevamiento fue realizado en la Primavera de 1997.

La descarga reconocida ocurre hacia el centro de la geoforma, desde donde podría conducirse hacia acuíferos más profundos, dado el mencionado carácter centrípeta del flujo. Existe un manantial próximo al sondeo P 120 (Figuras 3 y 5) en pleno campo de pozos y en el sector más deprimido del gran bajo, que dejó de manar al poco tiempo de comenzarse con el bombeo de ensayo.

Esta circunstancia, unida a la presencia de más de un sistema, motivó que tratara de diferenciarse la ocurrencia de ambos tipos de flujo dentro del sistema fisurado: el "overflow" o descendente y el "underflow" o ascendente. Se prefiere en este trabajo mantener la denominación original (propia de los medios fisurados) para no introducir confusiones con equivalentes para el medio poroso (flujo descendente, flujo superficial, flujo activo o flujo ascendente, flujo profundo, flujo pasivo).

Partiendo de la base de que el punto de descarga (en este caso el manantial) marca el plano de separación entre ambos flujos, se entiende como el bombeo descargó el "overflow" en un corto lapso, y el agua que se extrajo posteriormente fue aportada, al menos en las intermediaciones del campo de bombeo, por el "underflow".

Como tanto las relaciones de campo, poco asociables en el subsuelo entre ambos componentes del macizo fisurado (*Grupo Bahía Laura*) como la incertidumbre en la continuidad de las fisuras abiertas observadas en superficie, (por cerramiento o por relleno) no aportaban mayores evidencias hidrodinámicas pero sí las diferentes alturas hidrostáticas, se recurrió a los elementos de juicio hidroquímicos para tratar de dilucidar las características del flujo, como más adelante se describe.

Resulta necesario acotar que las perforaciones en roca (entre 78 m y 112 m de profundidad en el campo de pozos) fueron realizadas por el sistema rotativo, y por ende no es posible diferenciar la presencia de diaclasas o planos de estratificación en el detrito, principales elementos de discernimiento entre ambas

formaciones en su posición de campo. Esta es la razón por la cual se mantienen como Grupo, especialmente teniendo una similar composición mineralógica producto de únicos episodios eruptivos (Panza et al., 1994).

Respecto a los parámetros geohidrológicos, es sabido que en el caso de fisuras supercapilares como el presente, sin posibilidades de plantear físicamente un sistema de doble porosidad, los coeficientes de Permeabilidad, Trasmisividad y Almacenamiento carecen de sentido físico, por estar fuera del campo de validez de la Ley de Darcy.

Los ensayos de bombeo han aportado valores de caudal característico, transformables en un índice análogo a un coeficiente de Trasmisividad, que en este caso está en valores entre 14 m<sup>2</sup>/día y 200 m<sup>2</sup>/día (Hernández, 2000) sin una clara diferencia entre los caudales provenientes de una u otra formación dentro del Grupo Bahía Laura (Figura 5).

## HIDROQUÍMICA

En la Figura 4 se muestran diagramas que corresponden a diecisiete análisis químicos representativos de aguas subterráneas procedentes de los sondeos situados en la Figura 3, utilizando el sistema de Schoeller cuya rama aniónica posibilita observar las diferencias que a continuación se marcan.

Se trata en general de aguas de baja a media salinidad (TSD 325 ppm a 4835 ppm), la mayor parte por debajo de 2000 ppm, con el cloruro como anión dominante excepto una muestra (P120) donde prevalece el bicarbonato, y sódicas sin excepción.

Evidencias dadas a conocer por Mazzoni (1986) sobre la afinidad de los sulfatos con las tefras, llevaron a plantear la hipótesis de una respuesta diferencial respecto al contenido en sulfatos de las aguas que circulan por los planos de lajosidad de la *Fm. La Matilde*, respecto a las que lo hacen por las diaclasas de la *Fm. Chon Aique*. Mientras que las primeras son de tipo iónico cloruradas-sulfatadas sódicas, las restantes son cloruradas-bicarbonatadas sódicas.

Puede advertirse en los diagramas mostrados en la Figura 4 que las muestras P97, P100, P116, P117, P118, P119, P121, P126, P127, P128, P129 corresponden al primer grupo en coincidencia con una litología mayoritariamente tobácea (*Fm. La Matilde*). Las muestras P115, P122, P123, P124, P125 y P120 en cambio presentan al bicarbonato como anión secundario, e incluso la última es de tipo bicarbonatado clorurado. El tipo de roca para este grupo es predominantemente ignimbrítico (*Fm. Chon Aike*).

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los análisis químicos practicados sobre las 17 muestras de agua subterránea, correspondientes a los sondeos señalados en la Figura 3

Puede advertirse que en los pozos donde el agua es captada desde la *Fm. Chon Aike*, la relación  $\text{CO}_3\text{H}^-/\text{SO}_4^-$  es superior a la unidad, con un extremo de 5.49 en el pozo P120 para un tipo iónico bicarbonatado-clorurado.

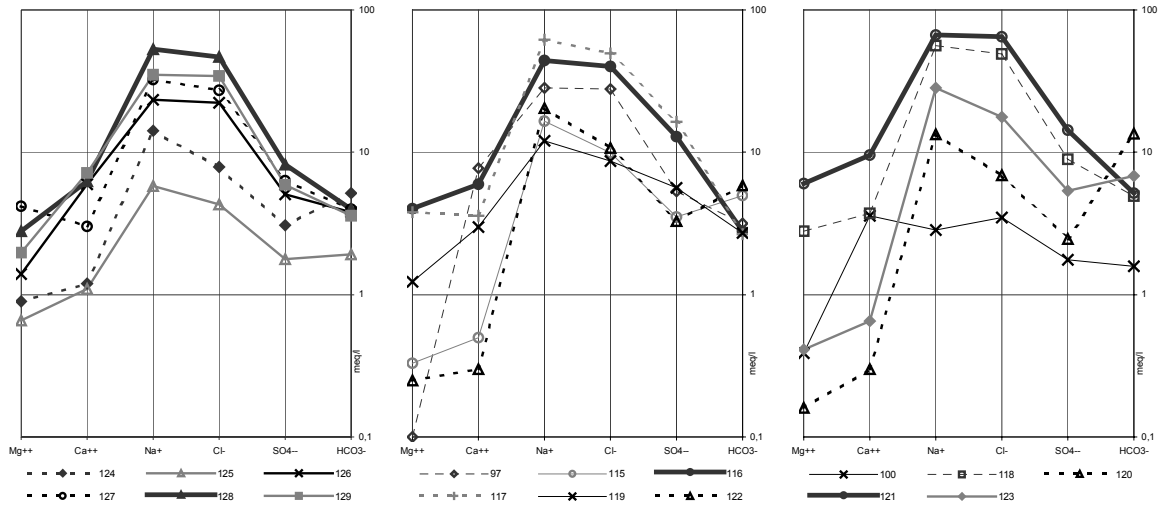


Figura 4: Diagramas de Schoeller

En las muestras provenientes de la *Fm. La Matilde* en cambio, la  $\text{rCO}_3\text{H}^-/\text{SO}_4^-$  resulta francamente inferior a 1. Además de esta Tabla y de los diagramas Schoeller expuestos en la Figura 4, puede apreciarse en la Figura 5 una

vinculación esquemática de la relación iónica mencionada, en función de la geología y la situación espacial de los sondeos seleccionados para componer un perfil representativo.

Pozo	pH	C.E. $\mu\text{s}/\text{c}$	Dureza $\text{ppm}$	Densid $\text{g}/\text{cm}^3$	TSD ppm	$\text{CO}_3\text{H}^-$ meq/l	$\text{SO}_4^-$ meq/l	$\text{Cl}^-$ meq/l	$\text{Na}^+$ meq/l	$\text{Ca}^{++}$ meq/l	$\text{Mg}^{++}$ meq/l	$\text{rCO}_3\text{H}^- / \text{SO}_4^-$	$\text{rCl}^- / \text{CO}_3\text{H}^-$
P 97	7.00	3356	388	1.005	2244	3.17	5.33	27.73	28.48	7.75	0.00	0.59	8.75
P100	6.60	800	199	1.006	448	1.58	1.75	3.49	2.85	3.58	0.39	0.90	2.21
P115	7.40	1370	41	1.002	1210	4.96	3.52	9.93	16.62	0.50	0.33	1.41	2.00
P116	7.00	1967	411	1.005	2858	2.80	12.91	40.05	44.02	5.99	4.03	0.22	14.30
P117	7.70	4150	369	1.007	4193	2.66	16.45	49.64	62.03	3.59	3.78	0.16	18.66
P118	8.07	4005	327	1.007	3864	4.90	8.95	48.91	56.20	3.74	2.79	0.55	9.98
P119			211	1.004	1706	2.72	5.64	8.69	12.01	2.99	1.23	0.48	3.19
P120	8.14	504	23	1.001	826	13.57	2.47	6.88	13.40	0.30	0.16	5.49	0.51
P121			660	1.008	4825	5.19	14.37	64.87	66.99	9.58	6.01	0.36	12.50
P122	7.90	1320	15	1.003	1200	5.84	3.29	10.72	20.49	0.30	0.25	1.78	1.84
P123			53	1.004	1774	6.80	5.37	17.77	28.49	0.65	0.41	1.27	2.61
P124	8.00	1005	105	1.001	952	5.19	3.06	7.90	14.22	1.20	0.90	1.70	1.52
P125	7.80	730	88	1.001	325	1.92	1.77	4.29	5.78	1.10	0.66	1.08	2.23
P126	7.60	2757	328	1.004	1838	3.80	5.08	22.28	23.49	5.99	1.40	0.75	5.86
P127	7.60	3325	359	1.004	2129	4.00	6.31	27.36	32.49	3.00	4.20	0.63	6.84
P128	7.60	3181	450	1.007	3593	4.00	8.18	46.82	53.07	6.24	2.80	0.49	11.70
P129	7.70	3850	456	1.004	2360	3.60	5.93	34.41	35.02	7.19	1.97	0.67	9.56

Tabla 1: Análisis químicos

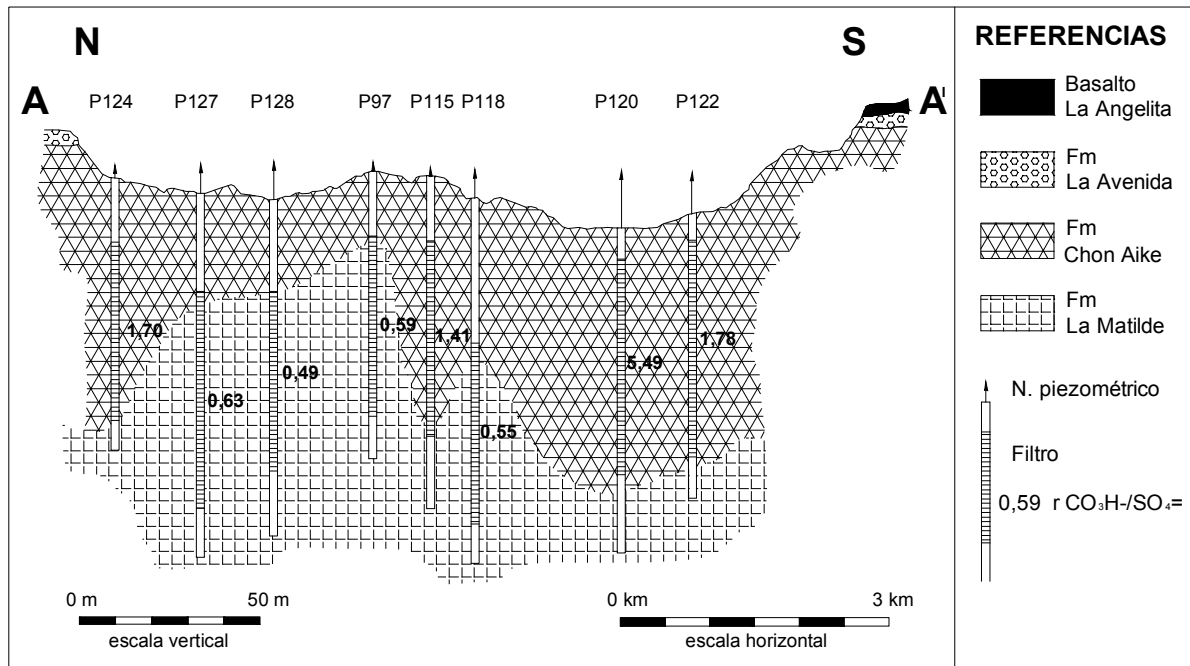


Figura 5: Perfil hidrogeológico esquemático.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El acuífero de fisuras localizado en el Grupo Bahía Laura muestra al menos dos sistemas, distinguibles desde el punto de vista hidráulico, por diferencias en las alturas hidrostáticas, aunque de muy difícil asociación en subsuelo con las litologías reconocidas, ya que las rocas corresponden a un mismo ciclo efusivo con una composición mineralógica similar.

Únicamente son apreciables en afloramientos donde las ignimbritas se hallan más próximas a las antiguas bocas de efusión, pasando a tobas ignimbríticas y tobas en función de la distancia y de las condiciones paleoambientales.

Las muestras de perforación son en cambio menos útiles a los fines hidrogeológicos, ya que como se mencionara provienen de detritos de perforación (cuttings) que como es lógico, no conservan rasgos estructurales testimoniales.

Hubo de recurrirse entonces al comportamiento hidroquímico, hallándose una correspondencia entre las rocas de la *Fm. La Matilde* con aguas cloruradas-sulfatadas sódicas, en función de la presencia de sulfatos en las tobas (Mazzoni, 1986), a la vez que las piroclastitas de nube de la *Fm. Chon Aike* contienen aguas cloruradas-bicarbonatadas (hasta bicarbonatadas-cloruradas en una muestra).

En función de las evidencias proporcionadas por las relaciones de campo, más que en la geología de subsuelo, se plantea

el rol trasmisivo vertical de las ignimbritas fisuradas y el subhorizontal de las tobas a través de los planos de lajosidad.

Corresponderían respectivamente a flujos de "overflow" y "underflow", y la mejor manera que se ha encontrado para evidenciarlo en subsuelo, es la interpretación hidroquímica aportada por la distribución aniónica, en especial por la relación  $\text{CO}_3\text{H}^-/\text{SO}_4^{2-}$ , por encima de la unidad en aguas procedentes de la *Fm. Chon Aike* y francamente por debajo en las que se captaron de la *Fm. La Matilde*.

Si bien los menores contenidos salinos se hallan en general en las muestras con bicarbonatos como anión no-dominante, avalando la hipótesis de sectores de recarga en la *Fm. Chon Aike*, este comportamiento no es tan claro, ya que existen muestras como la P100 (448 ppm) y P126 (1383 ppm) que se apartan de esta regla.

Sintéticamente, el agua subterránea que proviene de la *Fm. Chon Aike* ofrece una clara prevalencia del anión bicarbonato por sobre el sulfato ( $r \text{CO}_3\text{H}^-/\text{SO}_4^{2-} > 1$ ), evidenciado un tránsito rápido que correspondería a un flujo eminentemente descendente ("overflow") a expensas de las diaclasas verticales reconocidas y a la yacencia de la unidad en el espacio.

El agua que procede de la *Fm. La Matilde* es más sulfatada (como anión no-dominante,  $r \text{CO}_3\text{H}^-/\text{SO}_4^{2-} < 1$ ), conducida por planos de estratificación abiertos (lajosidad) por un flujo de tipo "underflow", aún cuando las rocas estén

afectadas en menor medida por el diaclasamiento regional.

## REFERENCIAS

- BLACK, J. 1994. Hydrogeology of fractured rocks – a question of Uncertainty about geometry. *Applied Hydrogeology* 2,3:56-70.
- HERNÁNDEZ, M.A. 2000. Estudio geohidrológico de la región Cerro Rubio- Cerro Vanguardia. Provincia de Santa Cruz (Geohydrological study in Cerro Rubio-Cerro Vanguardia region. Province of Santa Cruz) *Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Naturales y Museo. Universidad Nac. de La Plata*. La Plata.
- HERNÁNDEZ, M.A., González, N. y Sánchez, R.A. 2002. Mecanismos de Recarga de Acuíferos en regiones áridas. Cuenca del Río Seco, Provincia de Santa Cruz, Argentina (Mechanisms of aquifers recharge in arid regions. Rio Seco basin, Province of Santa Cruz, Argentina) *Presentado al XXXII IAH Congress-VI Congreso ALHSUD*. Mar del Plata.
- MAZZONI, M. 1986. Procesos y depósitos piroclásticos (Piroclastic process and deposits) *AGA, Serie "B", Serie Didáctica y Complementaria N° 14*, Buenos Aires.
- PANZA, J.L., ZUBIA, M., GENINI, A. Y GODEAS, M. 1994. Hoja Geológica 4969-II Tres Cerros. (Geologic map 4969-II Tres Cerros) *Progr. Nac. de Cartas Geológicas de la Rep. Argentina 1:250000, Bol. No 213 (Nueva Serie). DNSG-SMN*. Buenos Aires.