

# Contribución al conocimiento de la hidrogeología de las cuencas intraandinas del N de Chile

Orlando Acosta<sup>1,4</sup>, Jordi Guimera<sup>2</sup>, Emilio Custodio<sup>3</sup>, Isabel Ansón<sup>2</sup> y José Luis Delgado<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Chile. jldelgado@collahuasi.cl

<sup>2</sup> Amphos 21 Consulting. jordi.guimera@amphos21.com; isabel.anson@amphos21.com

<sup>3</sup> Depart. Ing. Terreno. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). España. emilio.custodio@upc.edu

<sup>4</sup> Actualmente en Colbún S.A. Chile. oacosta@colbun.cl

Mail de contacto: oacosta@colbun.cl

---

## RESUMEN

La cordillera andina en el norte de Chile es un área muy árida, aunque se puede producir una pequeña recarga pluvial y nival a los acuíferos en áreas recubiertas por formaciones volcánicas ácidas recientes, la que da origen a vertientes, humedales y salares activos. También se encuentran en el área importantes recursos minerales cuya explotación requiere disponer de agua, lo que hace necesario compatibilizar esa demanda de agua con las necesidades de la población y los valores ecológicos. La hidrogeoquímica y en especial los isótopos del oxígeno y del hidrógeno permiten diferenciar los orígenes del agua. Resulta una marcada diferencia de origen entre las aguas subterráneas altiplánicas y las propias de la depresión central. Los isótopos del carbono indican tiempos medios de residencia del agua subterránea en el entorno de 5 000 a 15 000 años.

Palabras clave: Altiplano andino, acuíferos, hidrogeoquímica, isótopos, Norte de Chile, Tarapacá.

---

## ABSTRACT

The Andes Range in northern Chile is a very arid area, albeit a small groundwater rain and snow recharge is possible in an environment dominated by a cover of recent acidic volcanic. This recharge originates springs, wetlands and active salt pans (salarés). Also important mineral resources are found, which need water for their exploitation. This water demand has to be made compatible with population needs and ecological values. Hydrogeochemistry and especially the oxygen and hydrogen isotopes allow differentiating the water origin. A conspicuous difference of groundwater origin between the Altiplano and the central depression groundwater appears. Carbon isotope data show average residence times around 5,000 to 15,000 years.

Keywords: Andean Altiplano, aquifers, hydrogeochemistry, isotopes, Northern Chile, Tarapacá.

---

## Introducción

El norte de Chile es árido. Algunas áreas reciben en promedio menos de 5 mm/a de precipitación, como la Depresión Intermedia entre la Precordillera de los Andes y la Cordillera Costera. En el Altiplano se precipitan actualmente en promedio entre 100 y 200 mm/a como lluvia y nieve, lo que unido a la alta tasa de infiltración en las áreas recubiertas por piroclastos recientes poco retentivos y a la muy escasa vegetación, permite una cierta recarga a los acuíferos, que pudo ser mayor en periodos pasados algo más húmedos. Además se puede producir recarga por escorrentías superficiales alimentadas por manantiales que descargan los acuíferos circundantes y la que se produce en eventos lluviosos ocasionales.

Más de un 80% de las lluvias altiplánicas son de procedencia atlántica por vía transamazónica, con lo que resultan

isotópicamente muy ligeras a causa del largo recorrido continental y de la altitud a la que se producen, hasta más de 5000 m, y con un marcado exceso de deuterio por recirculación de la humedad continental (Aravena *et al.*, 1999; Salati *et al.*, 1979). Actualmente la humedad procedente del Pacífico muy raramente deja sus escasas precipitaciones cerca de la costa. Ocasionalmente alcanzan la Depresión Intermedia y el Altiplano, aunque quizás lo pudieron hacer con mayor frecuencia en épocas pasadas, en las que el bloqueo de la zona de altas presiones atmosféricas costeras se podía haber desplazado durante ciertos periodos más hacia el Norte.

En este ambiente árido las manifestaciones del agua subterránea en forma de manantiales (vertientes) y cursos de agua asociados antes de que se evaporen o infiltren, son esenciales a la vida y a la economía de sus habitantes.

En las numerosas cuencas endorreicas altiplánicas, de orientación N-S, reactivadas y mantenidas por la actividad tectónica y las efusiones volcánicas, se producen áreas cerradas terminales en las que la escorrentía subterránea y superficial interna se evapora y da lugar a salares, con un entorno hídrico de transición y notables bofedales (humedales) de gran altitud. En la Depresión Intermedia también se forman o han formado salares y bosques de freatofitas. Además de los salares en superficie, hay restos de otros que han quedado enterrados como resultado de la relativamente rápida evolución geomorfológica debida al volcanismo y a la tectónica (Acosta *et al.*, 2010; Navarrete *et al.*, 2012). En estos salares domina el NaCl, pero en función de la geohidroquímica local pueden haber depósitos de sulfatos y de carbonatos (Risacher *et al.*, 1999, 2003; López y Garcés, 2002), entre los que en esta área están el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Además existen salmueras subterráneas profundas que se extienden sobre una amplia área alrededor de los salares. Estas salmueras que pueden estar enriquecidas en B y Li, y más raramente de  $\text{NO}_3$ , actualmente son objetivos mineros. En el área existen también acumulaciones muy importantes de sulfuros metálicos que han generado una muy notable actividad minera, en especial para la producción de Cu, de gran importancia nacional.

Para el procesamiento de los minerales hace falta disponer de agua. Ésta se puede captar de los acuíferos locales, con el riesgo de afecciones a los usos humanos preexistentes y a los notables valores ecológicos, bien sea por descenso de niveles freáticos, agotamiento de caudales o contaminación, además de un posible uso importante de reservas multiseculares de muy lenta reposición. Por esta razón se han realizado estudios para conocer y evaluar los posibles impactos y analizar la posibilidad de usar temporalmente esas reservas de agua subterránea.

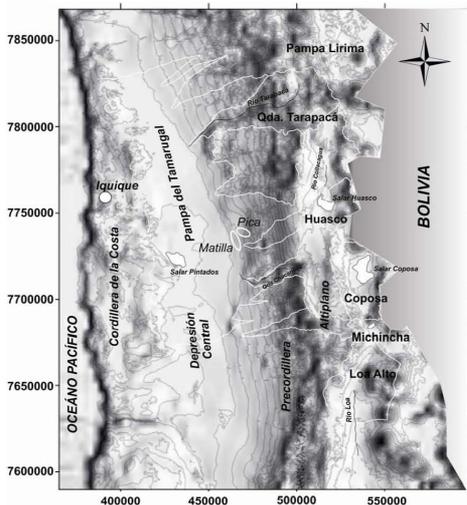
El objetivo de los estudios ha sido esclarecer las relaciones entre los cuerpos de agua subterránea existentes. Aunque los datos disponibles son escasos dada la gran extensión territorial, permiten evaluar la situación.

### Características del área

El área considerada, de unos 25 000  $\text{km}^2$ , se localiza en el norte de Chile, en la Región de Tarapacá (Figura 1), al Este de la Cordillera de la Costa. Comprende la cuenca de la Pampa del Tamarugal (Depresión Intermedia) y las Cuencas Altiplánicas entre la Precordillera y la Cordillera de los Andes, además de un área intermedia (aquí principalmente la de Pica-

Matilla), y considera parte de las quebradas que van desde las zonas altas de la Precordillera hacia la Pampa del Tamarugal. Entre las cuencas altiplánicas, la de Collacagua-Salar del Huasco es de especial interés por disponer de estudios y datos y estar en régimen natural.

Se tiene una alternancia de estructuras tipo horst y graben controladas por sistemas de fallas principales de desgarre con dirección N-S, con un segundo sistema secundario de fallas transversales W-E. Este conjunto da lugar a un relieve en el que dominan las cadenas montañosas, cuya altitud aumenta hacia el E, alcanzando sus cotas máximas de 5500 a 6000 m en el Altiplano Chileno. Existen notables recubrimientos volcánicos ácidos, que cubren una amplia área de la Cordillera Andina en este lugar, con elevados volcanes y extensas áreas de depósitos piroclásticos de caída (tobas de cenizas y lapillis) e ignimbriticos.



**Figura 1.** Mapa de situación, morfológico y toponímico. Los mayores salares terminales se desarrollan en territorio boliviano.

Las fallas de desgarre con dirección N-S, que están relacionadas con la intrusión de pórfidos, posibilitan aperturas que facilitan el flujo subterráneo preferente en esta dirección. No hay evidencias de que las fallas normales de orientación ortogonal y paralela a las anteriores, permitan el flujo en sentido W-E a causa del material triturado que tienen asociado, el cual puede actuar como barrera al flujo. Esta situación confiere una anisotropía a la conductividad hidráulica a escala kilométrica. En las Cuencas Altiplánicas favorece la

permeabilidad en dirección N-S y hace difícil el flujo en dirección W-E aún con gradientes hidráulicos elevados, lo que dificulta la transferencia del agua subterránea desde el Altiplano a los acuíferos topográficamente más bajos del lado oeste. En estos acuíferos la recarga se produciría, en su caso, esencialmente a través de la infiltración de la escorrentía de quebradas que se alimentan en vertientes situadas por sobre los 3500 m y de las esporádicas crecidas actuales o pasadas.

## Resultados

### Método de estudio

Se ha revisado y sintetizado críticamente la literatura relevante existente sobre el área considerada. Tales son: Achurra, 2010; Acosta, 2004; Acosta y Custodio, 2008; DGA, 1998; Magaritz *et al.*, 1989, 1990; Suzuki *et al.*, 1984, 1985, 1989; Thomson *et al.*, 2010; Tröger y Gerstner, 2004; JICA-DGA-PCI, 1995. Ha sido la base para diseñar una red de puntos de muestreo en la que se han tomado muestras de agua para analizar componentes mayoritarios y minoritarios y los isótopos del agua: oxígeno-18 ( $^{18}\text{O}$ ), deuterio ( $^2\text{H}$ ) y tritio ( $^3\text{H}$ ), y del carbono inorgánico disuelto (CID):  $^{13}\text{C}$  y  $^{14}\text{C}$ . Se han reunido unas 180 muestras de agua entre los datos previos existentes y los realizados específicamente para el presente estudio. El tratamiento de esa información se ha hecho mediante métodos clásicos. No se han realizado nuevos ensayos ni estudios hidráulicos.

### Isótopos del agua

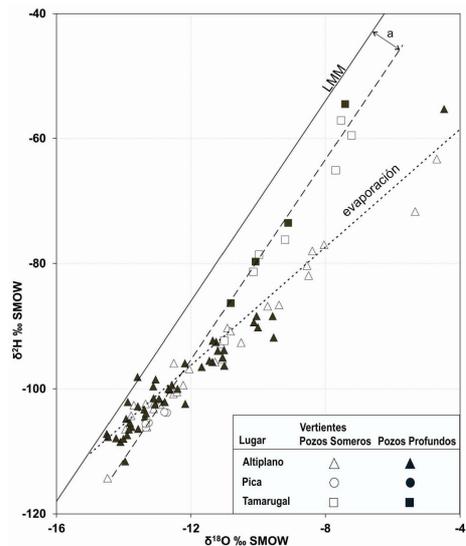
En la Figura 2 se representan los datos de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  para las muestras tomadas en las Cuencas Altiplánicas, área intermedia y cuenca de Pampa del Tamarugal.

Las muestras de Pampa del Tamarugal se agrupan paralelamente a la Recta Meteórica Mundial (RMM) ( $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$ ), con valores  $\delta^{18}\text{O}$  entre  $-7,5\text{‰}$  y  $-11\text{‰}$  y  $\delta^2\text{H}$  entre  $-57\text{‰}$  y  $-86\text{‰}$ , con un desplazamiento que muestra procesos de evaporación previos a la recarga, y tienen muy diversos orígenes, tales como vertientes y escorrentías superficiales, y que pueden incluir el resultado de ambientes climáticos pasados, distintos del actual. Las aguas correspondientes al área de Pica-Matilla son más ligeras y varían en un rango  $-12\text{‰}$  a  $-13\text{‰}$  para  $\delta^{18}\text{O}$  y de  $\delta\text{D} -104\text{‰}$  a  $-106\text{‰}$  para el  $\delta^2\text{H}$ . Las muestras tomadas en las Cuencas Altiplánicas varían en un rango amplio y se disponen según una recta de pendiente aproximada 4, que es característica de procesos de evaporación del agua desde la zona no

saturada. Estas aguas son en origen muy ligeras, con  $\delta^{18}\text{O}$  en el entorno de  $-14\text{‰}$  y  $\delta^2\text{H}$  en el entorno de  $-110\text{‰}$ , considerando un cierto fraccionamiento en la recarga en áreas poco vegetadas. Responden a su procedencia atlántica y transporte transamazónico, con precipitación final en áreas elevadas y frías. Actualmente la composición isotópica de estas lluvias es notablemente más ligera que la de las aguas subterráneas de Pampa del Tamarugal.

La diferente composición isotópica de las aguas de la Pampa del Tamarugal y la de las Cuencas Altiplánicas indica que las aguas subterráneas correspondientes a cada área se han recargado en lugares y condiciones climáticas y altimétricas diferentes.

Las determinaciones de tritio ( $^3\text{H}$ ) están por debajo del umbral de detección (aproximadamente 0,2 UT), lo que indica que se trata de aguas con un tiempo de renovación de por lo menos algunos centenares de años. La única excepción son algunas aguas subterráneas someras en el área intermedia de Matilla, afectadas por actividades recientes de regadío con aguas subterráneas locales, principalmente vertientes o galerías, que han adquirido  $^3\text{H}$  en su contacto con la atmósfera.



**Figura 2.** Relación  $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ . LRM es la recta meteórica mundial. Las aguas de la Pampa del Tamarugal son de origen diverso, con evaporación previa a la recarga, representada por el desplazamiento a. Las del Altiplano y Pica son aguas recargadas a gran altitud que han

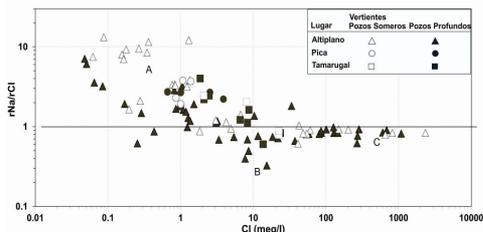
sufrido diversos procesos de evaporación tras la recarga, diferentes de los anteriores.

### Estudio hidrogeoquímico

Las muestras de agua en general presentan un apreciable grado relativo de mineralización a causa de la aridez climática, que evapoconcentra la deposición atmosférica transportada y reciclada, con un ambiente en que el  $\text{SO}_4$  puede dominar sobre el Cl. Así las aguas menos mineralizadas corresponden a las partes altas del altiplano, más lluviosas y con menor evapotranspiración, en áreas en que los suelos son poco retentivos. Se trata de aguas sulfatadas, variables entre sódicas y cálcicas, con una cierta diferenciación entre el lado Oeste y el lado Este fronterizo con Bolivia, con más volcanismo tranquiandesítico reciente y subreciente. El conjunto incluye aguas algo salinas bicarbonatadas, cálcicas o magnésicas, aportadas por los ríos Chislaca, Batea y Piga, que confluyen formando el río Collacagua que discurre por la cuenca del Salar del Huasco, y que se infiltran totalmente antes de llegar al salar y alimentan subterráneamente su periferia. Estas aguas proceden de vertientes en la cuenca y algunas son hidrotermales, lo que indica su procedencia de formaciones profundas y que emergen favorecidas por las fallas N-S. Otras aguas de moderada mineralización, bicarbonatadas sulfatadas, se encuentran en el extremo SE de Pampa del Tamarugal, más próximas a la Precordillera y otras al Salar de Pintados.

Se encuentran también aguas salinas cloruradas, que en general están asociadas a salares actuales o enterrados, bien sea como mezcla con salmueras finales (alto contenido en B y Li), bien como disolución de halita, como lixiviado de antiguos salares, a veces con alto contenido en  $\text{HCO}_3$ . Algo similar sucede en ciertas áreas de la Pampa del Tamarugal.

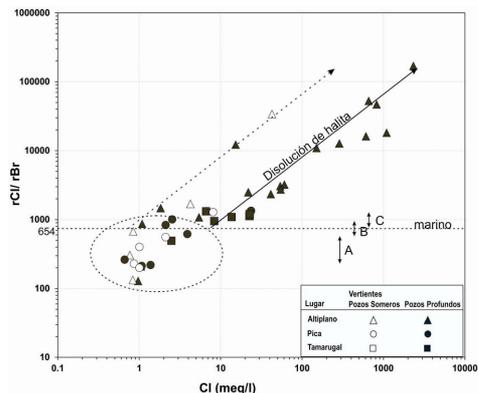
La Figura 3 muestra la relación entre Na y Cl. Un grupo de muestras con  $\text{Cl} < 5 \text{ meq/L}$  tienen  $r\text{Na}/r\text{Cl} > 1$  ( $r = \text{meq/L}$ ) y responden a la modificación de la recarga por aporte de Na de la alteración de los minerales de rocas volcánicas por acción de la acidez que comunica el  $\text{CO}_2$  edáfico, aunque su presión parcial en el gas del suelo sea pequeña por la escasa vegetación. Tales son las aguas muestreadas en las Cuencas Altiplánicas y los pozos y vertientes intermedias del área de Pica-Matilla.



**Figura 3.** Relación  $r\text{Na}/r\text{Cl}$  ( $r = \text{meq/L}$ ) en función de Cl. A: aguas dulces con un notable exceso de Na por meteorización de materiales volcánicos, hasta  $\text{Cl} < 2 \text{ meq/L}$ , con tendencia más acusada para las vertientes del altiplano. B: aguas más mineralizadas, con déficit de Na para algunos pozos profundos altiplánicos, a diferencia de las aguas de Pampa del Tamarugal. C: aguas salinas con un pequeño déficit de Na a causa de la disolución de halita impura y efecto de salmueras residuales.

El valor  $r\text{Na}/r\text{Cl}$  tiende a 1 al crecer el Cl, y corresponde a la disolución de halita en áreas en relación con salares actuales o anteriores o responden a mezclas de las aguas de menor mineralización con salmueras o de disolución de evaporitas.

La Figura 4 muestra un aumento de la relación Cl/Br al crecer la concentración de Cl debido a la disolución de halitas puras, que carecen de Br. Las aguas más diluidas ( $\text{Cl} < 5 \text{ meq/L}$ ) tienen  $r\text{Cl}/r\text{Br}$  entre 100 y 800 y corresponden a los pozos y vertientes del área de Pica-Matilla, y a las vertientes altiplánicas recargadas por la precipitación en áreas altas, en un ambiente no influenciado por salmueras o facies evaporíticas. Algo similar muestra la Figura 5 que relaciona el  $\delta^{18}\text{O}$  con el Cl.



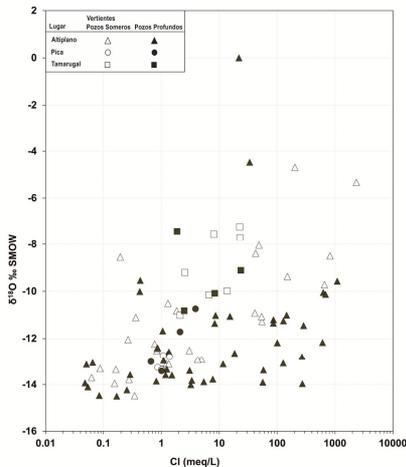
**Figura 4.** Relación  $r\text{Cl}/r\text{Br}$  ( $r = \text{meq/L}$ ) en función de Cl. A: rango esperable atmosférico; B: rango

esperable volcánico; C: posible rango de salmueras residuales de evaporación. Las líneas oblicuas indican la evolución por disolución de halita (NaCl) a partir de dos orígenes distintos del agua dulce.

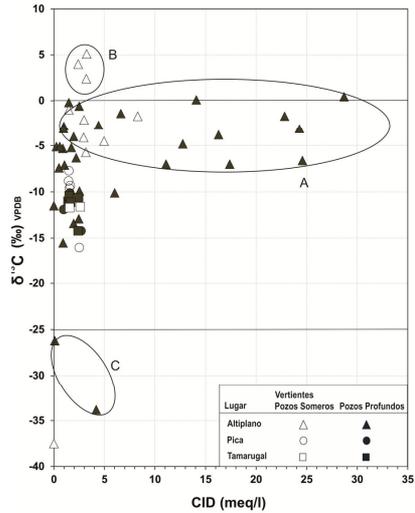
Las aguas que tienen incorporación de salmueras tienen una relación rNa/rLi en el entorno de 100, además de aumentar la concentración en Na. Los valores rNa/rLi próximo a 500 parecen ser los característicos del ambiente natural de recarga. En este grupo se encuentran la mayoría de los puntos muestreados en las Cuencas Altiplánicas, las vertientes de Pica y los pozos de Matilla, que así se diferencian del resto de las áreas de Pampa del Tamarugal.

### Tiempo de renovación

Para obtener una primera estimación de los tiempos de renovación del agua de los acuíferos (volumen almacenado / recarga en el área), que son grandes, se ha tratado de interpretar los contenidos de  $^{14}\text{C}$  (radiocarbono) en el CID (carbono orgánico disuelto) de las aguas muestreadas. Sólo se consideran aquellas muestras que no presentan aportes de C distintos al debido al  $\text{CO}_2$  atmosférico y edáfico. Así se han descartado las muestras con CID > 3 meq/L y  $\delta^{13}\text{C}$  anómalos (Figura 6), en especial



**Figura 5.** Relación  $\delta^{18}\text{O}$ -Cl. Si domina la disolución de halita el  $\delta^{18}\text{O}$  no se modifica mientras que los valores se hacen mucho mayores (más pesados) si hay evaporación.



**Figura 6.** Relación  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$  con el CID (carbono inorgánico disuelto). A: aguas con aporte de C mineral (de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y/o  $\text{CaCO}_3$ ); B: aguas con aporte mineral muy fraccionado ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  precipitado o de salmuera); C: aguas con posible aporte de C por oxidación de  $\text{CH}_4$  generado en humedales (biológico) o volcánico (geológico).

las más salinas, que probablemente contienen una proporción importante de C procedente de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{CaCO}_3$  depositados en los salares y su entorno, o contenido en salmueras residuales (es una situación especial local) o con un gran exceso de Na sobre Cl que pudiera ser debido a aportes de  $\text{CO}_2$  geogénico (volcánico).

En la Figura 7 se representa el  $^{14}\text{C}$  en función del  $^{13}\text{C}$ , remarcando aquellas en que la mayoría del  $^{14}\text{C}$  es edáfico y por lo tanto interpretables como "edad" en el supuesto de flujo de pistón (edad aparente radiométrica). Los valores de rango de edades aparentes corregidas en los puntos muestreados se indican en la Tabla 1, fuera de dos muestras de agua subterránea somera que responden a recarga local reciente en las áreas con uso agrícola en el entorno de Pica-Matilla, una de las cuales tiene  $^3\text{H}$  medible, el  $^{14}\text{C}$  varía entre 0 y 50 pmc. También se eliminan las muestras que pueden reflejar oxidación de  $\text{CH}_4$  biogénico (en humedales) o geogénico (volcánico), así como aquellas que tienen efectos antrópicos recientes en el entorno de Matilla. Para las muestras restantes, en este caso el medio geológico no aporta C de carbonatos minerales de forma significativa.

**Tabla 1.** Número de puntos en el rango de edades aparentes radiométricas,  $T_a$ , miles de años (ka) en base a los resultados por cuencas.

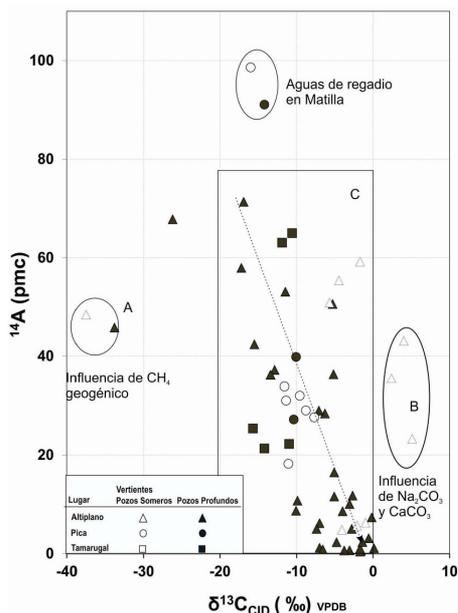
Cuenca	Total	< 5	5 < $T_a$ < 10	10 < $T_a$ < 15	> 20
Altiplánicas	19	0	11	7	6
Pica-Matilla	5	3	1	1	0
Tamarugal	7	1	1	5	0
<b>TOTAL</b>	<b>31</b>	<b>4</b>	<b>13</b>	<b>13</b>	<b>6</b>

Como se trata de acuíferos libres extensos, hay que distinguir entre las muestras de vertientes y de los pozos que extraen agua de todas las profundidades, de las muestras de pozos que corresponden a la parte profunda del acuífero y que hidráulicamente corresponden a un largo recorrido. Éstas tienen un tiempo de renovación que corresponde al tránsito por el medio no saturado en el área de recarga más el de circulación por el acuífero según la correspondiente línea de flujo. Aquellas primeras son una mezcla de aguas recargadas sobre todo el acuífero, cuyo tiempo de renovación depende del paso por el medio no saturado más una ponderación de tiempos de residencia en el acuífero según el conjunto de líneas de flujo. No hay datos para evaluar estas circunstancias, pero se pueden hacer conjeturas. Cabe esperar un tiempo de tránsito por el medio no saturado,  $\tau = \theta g/R$ ,  $\theta =$  humedad volumétrica,  $g =$  espesor,  $R =$  recarga, del orden de algunos miles de años, quizás hasta 30 000 años donde la recarga es menor, o sea valores de  $^{14}\text{C}$  entre 50 y 15 pmc. El efecto de acuífero libre recargado sobre toda su superficie reduce el contenido en  $^{14}\text{C}$  según  $C_0/C = 1 + 0,693mb/TR$ ,  $C_0 =$  valor inicial,  $C =$  valor en la descarga,  $m =$  porosidad,  $b =$  espesor saturado,  $R =$  recarga,  $T =$  periodo radioactivo = 5730 años para el  $^{14}\text{C}$ . Para  $C_0 = 100$  pmc,  $C$  puede variar entre 60 y 30 pmc. Todo ello está en el rango de lo observado de modo que se puede justificar con condiciones de recarga similares a las actuales, pero también con periodos pasados algo más lluviosos (Herrera y Custodio, 2013). Las muestras de pozos profundos pueden tener tiempos de tránsito por el medio no saturado de hasta unos pocos miles de años. El efecto de paso por el medio no saturado suele dominar el proceso.

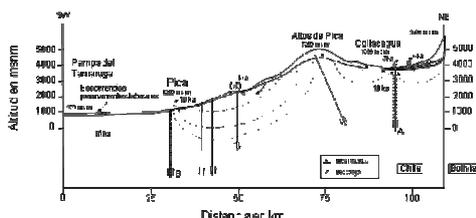
## Discusión

La diferente composición isotópica de las aguas subterráneas entre la Pampa del Tamarugal y las Cuencas Altiplánicas indica que las aguas subterráneas correspondientes a cada cuenca se pueden haber recargado en localidades y en condiciones climáticas y altimétricas diferentes, o tener su origen en precipitaciones de diferente procedencia. Así,

en términos generales se trata de sectores hidrogeológicos distintos, sin conexión. La Figura 8 muestra una síntesis del funcionamiento transversal en una sección SW-NE. La mayor permeabilidad N-S permitiría un flujo de esa orientación, pero por un lado el gradiente hidráulico es pequeño, lo que lo limita, y por otro, la tectónica y el volcanismo crean barreras que cortan la comunicación y producen las descargas que dan origen a los salares cuando la cuenca es terminal, sin salida ni superficial ni subterránea, por lo menos en un cierto tiempo geológico.



**Figura 7.** Gráfico  $^{14}\text{A}$  (actividad de  $^{14}\text{C}$  en porcentaje de carbono moderno, pmc) en función de  $\delta^{13}\text{C}$  del CID. A: aguas del altiplano con posible influencia de  $\text{CO}_2$  procedente de oxidación de  $\text{CH}_4$ , en parte subrecientes; B: aguas del altiplano con influencia del C de depósitos carbonáticos, en parte subrecientes; C: campo de aguas mezclas entre aguas subrecientes y aguas con largos tiempos de residencia en condiciones hidrogeoquímicas variables; parte de los pozos profundos muestran largos tiempos de recorrido. Subreciente quiere decir de hasta pocos miles de años.



**Figura 8.** Funcionamiento hidrogeológico esquemático de una sección SW-NE a través de los Altos de Pica-Collacagua con indicación aproximada de los tiempos de renovación en miles de años (ka) de las aguas de descarga recargadas en los Altos de Pica y en las formaciones volcánicas fronterizas. No hay transferencia significativa hacia la Pampa del Tamarugal. A.- Falla de desgarre permeable. B.- Falla normal regional a modo de barrera.

Los valores de las edades radiométricas aparentes están dentro del orden de las dataciones de restos orgánicos dentro de los materiales del cuaternario de las quebradas que drenan hacia la Pampa del Tamarugal (Nester *et al.*, 2007). De forma simplificada se menciona la existencia pasada de dos “ventanas climáticas” más lluviosas, una más acusada en el Pleistoceno terminal (13000–17000 años BP) y otra menor en el Holoceno reciente (1100–700 años BP) y que se asocia a restos arqueológicos precolombinos. Fuera de estas épocas el ambiente ha sido hiperárido, como lo es en la actualidad. En esos dos periodos, en especial en el primero, se podría haber producido una recarga preferente tanto a los acuíferos de la Pampa Tamarugal como a los de las cuencas altiplánicas. Los tiempos de renovación obtenidos en las vertientes de las diferentes cuencas son compatibles con una recarga en los periodos del Pleistoceno terminal y también con una recarga actual en las áreas que reciben algo de precipitación. Algo similar se presenta y discute en Herrera y Custodio (2013) para el área de la Depresión Intermedia-Cordillera Costera más al sur, en la II Región, aunque el periodo reciente algo más húmedo parece ser anterior, en el entorno de 3000 años BP. No obstante también puede haber recarga actual en el Altiplano y en las cuencas de la Pampa del Tamarugal a partir de la infiltración del agua de las vertientes laterales y de la ocasional escorrentía por las quebradas.

## Conclusiones

No se conoce la deposición atmosférica mineral en el área. Como primer orden de magnitud por la ubicación y circulación

atmosférica podría esperarse un valor medio de 0,1 a 0,3 g m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup> de Cl, incluyendo cierta recirculación local, y mayores valores de SO<sub>4</sub> a causa de recirculación y generación local por emanaciones volcánicas residuales. En las áreas altiplánicas no afectadas por los salares la concentración en Cl del agua subterránea varía entre 40 y 90 mg/L. Eso supondría una recarga posiblemente entre el 0,9 y 4,5% de la precipitación, o sea entre 1 y 6 mm/a. Es sólo una aproximación muy gruesa, que además puede fallar si los contenidos en Cl no son estacionarios sino que responden a otras condiciones climáticas. Una recarga en torno a 6 mm/a está de acuerdo con resultados de balances de agua en el suelo, que apuntan hacia 6,5 - 10 mm/a (5 a 8% de la precipitación).

A nivel regional, el flujo subterráneo en las cuencas altas está condicionado por el estilo estructural, que facilita el flujo del agua subterránea en sentido N-S pero que lo dificulta en sentido E-W. No se justifican flujos significativos de agua subterránea entre las cuencas altas y la Pampa del Tamarugal.

Los isótopos estables del agua permiten determinar los procesos que afectan al agua en los diferentes ámbitos, fundamentalmente evaporación y altitud de recarga, y diferencian claramente las aguas de las cuencas altiplánicas muy ligeras de las de la Pampa del Tamarugal, en general más pesadas y que no son compatibles isotópicamente con una recarga en las zonas altiplánicas. Lo mismo se deduce del estudio hidrogeoquímico.

La recarga actual en el Altiplano se produce durante el llamado “invierno boliviano”, con frentes de humedad que provienen del Atlántico. En cambio, la magnitud actual de la lluvia en la Pampa del Tamarugal no justifica una recarga difusa actual, aunque puede existir a partir de las vertientes laterales o de escorrentías ocasionales, o ser el resultado de épocas anteriores más húmedas, con una posible influencia de frentes de precipitación del Pacífico, isotópicamente más pesados.

Las vertientes y pozos en el lado oriental de la Pampa del Tamarugal, en el área de Pica - Matilla, a cota más elevada, tienen una composición isotópica muy ligera que se atribuye a que su zona de recarga está en los Altos de Pica, en la Precordillera, a cotas similares al resto de las cuencas altiplánicas. La recarga en estas áreas altas alimentaría a la vez e independientemente ambos lados.

El estudio de los isótopos del carbono indica tiempos de renovación de las aguas subterráneas entre 5 000 y 15 000 años,

compatibles con sus condiciones de recarga actual y también con una posible paleorecarga.

Las “edades” más antiguas obtenidas corresponden a muestras de pozos profundos de la cuenca altiplánica de Coposa, por razón del largo recorrido en flujo de pistón

El hecho de que el agua extraída en algunos de los pozos en explotación muestren edades aparentes muy antiguas no implica necesariamente que a nivel de acuífero o de cuenca solamente se estén explotando recursos de agua que no se renueva.

## Agradecimientos

Se agradece a Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi el haber permitido usar los datos obtenidos recientemente en los estudios hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos del área que ha llevado a cabo con el apoyo de Amphos21.

## Referencias

Achurra, L. 2010. Estudio hidrogeoquímico sobre la interacción de aguas subterráneas profundas y someras en Pampa Lirima, Norte de Chile. Tesis de Máster en Hidrología Subterránea, *Fundación UPC*. Barcelona: 107 pp.

Acosta, O. 2004. Impacto de las extracciones de agua subterránea en el salar del Huasco, Tesis de Máster en Hidrología Subterránea, *Fundación UPC*. Barcelona: 306 pp.

Acosta, O. y Custodio, E. 2008. Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile). *Boletín Geológico y Minero*, 119 (1): 33–50.

Acosta, O., Rengifo, P. y Dzogolyk, E. 2010. Saline groundwater: An alternative for the sustainable exploitation of Andean highland groundwater reserves. *Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Congress on Water Management in the Mining Industry*. Santiago, Chile: 157-165

Aravena, R., Suzuki, O., Peña, H., Pollastri, A., Fuenzalida, H. y Grilli, A. 1999. Isotopic composition and origin of precipitation in Northern Chile. *Applied Geochem.* 14 (4): 411–422.

DGA 1998. Evaluación de recursos hídricos en el sector de Pica, hoya Pampa del Tamarugal, I región. Dirección General de Aguas. Santiago.

Herrera, Ch. y Custodio, E. 2013. Origen de las aguas de los manantiales costeros de la Cordillera del norte de Chile en el entorno de Antofagasta. *Revista Geológica de Chile* (en evaluación).

JICA-DGA-PCI. (1995). The development of water resources in northern Chile, supporting report B: geology and groundwater.

López, P.L. y Garcés, I. 2002. Evolución química de las salmueras del salar de Huasco (Chile) en condiciones experimentales controladas. *Rev. Real Academia de Ciencias*. Zaragoza, 57: 201–209.

Magaritz, M., Aravena, R., Peña, H., Suzuki, O. y Grilli, A. 1989. Water chemistry and isotope study of streams and springs in Northern Chile. *J. Hydrol.*, 108, 323–341.

Magaritz, M., Aravena, R., Peña, H. Suzuki, O. y Grilli, A. 1990. Source of ground water in the deserts of Northern Chile: Evidence of deep circulation of ground water from the Andes. *Ground Water*, 28 (4): 513–517.

Navarrete N., Vergara C., Acosta O., Cáceres J., Garcés S., Avilés F., Inostroza C., Avendaño V., Ramírez E., López L. y Rengifo P. 2012. Nuevos antecedentes en la estratigrafía profunda de la cuenca del Salar de Coposa (20°30'–20°50'S). *Actas del XIII Congreso Geológico de Chile*, Antofagasta, Chile: 3 pp.

Nester, P.L., Gayó, E., Latorre, C., Jordan T.E. y Blanco N. 2007. Perennial stream discharge in the hyperarid Atacama Desert of northern Chile during the latest Pleistocene. *Proc. Natl. Acad. Science USA*, 104 (50): 19724–19729.

Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C. 1999. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: Regiones I, II y III., Chile. *Convenio de Cooperación DGA-UCN-IRD. MOP. Vol I: 1–89 y Vol II: 1–207*. Santiago.

Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C. 2003. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth–Science Reviews* 63: 249–293.

Salati, E., Dall'Allio, A., Matsui, E. y Gat, J.R. 1979. Recycling of water in the Amazon Basin: an isotopic study. *Water Resources Research*, 15: 1250–1258.

Suzuki, O., Aravena, R. y Fritz, P. 1984, 1985, 1987. Publicaciones diversas sobre hidrología isotópica y el recurso del área Esmeralda–Pica–Matilla. Comisión Chilena de Energía Nuclear. Santiago.

Tröger, U. y Gerstner, D. 2004. Estudio de investigación de la situación hidrogeológica en la Formación los Altos de Pica. *Convenio DGA–CONADI. SDT.Nº174*. 25 pp. Santiago.