

Metodología de terreno para apoyar la evaluación del contenido de salmueras de litio y potasio en cuencas salinas

Michael Rosko¹, Edward Peacock² y Cristián Avila¹

¹ Montgomery & Associates Consultores Limitada, Isidora Goyenechea 3365 of 901-902, Las Condes, Santiago, Chile.

² Errol L. Montgomery & Associates Inc, 1550 East Prince Road, Tucson, Arizona, USA.

Mail de contacto: mrosko@elmontgomery.cl

RESUMEN

Recientes avances en la tecnología de baterías ha provocado un incremento en la demanda y en el interés por depósitos de salmueras ricos en litio en Argentina. Junto con el contenido de litio, el potasio es un importante sub-producto comercializable para la industria de la agricultura. Con el apoyo de Galaxy Lithium, Montgomery & Associates ha desarrollado una metodología sistemática para determinar las propiedades físico-químicas del acuífero necesarias para evaluar los depósitos de salmueras. Estos métodos incluyen diversos análisis de laboratorio de muestras de testigos, muestreos de salmueras a diferentes profundidades, perfiles de conductividad eléctrica, muestreos de bombeos de bajo caudal, y pruebas de bombeo de corta y larga duración. Los buenos resultados obtenidos del análisis de los diversos métodos utilizados en las labores de campo, han permitido obtener un grado de confiabilidad más que satisfactorio en el desarrollo del modelo conceptual y en el plan de mina y extracción.

Palabras clave: litio, salmueras, métodos de terreno, Salar del Hombre Muerto, Proyecto Sal de Vida

ABSTRACT

Recent advances in battery technology has brought upon an increased demand and interest in lithium-rich brine deposits in Argentina. In addition to lithium contained in these deposits, potassium is an important and saleable by-product for the agricultural industry. With the support of Galaxy Lithium, Montgomery & Associates has developed a systematic approach for understanding the aquifer and chemical properties required to evaluate brine deposits. These methods include several different laboratory analyses for core samples, depth-specific brine sampling, downhole electrical conductivity measurements, low flow sampling, and short- and long-term aquifer tests. Good agreement of results from the various methods used in the field has resulted in a large degree of confidence in the conceptual model and future mining and extraction plan.

Keywords: lithium, brine, field methods, Salar del Hombre Muerto, Sal de Vida Project

Introducción

Debido al creciente interés por baterías de ión-litio, la demanda por este metal, el cual se encuentra principalmente en salmueras, se ha incrementado de manera exponencial. Dado los elevados costos asociados para su exploración y explotación, se hace indispensable contar con una metodología de trabajo que permita caracterizar de manera fehaciente sus características acuíferas y químicas.

Los recursos en salmueras y la definición de reservas caen fuera de las definiciones estándares de reservas minerales debido a que son fluidos, así tan pronto se inicia la extracción

los recursos cambian a consecuencia de un reordenamiento de los fluidos y mezclas. La evaluación de tales recursos y reservas depende del conocimiento de los parámetros físicos del acuífero bajo el cual la salmuera fluye así como a su grado de concentración en litio y potasio. La definición de reservas y recursos para depósitos minerales alojados en salmueras debe ser diferente que para aquellos depósitos minerales alojados en roca (Houston et al, 2011).

Para que un proyecto pase a un estado de factibilidad, debe realizarse una adecuada caracterización del sistema acuífero y de la

química de las salmueras, así como deber considerada fidedigna. Montgomery & Associates (M&A y GAI, 2011, 2012) ha utilizado una metodología directa e indirecta de campo y métodos de laboratorio para alcanzar un alto grado de confianza en una caracterización tridimensional del sistema en el Salar del Hombre Muerto para el Proyecto Sal de Vida. Es por el esfuerzo documentado aquí que la estimación del recurso mineral fue calculada.

Ubicación

Este salar se ubica en los límites de las provincias de Salta y Catamarca, Argentina, a una altitud promedio de 3,900 metros sobre el nivel del mar (Figura 1). El proyecto Sal de Vida de Galaxy Lithium se ubica en la parte este del salar. El clima que lo caracteriza es el desértico de altura, con fuertes variaciones térmicas entre el día y la noche. La precipitación promedio es de 80 mm/año, concentrándose en los meses de diciembre a febrero. A su vez, en los meses de invierno es común la precipitación de nieve. Su extensión es de aproximadamente 630 km², y se puede dividir en una parte oriental y en una parte occidental. La porción norte y occidental del salar están caracterizadas por grandes secuencias de halita con menores niveles de sedimentos clásticos. Las porciones oriental y sur están caracterizadas por sedimentos clásticos intercalados con niveles de menor espesor de halita, yeso y travertinos.

El principal afluente al Salar corresponde al Río Los Patos, el cual ingresa al Salar desde el sureste, con un caudal aproximado de 1 a 1.5 m³/s (Montgomery & Associates, 2011). Hace varios años que en este salar se realizan explotaciones de recursos no-metálicos, siendo los principales la explotación de boratos que se encuentran en la fuente superficial (ulexita). También destaca la explotación de litio en la parte occidental del salar. Cabe señalar, además, que junto con el litio, encontramos otros minerales de interés económico, principalmente de potasio.

Metodología de Trabajo

El principal objetivo para el proyecto es el de documentar y cuantificar el recurso mineral. Esto es alcanzado por la estimación de la cantidad de salmuera en almacenamiento, y determinar vía análisis químico de laboratorio, la cantidad de litio y potasio en las salmueras. Por

lo tanto, se ubicaron sondajes mediante recuperación de testigo (diamantina) a lo largo de la cuenca con el objeto de obtener muestras a profundidades específicas de sedimentos de la cuenca y salmueras intersticiales. Estas perforaciones diamantinas fueron finalizadas como pozos de pequeño diámetro y utilizadas para obtener perfiles verticales de las características físicas de la salmuera. Estos pozos fueron bombeados para obtener una muestra compuesta de salmuera para análisis químico de laboratorio. Un total de 349 muestras de testigo fueron analizadas, y un total de 586 muestras de salmuera fueron analizadas para apoyar la estimación del recurso mineral.

Los valores de porosidad eficaz fueron obtenidos a partir de los análisis de laboratorio de muestras de testigos a profundidades específicas. Porosidad eficaz es efectivamente lo mismo que la capacidad específica, o la cantidad de fluido que puede ser drenado bajo la influencia de la gravedad. Aunque la porosidad eficaz no es un valor que puede proveer una guía absoluta sobre la cantidad de salmuera que podría ser bombeada desde el sistema acuífero, es un valor que puede permitir una estimación de la cantidad total de salmuera en almacenamiento que puede teóricamente ser drenada desde el sistema. Junto con un entendimiento de la porosidad eficaz, el testigo provee una excelente información relacionada a la litología de la cuenca, y permite efectuar correlaciones de las unidades hidrogeológicas.

Medidas de la química de las salmueras fueron obtenidas desde múltiples métodos, incluyendo muestras a profundidades específicas desde *drive-points* y micro-muestras obtenidas por centrifugado desde testigos, y muestras compuestas de pozos durante perforación mediante air-lift así como de bombeo de pozos. Junto con ello, perfiles de conductividad eléctrica fueron obtenidos para un mejor entendimiento de la distribución vertical de la química en un pozo. La conductividad eléctrica es directamente proporcional al contenido de sólidos disueltos totales, y subsecuentemente, de las concentraciones de litio y potasio. La densidad de las muestras de salmuera fueron medidas directamente, usando densímetros.

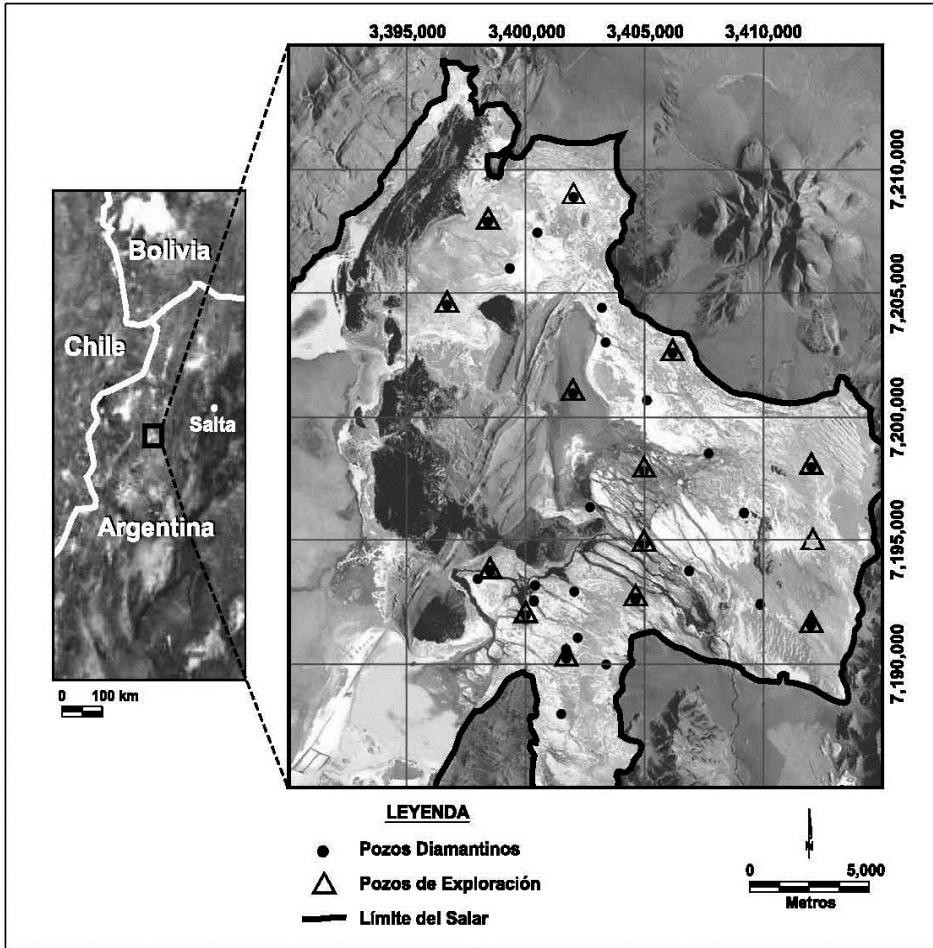


Figura 1. Mapa de ubicación del Proyecto Sal de Vida, parte oriental del Salar de Hombre Muerto

Muestras de Porosidad Eficaz

Las muestras de porosidad eficaz fueron seleccionadas a partir de las perforaciones diamantinas en diámetro HQ3 (96 mm) y NQ3 (75 mm). Se seleccionaron muestras no alteradas, las cuales se insertaron en tubos plásticos del mismo diámetro, selladas en su extremo inferior y superior. Las muestras fueron seleccionadas para ser representativas de las principales unidades litológicas e

hidrogeológicas encontradas durante la perforación. Se descartaron aquellas muestras que presenten fracturamiento secundario asociado a efectos propios de la perforación. Una vez guardada la muestra, ésta es pesada y embalada para su envío a Core Laboratories, EE.UU.

Los valores de la porosidad eficaz fueron calculados en base al peso de la muestra antes y después de drenar su fluido intersticial durante el ensayo. Basado en los resultados, valores promedios fueron determinados para cada tipo específico de litología como parte del proceso global de caracterización. Estos valores promedios fueron también aplicados a unidades hidrogeológicas en pozos donde no se analizaron muestras de testigos para porosidad eficaz.

Muestras de Salmuera

El análisis químico de las muestras de salmuera ha permitido determinar su contenido en litio y potasio, así como sus características (propiedades) químicas. Estas muestras se tomaron durante la perforación diamantina a diferentes profundidades, y para efectos de validación de las muestras obtenidas, se tomaron muestras mediante 5 formas diferentes:

1. Muestras a profundidades específicas mediante *drive-point* durante perforación diamantina
2. Muestras obtenidas por centrifugado desde muestras de testigos enviadas a Core Laboratories para ensayos de porosidad eficaz
3. Muestras desde bombeo de bajo caudal en pozos diamantinos habilitados
4. Muestras desde ensayos de bombeos de 24 horas en pozos de exploración de 6 y 8 pulgadas y desde pruebas de bombeo de 30 días y
5. Desde perforación de aire reverso

En cada caso, los valores de la química fueron evaluados y comparados entre sí para respaldar la validación de la muestra. Esto es especialmente importante para las muestras a profundidades específicas debido a que éstas presentan el mayor potencial de ser contaminadas por mezclas con fluidos de perforación o por aguas subterráneas provenientes desde otras zonas acuíferas. En la mayoría de los casos, excelentes correlaciones fueron observadas con los diferentes métodos de muestreo.

1. Muestras durante perforación diamantina

En conjunto con las muestras de porosidad eficaz, durante la perforación diamantina se extrajeron muestras de salmuera mediante el uso de un *drive-point*. Esta metodología consiste en la introducción de un *drive-point* al interior de las barras HQ3, a las cuales previamente se ha retirado el tubo interior. Éste va unido a barras BT (56 mm) mediante un adaptador, el cual incluye una membrana impermeable (Figura 2) para prevenir el ingreso de fluidos mientras éste es introducido en el acuífero por debajo del sondaje. Una vez alcanzada la profundidad de perforación, se

verifica que el interior de las barras BT se encuentren libres de agua para posteriormente hincar el *drive-point* en la formación mediante golpes de martillo desde la superficie. Una vez que éste se ha introducido completamente en la formación, se vuelve a verificar que el interior de las barras BT se encuentren libres de agua para posteriormente proceder a perforar la membrana con un pin (Figura 3). La salmuera acumulada en el interior de las barras BT es extraída mediante bailer. Parámetros de rutina (pH, conductividad eléctrica, temperatura y densidad) son medidos y un protocolo de control de calidad es efectuado (Houston & Jaacks, 2010).

Las muestras de salmuera se tomaron a intervalos de aproximadamente 9 metros, o en su defecto cuando la litología atravesada lo permite. Las muestras recolectadas fueron envasadas en envases plásticos esterilizados y enviadas a los laboratorios de Alex Stewart, Mendoza. Un total de 352 muestras de *drive-point* fueron obtenidas para la caracterización del sistema del salar.



Figura 2. Muestreo mediante sistema *drive-point*



Figura 3. Membrana perforada permitiendo el ingreso de salmuera

2. Muestras extraídas desde muestras de testigos

Un total de 15 muestras seleccionadas de porosidad eficaz del pozo SVH11_15 fueron centrifugadas en los laboratorios de Corelab, EE.UU., y la salmuera obtenida fue recolectada y enviada a su análisis químico en los laboratorios de Alex Stewart, Argentina. El volumen de muestra extraído varió entre 10 a 36 mililitros. Debido a que estas muestras fueron obtenidas a partir de muestras de testigos, las profundidades a las cuales éstas fueron recuperadas son levemente diferentes a aquellas obtenidas a partir de los *drive-point*. Sin embargo, los resultados obtenidos son consistentes entre ellos y permiten verificar que las concentraciones de litio en las muestras a profundidades específicas son válidas. La Tabla 1 presenta los valores de litio obtenidos a partir de los datos de *drive-point* y del centrifugado de los testigos seleccionados. Desde 0 a 30 metros, se presenta agua dulce a salobre, y desde los 30 a 150 metros las muestras corresponden a salmuera.

Tabla 1. Concentraciones de litio (mg/L) obtenidas mediante pruebas de *drive-point* y de centrifugado en sondaje diamantino SVH11_15.

Profundidad (m)	Centrifugado	<i>Drive-point</i>
0-30	71 (3 muestras)	74 (3 muestras)
30-150	636 (12 muestras)	608 (14 muestras)

3. Muestras extraídas desde bombeos de bajo caudal

Muestras de salmuera se obtuvieron a partir de bombeos en 14 pozos diamantinos entubados con PVC de 2 pulgadas. El objetivo de estos bombeos es el de obtener muestras representativas del pozo así como para comparar los valores promedios registrados con aquellos derivados de las muestras mediante *drive-point*. Una muestra es considerada no válida cuando se presenta una interfaz agua dulce/salmuera debido a la incapacidad de la salmuera densa de fluir por el interior de la columna de la bomba.

Para ello, se utilizaron bombas electrosumergibles de 1", las cuales fueron instaladas a profundidades comprendidas entre los 6 a 12 metros, con una línea de descarga de HDPE de ½". El caudal obtenido fue medido mediante el

uso de un balde graduado de 5 litros y un cronómetro. Parámetros de rutina fueron medidos (conductividad eléctrica, temperatura, pH, y densidad). Se bombeó un volumen de agua equivalente a tres veces el volumen del pozo y muestras de salmuera se tomaron al final del bombeo para su análisis químico. Los valores obtenidos a partir de este bombeo son comparados con los valores obtenidos mediante el muestreo con *drive-point* durante la perforación y se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Concentraciones promedios de litio (mg/L) obtenidas durante bombeo de bajo caudal y mediante pruebas de *drive-point* en pozos diamantinos.

Bombeo	<i>Drive-point</i> ¹
724 (13 samples)	728 (352 samples)

¹: Valores promedio de todas las muestras de salmuera

Los valores individuales de cada pozo son los que presentan mayor variabilidad entre los dos métodos de muestreo que los promedios arriba mencionados. Sin embargo, debido a que la estimación del recurso mineral es un proceso que incluye mucha extrapolación e interpolación de diferentes tipos de valores, creemos que los resultados de las muestras de bombeo de bajo caudal validan los valores de concentración de litio obtenidos a partir de las muestras de *drive-point*.

4. Muestras extraídas desde de pruebas de bombeo

Para la estimación del recurso mineral, 13 pozos de bombeo de 6 y 8" fueron construidos; de los cuales 12 fueron bombeados con bombas sumergibles con una duración del ensayo de 24 horas. Los caudales de bombeo fueron de hasta 24 litros por segundo. El objetivo de estos bombeos es el de determinar los parámetros acuíferos (transmisividad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento) así como determinar posibles variaciones en la química del agua. Parámetros de rutina fueron medidos a lo largo del ensayo y muestras de agua fueron tomadas al inicio y al final, para determinar posibles variaciones en su calidad. En 8 pozos, muestras de agua fueron tomadas a intervalos

de 2-3 horas. Estos análisis permitirán determinar posibles variaciones de su calidad durante el tiempo así como comparar sus valores con aquellos pozos diamantinos utilizados como pozos de observación.

En 2 pozos de exploración se efectuaron pruebas de bombeo de 30 días de duración. Estas pruebas tienen como objetivo el analizar posibles variaciones en la química de la salmuera durante el proceso de extracción. Para ello, se tomaron muestras cada 24 horas, de acuerdo a protocolos de muestreo y enviadas a análisis en los laboratorios de Alex Stewart, Mendoza. De acuerdo a los resultados obtenidos, no se aprecia una dilución de las salmueras durante los 30 días de bombeo.

La Tabla 3 presenta los valores promedio de litio obtenidos durante las pruebas de bombeo en los pozos de exploración.

Tabla 3. Concentraciones promedios de litio (mg/L) obtenidas en pruebas de bombeo

Pozo	Concentración litio (mg/L)
SVWW11_01	551
SVWW11_02	860
SVWW11_03	861
SVWW11_04	818
SVWW11_05	713
SVWW11_06	824
SVWW11_07	733
SVWW11_08	843
SVWW11_09	799
SVWW11_10	807
SVWW11_12	849
SVWW11_13	704

Aunque todos los métodos de muestreo presentan valores similares para el contenido de litio, la química de las muestras obtenidas al final de las pruebas de bombeo son considerados los valores más apropiados a usar para estimar la química de los futuros pozos de producción. La concentración promedio de litio para las muestras obtenidas durante las pruebas de bombeo y las muestras de air-lift es de aproximadamente 800 mg/L para 109 muestras. Esta concentración es consistente para las concentraciones promedio de litio para el sistema acuífero profundo de las salmueras desde el Salar del Hombre Muerto (M&A y GAI, 2012)

5. Muestras extraídas desde perforación de aire reverso

Tres pozos fueron perforados mediante el sistema de aire reverso. Para ello, muestras de agua fueron tomadas a intervalos de 6 metros, en los cuales se midió sus parámetros físico-químicos así como el caudal extraído. Estas muestras permitieron obtener una caracterización de la salmuera a diferentes profundidades. Aunque este método de muestreo provee resultados químicos similares a los otros métodos de muestreo, el mismo fue difícil de usar debido a las complejidades presentadas durante la perforación, como la inestabilidad de las paredes ya que éstos se trataban de sedimentos no consolidados.

Perfilajes de Conductividad Eléctrica

Una vez habilitado los pozos diamantinos con PVC de 2" y habiendo transcurrido un tiempo prudente de manera tal que la salmuera al interior del pozo esté en equilibrio con el acuífero, se procedió a realizar un perfil de conductividad en 17 de los 23 pozos habilitados así como en 3 pozos de exploración. La conductividad fluido-eléctrica es una medida indirecta de la actividad iónica y de los sólidos disueltos. La conductividad eléctrica está positivamente correlacionada con la concentración y la densidad de la salmuera. Los objetivos de estos perfilajes son:

1. Determinar un perfil de conductividad eléctrica e identificar posibles zonas de aguas dulces y/o de baja densidad (para evitar en el futuro)
2. Validar información obtenida a partir de las muestras de salmuera

Para cada pozo, se tomaron medidas a intervalos de 2 a 5 metros mediante un sensor In-Situ, modelo Aquatroll 100. Este sensor fue calibrado previo a cada perfil. Tres medidas fueron tomadas en cada intervalo, tomando el promedio de estos datos para su interpretación. La Figura 4 presenta el perfil de conductividad eléctrica para el pozo diamantino SVH10_08.

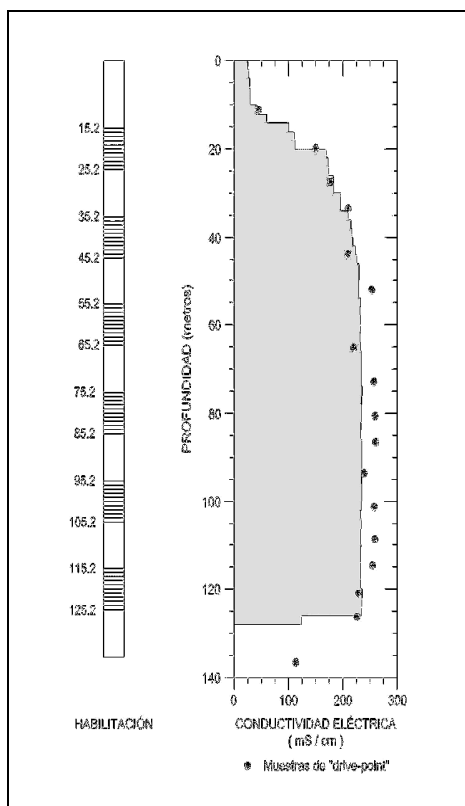


Figura 4. Perfil de habilitación y conductividad eléctrica para el pozo diamantino SVH10_08

De acuerdo a lo observado en la Figura 4, es posible apreciar una buena correlación entre los valores de conductividad eléctrica obtenida en las muestras de *drive-point*, y en el perfil obtenido a partir del Aquatroll. En particular, existe una excelente correlación entre ambos perfiles para las zonas de agua dulce/salobre en la parte superior del acuífero, la zona de transición y la salmuera ubicada en la zona más profunda.

Esta concordancia en los valores obtenidos ayuda a respaldar la fiabilidad de las muestras químicas obtenidas mediante *drive-point*, pero también provee confianza en usar los perfiles de conductividad eléctrica para identificar zonas de agua salobre en aquellos pozos en los que no se cuente con muestras de *drive-point*. Sin embargo, cuando se utilicen perfiles de conductividad eléctrica para determinar zonas

de agua salobre, el pozo debe estar habilitado con tubería ranurada (filtros) en su totalidad.

Conclusiones

Los trabajos efectuados han permitido caracterizar de manera fiable las salmueras del Salar de Hombre Muerto. Las diferentes metodologías empleadas han permitido validar los datos obtenidos, permitiendo determinar las zonas con mayores concentraciones de litio así como las zonas en donde se encuentra agua dulce/salobre. A su vez, mediante la perforación y posterior bombeo de los pozos de exploración, ha sido posible determinar los parámetros del acuífero así como los potenciales caudales de extracción.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Sr. Iain Scarr de Galaxy Lithium por su apoyo en la elaboración de esta publicación. Se agradece de manera especial al personal de Galaxy Lithium, en especial a sus geólogos y ayudantes, sin los cuales no se habría podido realizar este trabajo.

Referencias

- Houston, J., Butcher, A., Ehren, P., Evans, K., and Godfrey, L., 2011, The Evaluation of Brine Prospects and the Requirement for Modifications to Filing Standards: Economic Geology, v. 106, pp. 1225 – 1239.
- Houston, J., and Jaacks, J., 2010, Technical report on the Sal de Vida lithium project, Salar del Hombre Muerto, Catamarca, Argentina: Report for NI 43-101 prepared on behalf of Lithium One, Inc. 62 p.
- Montgomery & Associates 2011, Technical Memorandum: Mediciones de Aforo, Salar del Hombre Muerto. Memorandum prepared for Lithium One, September 30, 2011.
- Montgomery & Associates, and Geochemical Applications International, 2011, Inferred resource estimate for lithium and potassium: Sal de Vida project. Report for NI 43-101 prepared on behalf of Lithium One, Inc., 92 p.
- Montgomery & Associates, and Geochemical Applications International, 2012, Measured, Indicated and Inferred Lithium and Potassium Resource, Sal de Vida Project: Report for NI 43-101 March 7, 2012. Prepared on behalf of Lithium One, Inc., 224 p.