

Exploración y Explotación de Salmueras Enriquecidas en Litio y Potasio en Salares de la Puna Argentina

Rodolfo García¹, Verónica Rocha Fasola¹, Federico Moya Ruiz² y Esteban Tálamo³

¹Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales. Escuela de Geología. Cátedra de Hidrogeología. Bolivia 5151. Tel: 3874255511. (4400) Salta. Argentina.

²CONHIDRO S.R.L. Av. Batalla de Salta 962. Tel: 3874251302. (4400) Salta. Argentina

³CONHIDRO S.R.L. Dr. Tomás Vergara 1556. Tel: 03833454148. (4700) S. F. del Valle de Catamarca. Argentina.

Mail de contacto: rgarciamaurizzio@gmail.com

RESUMEN

Los salares de la Puna Argentina se han originado bajo extremas condiciones de aridez. Estos cuerpos, ocupan la parte más baja de extensas cuencas endorreicas constituyendo en muchos casos ricas reservas de boratos y sulfatos que son explotados por la minería tradicional. Sin embargo, las salmueras que saturan las facies del cuerpo del salar, conforman en muchos casos, importantes reservas de Litio, Potasio y Sodio. Estas reservas deben ser exploradas, explotadas y manejadas siguiendo los conceptos de la hidrogeología o hidrología subterránea, debido a que a diferencia de la exploración y explotación minera tradicional, en estos casos, la mena (la salmuera) es un fluido y como tal, es dinámica. En este trabajo se presenta, entre otros aspectos, la dificultad para establecer el valor de las componentes del balance hidrogeológico y los serios condicionantes que existen en la disponibilidad de agua dulce que pueda ser utilizada en los procesos industriales.

Palabras clave: Litio, Salares, Puna, Hidrogeología, Minería.

ABSTRACT

The salars of the Puna Argentina were originated under extreme arid conditions. These deposits occupy the lower part of large endorreic basins and constitute in many cases rich reserves of borates and sulfates exploited by traditional mining. However, the brines that saturate the salar body form in many cases significant reserves of lithium, potassium and sodium. These reserves should be explored, exploited and managed following the concepts of hydrogeology because unlike traditional exploration and mining, in these cases, the ore (brine) is a fluid and as such is dynamic. In this paper, among other things, it is exposed the difficulty of establishing the value of the groundwater balance components and the serious conditions that exist in the availability of fresh water that can be used in industrial processes.

Keywords: Lithium, Salars, Puna, Hydrogeology, Mining.

Introducción

La Puna constituye la terminación austral de la alta plataforma de los Andes Centrales, conocida como Altiplano. El ambiente puneño se caracteriza por ser una amplia altiplanicie surcada por numerosos cordones montañosos de alturas variables que encierran y delimitan entre sí extensas depresiones, que suelen conformar áreas de escurrimiento centrípeto, situadas a considerables alturas ya que la gran mayoría de los bordes de las salinas y salares se encuentran a una cota media de 3.800 metros sobre el nivel del mar (García, et al, 2011).

El clima de la Puna es de tipo Continental Andino intenso, alcanzando a poseer condiciones de clima desértico. El área se caracteriza por presentar escasas

precipitaciones líquidas, originadas en la gran mayoría de los casos en las masas de aire atlántica que provienen del este. En el dominio andino, la extrema sequedad del aire, elevada componente de evaporación, los vientos constantes, las bajas temperaturas y la pronunciada amplitud térmica, hacen de esta región un lugar extremadamente difícil para el desarrollo de la vida y de las actividades del hombre.

En el sector más occidental, los picos que pueden alcanzar la zona de circulación atmosférica del Pacífico, presentan sus cumbres nevadas por encima de los 6.000 msnm. En la época estival (diciembre a marzo), las lluvias normalmente no superan los 100 mm anuales; las nevadas en junio a agosto y granizadas en abril-mayo y septiembre-octubre, son comunes en casi todo el ámbito de la Puna (Bianchi,

2006). Gran parte de la superficie ocupada por los salares de la Puna Argentina se encuentra por debajo de la isohietas de 100 mm/año. Es posible diferenciar entre salares húmedos localizados al oriente (Olaroz, Cauchari, Pozuelos, Centenario, Ratones y Hombre Muerto), y salares secos ubicados al occidente (Jama, Rincón, Pocitos, Tolillar, Arizaro, Incahuasi, Llullaillaco, Río Grande y Antofalla). Los primeros se ubican entre las isohietas de 50 a 100 mm/año, mientras que los segundos se ubican en la zona por debajo de la isohieta de 50 mm/año.

Geológicamente, el área de estudio se caracteriza por una tectónica de horst y graben con la formación de un sistema de cuencas endorreicas, donde los rasgos positivos están formados por cadenas montañosas plegadas con núcleos de basamento Paleozoico, mientras que los depocentros originan cuencas sedimentarias propicias para la acumulación de sedimentos clásticos y evaporíticos, con intercalaciones de depósitos de origen volcánico, principalmente del Terciario (Alonso y Gutiérrez, 1986).

El agente modelador del relieve, la erosión fluvial, permanece casi inactiva gran parte del año, cobrando energía únicamente en la restringida época de lluvias, produciendo la remoción de sedimentos preparados por la acción meteórica. Las geoformas más característica son los bolsones intermontanos que conforman amplias cubetas rellenas de sedimentos coluviales y aluviales; siendo en la mayoría de los casos común que en el centro de estas depresiones se desarrollen salinas o salares. Por otra parte, y como rasgo distintivo, se observan amplios conos aluviales y sedimentos de bajadas que en las zonas distales se interdigitan con los depósitos evaporíticos de los salares (Igarzábal y Poppi, 1980).

En los últimos años, muchos salares de la Puna Argentina han sido objeto de exploración en búsqueda de salmueras enriquecidas principalmente en Litio y Potasio, debido a la gran demanda mundial de estos elementos. En estos momentos, de los numerosos proyectos de exploración que se están desarrollando, solo unos pocos se encuentran en etapa de explotación de salmueras y producción de sales de Litio y Potasio (García, et al, 2011).

Exploración Hidrogeológica en Salares

Luego de numerosas experiencias propias y de terceros, se puede expresar que la secuencia metodológica básica para la exploración de salmueras en ambientes

extremos como los salares de la Puna Argentina debe incluir, entre otros aspectos fundamentales:

- 1) Análisis y valoración de antecedentes.
- 2) Caracterización del ambiente hidrogeológico mediante el análisis de la geología de superficie (litología, estratigrafía y estructura) y de subsuelo (geofísica).
- 3) Perforación de pozos.
- 4) Muestreo geoquímico de salmueras para analizar variaciones laterales y en profundidad de las anomalías de Litio, Potasio, Boro, etc.
- 5) Obtención de muestras litológicas de las facies que funcionan como almacén (para evaluación de porosidad, permeabilidad, etc.).
- 6) Determinación de parámetros hidráulicos de los acuíferos.
- 7) Balance hidrogeológico.
- 8) Modelación numérica preliminar del reservorio que contemple mínimamente el modelo hidrogeológico conceptual del lugar.

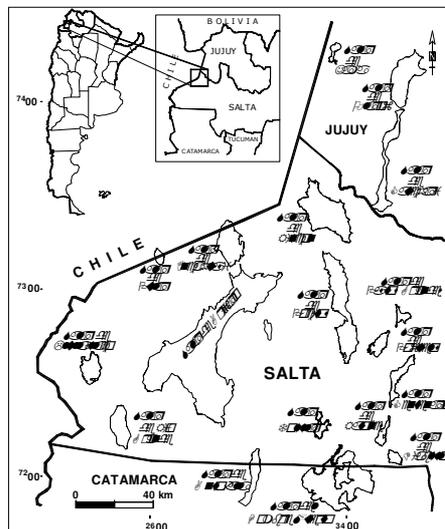


Figura 1. Ubicación de los principales salares de la Puna Argentina.

Antecedentes y Ambiente Hidrogeológico

Uno de los aspectos más importantes durante la etapa inicial de la investigación hidrogeológica de la Puna Argentina está relacionado a la falta de antecedentes directamente vinculados a los recursos hídricos subterráneos. Esta situación es casi una constante en la región debido a que durante mucho tiempo la Puna ha sido un lugar aislado, con escasa infraestructura, población muy

dispersa y, una actividad económica relativamente pobre. De esta manera, los estudios geológicos que se han efectuado en muchos lugares son a nivel regional y, cuando existen con mayor detalle, son puntuales y están directamente vinculados a proyectos de la minería tradicional (obtención de metales, rocas de aplicación, cosecha y extracción boratos, sal de mesa, etc.). Esta situación determinó entonces que sean nulos o muy escasos los antecedentes y datos vinculados al ciclo hidrológico del agua (precipitación, escurrimiento fluvial y evapotranspiración), lo que se traduce en la imposibilidad de poder cuantificar estos parámetros y con ello elaborar balances tentativos en un ambiente de pobres precipitaciones, escasos ríos de régimen permanente y elevada tasa de evaporación potencial anual.

El ambiente hidrogeológico de la mayoría de los salares de la Puna Argentina puede sintetizarse en la presencia de una cuenca hidrológica, donde se desarrollan numerosos cauces de régimen transitorio y uno o dos cursos principales que excepcionalmente pueden alcanzar el borde del salar, ya que éstos se infiltran casi totalmente en las llanuras aluviales, que poseen suelos poco desarrollados con gran capacidad de infiltración (García et al, 2011; Moya Ruiz et al, 2007; Vinante, 2003).

De acuerdo a la historia geológica de cada una de estas cuencas cerradas, los salares pueden ser inmaduros o maduros. Los primeros están caracterizados fundamentalmente por la presencia mayoritaria de facies clásticas, dispuestas en camadas, que se intercalan con pequeños niveles de evaporitas (principalmente, halita). Los salares maduros, en cambio, se caracterizan por un dominio de facies evaporíticas (cloruros, sulfatos, boratos) sobre las clásticas (arenas, gravas y arcillas).

El aspecto fundamental entre ambos tipos de salares está referido al movimiento del agua subterránea ya que en el primer caso el flujo es claramente en un medio poroso; mientras que en el segundo, el movimiento del agua parece responder a un sistema pseudokárstico (Conhido, 2007, 2008, 2009 a y b, 2010, 2012 a, b y c). Como ejemplo de salares inmaduros se pueden mencionar a Olaroz y Cauchari en la provincia de Jujuy; Pozuelos, Centenario y Ratones en la provincia de Salta. Ejemplos de salares maduros lo conforman Rincón, Arizaro, Río Grande y Pocitos, entre otros, en la provincia de Salta; Hombre Muerto y Antofalla en la provincia de Catamarca.

El ambiente hidrogeológico donde se desarrollan los salares, pertenecen a Provincias

Hidrogeológicas de Frente Montañoso, según criterio de Issar y Passchier (1990); donde la zona de aporte a la recarga es mucho mayor en superficie que aquella ocupada por el reservorio.

Estos ambientes se caracterizan por la presencia de agua salada y salmueras en facies evaporíticas y clásticas, mientras que en los conos y bajadas aluviales formadas por los ríos, los reservorios son de origen clástico exclusivamente y almacenan agua dulce, salobre y salada.

Geología de Superficie y de Subsuelo

Durante la etapa de exploración, el análisis de la cartografía y la comprensión de la geología de cada ambiente en particular, debe considerarse fundamental. En la Puna Argentina, como ya se expresó anteriormente, los estudios geológicos más detallados están directamente vinculados a algún tipo de prospecto minero, aunque debe señalarse que el nivel de levantamiento geológico actual efectuado por el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), se considera suficiente para esta etapa. En muchos lugares también existen excelentes trabajos de tesis de grado y doctorales que aportan información que de otra manera habría sido muy difícil de disponer.

Conocido el ambiente geológico, con identificación de unidades estratigráficas, secuencias litológicas, estilo estructural y, en definitiva, su historia geológica, es necesario establecer y conocer las propiedades y estructura de las rocas y/o sedimentos, en profundidad.

Para lograr este último objetivo, se debe acudir a herramientas de la prospección geofísica entre los cuales han resultado más útiles para los fines perseguidos los métodos eléctricos (Sondeos Eléctricos Verticales o SEV, Magnetotelúrica o MT y, últimamente, Tomografía Eléctrica). También, en algunos proyectos, se ha utilizado con cierto grado de éxito la gravimetría, fundamentalmente en la etapa de tratar de establecer el espesor de potentes secuencias sedimentarias que rellenan las depresiones.

El método del SEV es una herramienta sencilla que ha probado su eficacia en la identificación de facies sedimentarias saturadas con agua dulce y salmueras, principalmente en los conos y bajadas aluviales que se encuentran adosados a los sistemas montañosos y que se interdigitan con los sedimentos del salar propiamente dicho (Conhido, 2008, 2009 a y 2012 b). También han resultado muy útiles al momento de diferenciar la zona de interfase o

cuña entre el agua dulce almacenada en estos cuerpos sedimentarios y la salmuera que satura los depósitos del salar (Conhidro, 2009 a y 2012 b). Muchos son los ejemplos de salares en donde con el método del SEV se ha podido identificar claramente una zona superficial extremadamente conductiva y una inferior muy resistiva, principalmente en aquellos donde el cuerpo del salar está formado por halita; lo que se ha interpretado como una zona donde la halita se encuentra fracturada, con oquedades y cavernas (parte conductiva) y donde la halita se encuentra compacta y masiva (zona resistiva) (Conhidro, 2008, 2009 a y 2012 b).

La aplicación de MT en varios proyectos mineros en salares, permite señalar que el mayor aporte de esta herramienta está vinculado a la obtención de datos profundos (allí donde normalmente los SEV, pierden detalle) de las secuencias de relleno que conforman el salar y, muchas veces, en la identificación del basamento que conforma la base del relleno.

Como ejemplo se puede citar que con esta herramienta se ha determinado un espesor de facies evaporíticas de 700 metros en el Salar de Antofalla (provincia de Catamarca) y 300 a 400 metros de relleno sedimentario en el Salar de Pozuelos (provincia de Salta) (Conhidro, 2008 y 2009 a).

Estudios gravimétricos señalan profundidades de aproximadamente 700 metros de halita en la Subcuenca Occidental del Salar del Hombre Muerto (provincias de Catamarca y Salta) y, unos 600 metros de potencia de facies clásticas de relleno en la Subcuenca Oriental del mencionado salar (Conhidro, 2012 b). En el Salar de Rincón (provincia de Salta) se señala hasta 700 metros de espesor del cuerpo halítico (Conhidro, 2012 a).

Perforación de Pozos Exploratorios

Una etapa de vital importancia en la caracterización hidrogeológica de salares es la perforación de pozos exploratorios. En esta etapa la técnica más empleada es la perforación con sistema de diamantina (DDH), destinada a obtener testigos de las secuencias atravesadas para ser luego estudiados geológicamente (litología, mineralogía, etc.) o bien para efectuar análisis geoquímicos (dataciones, inclusiones fluidas, etc.) y físicos (porosidad, fracturas, etc.) con mucho detalle.

La mayoría de los pozos son realizados en diámetro NQ y BQ, aunque en algunos casos se efectúan en diámetro PQ y deben ser distribuidos de una manera tal que se pueda obtener la mayor información areal de las distintas unidades litológicas presentes y sus

variaciones faciales. En cuanto a la profundidad de exploración, normalmente depende si se trata de un salar maduro o inmaduro.

En el primer caso los pozos deben investigar hasta una profundidad donde se advierta que la halita se presenta compacta y maciza, señal de que la porosidad ha disminuido o desapareció casi por completo. Este efecto se ha observado en varios salares que el cuerpo principal o núcleo de halita se encuentra muy fracturado y con evidentes procesos de disolución hasta una profundidad variable entre 30 y 60 metros, alcanzando valores típicos de 10 % y máximos de hasta 25 % e incluso superiores. A partir de esa profundidad la porosidad suele disminuir drásticamente a valores medios de 2 % y, en muchos casos, incluso desaparecer completamente. En algunos casos, como en el Salar del Hombre Muerto y de Río Grande, se han observado además de las variaciones verticales, cambios laterales de igual intensidad, a distancias de tan sólo 50 metros, con diferencias de hasta 10 veces en los caudales específicos de los pozos (Conhidro, 2012 b y c).

En salares inmaduros la profundidad de exploración con diamantina suele ser claramente mayor ya que dependiendo de la historia geológica de cada salar en particular, puede presentarse una espesa cubeta con sedimentos detríticos que tienen porosidad primaria a cualquier profundidad. En este caso, en la mayoría de los salares argentinos, se han investigado hasta los 250 metros aproximadamente y, solo algunos pozos han avanzado más allá de esa profundidad.

Una desventaja de la perforación con diamantina es la poca recuperación de material poco consolidado o inconsolidado, por ejemplo el muestreo de arenas acuíferas.

El otro tipo de perforación que se suele utilizar es la rotativa clásica con trépanos triconos, en este caso se deben emplear también lodos especiales debido a que los lodos bentónicos se degradan totalmente al usar como base acuosa una salmuera. Estos lodos especiales, biodegradables, permiten mantener estables las paredes del pozo y elevar los fragmentos de cutting.

En salares como Pozuelos y Antofalla se realizaron pozos con el sistema rotativo tradicional, pero inyectando aire comprimido en vez de lodo de perforación, con muy buenos resultados, tanto en el avance de perforación como en el muestreo geológico. Sin embargo, la profundidad que se puede alcanzar utilizando esta metodología está limitada a unos 100 metros ya que para avanzar más allá es

necesario un equipo compresor de muy importante porte. La ventaja más apreciada en este caso es que las muestras de cutting provienen sin ninguna interferencia de lodo.

De acuerdo a la experiencia de los autores, en la mayoría de los salares, se ha sobredimensionado el uso de diamantina en detrimento de los pozos efectuados por sistema rotativo con tricono. Esta situación está vinculada claramente a que en casi todos los proyectos de exploración de salmueras, se abordaron desde un punto de vista de la minería tradicional y no desde la óptica hidrogeológica.

Este hecho ocasionó algunos serios problemas en muchos salares ya que a partir de ensayos de air lift en pozos de diamantina se han extrapolado caudales de producción que luego se pudo comprobar que se encuentran muy lejos de los reales cuando se hace un pozo tradicional para la captación de agua.

En otros casos se ha podido observar que en algunos proyectos, las empresas que efectuaron pozos con sistema rotativo con tricono, con comprobada experiencia en perforación en la minería tradicional, fracasaron notablemente al efectuar pozos de captación de agua. Este último hecho se debe fundamentalmente a la falta de manejo y técnica en la construcción de éstos pozos comparado con aquellas empresas que tienen experiencia en la construcción de pozos de captación de agua. Las mayores falencias que se han observado estuvo en el diseño de los pozos, en la inadecuada elección de aberturas de filtros y prefiltros, cálculo de volumen de grava, etc., razón por la cual muchos pozos construidos de esta manera han resultado inservibles.

Muestreo Geoquímico

En realidad el muestreo geoquímico de las salmueras se debe efectuar en dos etapas muy diferentes de un proyecto de exploración. Los primeros muestreos se realizan en la etapa inicial, es superficial a subsuperficial y fundamentalmente consiste en realizar una grilla en el salar, luego construir pequeños pozos con una pala barreno y/o retroexcavadora hasta alcanzar el nivel freático. Aparte de obtener las muestras debidamente clasificadas e identificadas, en el campo se deben realizar determinaciones de Conductividad Eléctrica, pH, Eh, Temperatura y Densidad. Estas muestras son enviadas al laboratorio para determinaciones específicas de Litio, Potasio, Sodio, etc.,

La segunda etapa de muestreo de salmueras se realiza cuando se finalizaron los pozos de exploración. En este caso, uno de los

aspectos más importantes es observar si existen variaciones en las concentraciones de Litio, Potasio, Sodio, Boro y Magnesio, entre otros, con respecto a la profundidad. Cuando se utilizan pozos de diamantina, se obtienen muestras secuenciales utilizando en la mayoría de los casos packer o bien un low flow. En el caso de pozos realizados con método rotativo tradicional y entubado con cañería ciega y filtros, las muestras de salmueras para análisis se obtienen durante la etapa de bombeo y se observa si existen variaciones temporales en las concentraciones.

Parámetros Hidráulicos de Reservorios

Uno de los aspectos más sensibles en la evaluación y estudio de los reservorios de salmueras está relacionado directamente a la determinación de los parámetros hidráulicos. Es opinión de los autores de que en muchos salares de la Puna Argentina este punto ha sido y sigue siendo uno de los mayores condicionantes. Esto se debería a:

1°) En varios casos se ha podido advertir que la etapa de evaluación de los reservorios de salmueras no ha sido correctamente dimensionada.

2°. Muchas veces fue valorada de manera errónea y,

3°. Algunas veces, ha sido tratada por personas que carecen de la formación necesaria para el tratamiento de los datos.

Con respecto al primer punto, se puede señalar que en muchos proyectos se ha podido observar que el número de pozos de bombeo y piezómetros empleados para efectuar ensayos de bombeo ha sido insuficiente. En efecto, si se considera la extensión areal de los salares y la potencia de las secuencias sedimentarias involucradas, se entiende que para obtener valores representativos de los parámetros hidráulicos se deben plantear mínimamente cuatro a seis campos de bombeo, construyendo un número conveniente de piezómetros de observación y de esta manera observar en distintas direcciones el comportamiento del reservorio. Esta situación también es cierta en cuanto a la profundidad de los pozos de bombeo y piezómetros ya que en la mayoría de los casos éstos son pozos parcialmente penetrantes y, muchas veces se ha observado que el diseño del pozo de bombeo y de los pozos de observación varían tanto que es extremadamente difícil asignarle representatividad a los datos de descenso del nivel piezométrico.

En el segundo caso, uno de los mayores problemas se ha observado en aquellos

reservorios de halita fracturada, con oquedades y verdaderas cavernas en donde se realizaron ensayos de bombeo con pozos de observación y los datos fueron tratados como si el flujo fuese en un medio poroso típico. En estos casos casi siempre se obtuvieron valores de Transmisividad, Coeficiente de Almacenamiento y Permeabilidad extremadamente altos que luego no se conciben con lo que se observa en el campo. La explicación podría encontrarse en que en realidad, el medio de circulación se comporta más parecido a un sistema kárstico que a un medio poroso.

El tercer escenario se observó en algunos casos donde los datos de ensayos de bombeo fueron tratados por personas con escasa formación hidrogeológica, obteniendo parámetros incoherentes ya que los datos originales presentan fuertes inconsistencias, principalmente vinculadas a errores en mediciones de los niveles dinámicos, falta de precisión en los caudales de ensayo y, lo más serio, de que en muchos ensayos se advierte que los mismos se llevaron a cabo en pozos que aún están en proceso de desarrollo o que directamente les falta desarrollo, influenciando así en forma directa sobre los parámetros hidráulicos del pozo y, por supuesto, sobre los del acuífero.

Otro hecho extraño observado en salares inmaduros, como Olaroz y Cauchari, donde se han puesto en producción en forma conjunta secciones halíticas y clásticas, es que los ensayos de bombeo escalonados, utilizados para definir los parámetros hidráulicos del pozo, presentan un comportamiento inverso a la teoría (Conhidro, 2011). Los caudales específicos aumentan a medida que se incrementa el caudal de explotación, no siendo posible ni real, aplicar los métodos comunes de Jacob o de Hantush-Bierschenk y de Rorabaugh, para la determinación de la ecuación de descensos del pozo y definir los caudales máximos y eficiencia. Se ha observado que este hecho fue muchas veces ignorado al momento del análisis o confundido con problemas de desarrollo lo que obligó a la repetición de los ensayos, volviendo el mismo a presentar la misma anomalía. En opinión de los autores esta anomalía se puede deber a que se están analizando dos medios de comportamiento hidráulico diferente (kárstico - poroso), con un método definido para un medio exclusivamente poroso. A esto debe sumársele el hecho de que en varios de estos sitios se ha observado que pozos habilitados a distintas profundidades, muestran niveles piezométricos con diferencias de hasta 5 metros, entre ellos,

situación que también puede influir en la anomalía observada.

Balance Hidrogeológico

Establecer un balance en los ambientes de salares es una tarea más que difícil debido principalmente a la falta de datos vinculados al ciclo hidrológico tal como precipitaciones, escurrimiento superficial, evaporación y, por supuesto, infiltración eficaz. En muchos salares se ha tratado con mayor o menor grado de éxito establecer cómo interactúan los componentes del ciclo, pudiéndose señalar que hasta el presente, en la mayoría de los casos, solo ha podido establecerse una aproximación o balance tentativo.

A modo de ejemplo se puede citar que en el Salar del Hombre Muerto, en la Subcuenca Occidental, donde opera Minera del Altiplano, los cálculos estimativos de balance efectuado en el cono del río Trapiche determinan que la evapotranspiración representa el 78 % de las precipitaciones; la Infiltración Eficaz el 5 % y el Escurrimiento el 17 % de las lluvias (Moya Ruiz et al, 2008).

En salares como Cauchari y Olaroz, se han efectuado algunos cálculos que estiman que la evapotranspiración representa entre el 81 al 98 % de las precipitaciones, mientras que el escurrimiento fluvial no alcanza a superar el 1 %.

Modelación y Modelo Conceptual

El último paso de la etapa de exploración se resuelve con una modelación numérica y la elaboración del modelo conceptual del ambiente hidrogeológico. La modelación numérica como herramienta de predicción, claramente, tendrá mayor o menor validez en función de los datos de ingreso y las condiciones de borde utilizadas.

De acuerdo a los autores, hasta ahora, en la mayoría de los salares donde se han efectuado modelaciones matemáticas, se ha observado que éstas no responden luego al modelo predicho, cuando se empieza con la explotación real del reservorio a través de sistemas de baterías de explotación. Está claro que esta falta de correlación entre el modelo predictivo y lo que realmente sucede cuando el reservorio es puesto en explotación, se debe a dos razones principales. La primera, parece estar vinculada estrechamente a una situación de falta de conocimiento del reservorio (faltan datos primarios sensibles) y la segunda a que en la mayoría de los casos la modelación la realiza un grupo de profesionales que no estuvo directamente vinculado al proceso de evaluación del reservorio. También se debe

señalar que en algunos casos, los modelos no han incluido la posibilidad de flujo inducido por diferencias de densidades en la salmuera a medida que se produce la explotación, tal como ocurre con algunos modelos numéricos básicos que, directamente, no lo contemplan en su plataforma.

Explotación del recurso

Si el reservorio ha mostrado que contiene leyes o concentraciones interesantes en el contenido de Litio y/o Potasio y, por otra parte, que posee reservas económicamente explotables, es posible que avance a la etapa de explotación.

En el ámbito de la Puna Argentina, en estos momentos, solamente unos pocos prospectos han avanzado y se encuentran en etapa de explotación. El más antiguo de todos estos es el de Minera del Altiplano – FMC Lithium que se localiza en la Subcuenca Occidental del Salar del Hombre Muerto (provincia de Catamarca) y en donde se produce Carbonato de Litio y Cloruro de Litio. En la provincia de Salta, ADY Resources Limited explota salmueras en el Salar del Rincón para producción de Carbonato de Litio. En la provincia de Jujuy se encuentra en estado muy avanzado la explotación de Salmueras del Salar de Olaroz para la producción de Carbonato de Litio. Otros interesantes proyectos que no han alcanzado esta etapa pero que se dirigen a esa instancia se localizan en la Subcuenca Oriental del Salar del Hombre Muerto, en los Salares de Centenario – Ratones, Salar de Cauchari y Pozuelos.

No es el propósito de este trabajo describir el sistema productivo de estos proyectos, sino el de señalar que para esta importante etapa de un proyecto de Litio y/o Potasio, se inicia, además de las complejidades de poner en funcionamiento una planta de tratamiento, una etapa crítica para cualquier proyecto de esta naturaleza en el ámbito de la Puna Argentina, como lo es la demanda de agua dulce industrial que necesitará el proyecto.

Lamentablemente, la presencia de agua subterránea dulce (tanto para el consumo humano, agrícola, ganadero e industrial) en muchos sectores de la Puna Argentina, está fuertemente condicionada por los aspectos climáticos reinantes, por la escasa recarga actual que existe que terminan condicionando la cantidad; pero también debido a la calidad del recurso hídrico subterráneo, por el fuerte efecto modificador que tienen las rocas y sedimentos de esta región (García et al, 2011; Moya Ruiz et al, 2008).

Esta última situación determina que aun cuando se localizan reservorios con agua dulce (aguas con baja conductividad eléctrica o residuo sólidos totales), en la gran mayoría de los casos no pueden ser aprovechadas para el consumo humano debido a la presencia de Arsénico y Boro, que son elementos directamente vinculados a actividad volcánica que, como se sabe es una constante en el ambiente de la Puna Argentina (García et al, 2011, Conhidro, 2012 d y e).

Si bien las características físicas y químicas del agua para el proceso productivo no requiere una calidad comparable a la del consumo humano, se debe señalar que la presencia de elementos y compuestos como Boro, Arsénico, Magnesio, Fluoruros, Cloruros y Sulfatos principalmente, interfieren seriamente en el proceso de obtención de carbonato y cloruro de Litio, razón por la cual se deben localizar fuentes de agua que presenten bajos contenidos en estos elementos; situación que realmente conforma todo un desafío puesto que en la Puna Argentina, las rocas y sedimentos de origen volcánico, son ricos en estos elementos y compuestos.

Conclusiones

Este trabajo pretende mostrar la secuencia metodológica que debería aplicarse durante la etapa inicial y final de un proyecto de explotación de salmueras enriquecidas en Litio y/o Potasio haciendo especial énfasis de que a diferencia de la minería tradicional, donde se explota un mineral en condiciones estáticas, en este caso particular de minería, la mena, es dinámica. Por otra parte se quiere mostrar, a través de la experiencia de este grupo de trabajo en diferentes salares de la Puna Argentina, lo complejo que resulta el análisis de los datos, para la determinación de los parámetros básicos de entrada del modelo numérico y conceptual, para evitar las diferencias extremas observadas entre el modelo predictivo y el real. Esta situación determina claramente que el enfoque, análisis y tratamiento de datos debe ser efectuado por especialistas en aguas subterráneas.

Referencias

- Alonso, R y R. Gutiérrez. 1986. Litoestratigrafía del Neógeno terminal. Puna sud-oriental argentino. *Revista del Instituto de Geología y Minería N° 6*. Universidad Nacional de Jujuy. República Argentina.
- Bianchi, A.R., 2006. Distribución Geográfica de las Lluvias en el Noroeste de Argentina (Región NOA). Instituto Nacional de

- Tecnología Agropecuaria (INTA) Estación Experimental Agropecuaria Salta. Recursos Naturales. Laboratorio de Teledetección. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación.
- Conhidro S.R.L., 2007. Estudio de Impacto Ambiental y Social del Proyecto Ampliación de Adsorción Selectiva (SA) y Recuperación de Potasio del Efluente de SA. Salar del Hombre Muerto. Provincia de Catamarca. Minera del Altiplano S.A – FMC. Informe Confidencial.
- Conhidro S.R.L., 2008. Prospección Geofísica en el Salar de Antofalla. Provincia de Catamarca. Vale Rio Doce Argentina. Informe Confidencial.
- Conhidro S.R.L., 2009 a. Prospección Geofísica y Geoquímica en el Salar de Pozuelos. Departamento Los Andes. Provincia de Salta. Ekeko S.A. Informe Confidencial.
- Conhidro S.R.L., 2009 b. Muestreo de Fuentes de Agua. Salar de Llullaillaco. Provincia de Salta. Compañía Minera Solitario Argentina S.A. Informe Confidencial.
- Conhidro S.R.L., 2010. Dirección Técnica y Construcción de Pozos para explotación de salmueras en el Salar de Pozuelos. Provincia de Salta. Ekeko S.A. Informe Confidencial.
- Conhidro S.R.L., 2011. Dirección Técnica y Construcción de Batería de Pozos para explotación de salmueras en el Salar de Cauchari. Provincia de Jujuy. Minera Exar S.A. Informe Confidencial.
- Conhidro S.R.L., 2012 a. Estimación de la Recarga y Balance Hídrico en el Salar del Rincón. Provincia de Salta. Ady Resources Limited. Informe Confidencial.
- Conhidro S.R.L., 2012 b. Geología y Recursos Hídricos del Proyecto Sal de Vida, Salar del Hombre Muerto. Provincias de Catamarca y Salta. Galaxy S.A. Informe Confidencial.
- Conhidro S.R.L., 2012 c. Informe final de construcción de batería de pozos en el Salar de Río Grande. Provincia de Salta. Ady Resources Limited. Informe Confidencial.
- Conhidro S.R.L., 2012 d. Dirección Técnica y Perforación de Pozos para Abastecimiento de Agua Industrial. Proyecto Sal de Vida. Salar del Hombre Muerto. Provincia de Catamarca. Galaxy S.A. Informe Confidencial.
- Conhidro S.R.L., 2012 e. Prospección Geoeléctrica y Test de Bombeo en el Valle Fluvial del Río Los Patos. Salar del Hombre Muerto. Provincia de Catamarca. Minera del Altiplano S.A. – FMC Lithium. Informe Confidencial.
- García, R. F., V. Rocha Fasola, F. A. Moya Ruiz y E. Tálamo, 2011. El Ambiente Hidrogeológico de la Puna Salteña. VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Salta, República Argentina.
- Igarzábal, A. P y R. F Poppi, 1980. El Salar del Hombre Muerto. Provincia de Catamarca. *Acta Lilloana XV: 2. Instituto Miguel Lillo.* Universidad Nacional de Tucumán.
- Issar A. y R. Passchier, 1990. Regional hydrogeological concepts. En: LERNER, D., A. ISSAR e I.SIMMERS. 1990. Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge. *International contributions to Hydrogeology, Vol 8.* International Association of Hydrogeologists - Heisse. Hannover.
- Moya Ruiz, F.; García, R.; Rocha, V.; Ferretti, J.; Massei, G y R. González, 2008. Sistema Acuífero Río Trapiche: Un Modelo de Reservorio de Agua Subterránea en Cuencas Endorreicas de la Puna Argentina. IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Quito, Ecuador.
- Moya Ruiz, F., Rocha Fasola, M. V., García, R. F. y E. Tálamo. 2007. Estudio Hidrogeológico Proyecto Diablillos, Departamento Los Andes, Provincia de Salta, Rojas y Asociados S. A. Informe Confidencial.
- Vinante, D., 2003. Estudio Geológico de la Subcuenca Boratífera Oriental del Salar del Hombre Muerto, Puna Argentina. Provincias de Catamarca y Salta. Tesis Profesional. Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.