

Ocurrencias Superficiales y Potencial de Recuperación de Litio en la Cuenca del Río Pingunchuela: Evaluación Geoquímica y Estimación del Valor de Mercado del Carbonato de Litio de la Salmuera Geotérmica de Chachimbiro, Imbabura – Ecuador.

Surface Occurrences and Lithium Recovery Potential in the Pingunchuela River Basin: Geochemical Evaluation and Market Value Estimation of Lithium Carbonate from Chachimbiro Geothermal Brine, Imbabura – Ecuador.

Danilo Ibarra Figueroa¹, Washington Lizandro Lomas Zumba², Andrés Lloret², Pablo Gonzalo Velásquez Riera³, Jenny Zambrano², Paola Hermosa², Danilo Asimbaya Amaguaña¹

1. Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, Japón. ibarra.figueroa.danilo.471@s.kyushu-u.ac.jp; asimbaya.danilo.050@s.kyushu-u.ac.jp
2. Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito – Ecuador
washington.lomas@geoenergia.gob.ec; andres.lloret@geoenergia.gob.ec; jenny.zambrano@geoenergia.gob.ec; paola.hermosa@geoenergia.gob.ec
3. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, México
pablo.velasquezr@uanl.edu.mx

ISSN: 2661-6998



Fecha de recepción: 29-07-2026
Fecha de aceptación: 13-10-2026

Resumen

Este estudio integra información hidrogeoquímica publicada sobre las aguas superficiales de la cuenca del río Pingunchuela y explora escenarios hipotéticos de recuperación de litio relacionados con el sistema geotérmico Chachimbiro. La compilación identifica una concentración superficial máxima de 6,776 mg/L de Li; se adopta 7 mg/L como entrada nominal del análisis. Con caudales externos de 860 000 kg/día a 273 130 ton/día, disponibilidad de 90 % y recuperación de 80 %, el modelo calcula entre 8,42 y 2 674,71 t/año de Li_2CO_3 equivalente. A un precio de referencia de 9 123,72 USD/t, estas cantidades representan valores brutos teóricos de 76 838,39 a 24 403 335,99 USD/año. Los caudales no están medidos en Chachimbiro y las cifras no constituyen una estimación de su capacidad productiva ni de rentabilidad. Los escenarios de 13, 45 y 62 mg/L son condicionales o comparativos. La composición y productividad del reservorio profundo requieren verificación independiente.

Palabras clave: Litio, salmueras geotérmicas, Chachimbiro, Extracción Directa de Litio, Salinas de Ibarra.

Abstract

This study integrates published hydrogeochemical information on surface waters in the Pingunchuela River basin and explores hypothetical lithium recovery scenarios related to the Chachimbiro geothermal system. The compilation identifies a maximum surface-water lithium concentration of 6.776 mg/L; 7 mg/L is adopted as the nominal model input. With external flow rates of 860,000 kg/day – 273,130 tonnes/day, 90% availability and 80% recovery, the model yields 8.42–2,674.71 tonnes/year of lithium carbonate equivalent. At a reference price of USD 9,123.72/tonne, these quantities correspond to theoretical gross market values of USD 76,838.39–24,403,335.99/year. The flow rates were not measured in Chachimbiro, and these figures do not estimate its productive capacity or profitability. Concentrations of 13, 45 and 62 mg/L are conditional or comparative inputs. Deep-reservoir composition and productivity require independent verification.

Keywords: Lithium, Geothermal Brines, Chachimbiro, Direct Lithium Extraction, Salinas de Ibarra.

1. INTRODUCCIÓN

El litio es uno de los minerales estratégicos para la transición energética mundial. La versatilidad de este mineral lo ha colocado como uno de los recursos más destacadas en el panorama global. Esto es, no solo debido a su capacidad para almacenar energía y ser utilizado en la construcción de baterías de iones, sino también, al constituir un elemento esencial para una cadena de valor diversa que incluye, desde la industria metalúrgica, hasta la farmacéutica. Durante el 2024, se produjeron 240 000 toneladas métricas de litio a nivel mundial, lo cual representa un aumento del 18 % en comparación con el año anterior [1]. La demanda de este mineral se ha disparado durante los últimos 10 años [2] y las proyecciones más recientes sugieren un incremento exponencial hasta alcanzar las 8 millones de toneladas métricas de litio para el año 2050 [3]. Este escenario obliga a identificar fuentes alternativas no convencionales y prácticas de extracción más sustentables para satisfacer la demanda en el largo plazo.

Las reservas de litio a nivel mundial pueden ser explotadas desde dos tipos de depósitos: salmueras, que corresponden al 60 % de la producción global, y minerales de roca dura, que abarcan el 40 % restante (Fig. 1) [4]. Las mayores reservas de este mineral en salmueras se encuentran en Argentina, Bolivia y Chile; para los otros países de la región, la existencia y cuantificación de posibles reservas de litio, no son del todo conocidas [5].

Producción mundial de litio por fuente, 2005-25

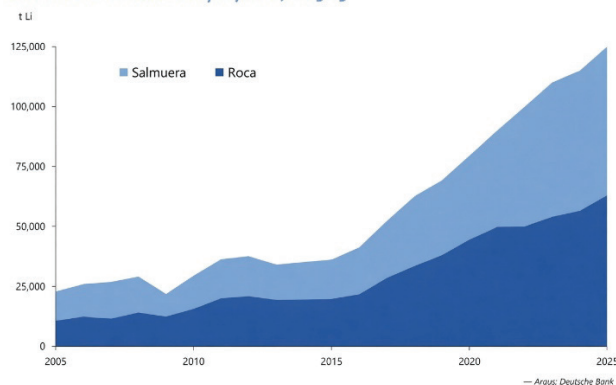


Figura 1: Distribución de la producción mundial de litio a partir de fuentes de salmuera y roca dura [4].

Bajo las prácticas actuales, el cloruro de litio (LiCl) y el carbonato de litio (Li_2CO_3) se producen a partir de salmueras mediante concentración por evaporación. Aunque resulta nominalmente económico, el proceso es lento, exige grandes extensiones de terreno y es intensivo en el uso de agua [6]. En contraste, la extracción de litio a partir de salmueras geotérmicas resulta ambientalmente menos lesiva, pues aprovecha la infraestructura ya existente de las centrales de generación eléctrica. No

obstante, la extracción del litio de esta fuente no convencional requiere de métodos y tratamientos con materiales especializados para maximizar la recuperación y pureza del litio [4]. Esto, es debido a que las salmueras geotérmicas se caracterizan por una química compleja, alta salinidad y altas temperaturas, lo que presenta desafíos únicos para la extracción económica de litio [3]. El enfoque tecnológicamente más avanzado para la Extracción Directa de Litio (EDL) de salmueras geotérmicas es la adsorción selectiva. En Europa, el proyecto EuGeli (European Geothermal Lithium Brine) logró obtener los primeros kilogramos de carbonato de litio para baterías a partir de las salmueras geotérmicas, utilizando EDL [7]. No obstante, la elección de la tecnología más adecuada depende de la composición de la salmuera y las condiciones específicas del reservorio.

En Ecuador, el conocimiento sobre los recursos de litio es limitado. Las condiciones geológicas del país no favorecen la formación de grandes salares ni de pegmatitas, típicos de yacimientos a nivel mundial [8][9]. Sin embargo, en algunos estudios se ha reportado la presencia de anomalías menores de litio en sedimentos fluviales [10] y en aguas de manantiales, como las de Salinas de Guaranda [11] [12], lo que sugiere que podrían existir ocurrencias asociadas a contextos geológicos distintos a los tradicionalmente explorados. Otra zona de interés poco explorada es Salinas de Ibarra; muestras de agua, analizadas geoquímicamente tanto en fuentes termales como en cursos de agua perennes y no perennes permitieron identificar concentraciones de litio en los manantiales termales [13]. Estas disminuyen progresivamente en los efluentes aguas abajo y se infiltran hacia el sistema fluvial, particularmente en la cuenca del río Pingunchuela. Esta distribución sugiere una conexión con la actividad hidrotermal del complejo volcánico Chachimbiro (Fig. 2), lo cual convierte el área de estudio en un entorno de interés para la identificación de ocurrencias superficiales de litio, y para evaluar su conexión con la actividad hidrotermal profunda del sistema geotérmico.

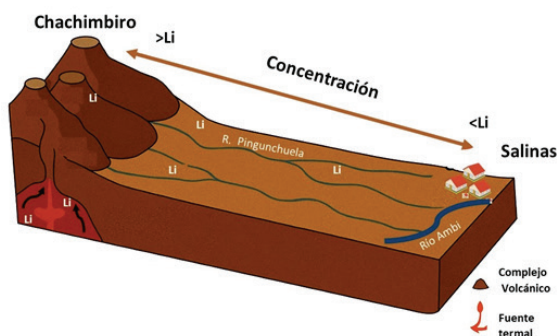


Figura 2: Relación de las vertientes termales con la Cuenca del río Pingunchuela.

Salinas de Ibarra ha sido históricamente reconocida por la extracción artesanal de sal. Existen registros coloniales que evidencian esta actividad desde 1598, cuando Fray Juan Nepomuceno de Suárez describió a “Las Salinas” como un lugar agreste pero habitado por comunidades indígenas dedicadas a la obtención y comercio de sal [14]. Esta evidencia sugiere la existencia de procesos naturales que favorecen la acumulación de sales en superficie, aunque, su origen, extensión y composición geoquímica son poco conocidos.

Este estudio tiene dos objetivos complementarios: caracterizar la distribución del litio en las aguas superficiales de la cuenca del río Pingunchuela a partir de información publicada, y explorar la sensibilidad de la recuperación teórica de Li_2CO_3 equivalente y de su valor bruto de mercado frente a concentraciones, caudales y precios asumidos. Los antecedentes geológicos y mineralógicos se utilizan para discutir las ocurrencias superficiales y su relación hidrotermal. El ejercicio de recuperación se plantea de manera independiente de la interpretación de las sales superficiales: la ausencia de un salar desarrollado no demuestra la viabilidad técnica o económica del aprovechamiento de un reservorio profundo.

Para el desarrollo de la investigación, se adoptan las siguientes definiciones:

Ocurrencia de litio: Presencia natural de litio en un determinado ambiente o depósito, ya sea en minerales, rocas, salmueras, arcillas o aguas geotermales, independientemente de que tenga o no valor económico comprobado (adaptado de British Geological Survey [15] Mihalasky et al [16] y McLemore [17]).

Fluido geotérmico: Fluido (agua o vapor) que circula en un sistema geotérmico, cuya composición y temperatura reflejan interacciones roca-fluido en profundidad (adaptado de Nicholson [18]).

Salmuera geotérmica: Salmueras que circula en sistemas geotérmicos activos, donde su alta salinidad influye en las propiedades termodinámicas del sistema (adaptado de Moeck [19] y Wasch [20]).

2. UBICACIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO

La cuenca del río Pingunchuela, ubicada en la provincia de Imbabura (aproximadamente 80 km al norte de Quito y 20 km – 25 km al noroeste de Ibarra) nace del complejo volcánico Chachimbiro, el cual es un volcán potencialmente activo de aproximadamente 12 km de diámetro, ubicado entre la Cordillera Occidental y el Valle Interandino (Fig. 3a). Su evolución ocurrió entre el Pleistoceno medio y el Holoceno, caracterizada por tres episodios de construcción de domos y dos de destrucción,

siendo su última gran erupción entre 3 640 y 3 510 a. C. [21], [22].

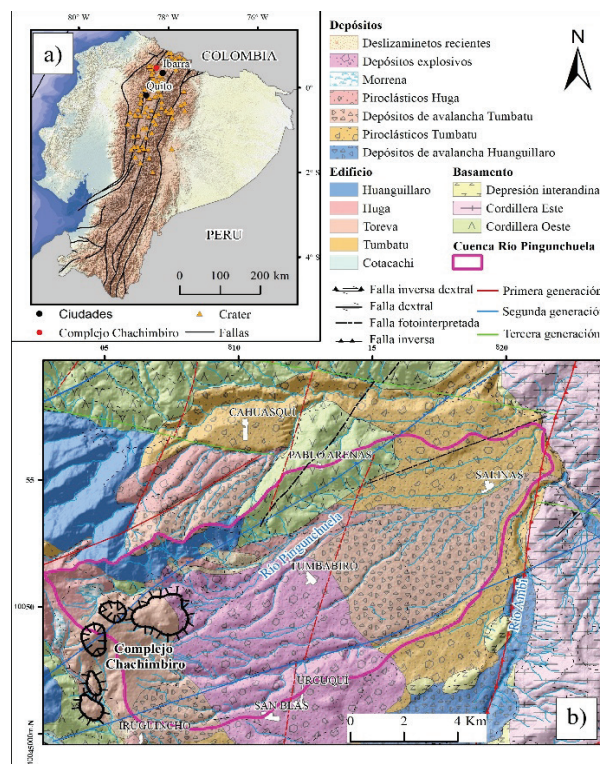


Figura 3: a) Ubicación contexto regional del Complejo Chachimbiro, b) Mapa litológico modificado de Bernard, 2011 [23].

Las etapas constructivas de Chachimbiro corresponden a los edificios: (i) Huanguillaro, destruido por un colapso sectorial que provocó avalanchas de escombros; (ii) Tumbatú, formado por domos dacíticos andesíticos acompañados de flujos piroclásticos, destruido por un segundo evento de colapso; (iii) la extrusión de los domos Hugá y Albuji, en el Holoceno y posteriormente alterados por procesos hidrotermales; y, finalmente (iv), un evento altamente explosivo con la formación de un flujo piroclástico voluminoso en las cercanías del Cerro La Viuda, asociado a la formación de un criptodomo (Fig. 3b) [22], [24]. Estructuralmente, el área está controlada por sistemas activos de fallas regionales. Localmente hay cuatro sistemas de fallas mayores: el Río Ambi (inversa, NNE–SSO, con levantamiento del bloque oriental de Ibarra), Otavalo (sur), y dos fallas occidentales (Billecocha y Apuela), todas con orientación NE–SO y cinemática dextral [23], [24]. Además, el modelado geomorfológico revela tres generaciones de fallas: (i) NS–NNE/SSO (fase temprana), (ii) NE–SO (cizallamiento intermedio) y (iii) E–O (fase más reciente) [13]. La interacción de estas estructuras, y sus fallas conjugadas, controlan la distribución de litologías, circulación hidrotermal y, en última instancia, el potencial de acumulación de litio en

las salmueras geotérmicas de la cuenca del río Pingunchuela.

3. METODOLOGÍA

La caracterización geoquímica de aguas se realizó con datos de muestras reportadas por el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) [13] (Anexo 1), Aguilera et al. [25], Inguaggiato et al. [26], Burbano et al. [27], y la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC) [28]. El Anexo 1 reúne 50 registros de aguas superficiales y un registro de composición reconstruida, que debe distinguirse de las observaciones. De los 50 registros, 41 contienen una determinación de Li y nueve carecen de este dato; la ausencia de medición no equivale a concentración cero. Se utilizaron diagramas de Schoeller y $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$, correlación de Pearson y PCA para explorar asociaciones hidroquímicas. La procedencia de cada muestra se conserva en el Anexo 1.

Los escenarios de recuperación se formularon con el balance de masa empleado por Ibarra [12], Neupane y Wendt [29] y Goldberg et al. [30]. Se calcularon toneladas anuales de carbonato de litio equivalente (LCE) y su valor bruto teórico, sin evaluar capacidad productiva local, pureza comercial, CAPEX, OPEX, tratamiento, refinación, reinyección ni comercialización. Los parámetros y su condición de observados o asumidos se resumen a continuación. Las concentraciones se cruzaron con los tres caudales y dos precios para generar una matriz de 24 escenarios; se conservaron todos los decimales intermedios y se redondearon únicamente las salidas mostradas.

La masa teórica anual de Li (M_{Li}), expresada en t/año calendario, se calculó como:

$$M_{\text{Li}} = q D c \eta \times 10^{-9} \quad (1)$$

Donde:

- q es el caudal másico diario durante la operación, en kg/día. Los extremos externos de 860 000 y 273 130 ton/día se obtienen de la Tabla 4 de Neupane y Wendt [29], cuyo encabezado expresa el caudal en miles de kg/día. El valor 860 corresponde a 860 000 kg/día. Estos extremos no delimitan el caudal real de Chachimbiro.
- D corresponde a los días operativos por año calendario. Se adoptó la disponibilidad $A = 0,90$ de Neupane y Wendt [29] y Goldberg et al. [30]; el 10 % de indisponibilidad es un supuesto operativo, no una medición local ni una asignación comprobada de días de mantenimiento.

$$D = 365 A \quad (2)$$

$$D = 365 \times 0,90$$

$$D = 328,5 \text{ días/año}$$

Donde:

- 365 es el número de días por año calendario utilizado en el modelo.
- A es la fracción anual de disponibilidad de la instalación.
- (c) es la concentración másica de Li en mg/kg. Cuando la entrada C está expresada en mg/L, se divide por la densidad ρ , en kg/L. Se supone $\rho = 1$ kg/L; esta conversión no convierte una muestra de manantial en una medición del reservorio profundo.

$$c = \frac{C}{\rho} \quad (3)$$

- η es la fracción recuperada de Li. Se adopta 0,80 como supuesto externo [29], [30]; no representa una recuperación demostrada para los fluidos de Chachimbiro.

$$\eta = 0,80 \quad (4)$$

La conversión de miligramos a toneladas se aplica una sola vez:

$$f = 10^{-9} \text{ t/mg} \quad (5)$$

La masa de Li_2CO_3 equivalente (M_{LCE}), en t/año, se calcula por estequiometría. No presupone la producción de carbonato de pureza comercial:

$$M_{\text{LCE}} = M_{\text{Li}} F \quad (6)$$

Donde:

- M_{Li} es la masa anual de Li calculada con la ecuación 1.
- F es el factor de conversión entre Li y Li_2CO_3 :

$$F = \frac{M(\text{Li}_2\text{CO}_3)}{2 M(\text{Li})} \quad (7)$$

$$F = \frac{73,888}{13,88}$$

$$F \approx 5,323342939$$

El valor bruto teórico anual V , expresado en USD/año, se calcula como:

$$V = M_{\text{LCE}} P \quad (8)$$

Donde:

- M_{LCE} es la masa anual de Li_2CO_3 equivalente de la ecuación 6.
- P es el precio de referencia por tonelada de Li_2CO_3 . El producto $M_{\text{LCE}} \times P$ es un valor bruto teórico,

previo a costos, pérdidas adicionales y requisitos de calidad del producto.

Se comprobó la aritmética con las entradas publicadas en [29], [30], sin considerar esta comprobación una validación de Chachimbiro. En el caso de Goldberg [30], la Tabla 1 usa un escenario virtual de 80 L/s y 2 270 592 m³/año con disponibilidad del 90 %, equivalente a 328,5 días. El valor mostrado de 329 días está redondeado y no debe utilizarse para reconstruir el caudal. Con Li = 61 mg/L, el presente balance da 589,85 t/año de LCE y 5 308 671,84 USD/año a 9 000 USD/t, frente a 585 t/año y 5 263 383 USD/año publicados. La diferencia monetaria es 0,86 % y queda explícita en el Anexo 2; las entradas publicadas redondeadas no permiten afirmar reproducción exacta. El ejemplo siguiente usa Desert Peak-1, con 1,4 mg/kg de Li, q = 10 230 000 kg/día y P = 6 600 USD/t [29].

Ejemplo de cálculo:

- Masa recuperable de Li

$$M_{Li} = 10\,230\,000 \times 328,5 \\ \times 1,4 \times 0,80 \times 10^{-9}$$

$$M_{Li} = 3,7638216 \text{ t/año}$$

- Masa recuperable de Li₂CO₃

$$M_{LCE} = 3,7638216 \times \frac{73,888}{13,88}$$

$$M_{LCE} \approx 20,03611314 \text{ t/año}$$

- Valor de mercado

$$V = 20,03611314 \times 6\,600$$

$$V \approx 132\,238,35 \text{ USD/año}$$

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización Geoquímica de Aguas

En los registros de aguas compilados del Anexo 1, las temperaturas varían entre 10,9 y 73,5 °C y el pH entre 5,60 y 8,92. El mínimo térmico corresponde al registro 109 de Aguilera et al. [25]. El máximo de Li, 6,776 mg/L, y el máximo de Cl⁻, 2 181,33 mg/L, corresponden a LH1-00330 de IIGE [13]. La Tabla 1 resume los solutos disueltos; las cifras se presentan redondeadas:

Tabla 1. Resumen estadístico de los principales solutos disueltos.

Parámetro	Concentración mínima (mg/L)	Concentración máxima (mg/L)	Promedio (mg/L)	Moda (mg/L)
Li ⁺	0,01	6,78	1,89	4,30
Na ⁺	6,41	1 347,00	470,96	677,00
K ⁺	2,12	187,00	64,35	141,00
Ca ²⁺	7,41	244,40	76,63	237,00
Mg ²⁺	2,73	171,30	57,43	36,00
SiO ₂	61,00	217,00	134,09	64,00
Cl ⁻	0,25	2 181,33	818,21	---
SO ₄ ²⁻	0,51	82,00	27,15	---
HCO ₃ ⁻	26,43	1 737,00	566,21	670,00

---: Sin valores repetidos.

El diagrama de Schoeller (Fig. 4) revela la presencia de cinco tipos de agua: Cl⁻-Na⁺ (25 muestras), Cl⁻-Ca²⁺ (1), HCO₃⁻-Na⁺ (14), HCO₃⁻-Ca²⁺ (7) y HCO₃⁻-Mg²⁺ (3). La Figura 5 muestra la ubicación de las ocurrencias y el tipo de agua al que pertenecen. Se observa que las muestras

correspondientes al tipo Cl⁻-Na⁺ presentan las mayores concentraciones de solutos disueltos, seguidas por las de tipo HCO₃⁻-Na⁺, mientras que las de tipo HCO₃⁻-Ca²⁺ exhiben las concentraciones más bajas. Las demás muestras se distribuyen entre estos extremos.

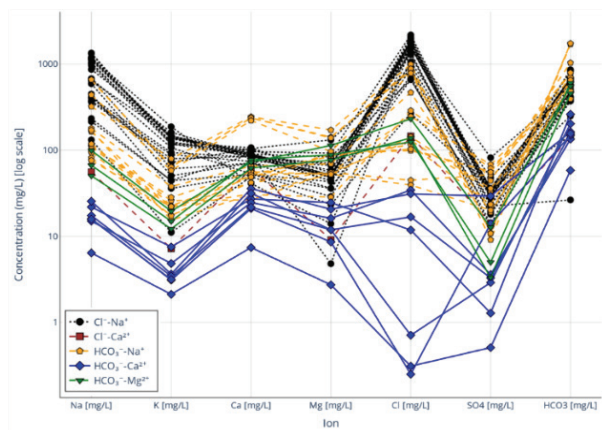


Figura 4: Diagrama de Schoeller para cationes y aniones mayoritarios.

En el diagrama ternario $\text{Cl-HCO}_3\text{-SO}_4$ (Fig. 6) se observa que las muestras con mayor temperatura de surgencia se distribuyen principalmente en la zona de aguas maduras de tipo Cl. Conforme disminuye la temperatura de surgencia, la composición química evoluciona progresivamente hacia tipos Cl-HCO_3 , $\text{HCO}_3\text{-Cl}$ y, finalmente, hacia tipo HCO_3 , los cuales se ubican en la zona de aguas periféricas.

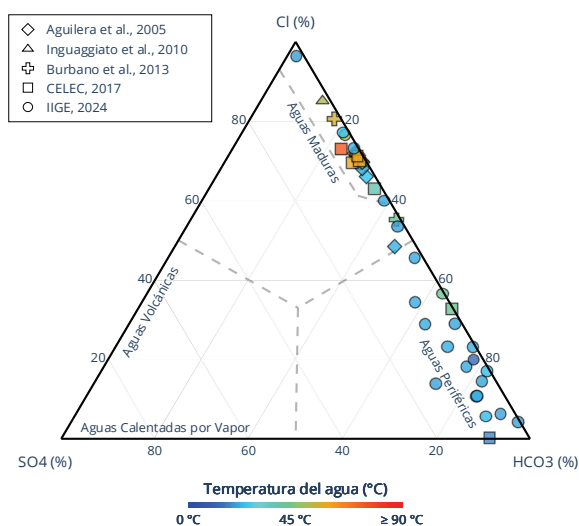


Figura 6: Diagrama Ternario $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$.

La matriz de correlación de Pearson (Fig. 7) deja ver que existe una alta correlación positiva ($r > 0,80$) entre la temperatura y los iones Li^+ , Na^+ y K^+ ; así como, entre Li^+ y Na^+ , K^+ y Cl^- ; Na^+ y K^+ , Cl^- ; y K^+ y Cl^- . También se observan correlaciones positivas moderadas a fuertes (r entre 0,50 y 0,80) entre la temperatura y Ca^{2+} , Cl^- ; Li^+ y Ca^{2+} ; Na^+ y Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- ; K^+ y Ca^{2+} , SO_4^{2-} ; Ca^{2+} y

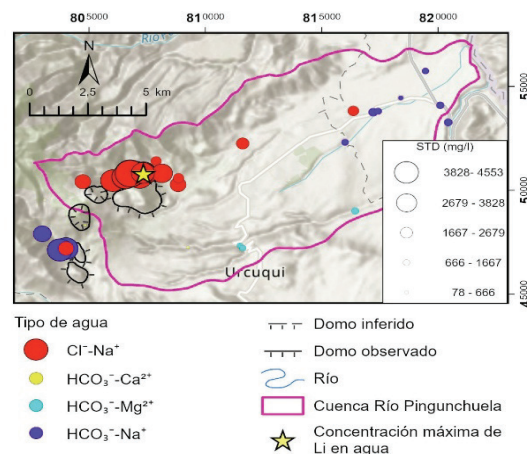


Figura 5: Distribución espacial de las muestras de agua

Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- ; y Mg^{2+} y Cl^- , HCO_3^- . Por otro lado, se evidencia una correlación muy baja o débil ($r < 0,30$) entre el pH y el resto de los parámetros, así como, entre la temperatura y Mg^{2+} ; Li^+ y Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- ; SO_4^{2-} y Ca^{2+} , Mg^{2+} ; y entre SO_4^{2-} y HCO_3^- .

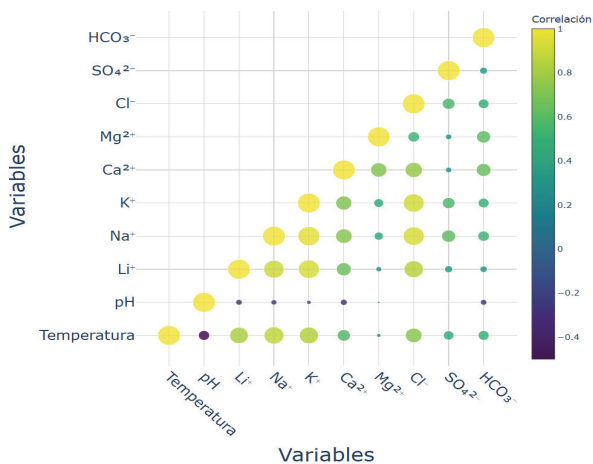


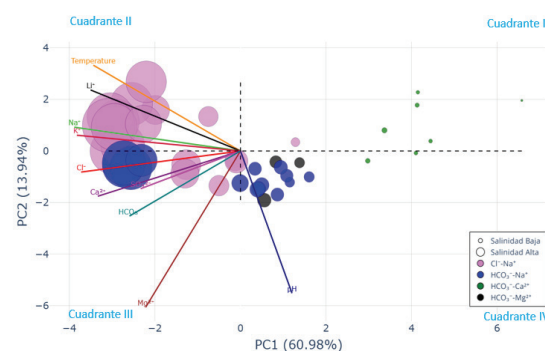
Figura 7: Matriz de correlación de Pearson entre parámetros físicoquímicos.

El análisis de componentes principales (PCA) muestra que el 74,93 % de la varianza total se concentra en los dos primeros componentes (Tabla 2). El primer componente (PC1), que explica el 60,98 %, está principalmente asociado con Na^+ (-0,39), K^+ (-0,39), Cl^- (-0,38), Li^+ (-0,36), Ca^{2+} (-0,34) y la temperatura (-0,35). El segundo componente (PC2), responsable del 13,94 % de la varianza, presenta una fuerte relación negativa con Mg^{2+} (-0,61) y pH (-0,56), y una contribución positiva de la temperatura (0,34).

Tabla 2. Componentes principales, cargas y varianza explicada del análisis hidroquímica

Variables	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
Temperatura	-0,35	0,34	0,01	-0,14	-0,24	-0,42	0,69	-0,13	0,12	0,07
pH	0,12	-0,56	0,57	0,22	-0,42	0,08	0,25	-0,22	-0,05	-0,08
Li ⁺	-0,36	0,24	0,15	0,35	-0,08	-0,02	-0,42	-0,43	0,51	-0,20
Na ⁺	-0,39	0,09	0,15	0,00	0,00	0,03	-0,03	0,26	-0,45	-0,74
K ⁺	-0,39	0,06	0,17	0,11	-0,13	-0,18	-0,33	-0,08	-0,56	0,57
Ca ²⁺	-0,34	-0,18	-0,32	0,26	0,34	0,52	0,35	-0,38	-0,16	0,07
Mg ²⁺	-0,22	-0,61	-0,26	0,12	0,27	-0,62	-0,07	0,06	0,12	-0,08
Cl ⁻	-0,38	-0,08	0,20	0,20	0,01	0,27	0,10	0,70	0,36	0,26
SO ₄ ²⁻	-0,24	-0,15	0,43	-0,71	0,40	0,09	-0,07	-0,19	0,14	0,05
HCO ₃ ⁻	-0,26	-0,26	-0,45	-0,42	-0,63	0,22	-0,18	-0,01	0,08	-0,02
Eigenvalue	6,25	1,43	1,21	0,73	0,29	0,14	0,10	0,07	0,03	0,01
Variabilidad (%)	60,98	13,94	11,81	7,07	2,78	1,34	0,96	0,67	0,29	0,14
Acumulada (%)	60,98	74,93	86,74	93,81	96,60	97,94	98,90	99,57	99,86	100,00

La distribución conjunta de muestras y variables se representa en el biplot (Fig. 8). En el cuadrante I se agrupan aguas de tipo HCO₃-Ca, caracterizadas por baja salinidad y temperaturas reducidas, sin que se proyecten vectores relevantes. En el cuadrante II destacan los vectores Temperatura ($\approx 136^\circ$), Li⁺ ($\approx 146^\circ$), Na⁺ ($\approx 167^\circ$) y K⁺ ($\approx 171^\circ$), asociados a aguas de tipo Cl-Na con alta salinidad y temperaturas medias a elevadas. En el cuadrante III se proyectan los vectores SO₄²⁻ ($\approx 190^\circ$), Cl⁻ ($\approx 192^\circ$), Ca²⁺ ($\approx 208^\circ$), HCO₃⁻ ($\approx 225^\circ$) y Mg²⁺ ($\approx 250^\circ$), en correspondencia con aguas de tipo Cl-Na y HCO₃-Na, que presentan salinidades medias-altas y temperaturas bajas a moderadas. Finalmente, en el cuadrante IV se ubica el vector pH ($\approx 282^\circ$), junto con aguas de tipo HCO₃-Na > HCO₃-Mg > HCO₃-Ca, que exhiben salinidades medias-bajas y temperaturas reducidas.


Figura 8: Biplot del análisis de componentes principales (PCA): iones principales y salinidad.

4.2 Escenarios hipotéticos de recuperación y valor bruto teórico

La concentración máxima compilada, 6,776 mg/L, proviene de una muestra superficial de manantial (LH1-00330, IIGE [13]); no es una medición del reservorio. Se mantiene 7 mg/L como escenario nominal para comparar con los cálculos previos. Esta entrada es 3,31 % mayor que el máximo observado y eleva en la misma proporción

las salidas del modelo. No se supone que represente un reservorio somero o profundo.

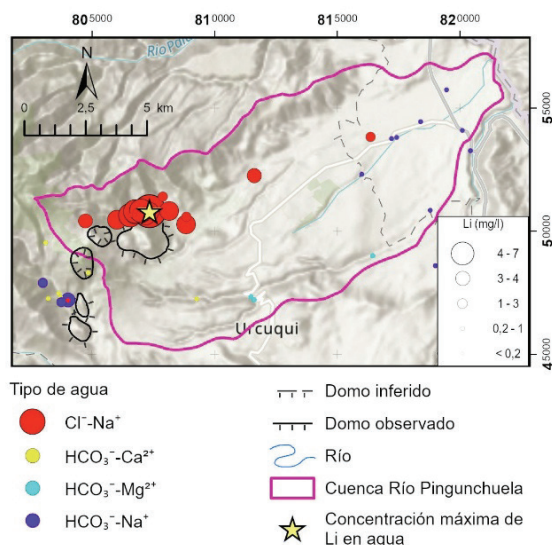


Figura 9: Distribución espacial de las muestras de agua, clasificadas en función del tipo de agua y de la concentración de Li (mg/L).

Los caudales externos bajo y alto son 860 000 kg/día y 273 130 ton/día [29]. El escenario intermedio es 55 289 053 kg/día: media aritmética de los 18 caudales de la Tabla 4 de [29] y del caudal virtual de 80 L/s de [30], convertido a 6 912 000 kg/día con $\rho = 1$ kg/L. La media sin redondear es 55 289 052,63 kg/día; se redondea a kg/día al definir la entrada. Este conjunto heterogéneo se conserva como referencia exploratoria y no estima el caudal de Chachimbiro. Se adoptan 328,5 días/año, $\eta = 0,80$ y el precio base de 9 123,72 USD/t declarado para septiembre de 2025 [31].

Para la entrada nominal de 7 mg/L, los escenarios bajo, intermedio y alto producen respectivamente 8,42; 541,44 y 2 674,71 t/año de LCE, con valores brutos teóricos de 76 838,39; 4 939 908,97 y 24 403 335,99 USD/año (Tabla 3). La amplitud de este intervalo resulta de los caudales externos asumidos y no representa un intervalo de incertidumbre cuantificado para el sistema local.

Tabla 3. Escenarios externos de caudal para Li nominal = 7 mg/L y P = 9 123,72 USD/t. Los caudales no están medidos en Chachimbiro.

Caudal externo (kg/día)	LCE (t/año)	Valor bruto (USD/año)
Bajo q = 860 000	8,42	76 838,39
Intermedio q = 55 289 053	541,44	4 939 908,97
Alto q = 273 130 000	2 674,71	24 403 335,99

5. DISCUSIÓN

La evolución hidrogeoquímica del agua en la cuenca del río Pingunchuela puede entenderse como un proceso en el que intervienen tanto aguas superficiales como fluidos hidrotermales. El agua fría, de tipo HCO_3^- -Ca y de baja salinidad, corresponde a la infiltración de lluvias y escorrentía superficial en zonas altas, las cuales alimentan al sistema geotérmico Chachimbiro [25]. Una vez en el subsuelo, el incremento de la temperatura y el prolongado contacto con las rocas favorecen la disolución de minerales, generando un enriquecimiento iónico que conduce a la evolución hacia aguas de tipo Cl⁻-Na, típicas de reservorios hidrotermales profundos.

Esto se ha representado en el biplot (Fig. 10) mediante la incorporación de las reconstrucción de agua del reservorio hidrotermal realizadas por Gherardi & Spycher [32], con el fin de visualizar mejor los procesos de mineralización y meteorización (de derecha a izquierda en el biplot); así como, la influencia de la temperatura en la disolución de minerales y el incremento de la salinidad. A partir de estas referencias, también se puede apreciar con mayor claridad la ocurrencia de mezclas y diluciones.

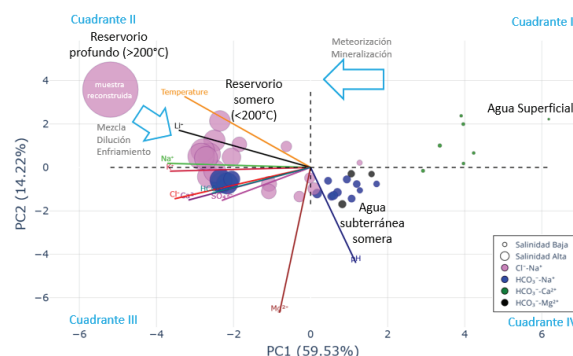


Figura 10: Biplot del análisis de componentes principales (PCA) con la reconstrucción de aguas del reservorio hidrotermal realizadas por Aguilera et al. [25] y Gherardi & Spycher [32].

Durante el ascenso, los fluidos calientes pueden experimentar procesos de ebullición y desgasificación, liberando vapor rico en CO_2 y, posiblemente, trazas de H_2S . Al condensarse en niveles someros y mezclarse con aguas superficiales, este vapor promueve la formación de ácido carbónico, lo que reduce el pH y facilita la disolución de minerales estables en condiciones de menor temperatura [32]. En paralelo, la fase líquida remanente se enriquece en Cl^- y otros iones, aumentando su salinidad como consecuencia de la pérdida de agua durante la ebullición. El cloruro se comporta como un trazador, y su posición en el biplot, ubicada entre las variables asociadas a fluidos del reservorio (Temperatura, Na^+ , K^+ , Li^+) y aquellas vinculadas con aguas someras (Ca^{2+} , HCO_3^- , Mg^{2+}), sugiere que tanto las

aguas profundas como las someras participan en su transporte. Esto significa que el Cl^- se concentra en los fluidos del reservorio hidrotermal profundo, pero también se incorpora progresivamente en las aguas subterráneas de menor temperatura durante la evolución de las aguas tipo $\text{HCO}_3\text{--Ca}$. Esta tendencia es coherente con la correlación moderada entre Ca^{2+} y Cl^- observada en la matriz de Pearson.

Estos fluidos clorurados provenientes del reservorio profundo, en su recorrido hacia zonas más bajas de la cuenca, tienden a mezclarse con aguas más someras de menor salinidad, entre ellas las aguas $\text{HCO}_3\text{--Ca}$ que ya han incorporado Cl^- y/o incluso con posibles condensados, generando así, una transición hacia aguas de tipo $\text{HCO}_3\text{--Cl--Na}$ (Fig. 9) [25]. En este contexto, el PCA refleja dichas dinámicas: el PC1 (eje X) representa principalmente la mineralización y el grado de madurez hidroquímica de las aguas termales, controlados por la disolución progresiva de minerales y el aumento de temperatura; el PC2 (eje Y) está asociado a los procesos de mezcla y dilución con aguas periféricas de menor evolución geoquímica, probablemente vinculadas a acuíferos someros. Estas aguas, provenientes tanto del reservorio hidrotermal como de acuíferos someros continúan su recorrido hacia la parte baja de la cuenca.

Las acumulaciones de sales de Salinas de Ibarra constituyen manifestaciones superficiales que deben evaluarse mediante su extensión, mineralogía, relación hidrológica y composición [13], [14]. El informe del IIGE [13] es citado como antecedente para contenidos de Li de 4 a 178 mg/kg en rocas, sedimentos y precipitados. Estos valores de fase sólida no se comparan directamente con concentraciones en mg/L de salmueras. Sin la tabla original de muestras y sus métodos, este intervalo no permite cuantificar un recurso ni concluir su inviabilidad económica. La interpretación de condiciones poco favorables para un salar desarrollado se apoya en el contexto geomorfológico e hidrológico, y requiere completar la trazabilidad de las muestras sólidas.

La génesis de salares enriquecidos en litio está estrechamente ligada a cuencas endorreicas cerradas, caracterizadas por un alto grado de aislamiento hidrológico, elevadas tasas de evaporación y un aporte sostenido de solutos de origen volcánico o hidrotermal, condiciones que permiten la retención prolongada de soluciones salinas y el enriquecimiento progresivo del litio en la fase líquida (Fig. 11) [33], [34]. En el área de estudio, estas condiciones no se cumplen, ya que la cuenca presenta un régimen hidrológico abierto, con drenaje efectivo hacia el río Ambi, lo que impide la acumulación de salmueras concentradas.

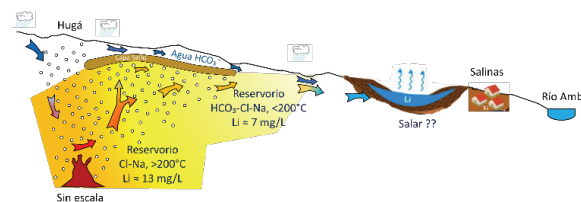


Figura 11: Esquema idealizado de condiciones esperadas para la formación de un salar en la cuenca del río Pingunchuela.

Los estudios hidrogeoquímicos realizados en la cuenca del río Pingunchuela [13] confirman este carácter no endorreico, evidenciando que las aguas enriquecidas en litio, tanto de origen hidrotermal como meteórico, drenan sin acumularse en una cuenca terminal (Fig. 12). La alta permeabilidad de los depósitos volcanoclásticos y el control estructural ejercido por sistemas de fallas favorecen la dispersión del litio en sedimentos fluviales, en lugar de su concentración en salmueras. Este comportamiento es coherente con el modelo propuesto por Bradley et al. [35], según el cual la ausencia de un sistema hidrológicamente cerrado limita el desarrollo de salares viables, aun en presencia de anomalías geoquímicas puntuales.

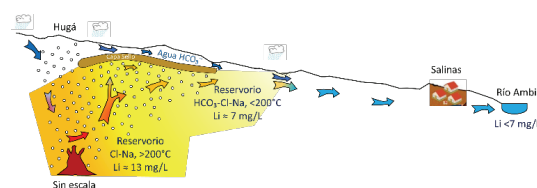


Figura 12: Esquema idealizado de condiciones encontradas en la cuenca del Río Pingunchuela.

Los antecedentes geológicos y mineralógicos de Chusin [36] e IIGE [13] permiten discutir un posible origen volcánico e hidrotermal de las sales locales. La investigación de los fluidos profundos constituye una línea complementaria, cuya pertinencia no depende de demostrar una inviabilidad económica superficial. Su evaluación requiere composición, caudal sostenible y ensayos de separación específicos del sistema.

Los registros de Sol de Mañana, con 45 mg/L [37], y Cerro Pabellón, con 62 mg/L [38], se incorporan únicamente como entradas comparativas de sensibilidad. No se transfieren a Chachimbiro como concentraciones esperadas. Se conserva además el escenario de 13 mg/L como supuesto condicional. La reconstrucción termodinámica de Gherardi y Spycher [32] no publica una determinación de Li en su Tabla 1; por tanto, la atribución de 12,6–13 mg/L a esa fuente requiere documentar la muestra de partida, el factor de dilución, las unidades y el supuesto de comportamiento conservativo de Li. En esta revisión, 13 mg/L no se presenta como una concentración profunda comprobada. La posibilidad de extracción directa de litio [39] debe

evaluarse para cada fluido mediante ensayos de recuperación, selectividad, pureza y estabilidad de los materiales.

Los procesos tradicionales fundamentados en la evaporación solar y tratamientos químicos convencionales presentan limitaciones críticas de selectividad y rendimiento. Como lo demuestran estudios previos [39], estos métodos se ven comprometidos por la coprecipitación de fases sólidas de magnesio y otros precipitados que obstruyen los mecanismos de separación. Esta interferencia no solo reduce la recuperación directa del litio, sino que también, degrada la eficiencia de tecnologías emergentes como la nanofiltración y la electrodiálisis, evidenciando la necesidad de pretratamientos efectivos que mitiguen la interferencia selectiva en las etapas iniciales. Este fenómeno ocurre cuando el exceso de magnesio desplaza al litio en los mecanismos de intercambio y filtración, saturando los medios activos y limitando la recuperación del recurso de interés.

La selección de una tecnología depende de la composición completa del fluido, los iones competidores, la temperatura, la salinidad y la estabilidad de los materiales [4]. La relación $Mg/Li \approx 8,7 \times 10^{-5}$ proviene de combinar $Mg = 0,0011 \text{ mg/kg}$ del modelo de [32] con $Li = 12,6 \text{ mg/kg}$ atribuido a una reconstrucción cuya trazabilidad sigue pendiente. Es un cociente aritmético condicionado por ambas entradas, no una propiedad medida del reservorio. En consecuencia, no permite demostrar condiciones favorables de extracción ni seleccionar una ruta industrial. Los tratamientos discutidos por Botelho et al. [39] y las comparaciones de [3] sirven para plantear opciones que deberán ensayarse.

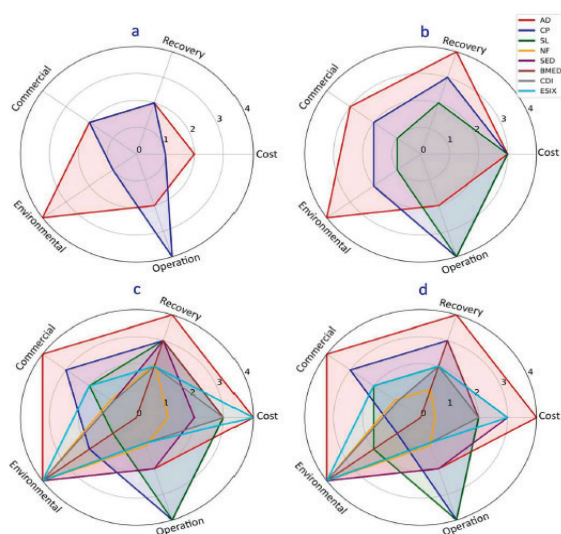


Figura 13. Comparación de tecnologías de recuperación de Li según Nikkhah et al. [3]: (a) agua de mar; (b) salmueras de petróleo; (c) salmueras geotérmicas y de lagos salinos con $Mg/Li < 10$; (d) salmueras de lagos salinos con $Mg/Li > 10$. Las puntuaciones no corresponden a ensayos en Chachimbiro.

Según la Tabla 7 de Nikkhah et al. [3], las siglas son: AD, adsorción; CP, precipitación química; NF, nanofiltración; SE, extracción con solventes; SED, electrodiálisis selectiva; BMED, electrodiálisis con membranas bipolares; CDI, desionización capacitiva; y ESIX, intercambio iónico conmutado eléctricamente. Los criterios de comparación son recuperación, costo, duración de operación, impacto ambiental y viabilidad comercial. Se debe cotejar la rotulación del gráfico adaptado con estas definiciones antes de su versión editorial final.

La adsorción, la precipitación química y los procesos de membrana responden a mecanismos diferentes. Las puntuaciones de la Figura 13 resumen la evaluación bibliográfica de [3] y no constituyen una jerarquía validada para Chachimbiro. La composición y las condiciones de operación locales deben comprobarse antes de comparar su desempeño.

La comparación entre salmueras con distinta relación Mg/Li ilustra que la competencia iónica puede afectar la separación. El empleo de electrodiálisis selectiva, membranas bipolares, desionización capacitiva o ESIX requiere determinar recuperación, selectividad, consumo de energía y duración de los materiales en el fluido específico; sus nombres y resultados no son intercambiables.

La Tabla 4 compara las entradas de 13, 45 y 62 mg/L bajo los mismos caudales externos y precio base. La Figura 14 muestra la sensibilidad del valor bruto a la concentración, al caudal y al precio. El Anexo 3 reúne los 24 casos para evitar la mezcla de resultados intermedios y altos. Estas comparaciones no anticipan la composición ni la productividad de un futuro pozo de Chachimbiro.

Tabla 4. Escenarios condicionales o comparativos a 9 123,72 USD/t. Caudales externos bajo = 860 000 e intermedio = 55 289 053 kg/día; 13 mg/L es condicional, 45 y 62 mg/L son referencias comparativas.

Li (mg/L)	Caudal externo	LCE (t/año)	Valor bruto (USD/año)
13	Bajo	15,64	142 699,86
13	Intermedio	1 005,52	9 174 116,66
45	Bajo	54,14	493 961,07
45	Intermedio	3 480,66	31 756 557,66
62	Bajo	74,59	680 568,58
62	Intermedio	4 795,57	43 753 479,44

Con 7 mg/L y caudal bajo externo, se calculan 8,42 t/año de LCE y 76 838,39 USD/año. Con 13 mg/L y caudal intermedio externo, se obtienen 1 005,52 t/año y 9 174 116,66 USD/año (Tabla 4, Figura 14 y Anexo 3). El resultado alto para 13 mg/L, 4 967,32 t/año, corresponde al caudal de 273 130 000 kg/día y no al intermedio. Esta

distinción corrige la confusión entre las columnas de la tabla anterior.

Para la entrada comparativa de 62 mg/L, los caudales bajo e intermedio producen respectivamente 74,59 y 4 795,57 t/año de LCE, equivalentes a 680 568,58 y 43 753 479,44 USD/año con $P = 9\,123,72$ USD/t. El resultado de 23 690,32 t/año pertenece al caudal alto externo; se presenta por separado en el Anexo 3.

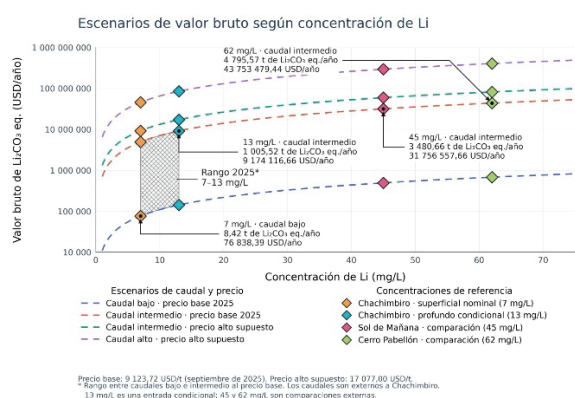


Figura 14. Sensibilidad del valor bruto teórico de LCE a la concentración de Li con caudales externos y dos precios asumidos. El eje vertical es logarítmico. Los puntos identifican 7, 13, 45 y 62 mg/L; las curvas no predicen la producción local.

El precio alto de 17 077 USD/t se usa como supuesto de sensibilidad, sin atribuirle una predicción confirmada para 2028. Con caudal bajo, las entradas de 13 y 62 mg/L generan valores brutos de 267 093,42 y 1 273 830,15 USD/año. Con caudal alto, los respectivos valores son 84 827 006,54 y 404 559 569,64 USD/año. La matriz completa mantiene los mismos factores y distingue ambas condiciones de precio.

El valor bruto calculado no representa beneficio, flujo de caja disponible ni capacidad de financiar perforaciones. El modelo no incorpora costos de desarrollo, extracción directa, procesamiento, refinación, reinyección, comercialización o financiamiento, y tampoco demuestra producción de Li₂CO₃ de calidad comercial. La evaluación económica requiere un caudal sostenible medido, composición profunda, desempeño del proceso y un modelo de costos. Por ello, los escenarios se utilizan para identificar qué parámetros controlan el balance y orientar futuras investigaciones.

6. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las siguientes conclusiones y hallazgos del estudio:

1. La compilación hidrogeoquímica y los antecedentes geológicos apoyan una relación entre las ocurrencias superficiales de Li y la circulación hidrotermal de Chachimbiro. Las condiciones actuales descritas para la cuenca no favorecen un salar desarrollado;

esta interpretación no equivale a una evaluación económica del conjunto de rocas, sedimentos o precipitados, cuya documentación analítica debe completarse.

2. La máxima concentración de Li identificada en la compilación de aguas es 6,776 mg/L en un manantial. La muestra superficial no determina por sí sola la composición del reservorio. La entrada de 13 mg/L se conserva como escenario condicional y su derivación profunda requiere verificación.
3. Para Li nominal = 7 mg/L, caudales externos de 860 000 a 273 130 000 kg/día, disponibilidad de 90 % y recuperación de 80 %, el modelo calcula 8,42–2 674,71 t/año de LCE y valores brutos de 76 838,39–24 403 335,99 USD/año al precio base. Para Li condicional = 13 mg/L, calcula 15,64–4 967,32 t/año y 142 699,86–45 320 481,12 USD/año. Estas cifras describen escenarios matemáticos, no capacidad productiva ni rentabilidad de Chachimbiro.
4. La evaluación de la recuperación de Li requiere verificar composición y caudal del fluido profundo, documentar la reconstrucción de Li y ensayar tecnologías de separación. La relación Mg/Li modelada y las comparaciones bibliográficas permiten formular hipótesis; no demuestran una ruta de extracción eficiente para el sistema estudiado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] USGS, *Mineral Commodity Summaries*, vol. 70, no. 7. 2025.
- [2] A. Dini, P. Lattanzi, G. Ruggieri, and E. Trumphy, "Lithium Occurrence in Italy—An Overview," *Minerals*, vol. 12, no. 8, p. 945, Jul. 2022, doi: 10.3390/min12080945.
- [3] H. Nikkhah *et al.*, "Challenges and opportunities of recovering lithium from seawater, produced water, geothermal brines, and salt lakes using conventional and emerging technologies," *Chem. Eng. J.*, vol. 498, p. 155349, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.155349.
- [4] W. T. Stringfellow and P. F. Dobson, "Technology for the Recovery of Lithium from Geothermal Brines," *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6805, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14206805.
- [5] CEPAL, "Extracción e industrialización del litio: oportunidades y desafíos para América Latina y el Caribe," 2023. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11362/48964>
- [6] A. Freibott, "Lithium Extraction and Geothermal Energy, a Dynamic Duo," Pacific Northwest National Laboratory News & Media Relations.

- [7] BRGM - French Geological Survey, "EuGeLi: Lithium extraction from geothermal brines in Europe," Reference, completed project. [Online]. Available: <https://www.brgm.fr/en/reference-completed-project/eugeli-lithium-extraction-geothermal-brines-europe>
- [8] M. Litherland, J. A. Aspden, and R. A. Jemielita, *The Metamorphic Belts of Ecuador*. British Geological Survey, 1994.
- [9] S. Baize *et al.*, "Active Tectonics and Earthquake Geology Along the Pallatanga Fault, Central Andes of Ecuador," *Front. Earth Sci.*, vol. 8, Jun. 2020, doi: 10.3389/feart.2020.00193.
- [10] G. C. M. Gonzaga, A. Egüez, F. Villares, "Evaluación geoestadística del potencial para litio en la cordillera occidental del Ecuador .," May 2017.
- [11] J. Manrique-Carreño, É. Martínez-Villa, É. Calderón-Maza, and G. Guamán-Jaramillo, "Geochemical characterization of Lithium-bearing brines from Guaranda, Ecuador," *Boletín Geol.*, vol. 45, no. 2, Jun. 2023, doi: 10.18273/revbol.v45n2-2023005.
- [12] D. Ibarra, "Assessment of Geothermal Energy and Lithium Co-Production Potential In Salvefaccha-Oyacachi, El Hondón, and Salinas de Bolívar, Ecuador,," Kyushu University, Fukuoka, Japan, 2025.
- [13] IIGE, "Informe Técnico de Salmueras Salinas de Ibarra- Imbabura,," Quito (Ecuador), 2024.
- [14] Salinas GAD Parroquial, "Reseña histórica Salinas de Ibarra." Accessed: Nov. 28, 2025. [Online]. Available: <https://gadsalinasimbabura.gob.ec/blog/post/resena-historica>
- [15] British Geological Survey (BGS) & Natural Environment Research Council (NERC), "Mineral profile: Lithium,," 2016. [Online]. Available: https://www.google.com/url?q=https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/534440/1/lithium_profile.pdf&sa=D&source=docs&ust=1764343231616773&u sg=AOvVaw0Iy36H85WTfVxaN7R_xNGj
- [16] M. J. Mihalasky, D. A. Briggs, M. S. Baker, B. W. Jaskula, K. Cheriyan, and S. W. DeLoach-Overton, "Lithium Occurrences and Processing Facilities of Argentina, and Salars of the Lithium Triangle, Central South America," 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5066/P9RLUH4F>
- [17] V. T. McLemore, "Potential Lithium Resources in New Mexico," in *SME Annual Meeting*, Denver, 2021, p. 5.
- [18] K. Nicholson, *Geothermal Fluids*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993. doi: 10.1007/978-3-642-77844-5.
- [19] I. S. Moeck, "Catalog of geothermal play types based on geologic controls," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, pp. 867–882, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.05.032.
- [20] L. J. Wasch, "Geochemical Modeling of Brine-reservoir Rock Reactions in Geothermal Systems," Nov. 2011. doi: 10.3997/2214-4609.20144160.
- [21] B. Beate, "Tefracronología Holocénica en el complejo Volcánico de Chachimbiro, prov. de Imbabura," *Resum. en" Cuartas Jornadas en Ciencias la Tierra", Esc. Politécnica Nac. April*, pp. 3–6, 2001.
- [22] B. Bernard, S. Hidalgo, C. Robin, B. Beate, and J. Quijozaca, "The 3640–3510 BC rhyodacite eruption of Chachimbiro compound volcano, Ecuador: a violent directed blast produced by a satellite dome," *Bull. Volcanol.*, vol. 76, no. 9, p. 849, 2014.
- [23] B. Bernard, C. Robin, B. Bate, and S. Hidalgo, "Nuevo modelo evolutivo y actividad reciente del volcán Chachimbiro," *Jornadas en Ciencias la Tierra No 7. y Encuentro sobre Riesgos y Desastr. No*, vol. 1, pp. 119–122, 2011.
- [24] B. F. P. Masabanda, "A 3D model of the Chachimbiro Geothermal System in Ecuador using PETREL," 2016, *J. UNU-GTP*.
- [25] E. Aguilera, R. Cioni, F. Gherardi, G. Magro, L. Marini, and Z. Pang, "Chemical and isotope characteristics of the Chachimbiro geothermal fluids (Ecuador)," *Geothermics*, vol. 34, no. 4, pp. 495–517, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.geothermics.2005.04.004.
- [26] S. Inguaggiato, S. Hidalgo, B. Beate, and J. Bourquin, "Geochemical and isotopic characterization of volcanic and geothermal fluids discharged from the Ecuadorian volcanic arc," *Geofluids*, vol. 10, no. 4, pp. 525–541, Nov. 2010, doi: 10.1111/j.1468-8123.2010.00315.x.
- [27] E. 2013 Burbano *et al.*, "Aguas Termominerales en el Ecuador," 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bjp.2015.06.056%0Ahttps://academic.oup.com/bioinformatics/article-abstract/34/13/2201/4852827%0Ainternal-pdf://semisupervised-3254828305/semisupervised.ppt%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.str.2013.02.005%0Ahttp://dx.doi.org/10.10>
- [28] CELEC EP, "Report on the Results of Thermal Samples from the Chachimbiro Geothermal

- Prospect,” Quito, Ecuador, 2017.
- [29] G. Neupane and D. Wendt, “Assessment of Mineral Resources in Geothermal Brines in the US,” 2017.
- [30] V. Goldberg *et al.*, “The potential of raw material extraction from thermal brines – Successful milestones of the BrineMine project,” *Oil Gas Eur. Mag.*, pp. 26–33, 2021, doi: 10.19225/210306.
- [31] SMM Information & Technology Co., “Shanghai Metals Market,” SMM Spot Metal Prices. [Online]. Available: <https://www.metal.com/>
- [32] F. Gherardi and N. Spycher, “Application of Integrated Multicomponent Geothermometry at the Chachimbiro Thermal Area, a Difficult Geothermal Prospection Case,” in *Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, California: Stanford University, 2014, p. 6. [Online]. Available: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SWG/2014/Gherardi.pdf>
- [33] S. E. Kesler, P. W. Gruber, P. A. Medina, G. A. Keoleian, M. P. Everson, and T. J. Wallington, “Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits,” *Ore Geol. Rev.*, vol. 48, pp. 55–69, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.05.006>.
- [34] J. Houston, A. Butcher, P. Ehren, K. Evans, and L. Godfrey, “The evaluation of brine prospects and the requirement for modifications to filing standards,” *Econ. Geol.*, vol. 106, no. 7, pp. 1225–1239, 2011.
- [35] D. Bradley, L. Munk, H. Jochens, S. Hynek, and K. A. Labay, “A preliminary deposit model for lithium brines,” Reston, VA, 2013. doi: 10.3133/ofr20131006.
- [36] Chusin Cunuhay, “Geologic characterization of Salinas de Ibarra: discovering the origin of salt,” (*Bachelor’s thesis, Univ. Investig. Tecnol. Exp. Yachay*)., 2023.
- [37] D. Villarroel Camacho, “Geochemical Studies of Geothermal Fluid and Evaluation of Well Test results from Wells Sm-01, Sm-02 And Sm-03, Sol de Mañana Field, Geothermal Project, Laguna Colorada, Bolivia,” Reykjavik, 2014.
- [38] F. Galarce Arenas, “Modelamiento termodinámico de la alteración hidrotermal bajo condiciones de reservorio del sistema geotermal Cerro Pabellón, Cordillera de los Andes, Norte de Chile.”, 2024, doi: <https://doi.org/10.58011/gk6b-ef12>.
- [39] A. B. Botelho Junior, K. Abels, D. C. R. Espinosa, and W. A. Tarpeh, “Lithium Extraction by Electrodialysis: Effect of Co-Occurring Ions for Application in Brine Processing,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 172, no. 2, p. 023501, Feb. 2025, doi: 10.1149/1945-7111/adad46.

Anexos

ANEXO 1. Caracterización geoquímica de aguas colectadas en la cuenca del río Pingunchuela. Con datos de muestras reportadas por Aguilera et al. [25], Inguaggiato et al. [26], Burbano et al. [27], CELEC [28], IIGE [13] y Gherardi y spycher [32].

Referencia	Nombre de la muestra	Temperature [°C]	pH	Li [mg/L]	Na [mg/L]	K [mg/L]	Ca [mg/L]	Mg [mg/L]	Cl [mg/L]	SO4 [mg/L]	CO3 [mg/L]	Tipo de Agua	Mg/Li
IIGE, 2024	LH1-00325	21.71	8.47	0.308	81.55	17.56	42.1	55.62	129.66	33.17	394.09	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	181
IIGE, 2024	LH1-00326	21.47	7.58	0.287	109.7	21.42	41.89	91.03	98.92	56.69	768.61	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	317
IIGE, 2024	LH1-00327	21.04	8.32	1.028	179.5	37.88	65.56	69.43	467.79	19.03	540.67	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	68
IIGE, 2024	LH1-00328	21.47	8.5	0.259	164.4	22.53	51.18	54.91	246.48	68.18	540.67	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	212
IIGE, 2024	LH1-00329	21.63	7.63	3.596	364.2	79.6	84.71	68.13	1373.09	19.68	482.66	Cl ⁻ -Na ⁺	19
IIGE, 2024	LH1-00330	51.53	7.47	6.776	643.6	145.6	96.14	92.43	2181.33	34.36	634.05	Cl ⁻ -Na ⁺	14
IIGE, 2024	LH1-00331	21.12	7.97	2.161	233	44.35	52.45	43.05	728.03	12.92	473.04	Cl ⁻ -Na ⁺	20
IIGE, 2024	LH1-00332	24.43	8.49	3.636	409.2	93.94	82.95	70.38	1346.40	23.66	374.87	Cl ⁻ -Na ⁺	19
IIGE, 2024	LH1-00333	19.69	8.92	3.356	373.8	88.88	74.23	66.82	1285.77	22.41	26.43	Cl ⁻ -Na ⁺	20
IIGE, 2024	LH1-00334	20.04	6.89	0.098	21.89	7.515	27.19	24.57	11.83	1.28	261.58	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺	251
IIGE, 2024	LH1-00335	21.94	7.01	0.32	50.46	12.2	62.1	77.02	138.87	3.31	456.22	HCO ₃ ⁻ -Mg ²⁺	241
IIGE, 2024	LH1-00336	23.11	6.65	0.407	66.75	14.95	77.25	88.52	124.89	4.99	602.81	HCO ₃ ⁻ -Mg ²⁺	217
IIGE, 2024	LH1-00337	22.67	7.85	0.042	112.65	25.99	26.5	55.1	44.74	51.95	696.52	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	1312
IIGE, 2024	LH1-00338	20.36	8.1	0.04	76.1	21.74	31.2	52.66	39.40	20.10	569.16	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	1317
IIGE, 2024	LH1-00339	20.85	8.73	0.675	99.4	19.54	72.66	113.6	230.96	12.66	555.09	HCO ₃ ⁻ -Mg ²⁺	168
IIGE, 2024	LH1-00340	21.55	8.09	0.229	170.6	15.42	30.57	28.49	288.57	61.51	487.46	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	124
IIGE, 2024	LH1-00341	21.22	7.47	0.806	111.35	28.36	56.02	52.6	142.87	35.83	610.02	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	65
IIGE, 2024	LH1-00342	12.92	8.41	0.08	15.03	4.829	24.64	16.19	34.42	3.59	134.57	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺	202
IIGE, 2024	LH1-00343	40.9	6.38	2.836	322.2	79.62	244.4	171.3	996.73	10.92	1717.80	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	60
IIGE, 2024	LH1-00344	20.25	8.23	1.646	215.5	44.47	90.28	83.63	659.80	18.58	555.09	Cl ⁻ -Na ⁺	51
IIGE, 2024	LH1-00345	20.66	8.5	0.38	94.5	17.33	51.58	85.48	115.14	23.44	651.21	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	225
IIGE, 2024	LH1-00346	20.34	8.44	0.059	25.51	3.639	35.84	20.62	31.16	29.27	163.40	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺	349
IIGE, 2024	LH1-00347	21.47	7.81	0.324	118.25	22.18	48.68	90.79	102.76	55.65	795.05	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	280
CELEC, 2017	JC-01	57.9	6.37	2.7	677	107	53	29	1060.00	48.00	418.00	Cl ⁻ -Na ⁺	11
CELEC, 2017	JC-03	73.5	7.2	4.4	1190	187	41	14	1600.00	82.00	511.00	Cl ⁻ -Na ⁺	3
CELEC, 2017	JC-05	17.6	5.6	0.013	16	3.1	21	8.6	0.25	14.00	149.00	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺	662
CELEC, 2017	JC-06	59.4	7.86	4.3	1150	148	86	52	1640.00	31.00	670.00	Cl ⁻ -Na ⁺	12
CELEC, 2017	JC-07	58	6.43	4.3	1140	136	88	51	1690.00	28.00	652.00	Cl ⁻ -Na ⁺	12
CELEC, 2017	JC-08	36.5	6.07	1.7	450	36	52	36	664.00	18.00	372.00	Cl ⁻ -Na ⁺	21
CELEC, 2017	JC-09	41.3	6.69	2	650	65	237	142	833.00	9.10	1700.00	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	71
Aguilera et al., 2005	101_	58.3	6.21	5.14	1186	141	80.9	49.4	1855.00	34.20	682.00	Cl ⁻ -Na ⁺	10
Aguilera et al., 2005	102_2001	53.4	6.37	4.43	1016	125	87.5	4.8	1601.00	31.90	616.00	Cl ⁻ -Na ⁺	1
Aguilera et al., 2005	103_2001	47.2	6.23	5.48	1329	117	102	54.9	2060.00	29.40	861.00	Cl ⁻ -Na ⁺	10
Aguilera et al., 2005	104_2001	24.8	7.31	0.17	132	11.1	49.3	23.4	268.00	35.60	147.00	Cl ⁻ -Na ⁺	138
Aguilera et al., 2005	105_2001	54.4	6.7	5.05	1156	145	86.9	48.9	1810.00	36.20	670.00	Cl ⁻ -Na ⁺	10
Aguilera et al., 2005	109_	10.9	7.76	0.04	17.4	3.45	21.8	11.9	16.80	3.28	156.00	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺	298
Aguilera et al., 2005	110_	42.2	6.46	2.41	660	63.6	237	139	884.00	10.80	1737.00	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	58
Aguilera et al., 2005	111_	14.1	8.18	0.01	6.41	2.12	7.41	2.73	0.31	0.51	58.30	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺	273
Aguilera et al., 2005	112_	17.2	5.96	0.01	15.8	3.15	31.6	11.9	0.71	2.90	203.00	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺	1190
Aguilera et al., 2005	113_	29.9	6.17	1.9	440	58.1	221	96.6	784.00	44.30	1035.00	HCO ₃ ⁻ -Na ⁺	51
Aguilera et al., 2005	105_1999	59.1	6.25		1112	139	91	48	1655.00	35.20	693.00	Cl ⁻ -Na ⁺	
Aguilera et al., 2005	M8	23.7	7.74		677	60.8	70.5	52.8	988.00	28.30	479.00	Cl ⁻ -Na ⁺	
Aguilera et al., 2005	101_1999	58.6	6.34		1195	141	92.5	48.8	1791.00	28.50	680.00	Cl ⁻ -Na ⁺	
Aguilera et al., 2005	102_1999	54.9	7		1036	126	84.5	44	1565.00	36.00	614.00	Cl ⁻ -Na ⁺	
Aguilera et al., 2005	M11	21.5	8.12		592	50.4	71	36	887.00	23.00	394.00	Cl ⁻ -Na ⁺	
Aguilera et al., 2005	103_1999	46.9	6.19		1347	121	107	50	1971.00	29.60	833.00	Cl ⁻ -Na ⁺	
Aguilera et al., 2005	M13	21.7	7.52		56	7.2	62	9.12	146.00	14.20	142.00	Cl ⁻ -Ca ²⁺	
Inguaggiato et al., 2010	Chachimburo (E43)	51.2	6.9	3.89	969.94	117.69	86.57	44.24	1611.34	33.14	250.17	Cl ⁻ -Na ⁺	11
Burbano et al., 2013	Timbuyacu	41	7.3		404.85	72.1	104.52	131.72	866.04	13.80	688.01	Cl ⁻ -Na ⁺	
Burbano et al., 2013	Chachimburo	55	7.6		867.4	161.02	88.44	58.54	1843.44	33.40	409.09	Cl ⁻ -Na ⁺	
Gherardi and Spycher, 2014	103_ reconstruido	254	7.1	12.6	2629	232	202	0.0011	4075.00	58.00	2731.00	Cl ⁻ -Na ⁺	8,7E-05

ANEXO 2. Comparación de los resultados obtenidos mediante la metodología descrita en este estudio, a partir de los datos reportados por Neupane y Wendt [29] y por Goldberg et al. [30], para el cálculo de la masa recuperable de Li (t/año) y del valor de mercado (USD/año).

Sitio	Masa de salmuera (kg/día)	Li (mg/l)	Li (mg/día)	Li (t/día)	Li (t/año)	Masa recuperable de Li (t/año)	Masa recuperable de Li ₂ CO ₃ (t/año)	Precio de mercado (USD/t)	Valor de mercado (USD/año)	Referencia
*Desert Peak-2 (low concentration)	860 000	1,4	1 204 000,00	0	0,4	0,32	0,00	6 600	11 116,81	11 100
*Desert Peak-2 (high concentration)	860 000	5,6	4 816 000,00	0	1,58	1,27	1,00	6 600	44 467,24	45 000
*Desert Peak-1 (low concentration)	10 230 000	1,4	14 322 000,00	0,01	4,7	3,76	4,00	6 600	132 238,35	132 000
*Desert Peak-1 (high concentration)	10 230 000	5,6	57 288 000,00	0,06	18,82	15,06	15,00	6 600	528 953,39	529 000
*Casa Diablo (low concentration)	65 660 000	0,3	19 698 000,00	0,02	6,47	5,18	5,00	6 600	181 876,20	182 000
*Casa Diablo (high concentration)	65 660 000	4	262 640 000,00	0,26	86,28	69,02	69,00	6 600	2 425 016,02	2 424 000
*Saltion Sea (low concentration)	273 130 000	90	24 581 700 000,00	24,58	8 075,09	6 460,07	6 460,00	6 600	226 968 535,65	226 908 000
*Saltion Sea (high concentration)	273 130 000	440	120 177 700 000,00	120,18	39 478,21	31 582,57	31 580,00	6 600	1 109 623 952,09	1 109 000 000
*El Tatio	6 853 032,93	61	418 035 008,91	0,42	137,32	109,86	no descrito	9 000	5 263 382,95	5 263 383

ANEXO 3. Escenarios de cálculo de la masa recuperable de Li₂CO₃ y del valor de mercado para Chachimburo (Ecuador), Sol del Mañana (Bolivia) y Cerro Pabellón (Chile).

Escenario	Masa de salmuera (kg/día)	Concentración de Li (mg/l)	Masa recuperable de Li (t/año)	Masa recuperable de Li ₂ CO ₃ (t/año)	Precio de mercado (USD/t)	Valor de mercado (USD/año)
Chachimburo reservorio somero – mínima salmuera – precio 2025	860 000	7	1,58	8,42	9 123,72	76 838,39
Chachimburo reservorio somero – promedio salmuera – precio 2025	55 288 500	7	101,71	541,43	9 123,72	4 939 859,56
Chachimburo reservorio somero – máxima salmuera – precio 2025	273 130 000	7	502,45	2 674,71	9 123,72	24 403 335,99
Chachimburo reservorio somero – mínima salmuera – precio 2028	860 000	7	1,58	8,42	17 077,00	143 819,53
Chachimburo reservorio somero – promedio salmuera – precio 2028	55 288 500	7	101,71	541,43	17 077,00	9 246 007,30
Chachimburo reservorio somero – máxima salmuera – precio 2028	273 130 000	7	502,45	2 674,71	17 077,00	45 676 080,44
Chachimburo reservorio profundo – mínima salmuera – precio 2025	860 000	13	2,94	15,64	9 123,72	142 699,86
Chachimburo reservorio profundo – promedio salmuera – precio 2025	55 288 500	13	188,89	1 005,51	9 123,72	9 174 024,90
Chachimburo reservorio profundo – máxima salmuera – precio 2025	273 130 000	13	933,12	4 967,32	9 124,00	45 321 871,97
Chachimburo reservorio profundo – mínima salmuera – precio 2028	860 000	13	2,94	15,64	17 077,00	267 093,42
Chachimburo reservorio profundo – promedio salmuera – precio 2028	55 288 500	13	188,89	1 005,51	17 077,00	17 171 156,41
Chachimburo reservorio profundo – máxima salmuera – precio 2028	273 130 000	13	933,12	4 967,32	17 077,00	84 827 006,54
Sol del mañana – mínima salmuera – precio 2025	860 000	45	10,17	54,14	9 123,72	493 961,07
Sol del mañana – promedio salmuera – precio 2025	55 288 500	45	653,84	3 480,62	9 123,72	31 756 240,03
Sol del mañana – máxima salmuera – precio 2025	273 130 000	45	3 230,04	17 194,59	9 124,00	156 883 402,98
Sol del mañana – mínima salmuera – precio 2028	860 000	45	10,17	54,14	17 077,00	924 554,14
Sol del mañana – promedio salmuera – precio 2028	55 288 500	45	653,84	3 480,62	17 077,00	59 438 618,35
Sol del mañana – máxima salmuera – precio 2028	273 130 000	45	3 230,04	17 194,59	17 077,00	293 631 945,71
Cerro Pabellón – mínima salmuera – precio 2025	860 000	62	14,01	74,59	9 123,72	680 568,58
Cerro Pabellón – promedio salmuera – precio 2025	55 288 500	62	900,85	4 795,53	9 123,72	43 753 041,82
Cerro Pabellón – máxima salmuera – precio 2025	273 130 000	62	4 450,27	23 690,32	9 124,00	216 150 466,33
Cerro Pabellón – mínima salmuera – precio 2028	860 000	62	14,01	74,59	17 077,00	1 273 830,15
Cerro Pabellón – promedio salmuera – precio 2028	55 288 500	62	900,85	4 795,53	17 077,00	81 893 207,51
Cerro Pabellón – máxima salmuera – precio 2028	273 130 000	62	4 450,27	23 690,32	17 077,00	404 559 569,64