



REVISTA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y CIENCIAS DE LA TIERRA



Volumen 1 - N° 1

DICIEMBRE 2025



Revista Científica de Publicación Anual
CARRERA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
FACULTAD NACIONAL DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE ORURO



geologia.fni@gmail.com

<https://www.fni.uto.edu.bo>



REVISTA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y CIENCIAS DE LA TIERRA



CARRERA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

MSc. Ing. Hugo Abdias Capuma Cáceres
DIRECTOR

COMITÉ EDITORIAL

MSc. Ing. Willy Camargo Gallegos
Ing. Dania Lucy Yave Choque
Ing. Joaquín Ramos Pinto

COORDINACIÓN EDITORIAL

Ing. Vladimir Luis Rodríguez Rojas

Revista de Ingeniería Geológica y Ciencias de la Tierra

Año 1, No. 1, diciembre 2025
Edición 40 Aniversario de la carrera de
Ingeniería Geológica
Oruro – Bolivia

Publicación Anual

ISSN

Tiraje: 200 ejemplares

Impreso en:
Latinas Editores Ltda.
c. Sucre #1164 entre Petot y Linares
Telf. (2) 5252458 - (2)5275579
Oruro - Bolivia

ÍNDICE

ESTIMACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE RECURSOS DE LITIO EN LOS PRINCIPALES SALARES DE BOLIVIA.....	3
<i>Miguel Ángel Vinaya Cruz - Alfonso Berardo Perez Valda</i>	
TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL DE MINERALES DE ALTERACIÓN DE LOS INTRUSIVOS: CORIVIRI Y PAN DE AZÚCAR-CHUALLANI, ORURO - BOLIVIA.....	13
<i>Anabel Choque Mamani</i>	
USO DE TÉCNICAS ISOTÓPICAS E HIDROQUÍMICAS PARA LA GESTIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO PRIORIZADO CHALLAPAMPA - ORURO.....	19
<i>Paola Mancilla - Beatriz Canaviri, Andro Villegas</i>	
FRACTALES EN UN ANÁLISIS LITOGEOQUÍMICO POR LITIO EN DEPÓSITOS IGNIMBRÍTICOS DE LA FORMACIÓN MOROCOCALA	19
<i>Joaquín Ramos Pinto</i>	
CÁLCULO DEL FONDO GEOQUÍMICO PARA PLOMO Y ZINC EN SUELOS EN EL SECTOR ORURO-LA JOAYA.....	33
<i>Dania Lucy Yave Choque - Willy Camargo Gallegos</i>	
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO GEOTÉRMICO EN EL MUNICIPIO DE ORURO.....	40
<i>Antonio Carrasco Cortez</i>	



PRESENTACIÓN

La Carrera de Ingeniería Geológica de la UTO, al celebrar su XL Aniversario, presenta con orgullo la primera edición de su Revista Científica, un espacio dedicado a la difusión del conocimiento, la investigación y la innovación en las ciencias de la Tierra. Este acontecimiento marca un hito trascendental en la historia de nuestra carrera, que durante cuatro décadas ha contribuido a la formación de profesionales comprometidos con el desarrollo sostenible, la gestión responsable de los recursos naturales y la comprensión profunda de los procesos geológicos que modelan nuestro planeta.

La creación de esta revista representa la consolidación de una aspiración largamente anhelada por la comunidad académica de la carrera: disponer de un medio de publicación que visibilice los resultados de investigación, promueva el intercambio de conocimientos entre docentes, estudiantes y profesionales, y fomente la integración con otras instituciones científicas, tanto a nivel nacional como internacional.

La publicación de esta revista no solo simboliza un logro institucional, sino también un compromiso renovado con la ciencia y la sociedad. Es un homenaje a todos los pioneros que sentaron las bases de la carrera, a los docentes que han forjado generaciones de profesionales, y a los estudiantes que, con su entusiasmo y curiosidad, aseguran la continuidad de esta noble disciplina.

MSc. Hugo Abdías Capuma Cáceres
DIRECTOR
CARRERA INGENIERÍA GEOLÓGICA



PRÓLOGO

Este volumen es el primer número de la revista de artículos científicos que se publicará anualmente por la carrera de Ingeniería Geológica de la Universidad Técnica de Oruro. Intenta cubrir todo el espectro de las Ciencias de la Tierra y de Geología Aplicada como es la Ingeniería Geológica.

En este primer número se presentan trabajos de investigación, realizados por profesionales, esencialmente formados en nuestra carrera que cubren especialidades desde geoquímica aplicada a exploración de depósitos minerales y de control ambiental, hasta nuevas fuentes de energías alternativas como la geotermia, apoyada en estudios de geofísica avanzada , pasando por modelos de recarga de acuíferos subterráneos del altiplano boliviano y de técnicas de ingeniería de datos mediante fractales e imágenes de satélite en estado de arte, además de estimación y certificación de reservas y recursos de litio en el salar de Uyuni.

Los artículos aquí presentados se escribieron conforme a la idea de que Bolivia necesita conocer las diferentes alternativas de abordar los problemas relacionados a recursos naturales no renovables y sus propuestas de solución.

COMISIÓN DE REDACCIÓN

Willy Camargo Gallegos
Dania Lucy Yave Choque
Joaquín Ramos Pinto

Oruro. Diciembre de 2025

ESTIMACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE RECURSOS DE LITIO EN LOS PRINCIPALES SALARES DE BOLIVIA

Miguel Ángel Vinaya Cruz¹, Alfonso Berardo Perez Valda²

¹miguel.vinaya@ylb.gob.bo, ²alfonso.perez@ylb.gob.bo

Empresa Pública Nacional Estratégica Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB)

Departamento de Geología – Gerencia de Proyectos y Contratos



RESUMEN

Bolivia posee las mayores reservas de litio del mundo, estimadas en aproximadamente 23 millones de toneladas métricas, equivalentes al 22–24 % de los recursos globales identificados. Estos depósitos se encuentran en cuencas endorreicas del altiplano sur, donde se desarrollan salares de gran extensión como Uyuni, Coipasa, Empexa, Cañapa, Pastos Grandes, Capina y Chiguana. El presente trabajo, fue elaborado con información técnica de Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB), describe las características geológicas de estos salares, así como la estimación de sus recursos evaporíticos. Se destaca la aplicación del modelo numérico hidrogeológico del Salar de Uyuni elaborado por SRK Consulting bajo los lineamientos de la norma NI 43-101, y su extensión a otros salares bolivianos a través de YLB. Los recursos de litio en las salmueras bolivianas suman aproximadamente 23,35 millones de toneladas de litio metálico in situ (124,4 millones de toneladas de LCE). El Salar de Uyuni es el principal reservorio, con 21,09 millones de toneladas de litio metálico (112,2 Mt LCE) certificado por SRK Consulting, mientras que los salares de Coipasa, Empexa, Cañapa, Pastos Grandes y Capina presentan estimaciones preliminares las cuales se encuentran en proceso de certificación internacional. Entre ellos, Coipasa se destaca con 1,85 millones de toneladas de litio metálico (9,87 Mt LCE), seguido por Empexa (0,21 Mt Li, 1,14 Mt LCE) y Pastos Grandes (0,20 Mt Li, 1,09 Mt LCE). Capina y Cañapa muestran los menores volúmenes, con 0,024 y 0,0007 Mt de litio metálico, respectivamente.

Palabras clave: litio, salmueras, salares, evaporitas, recursos minerales, Bolivia.

ABSTRACT

Bolivia possesses the largest lithium reserves in the world, estimated at approximately 23 million metric tons, equivalent to 22–24% of the globally identified resources. These deposits are located in endorheic basins of the southern Altiplano, where extensive salt flats such as Uyuni, Coipasa, Empexa, Cañapa, Pastos Grandes, Capina, and Chiguana have developed. This study, prepared with technical information provided by Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB), describes the geological characteristics of these salars as well as the estimation of their evaporitic resources. It highlights the application of the hydrogeological numerical model of the Salar de Uyuni, developed by SRK Consulting under the guidelines of the NI 43-101 standard, and its extension to other Bolivian salars through YLB. The lithium resources in Bolivian brines amount to approximately 23.35 million tons of lithium metal in situ (124.4 million tons of LCE). The Salar de Uyuni represents the main reservoir, with 21.09 million tons of lithium metal (112.2 Mt LCE) certified by SRK Consulting, while the Coipasa, Empexa, Cañapa, Pastos Grandes, and Capina salars present preliminary estimates that are currently in the process of international certification. Among them, Coipasa stands out with 1.85 million tons of lithium metal (9.87 Mt LCE), followed by Empexa (0.21 Mt Li, 1.14 Mt LCE) and Pastos Grandes (0.20 Mt Li, 1.09 Mt LCE). Capina and Cañapa show the smallest volumes, with 0.024 and 0.0007 Mt of lithium metal, respectively.

Keywords: lithium, brines, salars, evaporites, mineral resources, Bolivia.

INTRODUCCIÓN

El litio constituye un elemento estratégico para la transición energética global debido a su aplicación en baterías de ion-litio, fundamentales en la electromovilidad y el almacenamiento de energía. En este contexto, Bolivia se

posiciona como un país estratégico, con los mayores recursos mundiales de litio contenidos en salmueras evaporíticas Figura 1. Estas se localizan en el altiplano sur, en una extensa cuenca endorreica caracterizada por sistemas salinos de alta evaporación.



Fig. 1. A) Mapa de ubicación de los salares bolivianos explorados B) América del Sur C) Triángulo del Litio

El presente estudio tiene como objetivo presentar los resultados de la estimación y certificación de recursos de litio realizada por Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB) y Steffen, Robertson & Kirsten (SRK) Consulting, con base en metodologías reconocidas internacionalmente, así como en trabajos de exploración.

ANTECEDENTES

Las investigaciones sobre los salares bolivianos iniciaron en la segunda mitad del siglo XX, avanzando desde la caracterización geológica hasta la modelización de recursos bajo estándares internacionales. Los primeros estudios, realizados por la Universidad Mayor de San Andrés en colaboración con el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación ORSTOM y el CIRESU, permitieron la caracterización geoquímica detallada

de los salares de Uyuni y Coipasa, destacando el trabajo de Ballivián y Risacher, que sentó las bases para la evaluación de recursos minerales.

En 1995, el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) reconoció al Salar de Uyuni como el mayor depósito evaporítico del mundo, consolidando su importancia estratégica. Posteriormente, estudios como los de Risacher y Fritz (2009) profundizaron en la evolución geoquímica cuaternaria, explicando la alta concentración de magnesio en las salmueras bolivianas, factor determinante en los métodos de extracción de litio.

Un hito en la estandarización metodológica se alcanzó en 2019 con el Modelo Numérico Hidrogeológico y la Estimación de Recursos Minerales Recuperables del Salar de Uyuni, desarrollado por SRK Consulting con sede legal en

Canadá, bajo la norma canadiense NI 43-101, estableciendo un marco de referencia que se ha aplicado en otros salares bolivianos.

MÉTODOS Y MATERIALES

La estimación de los recursos de litio se basó en múltiples parámetros geológicos e hidrogeológicos. La concentración de litio se determinó mediante análisis de salmuera realizados en distintas etapas del proceso exploratorio. La porosidad drenable (S_y) se obtuvo a partir de ensayos de laboratorio en testigos de perforación, analizados en el laboratorio DBS&A, Nuevo México, EE. UU., específicamente para el Salar de Uyuni. La conductividad hidráulica (K) se estimó mediante pruebas de bombeo en campo, mientras que el espesor de las unidades saturadas se definió a través de la correlación estratigráfica.

Finalmente, la clasificación de recursos se realizó siguiendo la normativa NI 43-101, asignando categorías Medido, Indicado e Inferido en función de la densidad de los pozos perforados y a la calidad de los datos geológicos

disponibles. El cálculo de los recursos de litio se realizó mediante el balance volumétrico de salmuera, considerando el volumen poroso drenado multiplicado por la concentración promedio de Li disuelto.

RESULTADOS

Salar de Uyuni

Ubicado a 3.650 m.s.n.m. con una superficie superior a 10.000 km², el Salar de Uyuni es el mayor depósito evaporítico del mundo y el primero en explotación industrial en Bolivia. SRK Consulting identificó cinco unidades hidroestratigráficas: costra salina, sedimentos lacustres, evaporitas, sedimentos finos y basamento rocoso.

Los resultados indican:

- Conductividad hidráulica: 0,1–100 m/d.
- Porosidad drenable (S_y): 0,04–0,17.
- Concentración de Li: 200,0–1.750 mg/L.
- Caudales de bombeo: 250–500 L/s.
- Profundidad del modelo hidrogeológico 50,0 m.

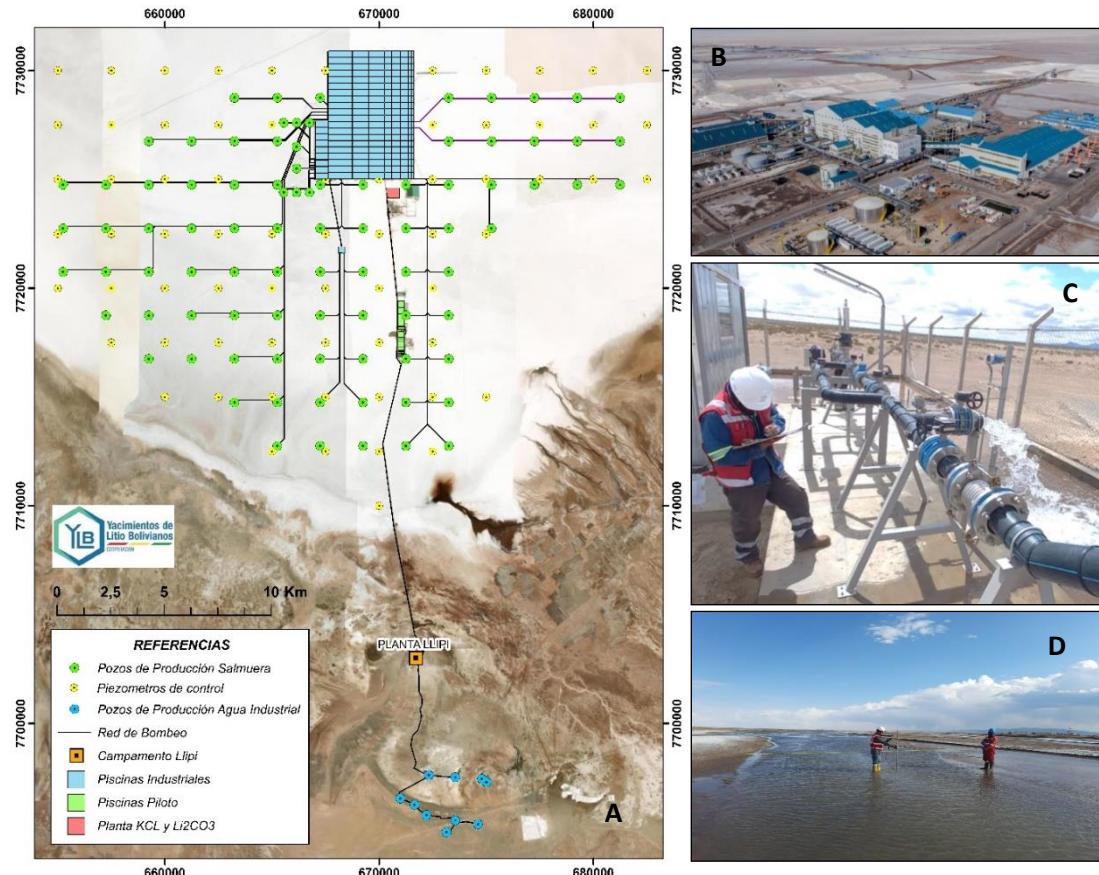


Fig. 2. A) Proyecto Salar de Uyuni B) Plantas industriales de sales KCl y Li_2CO_3 instaladas en el salar de Uyuni C) Monitoreo de pozos productivos de agua industrial D) Monitoreo del Río Grande de Lipez afluente principal del Salar de Uyuni

El modelo proyecta una vida útil del yacimiento de 50–100 años pudiendo extenderse bajo ciertas condiciones. Las plantas industriales de KCl y Li₂CO₃ ubicadas en el salar de Uyuni utilizan agua salobre del acuífero San Gerónimo, donde los pozos productivos destinados a la extracción de agua industrial son monitoreados y gestionados de forma continua, garantizando la sostenibilidad hídrica del acuífero (fig. 2^a).

El Río Grande de Lípez constituye la principal fuente de recarga superficial del sistema hidrológico del Salar de Uyuni (fig. 2D). En el sector sur del salar, este río ha formado un extenso delta de aproximadamente 300 km², que se interdigita y cubre parcialmente la costra salina. El delta está

conformado por un complejo sistema de capas arcillosas intercaladas con lentes de limo y arena, conformando una unidad con baja porosidad y permeabilidad Risacher y Fritz (1991).

Las observaciones hidrológicas evidencian que las inundaciones anuales generan una dilución temporal de las salmueras superficiales, reduciendo las concentraciones de litio entre un 11 % y un 30 %. Sin embargo, los registros de monitoreo muestran que la composición química de las salmueras tiende a mantenerse estable en el tiempo, lo que sugiere una limitada conexión hidráulica entre las aguas de inundación y las salmueras profundas del salar de Uyuni.

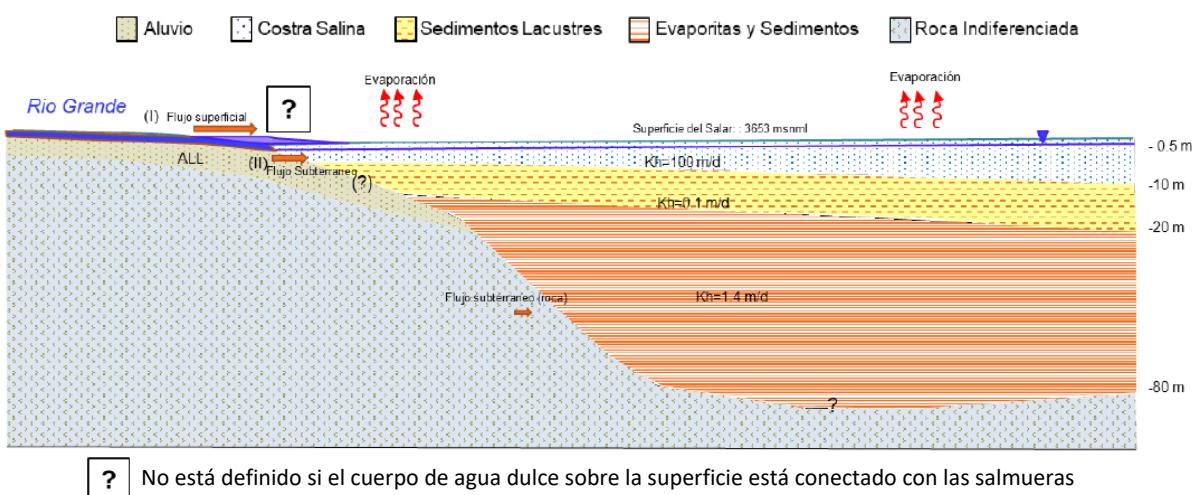


Fig. 3. Modelo Hidrogeológico Conceptual antes del Bombeo SRK 2019 para el salar de Uyuni

El Salar de Uyuni se clasifica como un salar inmaduro, con una secuencia estratigráfica intercalada por evaporíticas intercaladas con formaciones clásticas. La costra superficial alcanza 17 m de espesor, está formada por halita y pequeñas cantidades de yeso, infiltrando a estas se presentan formaciones arcillo-limosas con capas de yeso y calcita de 25 m de espesor, seguidas por intercalaciones de halita y niveles arcillo limosos de 50 m de espesor. En la base se encuentran halitas masivas con interdigitaciones clásticas de 350 m de espesor, que constituyen el núcleo del depósito evaporítico, este estudio, desarrollado por G. Quezada y N. Carvajal (2020) define distintas litofacies sedimentarias y ciclos de deposición, estableciendo la

cronología del relleno sedimentario, información clave para comprender la evolución geológica

SRK Consulting elaboró un modelo hidrogeológico para el Salar de Uyuni (fig. 3), a partir del cual se realizó el cálculo de los recursos mediante la NI 43-101 (fig. 4a) que proporciona un razonable y riguroso marco de referencia para proyectos minerales alojados en salmueras.

La Fig. 4B muestra los recursos certificados para el salar de Uyuni que corresponden a los recursos medidos con un alto grado de certeza geológica, obteniéndose 1.352.621,0 Tm de Litio in situ y 7.195.943,7 Tm para carbonato de litio equivalente (LCE).

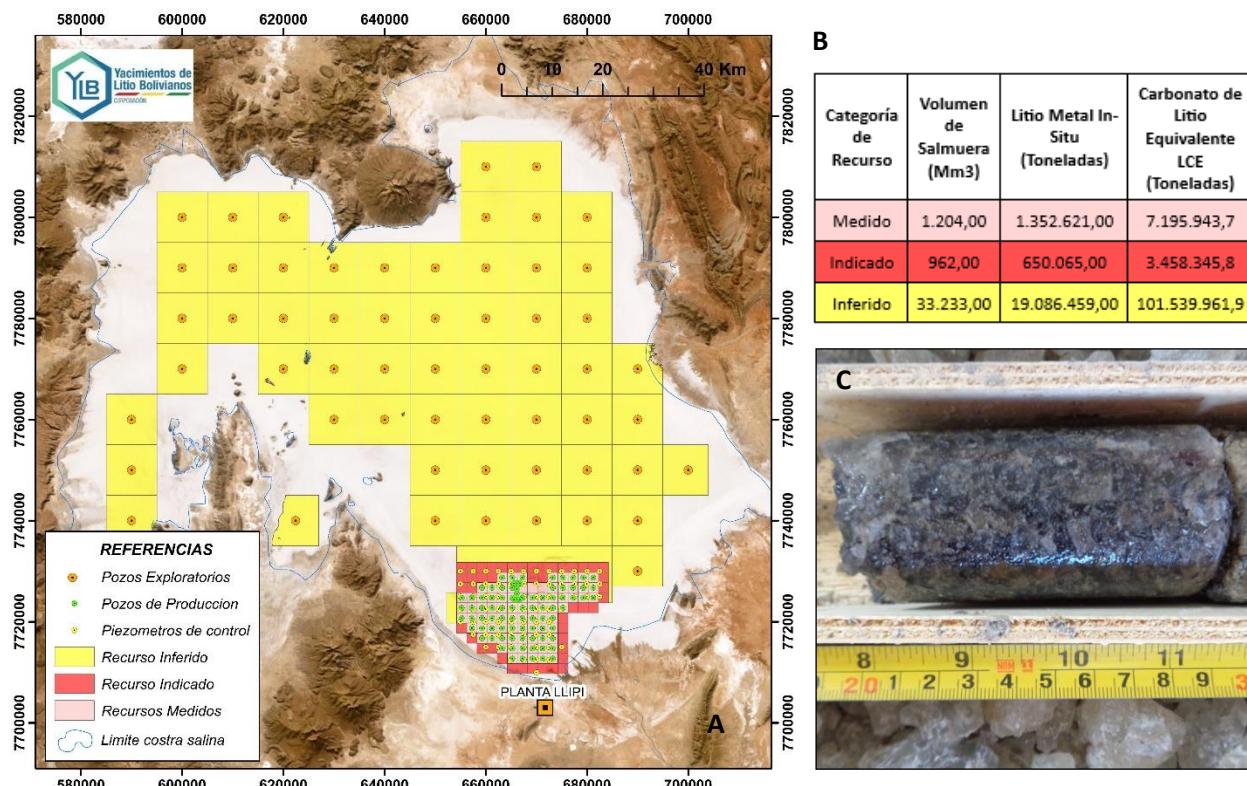


Fig. 4. A) Modelo de bloques calculados para el salar de Uyuni B) Recursos certificados para el salar de Uyuni C) Halita gris masiva con impregnaciones de limos arcillosos salar de Uyuni profundidad 200 m

Los resultados obtenidos para la porosidad drenable (S_y) responden a las características geológicas del salar de Uyuni, los resultados obtenidos para (S_y) fueron utilizados en la estimación de los recursos inferidos e indicados para los salares de Coipasa, Empexa, Cañapa, Pastos Grandes y Capina.

Salar de Coipasa

El Salar de Coipasa, ubicado en el altiplano sur de Bolivia a 3.653 m.s.n.m. y con una superficie cercana a 2.500 km², constituye el segundo salar más importante del país. YLB, a través del Departamento de Geología, ha desarrollado trabajos exploratorios orientados a la estimación de los recursos evaporíticos, basados en perforaciones exploratorias, cuya certificación se encuentra en proceso.

La Figura 5B muestra los recursos estimados para el salar de Coipasa. Las concentraciones de litio en las salmueras varían entre 0,17 y 0,74 g/L. El segundo valor pertenece al sector de mayor concentración, y corresponde a los bloques definidos para los recursos indicados de 305.712,10 Tm de Litio in situ y 1.626.388,0 Tm para LCE.

El Salar de Coipasa presenta cuatro ríos aportantes; el río Sabaya al norte, el río Lauca principal colector al norte del Salar cuyas aguas forman un lago salado Coipasa, el río Lakajahuira relacionado al lago Poopó al este del salar, el río Jachajahuira al oeste y al sur el río Totora. Todos estos ríos son permanentes.

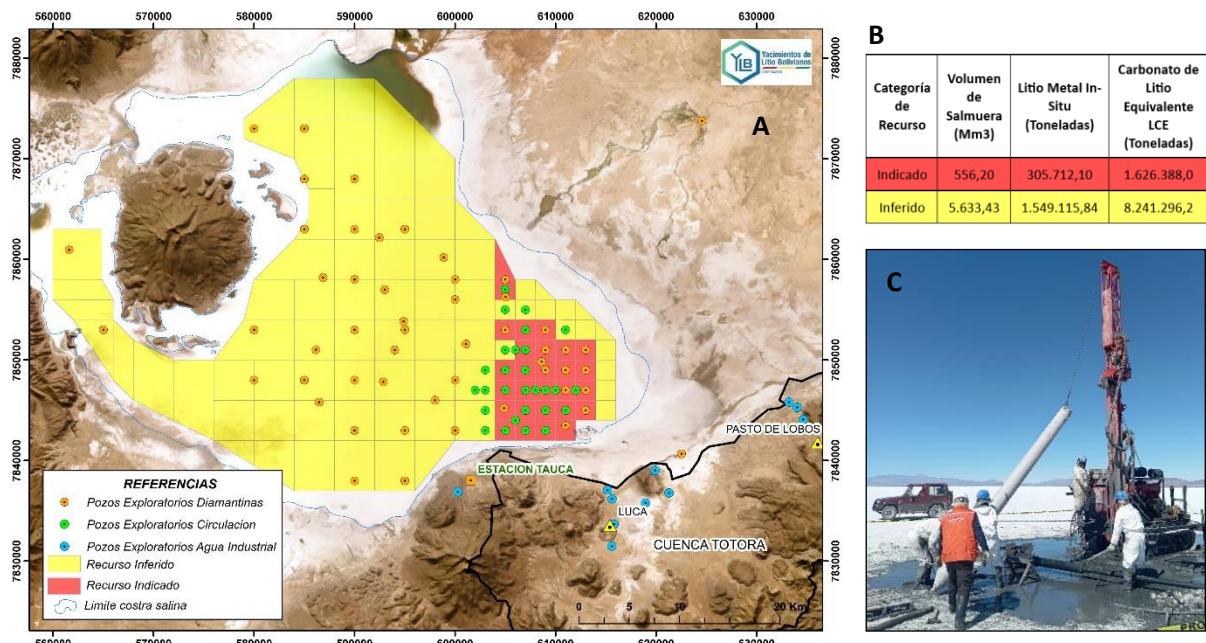


Fig. 5. A) Modelo de bloques calculados para el salar de Coipasa **B)** Recursos estimados para el salar de Coipasa **C)** Entubado pozos a circulación directa salar de Coipasa

En el sector sureste, específicamente en la cuenca Totora, se realizaron diez pozos exploratorios destinados a la obtención de agua para uso industrial (fig. 5^a). Los caudales promedio registrados fueron de 58,5 m³/h en las proximidades de la localidad de Luca y 5,5 m³/h cerca de la población de Pastos de Lobos.

Salar de Empexa

El Salar de Empexa, ubicado en el altiplano sur de Bolivia a 3.680 m.s.n.m. con una superficie de 420,0 km², constituye uno de los principales salares secundarios del país. Las concentraciones de litio en sus salmueras varían entre 0,25 y 0,40 g/L, las pruebas de bombeo en los pozos a circulación directa registraron un caudal promedio de 68,11 m³/h. La Figura 6A muestra los recursos estimados para el

salar de Empexa correspondiente a los recursos indicados obteniéndose 112.014,53 Tm de Litio in situ y 595.917,30 Tm para LCE.

Salar de Cañapa

El Salar de Cañapa, ubicado en el altiplano sur de Bolivia a 4.139 m.s.n.m. con una superficie de 1,6 km², constituye un salar secundario de interés para la explotación de litio. Las concentraciones de litio en sus salmueras varían entre 0,07 y 0,60 g/L, las pruebas de bombeo en el único pozo perforado a circulación directa registró un caudal promedio de 60,85 m³/h. La Figura 6B muestra los recursos estimados para el salar de Cañapa correspondiente a los recursos indicados obteniéndose 498.920,0 Tm de Litio in situ y 2.574,45 Tm para LCE.

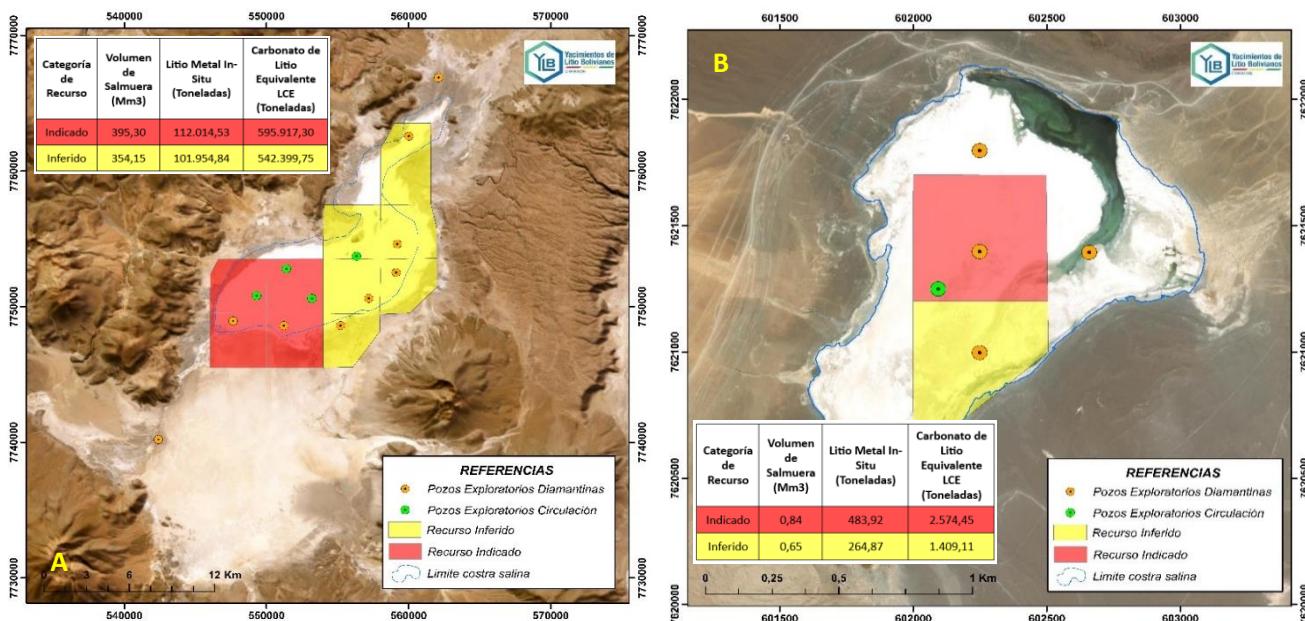


Fig. 6. A) Modelo de bloques calculados para el salar de Empexa B) Modelo de bloques calculados para el salar de Cañapa

Salar de Pastos Grandes

El Salar de Pastos Grandes se encuentra al suroeste de Bolivia, en la provincia Nor Lípez del Departamento de Potosí, con una superficie aproximada de 120 km² a una elevación de 4.445 m.s.n.m. el Departamento de Geología, realiza trabajos exploratorios enfocados en la estimación y cuantificación de los recursos evaporíticos.

Las concentraciones de litio en el salar de Pastos Grandes varían entre 0,08 y 1,56 g/L. Las pruebas de bombeo en los pozos perforados a circulación directa reportaron un caudal promedio de 20,77 m³/h. La Figura 7A muestra los recursos estimados para el salar de Pastos Grandes correspondiente a los recursos indicados obteniéndose 155.917,34 Tm de Litio in situ y 829.480,25 Tm para LCE.

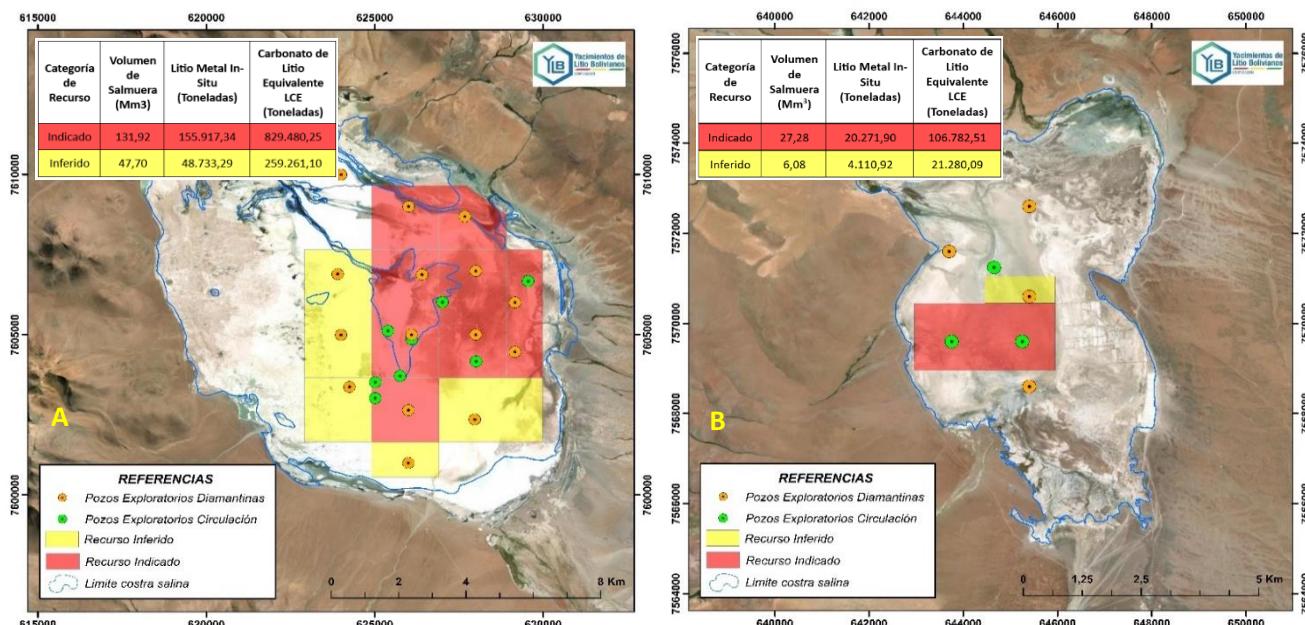


Fig. 7. A) Modelo de bloques calculados para el salar de Pastos Grandes, B) Modelo de bloques calculados para el salar de Capina

Salar de Capina

El Salar de Capina, con una superficie aproximada de 40,0 km², se ubica al sureste del Salar de Pastos Grandes, abarcando las provincias Nor y Sur Lípez del Departamento de Potosí, con una elevación de 4.500 m.s.n.m.

Las concentraciones de litio en las salmueras del salar de Capina oscilan entre 0,01 y 0,82 g/L. Las pruebas de bombeo en los pozos perforados a circulación directa reportaron un caudal promedio de 40,03 m³/h. La Figura 7B muestra los recursos estimados para el salar de Capina correspondiente a los recursos indicados obteniéndose 20.271,90 Tm de Litio in situ y 106.728,51 Tm para LCE.

Salar de Chiguana

El Salar de Chiguana, con una superficie aproximada de 320,2 km², se ubica en la provincia Nor Lípez del Departamento de Potosí, municipio de San Pedro de Quemez, próximo a la frontera con Chile. Este salar está formado en una depresión alimentado de pequeñas quebradas por donde se filtra el agua desde la Cordillera Occidental y por rebalse desde el salar de Uyuni, presenta una elevación promedio de 3.700 m.s.n.m.

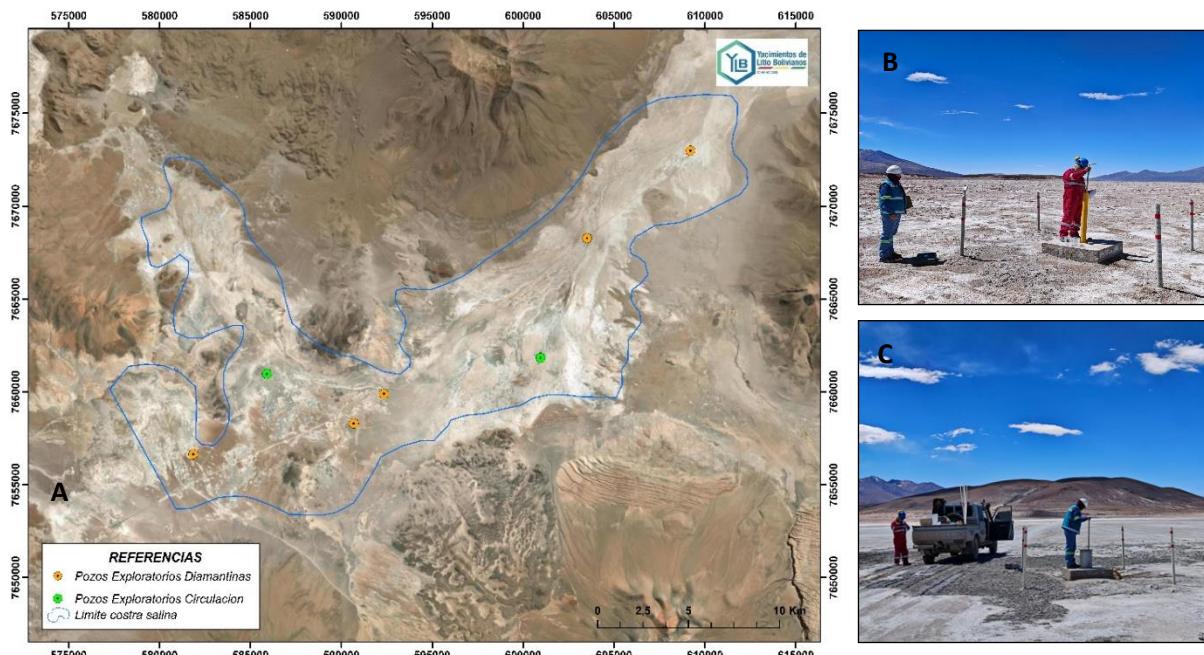


Fig. 8. A) Pozos exploratorios en el salar de Chiguana **B)** Monitoreo de pozos a diamantina en el salar de Chiguana
C) Monitoreo de pozos a circulación directa en el salar de Chiguana

El Departamento de Geología realiza trabajos exploratorios en el salar de Chiguana, mediante la perforación de pozos a diamantina y a circulación directa (fig. 8). Las concentraciones de litio en las salmueras varían entre 0,001 y 0,04 g/L, las pruebas de bombeo en los pozos perforados a circulación directa registraron un caudal promedio de 60,01 m³/h. la estimación de los recursos en el salar de Chiguana se encuentran en elaboración.

CONCLUSIONES

Los recursos de litio contenidos en las salmueras evaluadas por YLB y los certificados por SRK Consulting para el salar de Uyuni, suman aproximadamente 21,09 millones de toneladas de litio metálico in situ, equivalentes a 112,2 millones de toneladas de carbonato de litio equivalente (LCE).

Cabe resaltar que el Salar de Uyuni es el único con recursos certificados por una consultora internacional (SRK Consulting), mientras que los resto de los salares como Coipasa, Empexa, Cañapa, Pastos Grandes y Capina presentan estimaciones preliminares elaboradas por YLB, en proceso de certificación técnica internacional.

En segundo orden de importancia se ubica el Salar de Coipasa, con 1,85 millones de toneladas de litio metálico y 9,87 millones de toneladas de LCE. Le siguen los salares de Empexa con 0,21 millones de toneladas de litio metálico (1,14 Mt LCE) y Pastos Grandes con 0,20 millones de toneladas de litio metálico (1,09 Mt LCE). Por su parte, los salares de Capina y Cañapa exhiben volúmenes menores, de 0,024 y 0,0007 millones de toneladas de litio metálico, equivalentes a 0,13 y 0,004 millones de toneladas de LCE, respectivamente.

En conjunto, los seis salares considerados suman aproximadamente 23,35 millones de toneladas de litio metálico in situ, equivalentes a 124,4 millones de toneladas de carbonato de litio equivalente (LCE).

DISCUSIÓN

Los resultados confirman que el Salar de Uyuni es el principal reservorio de litio de Bolivia y uno de los más relevantes a nivel mundial, con 21,09 millones de toneladas de litio metálico in situ (equivalentes a 112,2 Mt LCE), certificados por SRK Consulting bajo los estándares NI 43-101. En contraste, los salares de Coipasa, Empexa, Cañapa, Pastos Grandes y Capina solo cuentan con estimaciones preliminares elaboradas por YLB, pendientes de certificación internacional. Dado que dichas estimaciones abarcan áreas menores que la extensión real de los salares, se presume un potencial mayor de recursos. Hace falta una actualización mediante monitoreos hidrogeoquímicos y registros meteorológicos que permitan una evaluación constante y sustentable de los recursos evaporíticos bolivianos.

La relación Mg/Li es un parámetro crítico que determina la calidad de las salmueras y la viabilidad del proceso de extracción de litio. En los salares bolivianos, esta relación varía ampliamente: Uyuni (20:1), Coipasa y Empexa (40:1), Chiguana (56:1), y valores bajos en Pastos Grandes (3:1), Capina (3:1) y Cañapa (2:1). Los salares con alta proporción de magnesio presentan mayores dificultades técnicas, lo que hace imprescindible la aplicación de tecnologías de Extracción Directa de Litio (EDL). En contraste, los salares con baja relación Mg/Li son más favorables para métodos convencionales. Esta variabilidad refleja la necesidad de

seleccionar tecnologías específicas según las características geoquímicas de cada salar para lograr una explotación sostenible del litio en Bolivia.

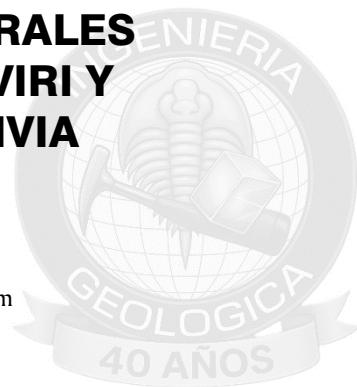
Se debe mencionar que, desde la gestión 2023, el Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de Materiales y Recursos Evaporíticos de Bolivia (CICYT MAT-REB), dependiente de YLB ubicado en La Palca Potosí, ha iniciado la implementación de diferentes métodos para la determinación de la porosidad drenable (Sy). Entre ellos destaca la aplicación de la metodología Resaturation Drying Resaturation (RBR), basada en la norma internacional ASTM D6836-02, mediante la cual se han obtenido resultados preliminares promisorios. La aplicación sistemática de este método constituye un avance significativo, que permitirá mejorar la precisión en la estimación de los parámetros hidrogeológicos y actualizar los recursos evaporíticos de los salares bolivianos de manera técnica y estandarizada.

REFERENCIAS

- Alonso, H., Risacher, F., & Fritz, B. (1991). Geoquímica y evolución del Salar de Uyuni (Bolivia). *Revista Geológica de Chile*, 18(2), 125–146.
- ASTM International. (2002). *ASTM D6836-02: Standard test methods for determination of the water retention characteristics of soil using a pressure extractor, pressure plate apparatus, or centrifuge method*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Ballivián, O., & Risacher, F. (1981). *Los salares del altiplano boliviano: Geología, hidroquímica y balance de masas*. La Paz, Bolivia: ORSTOM–Instituto de Geología.
- Fritz, B., & Risacher, F. (1998). Saline lake evolution: Chemical model of the Salar de Uyuni, Bolivia. *Hydrogeology Journal*, 6(4), 477–491. <https://doi.org/10.1007/s100400050165>
- Quezada, G., & Carvajal, N. (2020). *Geología y recursos de litio del depósito evaporítico más grande del mundo*. La Paz, Bolivia.
- Risacher, F. (2005). Geoquímica de los salares andinos: Procesos de evaporación y evolución de las salmueras. *Boletín del Servicio Geológico de Bolivia*, 27, 45–67.
- Risacher, F., & Fritz, B. (1991). Origin of salts and brine evolution of Bolivian and Chilean salars. *Chemical Geology*, 90(3), 211–231. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(91\)90101-V](https://doi.org/10.1016/0009-2541(91)90101-V)

- Silva, M., Carvajal, N., Vargas, R., & Mendoza, A. (2025). *Estimación de recursos de litio y potasio en el Salar de Pastos Grandes, Potosí – Bolivia*. En XXV Congreso Geológico Boliviano.
- SRK Consulting. (2019). *Technical report on the mineral resources of the Salar de Uyuni, Bolivia*. Report prepared for Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB) under NI 43-101 standards.
- U.S. Geological Survey (USGS). (2024). *Mineral commodity summaries 2024: Lithium*. Reston, VA: U.S. Department of the Interior.
- Vinaya, M., & Carvajal, N. (2025). *Estimación preliminar de recursos para litio y potasio: Salar de Coipasa, Oruro – Bolivia*. En XXV Congreso Geológico Boliviano.
- Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB). (2024). *Avances en la caracterización hidrogeológica de los salares bolivianos: Uyuni, Coipasa, Empexa, Cañapa, Pastos Grandes, Capina y Chiguana*. Informe interno La Paz, Bolivia.

TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL DE MINERALES DE ALTERACIÓN DE LOS INTRUSIVOS: CORIVIRI Y PAN DE AZÚCAR-CHUALLANI, ORURO-BOLIVIA



Anabel Choque Mamani

Servicio Geológico Minero (SERGEOMIN), La Paz, Bolivia – choqueanabel.geo@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo evalúa la aplicación de imágenes satelitales ASTER para la prospección geológica-minera en el área de Coriviri (Faja Polimetálica Estañífera), enfocándose en la identificación de alteraciones hidrotermales y supérgenicas.

Mediante la técnica de combinación de bandas y cocientes espectrales (como RGB 943, 461 y cocientes 2/1, 4/6, 4/5, 4/7), se detectaron minerales como óxidos de hierro, arcillas, sericitina y dickita, verificadas en campo confirmando su relación con estructuras vetiformes mineralizadas, donde se identifican dos tipos de alteración hidrotermal: cuarzo-sericitina y silicificación, así como procesos supérgenos de argillización y oxidación en halos de estructuras vetiformes asociadas a mineralización de Au, Ag, Pb, Zn, Cu y Sn controladas por el intrusivo subvolcánico dacítico de Coriviri.

El análisis espectral se validó en Coriviri y se extrapoló al Sector Pan de Azúcar (Cerro Pan de Azúcar y Cerro Chuallani ambos de composición dacítica), donde también se identificaron firmas de alteración asociadas a posibles cuerpos intrusivos mineralizados.

Se concluye indicando que la teledetección permite resaltar zonas de interés mediante combinaciones de bandas, en este estudio con mayor efectividad RGB 461 y cocientes espectrales de bandas, verificadas posteriormente en campo.

ABSTRACT

This study evaluates the application of ASTER satellite imagery for geological–mining exploration in the Coriviri area (Tin-Polymetallic Belt), focusing on the identification of hydrothermal and supergene alterations.

Through band combinations and spectral ratio techniques (e.g., RGB 943, 461, and ratios 2/1, 4/6, 4/5, 4/7), minerals such as iron oxides, clays, sericitina, and dickite were detected. Field verification confirmed their association with mineralized vein structures, revealing two main types of hydrothermal alteration: quartz–sericitina and silicification, along with supergene argillization and oxidation halos linked to Au, Ag, Pb, Zn, Cu, and Sn mineralization. These are structurally controlled by the dacitic subvolcanic intrusive body of Coriviri.

Spectral analysis validated in Coriviri was extrapolated to the Pan de Azúcar sector (Cerro Pan de Azúcar and Cerro Chuallani, both dacitic in composition), where alteration signatures also suggest potential mineralized intrusive bodies.

The study concludes that remote sensing effectively highlights exploration targets through specific band combinations—particularly RGB 461—and spectral ratios, which were subsequently verified through fieldwork.

Palabras clave: Imagen ASTER · Combinaciones RGB · Cocientes de bandas · Intrusivos: Corivi, Pan de Azúcar Oruro, Bolivia

INTRODUCCIÓN

La teledetección, cuyo origen se remonta a la fotografía aérea en 1858 (Pérez & Muñoz 2016), es una herramienta en la exploración minera, que identifica minerales y alteración hidrotermal mediante su respuesta espectral. Combinada con análisis geoquímicos y clasificación digital, facilita el mapeo en superficie (Corrales, 2010). ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) es un dispositivo que obtiene imágenes multiespectrales de la plataforma TERRA de la NASA. (Van Ede, 2004). El procesamiento de imágenes satelitales ASTER ayuda en la identificación litológica y mineralógica (Ait Inoh et al., 2022). Varios estudios han empleado teledetección multiespectral para extraer información sobre alteraciones. (El-Desoky et al. 2020)

Ubicación geológica.

El área se encuentra en el municipio de Poopó del departamento de Oruro, en el margen occidental de la Cordillera Oriental y presenta secuencias siliciclásticas silúricas de las formaciones: Llallagua, Uncía y Catavi en contacto con unidades devónica (formación Belén) y cretácica (formación El Molino). Se destacan intrusiones subvolcánicas oligocenas-miocenas de composición dacítica a riodacítica, entre ellas el intrusivo Coriviri, cuya presencia controla la mineralización polimetálica (Angulo U., et al. 2025). Este intrusivo resalta por su anomalía geomórfica y su expresión en la imagen satelital en medio de rocas sedimentarias paleozoicas.

Esta metodología fue aplicada por el Servicio Geológico Minero (SERGEMIN) en el Proyecto de Prospección Geológica Minera en el sector Machacamarca, con el objetivo de delimitar blancos de interés previa a las actividades en campo (Angulo U. et al 2025).

La teledetección satelital (Remote Sensing) permite colectar información de la superficie terrestre (Chapman, 2020). Su integración previamente con conocimiento geológico contribuye en la identificación de blancos exploratorios, si bien el área de estudio comprende mayormente sectores sedimentarios, se consideró el análisis del Intrusivo Coriviri. En el área de estudio, el intrusivo subvolcánico de Coriviri genera contrastes espectrales que permiten aplicar técnicas de análisis con imágenes ASTER para identificar óxidos y minerales

arcillosos asociados a mineralización polimetálica. La investigación se desarrolló en dos fases: análisis espectral de la imagen ASTER mediante combinaciones y cocientes de bandas y validación de resultados en campo; posteriormente la extrapolación al sector del intrusivo Pan de Azúcar-Chuallani

Métodos y materiales

Se procesó la imagen ASTER LT1, AST_L1T_00306042006144623_20150514165923_41711, de fecha 4 de junio de 2006, row: 233, path: 73, utilizando el software ENVI 5.6 que incluye las correcciones atmosférica y radiométrica, así como obtención de (índices de vegetación y agua), y combinación de bandas-cociente de bandas. Se aplicaron las siguientes combinaciones RGB y cociente de bandas en imagen ASTER para resaltar diferentes características geológicas:

- *RGB 943* (Caiza Cañar, 2018; Mamani, 2017) para resaltar óxidos.
- *RGB 461* (Caiza Cañar, 2018; Tommaso et al., 2005) para minerales arcillosos y óxidos.
- *2/1* (Ait Inoh et al., 2022) para óxidos (hematita).
- *4/6* (Alarifi et al., 2022) para minerales de arcilla.
- *4/7* (Alarifi et al., 2022) para sericitita.
- *4/5* (Alarifi et al., 2022) para dickita.
- *(3-2) / (3+2)* (Ninomiya 2004) para índice de vegetación (NDVI).

RESULTADOS

La interpretación obtenida mediante la *combinación de bandas* se presenta en la Fig.1. En la Fig.1a, sectores locales indican procesos de oxidación supérigenica, concentrados en el centro del cerro Pucará del distrito de Coriviri, asociados a estructuras vetiformes con hematita, limonita y pirolusita. Aunque no muy definidos.

En la Fig. 1b se muestra el color magenta en el Cerro Pucará, que indica la presencia de arcillas y óxidos, relacionadas con las estructuras vetiformes Pucará I y Pucará II y otras estructuras adyacentes, estos sectores contienen mineralización polimetálica de Au, Ag, Pb, Zn, Cu y Sn.

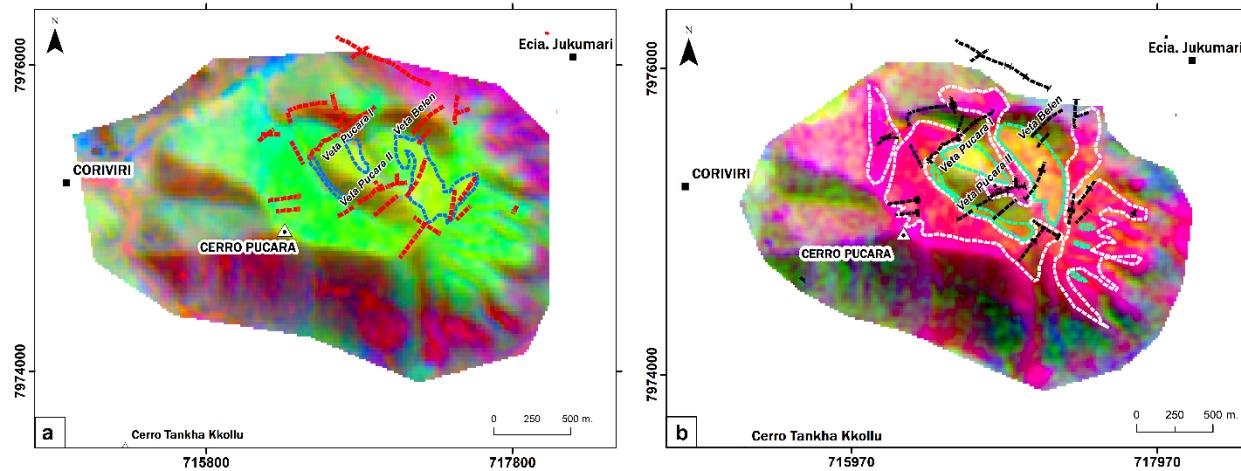


Fig. 1. a) Combinación RGB 943 de imagen ASTER utilizada para el mapeo de óxidos, evidenciando su asociación espacial con estructuras vetiformes mapeadas por el Proyecto Machacamarca (Angulo U. et al., 2025), representadas con líneas rojas (veta Pucara I, veta Pucara II y veta Belén). Las líneas segmentadas azules delimitan áreas con tonalidades amarillas, interpretadas como zonas de oxidación. En campo, estas zonas corresponden a la presencia de óxidos e hidróxidos (hematita, limonita y pirolusita), asociados a procesos de alteración supérgena. Los tonos en verde por interpretación son superficies de material cuaternario.

b) Combinación RGB 461 para la identificación de minerales arcillosos (tonalidad magenta) y óxidos (tonalidad amarilla). Las estructuras vetiformes se muestran en líneas oscuras. Las líneas segmentadas blancas delimitan sectores con alteración arcillosa, mientras que las líneas cian segmentadas corresponden a zonas de oxidación. Las observaciones de campo confirman la presencia de minerales como caolinita y dickita, así como óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, asociados a halos de alteración hidrotermal y supérgena de las vetas mencionadas.

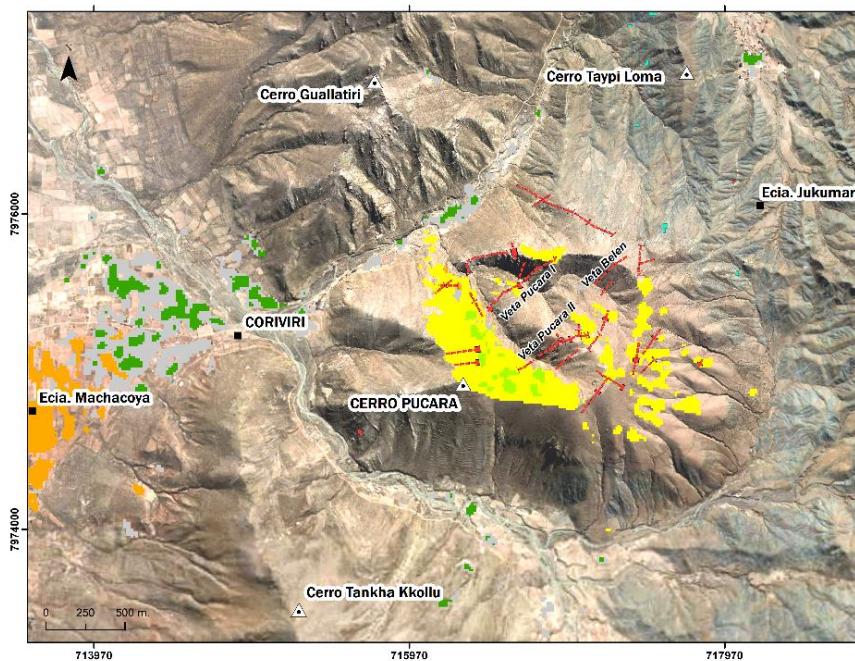


Fig. 2. Firmas espectrales (ASTER) de cociente de bandas: anaranjado: óxidos de hierro; verde claro: sericitia; plomo: dickita; amarillo: arcillas; celeste: agua; verde: vegetación. Se muestra la relación del cociente de bandas con las estructuras mapeadas por el proyecto Machacamarca (Angulo U. et al., 2025), representadas con líneas rojas: veta Pucara I, veta Pucara II y veta Belén.

Si bien los límites de alteración no se definen con exactitud en la imagen, la distribución espectral coincide con zonas mineralizadas reconocidas en campo.

El análisis de cocientes de bandas (band ratio) ASTER evidencia zonas de alteración en el área de Coriviri. En el Cerro Pucará (Coriviri), las firmas espectrales indican la presencia de arcillas con sericita. En las zonas bajas (sector Machacoya), los sedimentos muestran firmas de óxidos y dickita, interpretadas como material transportado desde zonas elevadas, como el cerro Tankha Kkollu. Las estructuras vetiformes Pucará I, Pucará II y Belén presentan alteración hidrotermal con desarrollo de caolinita, dickita y sericita, confirmadas mediante observación en campo. (Fig.2).

En Fig. 3, a partir de los resultados obtenidos en Coriviri y su validación en campo, se replicó el análisis espectral en la zona sudeste, en el sector Pan de Azúcar (Cerro Pan de Azúcar y Cerro Chuallani), donde afloran cuerpos intrusivos

de composición dacita porfíritica. Esta extrapolación regional permitió identificar nuevas zonas con potencial posiblemente mineralizado. La combinación RGB 461 evidencia firmas espectrales de minerales arcillosos y óxidos en el sector Pan de Azúcar, posiblemente asociadas a estructuras vetiformes relacionadas a actividad hidrotermal.

En Fig.4, en el intrusivo Coriviri predominan las firmas espectrales descritas en la Fig. 2. En contraste, en el sector Pan de Azúcar, especialmente en los cerros Chuallani y Pan de Azúcar, se observa una respuesta espectral de arcillas, sericita, y zonas puntuales de oxidación, lo que sugiere la posible presencia de un sistema vetiforme asociado a intrusivos. Hacia el este, las firmas espectrales se alinean a lo largo de quebradas, con acumulación de material como arcilla transportado desde las zonas elevadas. Ambos sectores confirman que la metodología aplicada resalta estructuras prospectivas, que para el segundo caso necesita ser validada con trabajos de campo y análisis geoquímico.

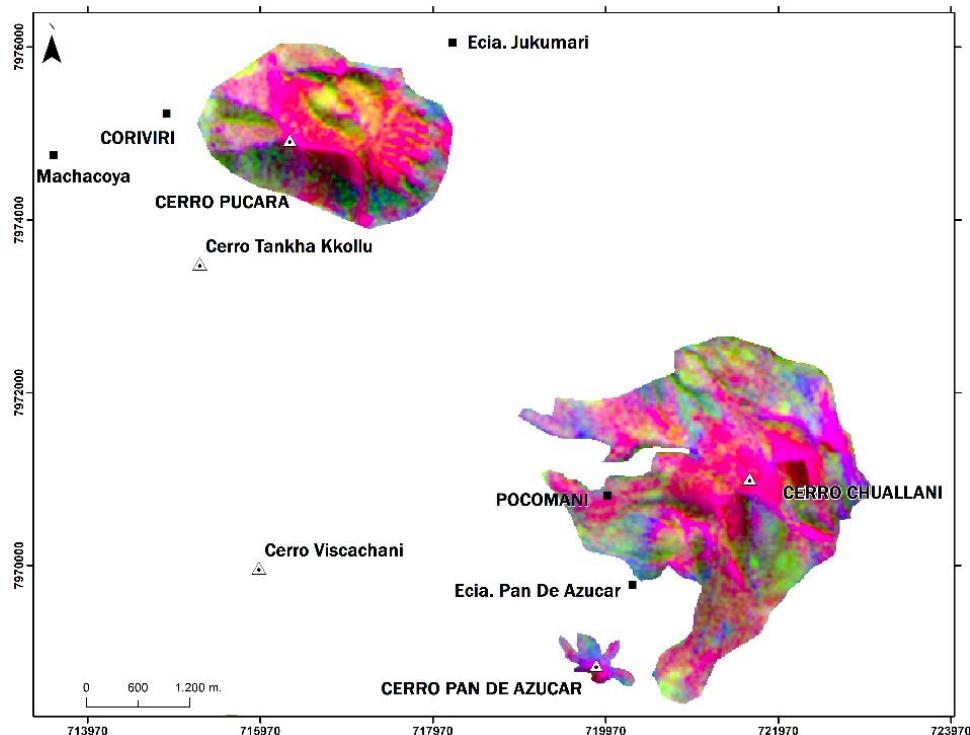


Fig. 3. Extrapolación regional 461, corresponde a intrusivos al sud este del distrito de Coriviri en el sector Pan de Azúcar (Cerro Pan de Azúcar –Cerro Chuallani)

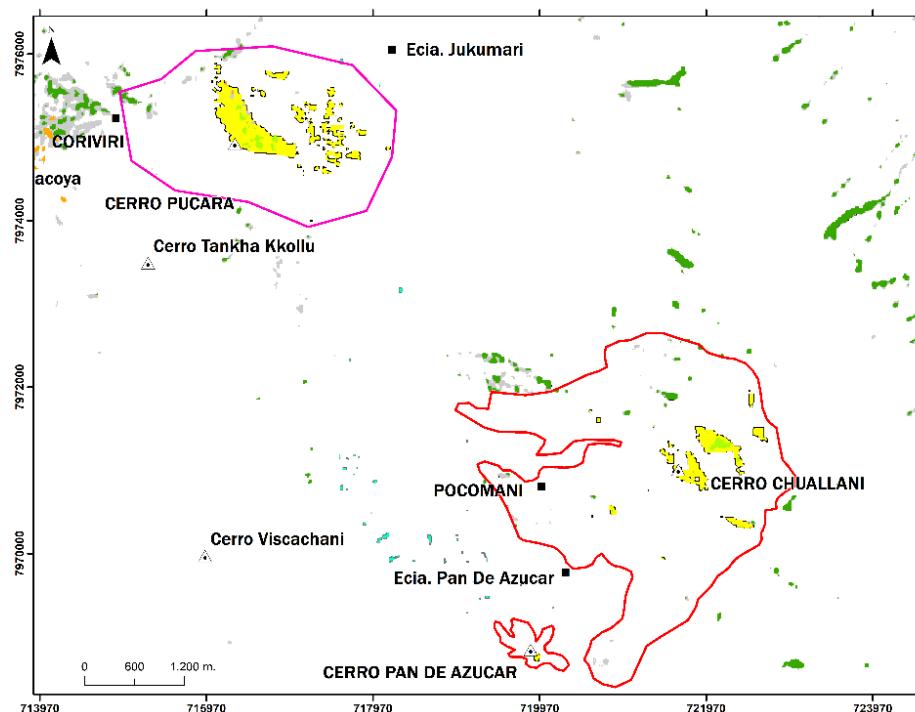


Fig. 4. Mapa de alteraciones espectrales en los sectores de Coriviri y Pan de Azúcar (Cerro Pan de Azúcar – Cerro Chuallani). La clasificación distingue diferentes firmas minerales: plomo = dickita; amarillo = arcillas; anaranjado = óxidos de Fe (zonas de oxidación); verde claro = sericita; verde = vegetación; celeste = agua superficial; polígono rosado= Intrusivo de Coriviri, polígono rojo=área sector Pan de Azúcar (Cerro Pan de Azúcar– Cerro Chuallani).

DISCUSIÓN

La interpretación espectral y la validación de campo evidencian que la combinación de bandas y cocientes de bandas en la imagen ASTER permite identificar halos de alteración supérgena e hidrotermal, incluso en áreas con cobertura sedimentaria. Sin embargo, es necesario discriminar con mayor precisión las respuestas espectrales considerando el tipo litológico para evitar confusiones.

Los resultados espetrales muestran que el intrusivo Coriviri presenta minerales indicadores de alteración como minerales arcillosos, sericita, óxidos de hierro (hematita) y dickita. En terreno, se observó una alteración de tipo cuarzo-sericita que afecta tanto a la pasta de roca como a los minerales ferromagnesianos, originando micas (sericita, moscovita) y minerales arcillosos (dickita, de carácter higroscópico). Asimismo, la alteración supérgena se manifiesta como arcillización (blanqueamiento) y oxidación de ferromagnesianos, que confiere una tonalidad amarillenta a marrón a la dacita (Angulo U. et al., 2025). La distribución espectral coincide con zonas mineralizadas en campo.

Por otro lado, el sector Pan de Azúcar se perfila como un blanco prospectivo, posiblemente asociado a un sistema vetiforme con oxidación supergénica y mineralización similar a Coriviri (Au, Ag, Pb, Zn, Cu y Sn), relacionada a cuerpos intrusivos. La combinación RGB 4-6-1 mostró mejor eficiencia para la diferenciación de litologías y tipos de alteración, mientras que los cocientes de bandas facilitaron la discriminación de óxidos y minerales específicos.

No obstante, se identifican limitaciones en el análisis debido a la cobertura cuaternaria y a la secuencia sedimentaria, las cuales pueden enmascarar las señales espetrales.

CONCLUSIONES

- La imagen ASTER, mediante la combinación RGB 4-6-1 y cocientes de bandas, permiten identificar y delimitar zonas de alteración hidrotermal y supérgena en el área de estudio.
- El intrusivo Coriviri presenta un patrón espectral y de alteración coherente con los resultados de campo, confirmando la presencia de sericita, dickita y óxidos de

hierro, asociados a procesos hidrotermales.

- El sector Pan de Azúcar constituye un blanco prospectivo con características mineralógicas y espectrales similares a Coriviri, lo que sugiere un potencial sistema vetiforme mineralizado.

Agradecimientos

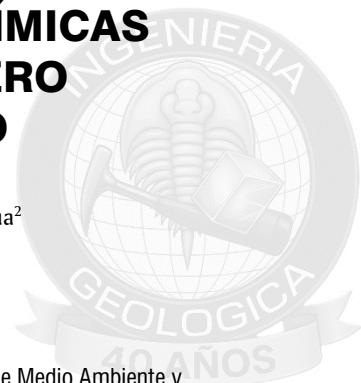
Expreso mi agradecimiento al Ing. Gilberto Borja Navarro, Director Ejecutivo, al Dr. Ing. Ricardo López Montaño y a Ing. Juan Carlos Ayaviri Inturias, todos del SERGEOMIN, por su orientación técnica y aportes, así como por hacer posible esta presentación. Asimismo, a los ingenieros: David Angulo, Iván Machaca, Raúl Martínez, Yoshiro Calizaya y Neiva Cruz por su dedicación durante el trabajo de campo.

REFERENCIAS

- Alarifi, S. S., Abdelkareem, M., Abdalla, F., Abdelsadek, I. S., Gahlan, H., Al-Saleh, A. M., & Alotaibi, M. (2022). Fusión de datos de teledetección multispectral mediante un método de superposición basado en SIG para revelar áreas potenciales de recursos minerales hidrotermales. *Minerals*, 12(12), 1577. <https://doi.org/10.3390/min12121577>
- Ait Inoh, H., Rajji, A., Eddardouri, M., & Tayebi, M. (2022). Structural and mineral mapping using multispectral images in the Central High Atlas of Morocco. *Estudios Geológicos*, 79(1), e148. <https://doi.org/10.3989/egeol.44694.617>
- Angulo U., G. David, Machaca C., I., Martínez C., R., Calizaya O., Y. & Choque M., A. (2025). Informe Técnico Final (Informe interno no publicado). *Prospección Geológica Minera en el sector de Machacamarca departamento de Oruro*. 139 págs. Servicio Geológico Minero de Bolivia. La Paz.
- Caiza Cañar, E. K. (2018). *Estimación de zonas de alteración hidrotermal mediante interpretación de imágenes satelitales tipo ASTER y uso del equipo Terraspec en la zona oriental de Cerro de Pasco, Perú* [Trabajo de titulación, Universidad Central del Ecuador].
<https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/123d862e-22e8-40ca-a85d-03d6b6734693>
- Chapman, J. S. (2020). *A primer for the use of satellite imagery in geologic investigations* (Open-File Report 2020-01, 45 pp.). North Carolina Geological Survey. Recuperado de https://www.deq.nc.gov/energy-mineral-and-land-resources/geological-survey/ofrs-geological-survey/primer-use-satellite-imagery-geologic-investigations-north-carolina-geological-survey/open?utm_source
- Corrales, R., J.G., 2010. Caracterización de alteraciones hidrotermal y dinámica de cobertura de suelos mediante métodos de teledetección, en el Valle de Choluteca Honduras: Posgrados UNAH
- El-Desoky, H. M., Soliman, N., Heikal, M. A., & Abdel-Rahman, A. M. (2020). Mapping hydrothermal alteration zones using ASTER images in the Arabian–Nubian Shield: A case study of the northwestern Allaqa District, South Eastern Desert, Egypt. *Geology Department, Faculty of Science, Al-Azhar University*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590056021000177?via%3Dihub>
- Pérez Carlos, A., & Muñoz, A. (2006). Teledetección: nociones y aplicaciones. Universidad de Salamanca.
- Ninomiya, Y. (2004). Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Proceedings of SPIE- The International Society for Optical Engineering*.
https://www.researchgate.net/publication/253125670_Lithologic_mapping_with_multispectralASTER_TIR_and_SWIR_data
- Van Ede, R. (2004). Destriping and geometric correction of an ASTER Level 1A image [Master's thesis, Utrecht University]. Faculty of Geosciences, Department of Physical Geography. <https://gis-lab.info/docs/aster-report-v3.pdf>

USO DE TÉCNICAS ISOTÓPICAS E HIDROQUÍMICAS PARA LA GESTIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO PRIORIZADO CHALLAPAMPA - ORURO

Paola Mancilla¹, Beatriz Canaviri², Andro Villegas³
Gobierno Autónomo Departamental de Oruro^{1,3} Ministerio de Medio Ambiente y Agua²
paulinamanor@gmail.com, beatriz.canaviri@mmaya.gob.bo



Resumen

El Sistema Acuífero Priorizado (SAP) Challapampa es uno de los siete acuíferos priorizados por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAYA) para desarrollar estudios orientados a la formulación del Plan de Gestión Sostenible de Acuíferos (PGSA), en el marco de la Directriz Estratégica de Caracterización. Esta priorización se formaliza mediante un convenio entre el Ministerio y el Gobierno Autónomo Departamental de Oruro para la ejecución del proyecto “Manejo del Sistema Acuífero Challapampa, Paria y Cochiraya (SACPyC)”, cuyo objetivo central es la obtención del PGSA con base en la caracterización hidrogeológica del sistema.

El proyecto incorpora estudios hidroquímicos e isotópicos para determinar el origen del agua subterránea, sus zonas de recarga y su interacción con aguas superficiales. Los análisis hidroquímicos muestran que la mayoría de las muestras se ubican en un campo intermedio con tendencia a aguas clorurado-sulfatadas, lo que refleja una mayor permanencia del agua en el acuífero y un alto grado de mineralización.

De los resultados del análisis isotópico, se puede observar que las muestras se ubican por debajo de la línea meteórica local, según Frits & Clark (1987) indicaría que el agua se recargó en climas más fríos y en zonas altas; este proceso es típico de los procesos de avance y retroceso de glaciares del Pleistoceno. Sin embargo, en el área del acuífero este tipo de formaciones (morrenas y bajadas) solo se presenta en áreas aledañas a las serranías de los municipios de Soracachi y Caracollo y la ubicación de las muestras recolectadas obedece a una distribución semi homogénea del área central del acuífero, caracterizado por depósitos limo arenosos y arcillosos que indican un ambiente lacustre. Esto indica que la recarga ocurre principalmente en áreas periféricas, distintas de la zona de mayor explotación.

Se identificaron cinco rangos altitudinales de recarga: A) a los 3800 msnm, B) a los 4050 msnm, C) a los 4200 a 4450 msnm, D) a los 4450 y 4850 msnm, y E) a los 4950 msnm.

Abstract

The Challapampa Priority Aquifer System (SAP) is one of seven aquifers prioritized by the Ministry of Environment and Water (MMAYA) for studies aimed at formulating the Sustainable Aquifer Management Plan (PGSA), within the framework of the Strategic Characterization Guideline. This prioritization is formalized through an agreement between the Ministry and the Autonomous Departmental Government of Oruro for the execution of the project “Management of the Challapampa, Paria, and Cochiraya Aquifer System (SACPyC),” whose central objective is to obtain the PGSA based on the hydrogeological characterization of the system.

The project incorporates hydrochemical and isotopic studies to determine the origin of the groundwater, its recharge zones, and its interaction with surface waters. Hydrochemical analyses show that most samples are located in an intermediate field with a tendency towards chloride-sulfate waters, reflecting a longer permanence of water in the aquifer and a high degree of mineralization.

The isotopic analysis results show that the samples are located below the local meteoric line. According to Frits & Clark (1987), this would indicate that the water was recharged in colder climates and at higher elevations; this process is typical of Pleistocene glacial advances and retreats. However, in the aquifer area, these types of formations (moraines and dips) are only present in areas adjacent to the mountain ranges of the municipalities of Soracachi and Caracollo. The location of the collected samples reflects a semi-homogeneous distribution in the central area of the aquifer, characterized by silty-sandy and clayey deposits indicative of a lacustrine environment. This suggests that recharge occurs primarily in peripheral areas, distinct from the area of greatest exploitation.

Five altitudinal ranges of recharge were identified: A) at 3800 m above sea level, B) at 4050 m above sea level, C) at 4200 to 4450 m above sea level, D) at 4450 and 4850 m above sea level, and E) at 4950 m above sea level.

Palabras claves

SAP Challapampa, hidrología isotópica, hidroquímica.

Introducción

En el marco de un convenio entre el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) y el Gobierno Autónomo Departamental de Oruro (GADOR) se viene ejecutando el proyecto “Manejo del Sistema Acuífero Challapampa, Paria y Cochiraya (SACPyC)”, cuyo objetivo central es la obtención del PGSA con base en la caracterización hidrogeológica del sistema.

El SAP Challapampa, involucra áreas de las comunidades de Soracachi - Paria al Este y Cochiraya al Oeste, de donde procede la denominación y área de estudio del proyecto y representa la fuente principal de abastecimiento de agua potable y riego. Para el área urbana de Oruro, el agua subterránea es captada por la EPSA SELA (Servicio Local de Acueductos y Alcantarillado de Oruro) para satisfacer la demanda. El área de servicio de la EPSA cuenta con 411.252 habitantes, y abastece a 405.936, al 2021 (AAPS), lo que subraya la importancia de priorización del acuífero.

Entre los estudios que involucra el proyecto, se encuentra la aplicación de técnicas hidroquímicas e isotópicas, para determinar el origen, altura de recarga y su relación con las aguas superficiales.

Marco geológico

El SAP Challapampa se encuentra en el Departamento de Oruro, Provincia Cercado, entre los municipios de Oruro, Soracachi, Caracollo y El Choro, la extensión aproximada es de 937,05 km² y una elevación promedio de 3.706 msnm.

Geológicamente al norte y este está bordeada por serranías silúricas de las formaciones Uncía y Catavi, constituidas por lutitas de color gris oscuro a gris verdoso intercaladas con delgadas capas de areniscas y limolitas. Hacia el sur se pueden identificar serranías de formaciones silúricas a las que se agregan vulcanitas de edad terciaria como el complejo Oruro y las volcanitas Escalera que son lavas dacíticas porfiríticas que afloran al noreste de la ciudad de Oruro.

En SAP Challapampa es del tipo detrítico, conformado por depósitos lacustres, fluvio acustre, depósitos Aluviales, depósitos de abanico constituidas por cantos, gravas, arenas, limos y arcillas con el vértice apuntando hacia la parte alta de su cuenca y la base extendiéndose hacia la llanura. La dirección preferencial de las líneas de flujo es de Noreste a Sudoeste (Fig 1).

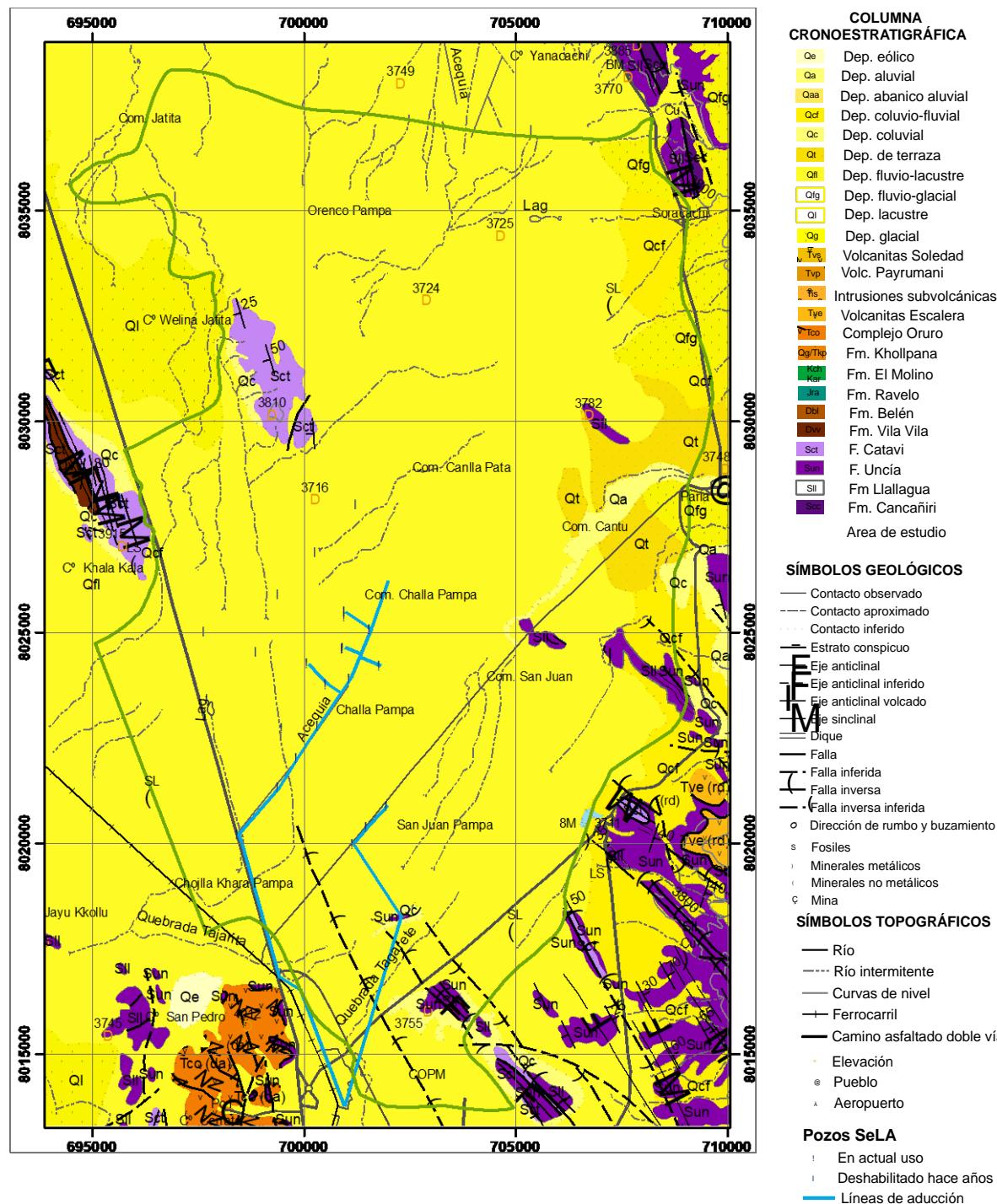


Fig 1. Mapa Geológico a Detalle

Fuente: Carta Geológica 6140 Hoja Oruro - GEOBOL, Carta Geológica 6141 Hoja Colquiri - GEOBOL

Métodos y materiales

La composición química del agua subterránea en un acuífero depende tanto de la composición del agua de recarga (generalmente proveniente de la precipitación en las zonas de recarga) como de las interacciones agua–roca que ocurren a lo largo de su flujo subterráneo (Manzano & Guimaraens, 2008). Para el análisis hidroquímico e isotópico se consideró una red de monitoreo conformada por 43 puntos, de los cuales 20 son pozos perforados, 15 pozos excavados, 4 ríos, 3 manantiales y 1 un bofedal.

Los análisis químicos realizados fueron iones mayoritarios: aniones ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} , y $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$) y cationes (Na^{+} , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}). Para el análisis isotópico se utilizó isotopos estables ^{18}O y ^2H .

Una herramienta fundamental para la caracterización isotópica es la Línea Meteórica Local (LML), construida a partir del análisis de los isótopos de oxígeno 18 (^{18}O) y deuterio (^2H) presentes en muestras de precipitación. Estas muestras se recolectan mensualmente en las estaciones de El Alto, Viacha, Challapampa y Huayllamarca, y posteriormente son analizadas en los laboratorios del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en Viena-Austria.

Resultados e interpretación

Diagrama de Piper.- Las muestras provenientes de pozos excavados, manantiales y ríos se clasifican principalmente como bicarbonatadas cálcicas y magnésicas, y en menor

proporción como cloruradas–sulfatadas cálcicas y magnésicas. En cambio, la mayoría de las muestras de pozos perforados se agrupan en los campos clorurado–sódico y sulfatado–sódico, y en menor medida en el de bicarbonatado sódico–potásico.

De acuerdo a la concentración de aniones, las muestras presentan una tendencia a campos intermedios y sodio potasio, lo que correspondería a aguas de flujo profundo con tiempos de residencia elevados y muy mineralizados; para las concentraciones de cationes, las muestras presentan una composición de tipo intermedio con una tendencia a bicarbonatada con dominio aniónico. Un caso particular es la muestra C102 misma que presenta una característica más clorurada indicando un mayor tiempo de residencia. Sin embargo, el área circundante a este punto se caracteriza por la actividad de empresas concentradoras de minerales, lo cual podría influir en las condiciones geoquímicas de este pozo (**iError! No se encuentra el origen de la referencia.2**).

De acuerdo a la Secuencia de Chevoratev (**iError! No se encuentra el origen de la referencia.3**), las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente bicarbonatadas, después predomina el sulfato y las aguas más salinas son cloruradas (Custodio & Llamas , 1983). Por consiguiente, la residencia del agua en el acuífero fue prolongada, es decir que la fuente de recarga se encontraría en una zona alejada, en las cabeceras de la cuenca existiendo un alto intercambio iónico.

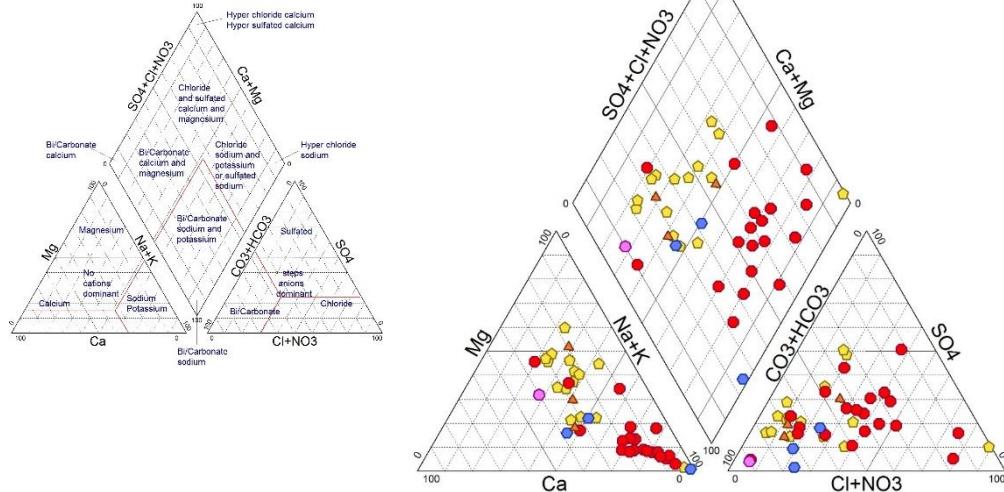


Fig. 2. Diagrama de Piper para muestras de SAP Challapampa.

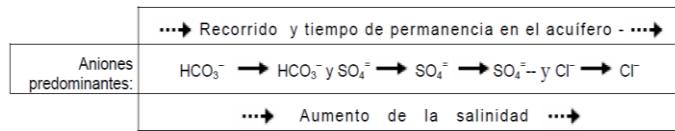
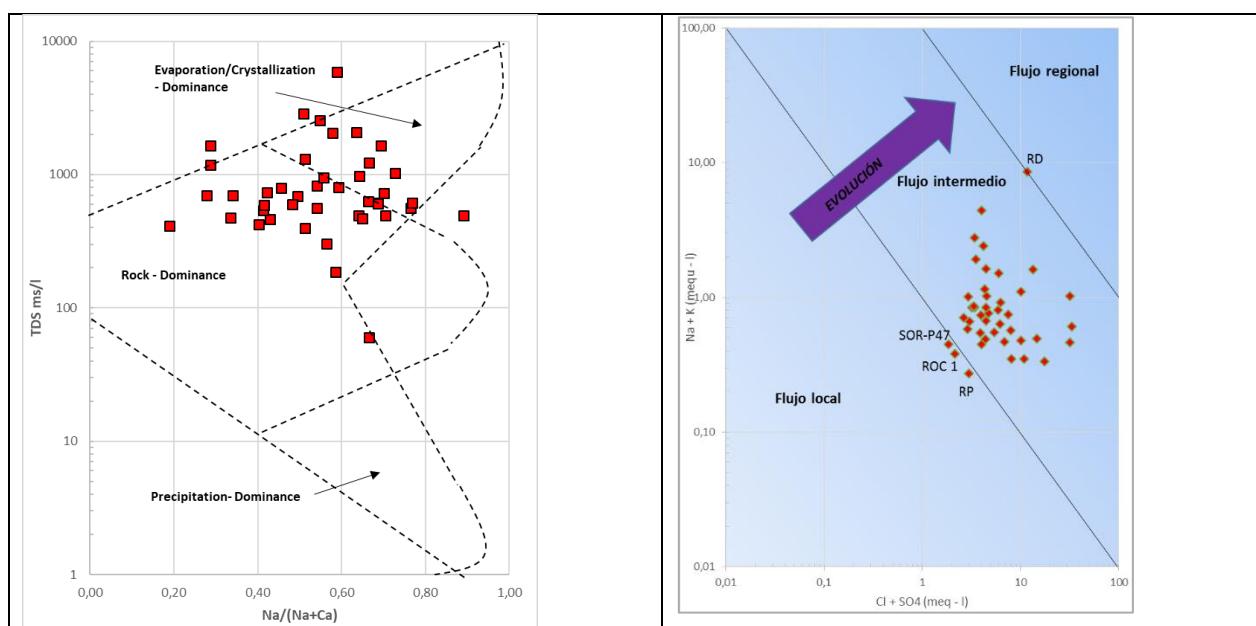
**Fig 3.** Secuencia de Chevratev.

Diagrama de Gibbs. Este diagrama grafica la concentración de los sólidos disueltos y la relación de $\text{Na}/(\text{Na}+\text{K})$, para cationes y para aniones $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HCO}_3)$, (Bustamante Ibañez, 2017).

Las muestras del acuífero en su mayoría se ubican en el campo de interacción agua roca (Rock dominance) y el proceso de evaporación – cristalización (Evaporation – Crystallization Dominance), (Figura 3). Este análisis indica que el agua presente en la mayoría de los puntos muestreados ha tenido un recorrido mayor desde el punto de recarga lo que ha ocasionado una interacción con la roca adquiriendo elementos químicos por disolución de minerales, así mismo existirían procesos de evaporación y podría deberse a que los pozos someros estarían siendo afectados por las condiciones atmosféricas que provocan esta situación.

Diagramas de dispersión. Para este análisis se utilizó el Diagrama de Muffin mediante el cual se determina la evolución del agua subterránea y superficial en base a la creciente concentración de los iones Na^+ , K^+ , Cl^- y SO_4^{2-} a lo largo del flujo (Fig 4).

En el análisis de muestras de Challapampa se puede observar que la casi totalidad de ellas se ubican en el campo de flujo intermedio; las muestras de los ríos Paria y Ocotavi se ubican en el área de flujo local, al igual que la muestra SOR P 47 perteneciente a un manantial a un río seco (al momento de toma de muestra). Al otro extremo se ubica en el campo de flujo regional la muestra RD correspondiente al río Desaguadero.

**Fig 4.** Izquierda: Diagrama GIBBS y derecha: Diagrama de dispersión

Análisis isotópico

Las muestras se ubican por debajo de la línea meteórica local, lo cual indicaría que el agua se recargó en climas más fríos y en zonas altas (Fritz & Clark, 1997); sin embargo en

el área del acuífero este tipo de formaciones (morrenas y bajadas) solo se presenta en áreas aledañas a las serranías de los municipios de Soracachi y Caracollo y los puntos muestreados presentan una distribución semi homogénea

ubicados en el área central del acuífero, es decir en Challapampa, característico de depósitos limo arenosos y arcillosos que indican un ambiente lacustre.

Las muestras de río definen la línea de evaporación y mezcla de aguas. Tres pozos excavados, situados en una planicie de material arenoso limoso, similar de depósito fluvial – abanico – con vestigios de ríos antiguos estarían asociados a este tipo de ambiente, es decir tendrían una mezcla de aguas con el río más próximo, es decir el Ocotavi.

En el caso del punto CAR 85, corresponde a un pozo excavado que presenta el mayor contenido de ^{18}O con un valor de 15,75 ‰, según los procesos de enriquecimiento isotópico. El ambiente de formación o de infiltración es de cordillera y se encontraría en un estado más puro que el resto de puntos inspeccionados. La muestra está situada en el extremo Este del sistema, cercano a serranías del municipio de Soracachi

El resto muestras se sitúan en un área común, con valores de ^{18}O entre los 14 y 15 ‰, lo que indica que corresponden a un ambiente de clima frío y de altura (Fig 5).

Altura de recarga según oxígeno 18.- Para una mejor interpretación de las muestras analizadas, se agruparon en cuatro áreas preferenciales:

Grupo A: Corresponde a los ríos Ocotavi y río Paria, marcan una altura de recarga de 3800 msnm, muy aproximada a la

cota de referencia donde se tomó la muestra. Así mismo y de forma anómala, la muestra correspondiente al pozo CAR 86 se ubica en este grupo denotando una vez más su fuerte relación con el agua de ríos.

Grupo B: En este grupo se ubican dos muestras, correspondiente al pozo excavado CAR P20 y al pozo perforado CAR 88. La altura de punto de lluvia para la recarga aproximada es de 4050 msnm.

Grupo C: Esta área está conformada mayormente por los pozos perforados CAR 87, Pedro Ferrari, El Carmen, PP 11, PP 34, PP 31, SOR 111, SOR 112, CAR P68 y CAR P80, los pozos excavados CAR 64 y CAR 54, el Bofedal CAR P76 y el río Sepultura RS. La cota de punto de recarga oscila entre los 4200 a 4450 msnm.

Grupo D: La mayor parte de las muestras que está ubicada en esta área, presenta un punto de recarga corresponde a una altura entre los 4450 y 4850 msnm. Los pozos perforados son SOR 115, SOR 114, SOR 117, San Isidro, CIO2, PP 19, F6 y SOR P64, pozos excavados son M 38, M18, CAR P64 y SOR P66; los manantiales CAR P86 y CAR P72 y la virginia SOR P47.

Grupo E: El pozo excavado M18 se ubica en este sitio marcando una altura de 'punto de recarga de casi 4950 msnm. (Fig 5)

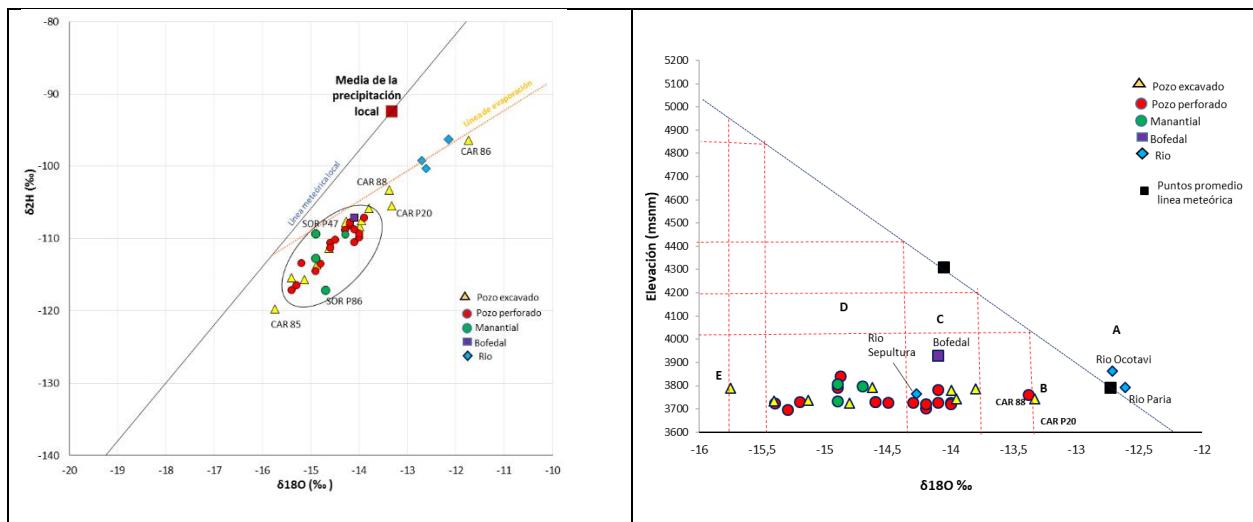


Fig 5. Izquierda: Gráfica Deuterio Vs. Oxígeno 18. Derecha: Altura de recarga

Discusión

La hidroquímica del agua subterránea está altamente relacionada a la zona geográfica donde se encuentra, en este caso a las zonas de recarga, transición y/o descarga. La clasificación según Pipper presenta una composición general entre intermedia clorurada – sulfatada sódica o sulfatada – clorurada cálcica y/o magnésica. En el diagrama de aniones, las muestras están mayormente situadas en los campos intermedios y sodio potasio, lo que correspondería a aguas de flujo profundo con tiempos de residencia elevados y muy mineralizados, esta área correspondería a la zona de Challapampa.

De acuerdo al Diagrama de Gibbs, las muestras tienen una alta interacción con el medio, ya sea roca o sedimento. El diagrama de dispersión indica que el agua subterránea obedecería a un flujo intermedio, es decir que la recarga se produce en un área aledaña al sistema acuífero, particularmente en zonas altas de la cuenca y el tiempo de trayecto para la infiltración sería rápido (en términos geológicos).

El agua subterránea presentaría un proceso de mineralización a medida que sigue la dirección de flujo, presentando una calidad mejor en zonas altas o de recarga

como ser los abanicos aluviales y llegando a incrementar la conductividad en zonas de transición y descarga.

Según la firma isotópica de las aguas subterráneas y su relación con la precipitación y cursos superficiales de agua, se identificaron cinco rangos altitudinales de recarga: A) a los 3800 msnm, B) a los 4050 msnm, C) a los 4200 a 4450 msnm, D) a los 4450 y 4850 msnm, y E) a los 4950 msnm.

Referencias

- Manzano, M., & Guimaraens, M.** (2008). Hidroquímica Regional del SAG.
- Bustamante Ibañez, E.** (2017). *Identificación de procesos hidrogeoquímicos aplicando modelación inversa en el Acuífero Sononusco Chiapas, Mejico*. Chiapas, Mejico.: Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
- Custodio, E., & Llamas , R.** (1983). *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Omega.
- Fritz, P., & Clark, I.** (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. New York: CRC Press/Lewis Publishers.

FRACTALES EN UN ANÁLISIS LITOGEOQUÍMICO POR LITIO EN DEPÓSITOS IGNIMBRÍTICOS DE LA FORMACIÓN MOROCOCALA

Joaquin Ramos-Pinto*

*Geólogo de Exploraciones, ESMICAL S.A. E-mail: ramos.pinto.joaquin@gmail.com



RESUMEN

La identificación espacial de poblaciones anómalas es fundamental en el campo de la exploración geoquímica. Empero, los métodos convencionales no relacionan la distribución estadística con la información espacial. Por tanto, el método fractal de concentración – área (C-A) con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica, se consolidan como una herramienta que permite superar este desafío.

En este estudio se utilizan 211 datos analíticos del elemento litio como resultados de un muestreo geoquímico sistemático, malla 300 x 300 m en un área de 29 km² en depósitos ignimbriticos de la formación Morococala dentro del distrito de Villa Huanuni ubicado a 45 km al SW de la ciudad de Oruro.

El análisis fractal C-A denota 3 poblaciones: (i) fondo geoquímico de 65 ppm Li; (ii) anomalía baja entre 107 a 210 ppm Li; (iii) anomalía alta mayor a 210 ppm Li. Las concentraciones anómalas ocurren en el sector austral y occidental del área de estudio, demostrando que un aporte significativo de Li en los salares del Altiplano boliviano provienen de los depósitos ignimbriticos y flujos piroclásticos felsicos.

Comparativamente, los valores de fondo geoquímico de litio en este estudio (65 ppm) son más altos que el Clark para rocas ígneas felsicas (40 ppm), sugiriendo un enriquecimiento inusual de la cámara magmática.

Palabras clave: Litio, depósitos ignimbriticos, fractales, umbral geoquímico.

ABSTRACT

The spatial identification of anomalous populations is fundamental in geochemical exploration. However, conventional methods do not relate statistical distribution among spatial information. Therefore, the concentration-area (C-A) fractal method, aided by Geographic Information System, is consolidated as a tool to overcome this challenge.

This study utilizes 211 analytical data points of the element tin, resulting from systematic geochemical sampling using a 300 x 300 m grid over a 29 km² area in tuff deposits of the Morococala Formation, located in the Villa Huanuni district, 45 km southwest from Oruro city.

The C-A fractal analysis denotes three populations: (i) geochemical background at 65 ppm Li; (ii) low anomaly between 107 and 210 ppm Li; (iii) high anomaly greater than 210 ppm Li. The anomalous concentrations occur in the southern and western sectors of the study area, demonstrating significant contribution of Li in the salt flats of the Bolivian Altiplano comes from ignimbrite deposits and felsic pyroclastic ash-flows.

Comparatively, the geochemical background values in this study (65 ppm) are higher than Clark values for felsic igneous rocks (40 ppm), suggesting unusual chamber magma enrichment.

Keywords: Lithium, tuff deposits, fractals, geochemical threshold.

INTRODUCCIÓN

Los depósitos ignimbriticos de la Formación Morococala, ocurren en la parte más productiva de la faja estannífera boliviana, en el sector central de la Cordillera Oriental, tiene una superficie aproximada de 1200 km², son flujos

piroclásticos ricos en sílice relacionados a erupciones catastróficas y colapsos de caldera con espesores que alcanzan los 300 m (Luedke *et al.*, 1990), su edad se asocia al Mioceno tardío, entre 8,4 a 6,8 Ma. (Koeppen *et al.*, 1987).

En este estudio, se analiza la distribución espacial de las anomalías geoquímicas de Li aplicando los Sistemas de Información Geográfica y el modelo fractal concentración-área (C-A), a través de un estudio de caso que comprenden

211 muestras de roca ignimbritica de la formación Morococala distribuidas en una malla de 300 x 300 m, extensión de 29 km² para el distrito de Villa Huanuni (Fig. 1), ubicado a 45 km al SW desde la ciudad de Oruro.

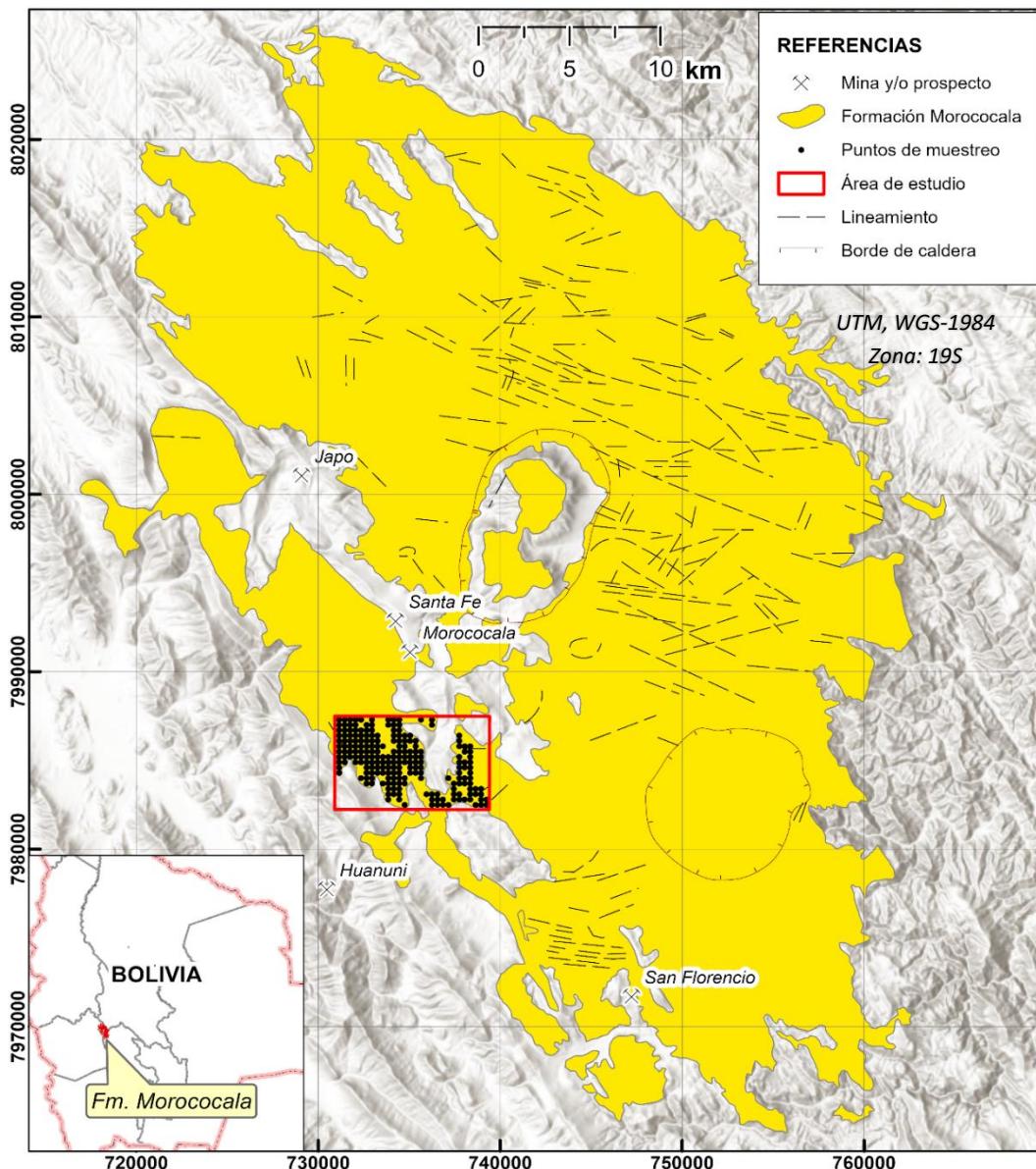


Fig. 1. Ubicación del área de estudio y de 211 muestras litogegeoquímicas en la formación Morococala.

ANTECEDENTES

Los trabajos orientados al análisis e interpretación de fractales como herramienta para los estudios de litogegeoquímica en Bolivia son escasos. Aunque, los estudios de petrología y geoquímica en rocas ignimbriticas de la

formación Morococala son muy limitados, algunos aportes se destacan de la década de 1980 y 1990.

Davis *et al.* (1982), sugieren que la fuente de litio en los salares de la cuenca endorreica, parecen provenir de flujos piroclásticos félsicos de calderas resurgententes,

estableciendo concentraciones entre 16 a 43 ppm Li en la Formación los Frailes.

Posteriormente, Ericksen *et al.* (1985), determinan valores a partir de 7 muestras obtenidas en las vulcanitas de la formación Morococala en un rango de 33 a 110 ppm Li, que indicarían concentraciones inusuales en partes de la cámara magmática.

Petrogenéticamente, según Morgan *et al.* (1997), sugieren que los magmas de la meseta de Morococala, derivaron a partir de protolitos peraluminosos que definen una secuencia volcánica de: i) tobas riolíticas basales con andalucita, biotita (\pm moscovita), superpuestas por ii) tobas riolíticas con cordierita y biotita, coronadas por: iii) tobas de cuarzolatita con biotita, lavas y flujos domiales tardíos. Adicionalmente las 13 muestras de roca de la Formación Morococala denotan valores entre 80 y 240 ppm Li, donde los tenores más altos ocurren en tobas riolíticas basales con andalucita.

MÉTODOS

Determinación de parámetros geoquímicos – comparación de diferentes enfoques

El fondo y umbral geoquímico son dos conceptos esenciales utilizados en prospección y exploración; sin embargo, es sorprendente lo pobre que han sido definidos y lo diferente que han sido empleados en la literatura (Reimann & De Caritat, 2016). En general, estos términos son usados para distinguir una población natural de una anómala (que podría indicar un enriquecimiento mineral) en un área específica sin perturbación antropogénica.

Uno de los primeros estándares para la interpretación de datos geoquímicos fue propuesto por Lepeltier (1969) a través de la identificación de poblaciones en histogramas de frecuencias, para concentraciones de un elemento químico específico. Este método fue complementado por el análisis

del comportamiento de gráficos de probabilidad para separar distintas poblaciones en un mismo conjunto de datos, propuesto por Sinclair (1976).

Otros enfoques de carácter analítico sugieren establecer el umbral a partir de datos ordenados probabilísticamente y seleccionar el valor de 2,5% superior; y para conjuntos de datos grandes, que no se pueden ordenar fácilmente, utilizar $M+2STD$ (M : media aritmética, STD : desviación estándar) para identificar alrededor del 2,5% de los valores extremos superiores, asumiendo de que los datos se extraen de una distribución normal (Reimann *et al.*, 2005).

Sin embargo, el concepto de *distribución normal* simplemente es idealizado. Para evitar este problema, los valores extremos (valores atípicos), a menudo se eliminan de los datos antes del cálculo (Reimann *et al.*, 2005). Otro método consiste en transformar primero los datos a log-normal, para minimizar la influencia de los valores atípicos. Usualmente en prospección geoquímica se observa que los datos transformados no siguen una distribución normal, por tanto, los métodos estadísticos clásicos, ampliamente utilizados, tienden a fallar con datos muy sesgados (Reimann & Filzmoser, 2000).

En este contexto, Reimann & De Caritat (2016), proponen utilizar estadística avanzada y un análisis exploratorio de datos cuando se tienen estos problemas, como: el diagrama de caja de Tukey y la regla: $Me+2MAD$ (Me : mediana estadística, MAD : desviación media absoluta), además, de funciones de distribución acumulativa empíricas para facilitar la estimación de los valores de umbral y el rango de concentraciones de fondo geoquímico.

Todos los métodos descritos son útiles hasta la actualidad; sin embargo, ninguno de ellos permite apreciar la distribución espacial de los parámetros geoquímicos, ignorando la información georreferenciada y/o la estructura de autocorrelación de los datos (Hoang & Nguyen, 2016).

Análisis de datos y discretización de superficies geoquímicas

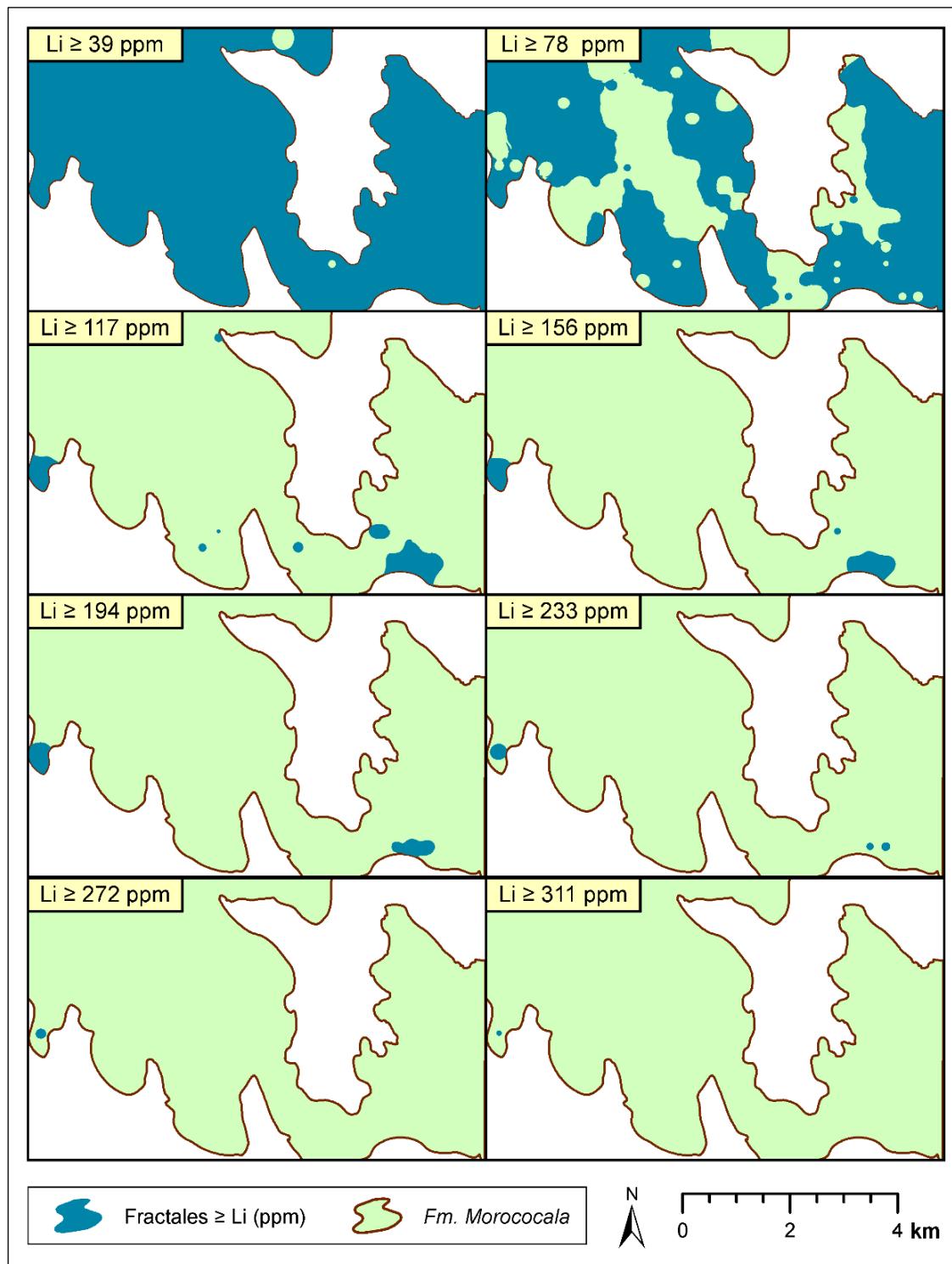


Fig. 2. Mapa de fractales para concentraciones de litio en depósitos ignimbíticos.

La consideración de la geometría y las propiedades independientes de la escala de los parámetros geoquímicos tiene como objetivo separar con precisión la población de fondo de la anómala a través de un modelo fractal (Carranza, 2009), basándose en las distribuciones de frecuencia y propiedad de autosimilitud espacial de variables geoquímicas (Cheng, 2004).

Los parámetros de estadística descriptiva determinan (i) promedio: 85 ppm; (ii) mínimo: 20 ppm; (iii) máximo: 330 ppm; desviación estándar: 31 ppm. El histograma de frecuencias denota una distribución *normal*, con una población menor hacia la derecha representando tenores de anomalía.

Cheng *et al.* (1994), consideran definir una escala espacial de distribución de datos para separar anomalías geoquímicas del fondo. Los mapas de contorno permiten obtener relaciones aproximadas entre áreas y valores de concentración del elemento químico y puede representarse

en gráficos logarítmicos, donde los puntos de inflexión denotan valores de fondo y umbral que separan poblaciones geoquímicas (Zou *et al.*, 2009).

El modelo de interpolación aplicado es el inverso a la distancia (IDW), el cual se ajusta a la distribución sistemática de las muestras con malla 300 x 300 m en un área de 29 km² restringida por depósitos ignimbriticos. La dimensión fractal de los isovalores en este estudio se considera en 2 m asociado con el principio de autosimilitud fractal (Carranza, 2009).

A objeto de discretizar las superficies geoquímicas, se determina el área para diferentes concentraciones del mapa de isovalores relacionando la dimensión fractal con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS versión 10.8), los resultados en relación al análisis estadístico de Li son: ≥ 39 ppm; ≥ 78 ppm; ≥ 117 ppm; ≥ 156 ppm; ≥ 194 ppm; ≥ 233 ppm; ≥ 272 ppm; y ≥ 311 ppm (Fig. 2).

Modelo fractal de concentración-área (C-A)

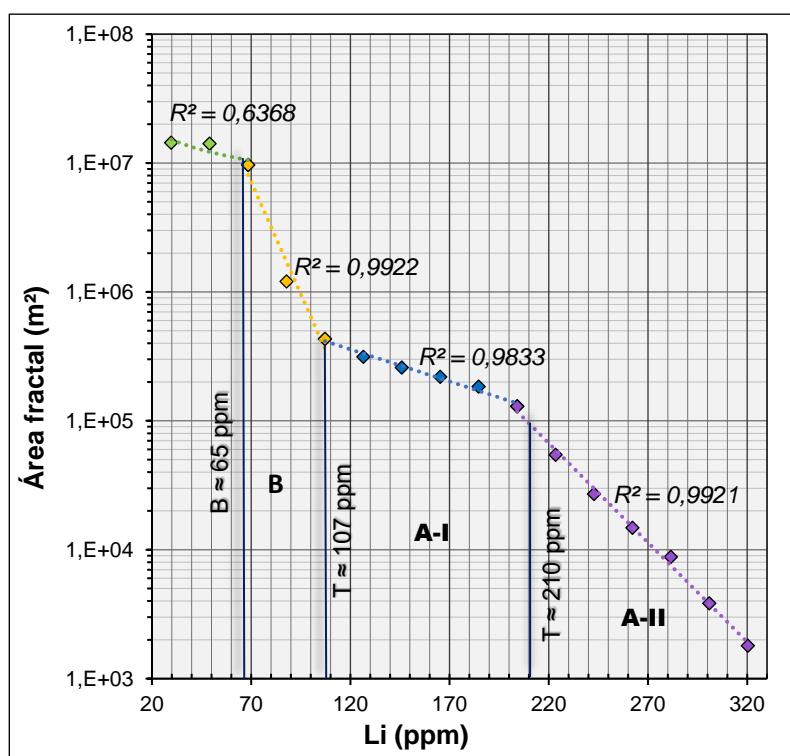


Fig. 3. Gráfico C-A para concentraciones de Li. Donde, R^2 : regresión lineal; T: umbral geoquímico; B: fondo geoquímico; A-I: población anómala baja; A-II: población anómala alta.

El gráfico *log-normal* C-A (Fig. 3), muestra la relación de la concentración de Li con el área de estudio. Los niveles de fondo geoquímico se presentan en gran parte del sector (valores más altos de la variable área m^2) y el primer punto de inflexión, mientras que los valores de umbral se identifican a partir de los puntos de inflexión posteriores. Las rectas tienen una buena regresión lineal (R^2 cercano a 1) indicando poblaciones fractales bien definidas.

RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Tres poblaciones son determinadas para Li usando el modelo fractal *concentración – área*; los valores menores a 107 ppm se consideran como primera población correspondiente al fondo geoquímico (B). Los tenores de litio entre 107 a 210 ppm se asocian a anomalía baja (A-I). Finalmente, las concentraciones mayores a 210 ppm corresponden a anomalía alta (A-II).

Los valores de R^2 son mayores a 0,983 indicativo de que se tiene un buen ajuste del modelo de regresión lineal; por tanto, la agrupación de 3 poblaciones en el área de estudio es representativa.

CONCLUSIONES

El método de concentración-área es apropiado para el análisis de datos litogegeoquímicos en superficie, porque relaciona la variabilidad de concentración de los datos con una agrupación coherente de poblaciones (de fondo y anomalía) donde el principio de autosimilitud fractal determina las características geoquímicas con gran precisión.

Sin embargo, si el modelo de interpolación es erróneo, la información generada no será representativa, por tanto, es recomendable aplicar el método fractal de concentración – área en estudios donde se disponga el muestreo sistemático (de suelos o roca) con malla reducida.

El fondo geoquímico es 65 ppm Li, comparativamente elevado al Clark para rocas ígneas felsicas de 40 ppm Li (Turekian & Wedepohl, 1961); este comportamiento confirma un enriquecimiento de litio inusual en la cámara magmática.

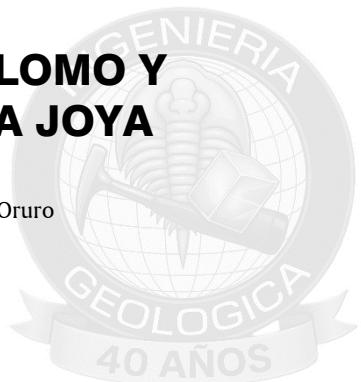
Del mapa de fractales se determina que los tenores anómalos de Li ocurren en el sector austral y occidental para el área de estudio, con dos valores de umbral >107 ppm (anomalía baja) y >210 ppm (anomalía alta), demostrando la importancia en la aplicación del modelo fractal de concentración-área C-A en la identificación de parámetros

litogegeoquímicos relacionando los tenores de Li con el área de ocurrencia.

REFERENCIAS

- Carranza, E., 2009. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*. Amsterdam, Netherlands. p. 3-351.
- Cheng, Q.M., 2004. A new model for quantifying anisotropic scale variance and for decomposition of mixing patterns. *Mathematical Geology*. 36(3), p. 345-360.
- Cheng, Q.M., Agterberg F., & Ballantyne, S., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*. 51(2), p. 109-130.
- Davis, J.R., Howard, K.A., Rettig, S.L., Smith, R.L., Erickson, G.E., Risacher, F., Alarcon, H., & Morales, R., 1982. Progress report on lithium-related geologic investigations in Bolivia. *U.S. Geological Survey Open-File Report*. OF 82-782, p.14.
- Erickson, G.E., Smith, R.L., Luedke, R.G., Flores, M., Espinosa, A., Urquidi, F.B., & Saravia, S., 1985. Preliminary geochemical study of ash-flow tuffs in the Morococala and Los Frailes volcanic fields, central Bolivian tin belt. *Department of the Interior U.S. Geological Survey. Report 85-258 y GEOBOL*. La Paz, Bolivia.
- Hoang, A.H., & Nguyen T.T., 2016. Identification of Spatial Distribution of Geochemical Anomalies Based on GIS and C-A Fractal Model – A Case Study of Jiurui Copper Mining Area. *Journal of Geosciences and Geomatics*. 4(2), p. 36-41.
- Koeppen, R.P., Smith, R.L., Kunk, M.J., Flores, A.M., Luedke, R.G., & Sutter, J. F., 1987. The Morococala volcanics: peraluminous rhyolite ash flow magmatism in The Cordillera Oriental, Bolivia. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*. 19(7), p. 731.
- Lepeltier, C., 1969. A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Economic Geology*. 64, p. 538-550.
- Luedke, R.G., Koeppen, R.P., Flores, M., & Espinosa, A., 1990. Reconnaissance geologic map of the Morococala volcanic field, Bolivia. *US Geological Survey, Map 1-2014*.
- Morgan, G.B., London, D. & Luedke, R.G., 1997. Petrochemistry of Late Miocene Peraluminous Silicic

- Volcanic Rocks from The Morococala Field. *School of Geology and Geophysics, University of Oklahoma.* 39(4), p. 601-632.
- Philip, G.M., & Watson, D.F., 1987. Probabilism in geological data analysis. *Geological Magazine.* 124(6), p. 577-583.
- Reimann, C., & De Caritat, P., 2016. Establishing geochemical background variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil. *Science of the Total Environment.* 578, p. 633-648
- Reimann, C., & Filzmoser, P., 2000. Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental geology.* 39(9), p. 1001-1014.
- Reimann, C., Filzmoser, P., & Garrett, R.G., 2005. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment.* 346(3), p. 1-16.
- Sinclair, A.J., 1976. Probability graphs in mineral exploration. *The Association of exploration geochemists.* 4. Vancouver, Canada.
- Turekian, K.K., & Wedepohl, K.H., 1961. Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. *Geological Society of America Bulletin 1961.* 72(2), p. 175-192.
- Zou, R.G., Cheng, Q.M., & Xia, Q.L., 2009. Application of Fractal Models to Characterization of Vertical Distribution of Geochemical Element Concentration. *Journal of Geochemical Exploration.* 102, p. 37-43.



CÁLCULO DEL FONDO GEOQUÍMICO PARA PLOMO Y ZINC EN SUELOS EN EL SECTOR ORURO – LA JOYA

Dania Lucy Yave Choque¹, Willy Camargo Gallegos²

Carrera Ingeniería Geológica – Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro

¹danielucy2511@gmail.com, ²wcamargo_gallegos@yahoo.com

RESUMEN

El proyecto tiene como objetivo generar información básica inexistente en el altiplano boliviano, que sea de fácil acceso y de alta confiabilidad científica para propósitos de exploración de yacimientos minerales y de control ambiental. Se realizaron mediciones de concentración para el plomo y zinc en el horizonte B en suelos, estos elementos tienen importancia para propósitos de exploración geológica, control ambiental y seguimiento de la evolución geoquímica del sector. Las muestras fueron tomadas de forma aleatoria en suelos sin perturbación por actividad humana, agrícola, etc. mediante el uso de un taladro manual para evitar alterar la secuencia de los sedimentos del suelo, esto garantizó que la información obtenida sea confiable al igual que los resultados. Con el análisis estadístico realizado se pudo calcular la media para el plomo y zinc, los mapas de isoconcentración nos permitieron definir la dispersión geoquímica de los elementos estudiados. Los resultados fueron comparados con la media mundial y notamos que son más elevados y esto se debe a las características geológicas que presenta la región y sobre todo las características de la provincia geoquímica del altiplano.

Palabras clave: Fondo geoquímico, suelos, Oruro – La Joya, horizonte B, Concentración normal, plomo, zinc, media, comparación, información básica.

ABSTRACT

The project aims to generate basic information that does not exist in the Bolivian highlands, that is easily accessible and of high scientific reliability for the purposes of mineral deposit exploration and environmental control. Concentration measurements for lead and zinc were taken in the B horizon of soils, these elements are important for geological exploration, environmental monitoring, and tracking the geochemical evolution of the area. Samples were randomly collected from soils undisturbed by human activity, agriculture, etc., using a hand drill to avoid altering the soil sediment sequence, this ensured the reliability of the data and results. Statistical analysis allowed for the calculation of mean concentrations for lead and zinc. Isoconcentration maps enabled the definition of the geochemical dispersion of the studied elements. The results were compared with the global average, revealing higher values. This is attributed to the region's geological characteristics, particularly those of the Altiplano geochemical province.

Keywords: Geochemical background, soils, Oruro – La Joya, B horizon, Normal concentration, lead, zinc, average, comparison, basic information.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se han publicado muchos estudios de investigación que buscan separar el fondo geoquímico de la línea base, especialmente en sectores altamente perturbados por la actividad humana. Sin embargo, los valores obtenidos no pueden ser trasladados a otras condiciones geológicas, por eso las investigaciones deben hacerse en el mismo lugar de interés ya que la geología, el clima, la actividad humana y otros aspectos pueden variar mucho de una región geológica a otras y de un país a otro, por eso abunda la enorme información científica que cada país ha generado para sí mismo.

Las experiencias en Bolivia son limitadas. El organismo que se debe ocupar de esta elaboración de información básica

es el Servicio Geológico de Bolivia, ahora transformado en un organismo que se ocupa de varios otros aspectos adicionales, y conocido con el acrónimo de SERGEOMIN.

Sin embargo, una excelente experiencia que produjo información de validez científica de calidad mundial es el trabajo de geoquímica del precámbrico boliviano, realizado en cooperación con el servicio geológico de Gran Bretaña (1987). Este trabajo de varios años produjo mapas geoquímicos y de fondos geoquímicos para varios elementos químicos característicos de esa provincia geoquímica, como Cromo, Vanadio, Cobalto, Hierro, Níquel, oro y otros. Los datos fueron tomados en sedimentos de corriente y en algunos casos en suelos. Los trabajos específicamente para el altiplano son prácticamente

inexistentes con excepción de los estudios realizados por Camargo (2009), para el sector de Oruro Pazña, por plomo y Zinc. Por otro lado, el trabajo de Altamirano (2021) quien hizo el cálculo del fondo geoquímico por arsénico en el área de Huanuni.

La ausencia de información geoquímica básica en general y de información geoquímica de los elementos indicados en particular, en los suelos del altiplano, no ha permitido en las limitadas experiencias anteriores y no permite en la actualidad una adecuada planificación de la actividad de exploración de yacimientos minerales y de control ambiental de validez científica.

El objetivo de realizar este proyecto fue determinar el fondo geoquímico de los elementos Pb y Zn. Dicho parámetro permitirá establecer los patrones de dispersión geoquímica, realizar comparaciones con resultados de futuras

exploraciones y detectar la evolución de la calidad de estos suelos debido a diferentes factores.

MARCO GEOLÓGICO

Se tienen varios yacimientos que han sido importantes y algunos continúan siendo explotados por oro y plata principalmente. Es imprescindible tener en cuenta la mineralogía de elementos calcófilos en la zona ya que durante decenas y centenas de miles de años han sido intemperizados y dispersados en los suelos y aguas de la zona de estudio, confiriendo una característica geoquímica muy especial en toda la cuenca.

A continuación, se cita la información geológica pertinente de dos (San José y Kori Kollo) de los cuatro principales cuerpos mineralizados de la zona (San José, Koi Kollo, Llallagua y la Joya).

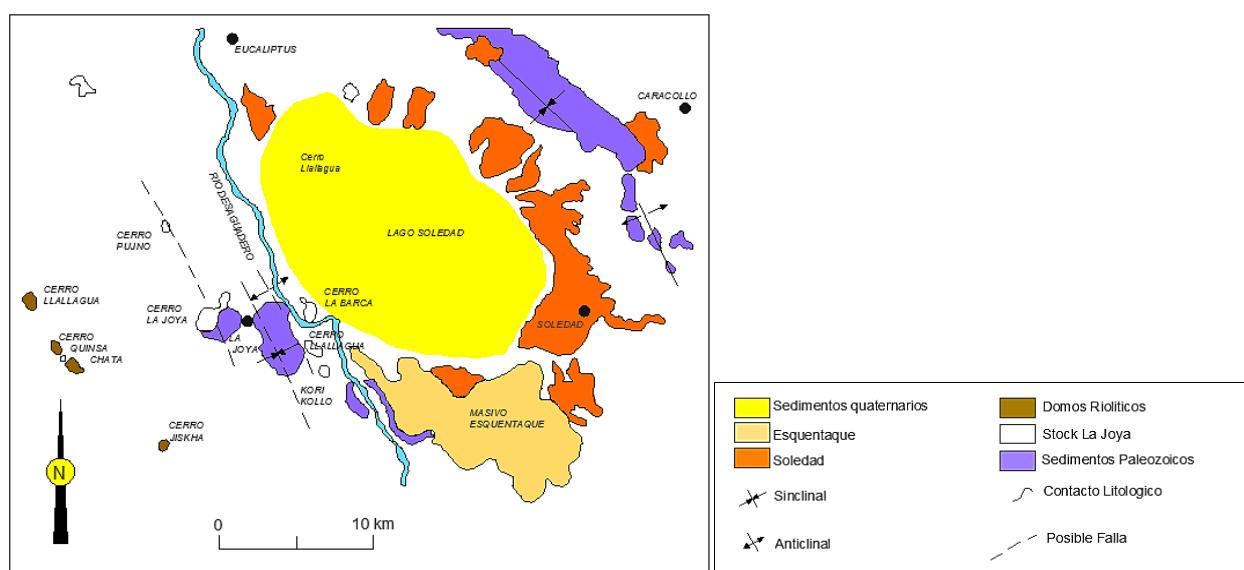


Fig. 1. Mapa geológico referencial de la zona de estudio

Yacimiento de San José

El basamento está compuesto de una potente secuencia de rocas sedimentarias clásticas de origen marino de edad paleozoica (lutitas, siltitas y areniscas esencialmente) fuertemente plegadas y deformadas por rocas volcánicas de edad oligocena tardía y plioceno (Cunningham et. al. 1991). El complejo volcánico de edad miocénica de rumbo Norte Sur, se emplaza en rocas de lutitas negras y areniscas de edad silúrica. En términos genéricos el complejo volcánico está compuesto de rocas dacíticas, aunque al ser más

preciosos se tratan de pórfidos cuarzo monzoníticos, brechas y lavas dacíticas.

Estas rocas constituyen la roca hospedante de una compleja mineralización como cuarzo, casiterita, galena, esfalerita, arsenopirita, pirita, marcasita, estibina, estannita, cilindrita, frankeita, tetraedrita, andorita, boulangerita, entre otros.

Yacimiento del Kori Kollo

Está localizado en un conjunto de stocks dacíticos alterados, fuertemente caolinizados, de edad miocénica. El basamento

está constituido por siltitas y lutitas de edad silúrica. El stock del Kori Kollo incluye tres fases de dacita desde grano fino hasta grano grueso con fenocristales de feldespatos, biotita y cuarzo. Los feldespatos y la biotita han sido alterados a sericitas y caolinita.

La mineralización de las vetas consiste de: arsenopirita, pirita, electrum, jamesonita, calcopirita, galena, estanina, esfalerita, bournonita, marcasita, entre otros.

ÁREA DE ESTUDIO

Comprende el sector Oruro – La Joya

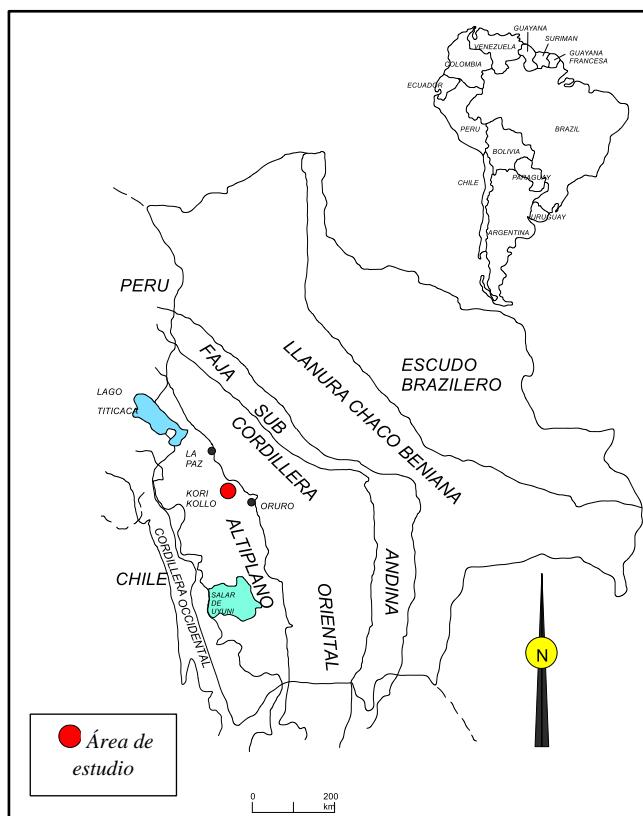


Fig. 2. Mapa de ubicación de la zona de estudio

MÉTODOS Y MATERIALES

Se tomaron 83 muestras de suelo, en el horizonte B, que se encuentra entre 15 a 30 centímetros de profundidad de tal manera que fue fácilmente alcanzarlo por el taladro manual disponible. La perforación fue manual, siguiendo un ritmo giratorio lento y firme que garantice la penetración establecida. La perforación, por recomendaciones de expertos, fue realizada por etapas hasta alcanzar la profundidad del horizonte B. Fue necesario evitar el

derrumbe del pozo u orificio de perforación, se tuvo especial cuidado en no mezclar diferentes horizontes del suelo en la misma muestra. Los puntos de las muestras corresponden a sitios no perturbados por actividad humana, ya sea por actividad humana, agrícola, pastoril, caminos permanentes y temporales u otros. Esto fue identificado al encontrar vegetación autóctona de crecimiento muy lento.

El punto de cada muestra fue registrado con un GPS de alta resolución. No se tomaron muestras sin ubicación en términos de coordenadas. Se realizó una breve descripción con información útil del sitio en la libreta de campo. La cantidad de muestra oscilo entre 80 y 100 gramos para garantizar el análisis por fluorescencia de rayos X. Cada muestra fue codificada y guardada en un sobre de papel Kraft.

- **Análisis químico de las muestras por fluorescencia de rayos X**

Del total de las muestras obtenidas, 23 fueron enviadas al laboratorio de SPECTROLAB (Oruro-Bolivia) para el respectivo análisis de los elementos de interés: Pb y Zn. 15 muestras fueron enviadas al laboratorio SERGEOMIN-(Cochabamba Bolivia), los restantes de muestras fueron llevadas a ALS y CIMM (Oruro-Bolivia). Se tuvo que acudir a diferentes laboratorios en función de las situaciones de servicio que ofrecían estas entidades. Lo ideal hubiese sido acudir a un solo laboratorio certificado internacionalmente y hacer la validación en otro.

- **Análisis estadístico, recomendado según Lepeltier y Sinclair**

Estadística descriptiva, para la elaboración de histogramas, curva de frecuencias acumuladas, cálculo de la media y otros parámetros estadísticos. Se hace notar que, al tratarse de dos elementos indicadores, las soluciones gráficas recomendadas anteriormente se ajustan de manera apropiada y generan información geoquímica interpretable. En caso de haberse trabajado con análisis de varios elementos químicos se hubiese acudido adicionalmente a otros modelos matemáticos como de componentes múltiples o fractales dentro de la llamada estadística robusta.

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

La Fig. 3, muestra el histograma donde se observan 2 poblaciones, una que es la de fondo geoquímico que es la concentración normal de Pb con una media de 39 ppm aproximadamente y la otra que es población anómala.

Ambas poblaciones están separadas por el umbral que se encuentra a los 110 ppm aproximadamente y todos los valores que superen el umbral son considerados anómalos.

En el gráfico de probabilidad también se observa como el valor anómalo va alejándose de los datos de fondo y se encuentra en la parte superior.

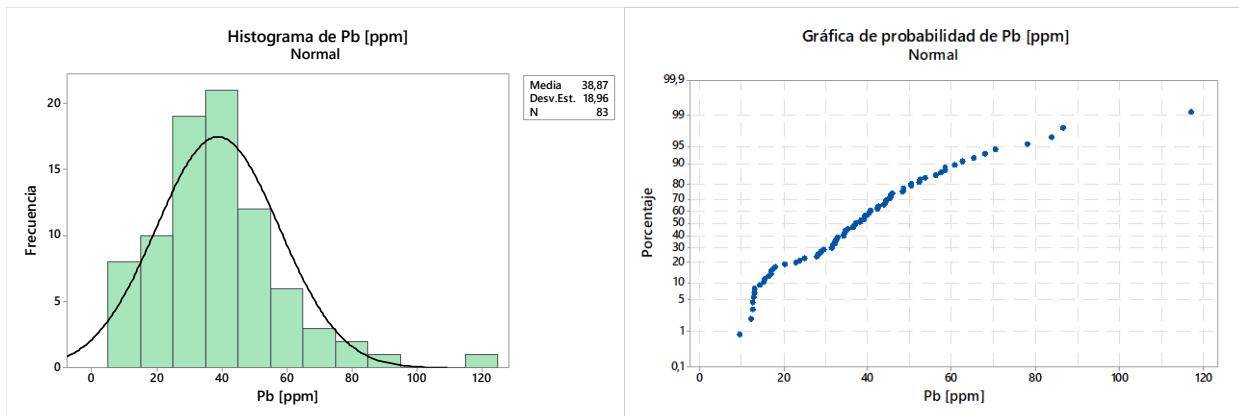


Fig. 3. Histograma y gráfico de probabilidad para el Pb con datos crudos.

La Fig. 4, muestra el histograma para el zinc y se observan 2 poblaciones, la de fondo geoquímico que es la concentración normal de Zn con una media de 91 ppm aproximadamente y la población anómala. Ambas poblaciones están separadas por el umbral que se encuentra

a los 200 ppm aproximadamente, lo que indica que todos los valores superiores al umbral son considerados anómalos. En el gráfico de probabilidad también se observa como los valores anómalos se van alejando de los datos de fondo mostrando una inflexión.

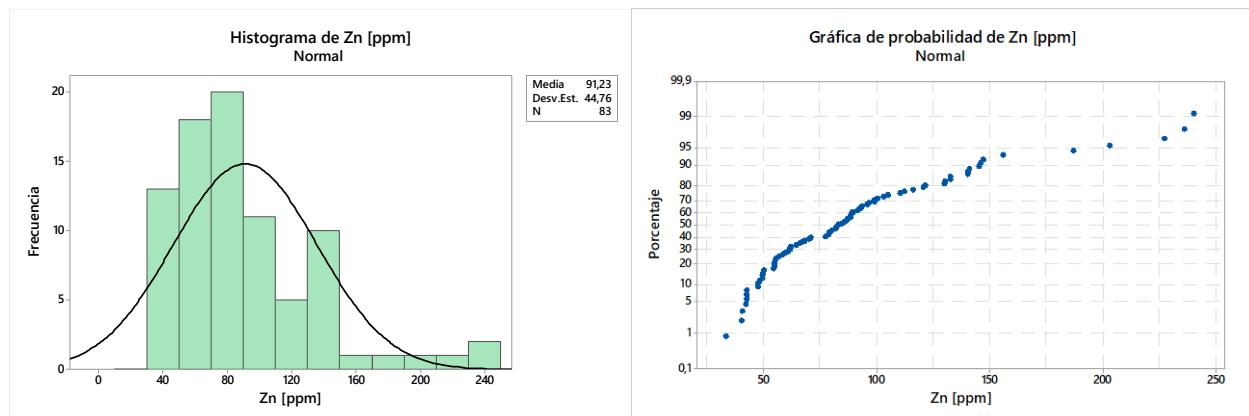
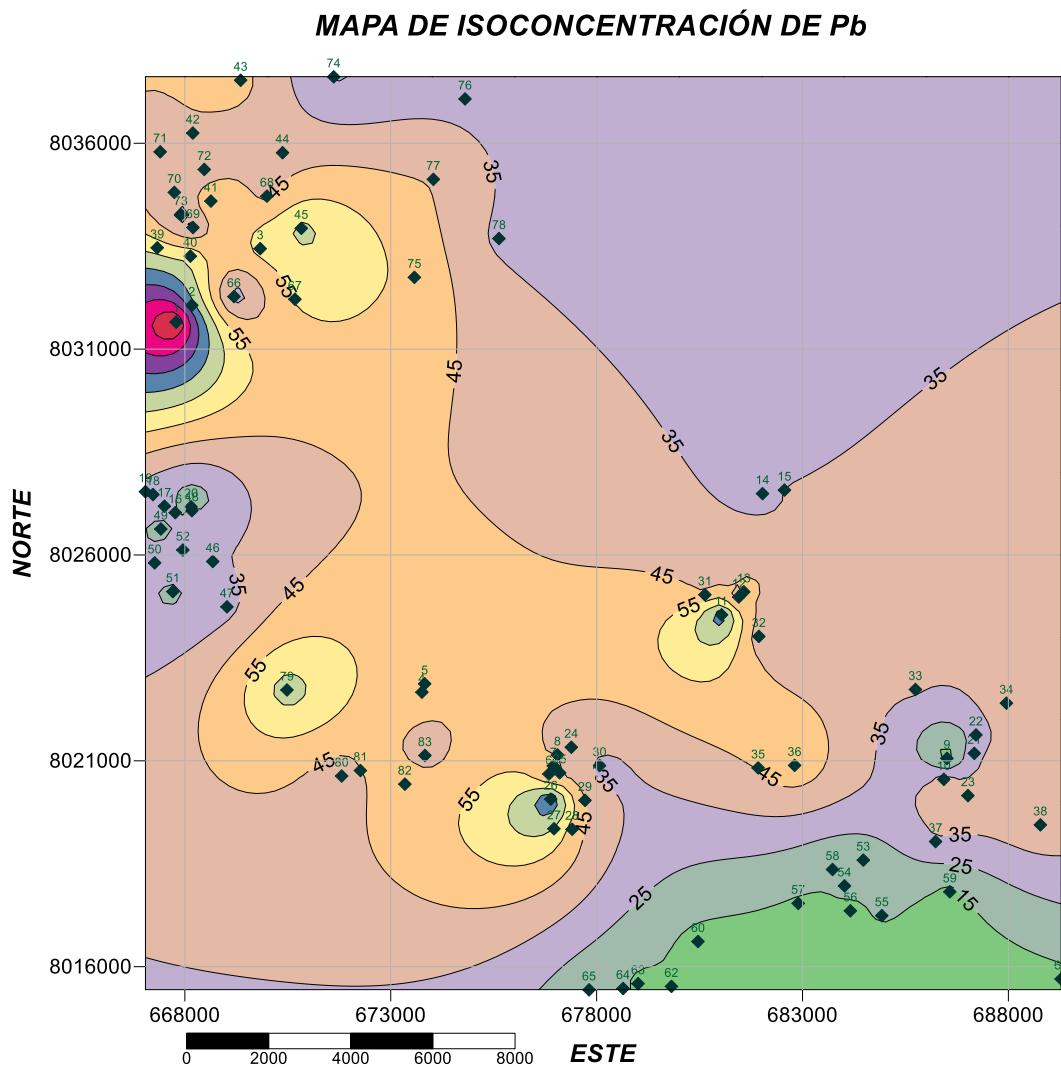


Fig. 4. Histograma y gráfico de probabilidad para el Zn con datos crudos.

Mapas de isoconcentraciones

Toda la información generada a partir de los datos de concentraciones y transformada en información geoquímica

fue traslada a los mapas de isoconcentraciones que se muestran a continuación.

**Fig. 5.** Mapa de isoconcentración para el Pb

La Fig. 5. muestra el mapa de isoconcentración, destacando que las mayores concentraciones de Pb se encuentran en el sector NW del área de estudio, y en la muestra N°1 con un

valor de concentración de 117 ppm, que se encuentra en el sector SW la Laguna Soledad. Este valor debe ser verificado mediante una posterior exploración de seguimiento.

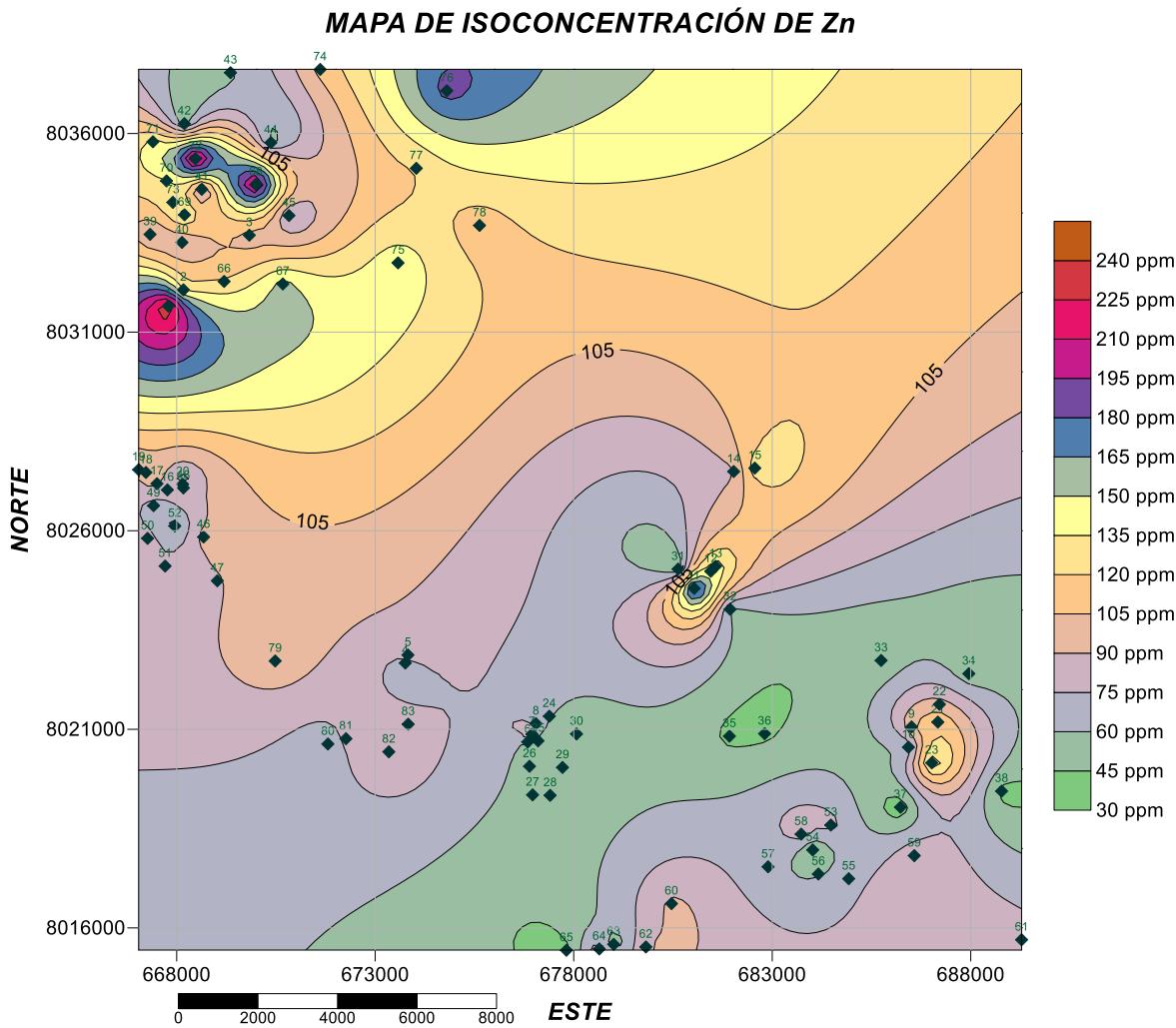


Fig. 6. Mapa de isoconcentración para el Zn.

La Fig. 6. muestra el mapa de isoconcentración donde se destaca que las mayores concentraciones de Zn se encuentran en el sector NW del área de estudio, que al igual que el plomo se encuentra en la muestra N°1 con 240 ppm.

DISCUSIÓN

Objetivo principal fue cumplido al generarse información básica para futuros trabajos de exploración geoquímica de control de impacto ambiental y de punto de partida para establecer la evolución geoquímica de la cuenca.

Estos valores medios sirven como una información básica científica de fácil acceso y confiable.

Los elementos de estudio son el plomo y el zinc con un rango de concentración de 9,5 a 117 ppm y de 33,34 a

240,26 ppm respectivamente. Los valores medios son 39 y 91 ppm respectivamente. Estos valores superan la media mundial para suelos que según Wedepohl (1969-1978) para el plomo es 17 ppm y para el zinc es 36 ppm.

Según las curvas de isoconcentración tenemos los valores más altos tanto para Pb y Zn en el sector noroeste del área de estudio, más específicamente se encuentra en el sector de la Laguna Soledad y en la muestra 1, donde podemos apreciar sedimentos del cuaternario lacustre (QI). Se presume que estos elementos pudieron haber migrado del sector de Kori kollo y La Joya que están muy próximos o San José.

Nótese que hay una gran diferencia entre los valores obtenidos y la media mundial, esto se debe a las características geológicas del lugar.

CONCLUSIONES

Se logró obtener la concentración media de plomo y zinc (39 ppm y 91 ppm), lo que equivale a la concentración de fondo geoquímico los suelos del sector Oruro – La Joya.

Los mapas de isoconcentración nos muestran que los valores más altos de concentración se encuentran en el sector NW del área de estudio. Por lo cual es recomendable que se pueda realizar un estudio geoquímico con muestreo de seguimiento y de detalle si los valores se verifican en el sector.

La metodología aplicada para la obtención de las muestras resultó ser acertada. Las muestras se recolectaron en sitios no perturbados por actividad humana. El procesamiento de datos fue apropiado al tratarse de dos elementos indicadores. Todos estos aspectos garantizan la confiabilidad de los resultados.

REFERENCIAS

Altamirano, R., 2021, Estimación del fondo geoquímico de arsénico en suelos de la sub cuenca del Río Huanuni: proyecto de grado, Oruro, Bolivia, Universidad Técnica de Oruro.

Camargo, W., 2009, Una propuesta de determinación del fondo geoquímico por plomo y zinc en los suelos de Oruro.

Cohen D.R. Bowell R.J. Exploration Geochemistry. Researchgate. Elsevier.2014.

Faure, G., MacDougall, J. D., 2019, Geochemical Distribution of Elements, Macgraw – Hill, Access Science.

Fitzmayer, J. F., 2000, Sulfide Mineralogy, wall rock Alteration and Geologic Model of the Kori Kollo, Gold-Silver Deposit, Bolivia, University of UTAH, USA.

Grunsky Erick. Geological Survey of Canada. Geochemical Data Evaluation and Interpretation. Workshop 2. Exploration Geochemistry. Basic Principles and Concepts. Exploration 07.-08 September 2007..

Monroy I., Gorinova E., Alarcon H., Fornari M. & Soler P., 1994, Geología y petrografía de la zona de Esquentaque – La Joya, Memorias del XI Congreso Geológico de Bolivia, Santa Cruz – Bolivia.

Lepeltier, C., 1969, A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation, Economic Geology.

Oyarzun, J., 2022, Geoquímica Aplicada, Principios Básicos de Geoquímica, Prospección Geoquímica, Hidrogeoquímica y riesgos ambientales, Ediciones GEMM. Universidad de La Serena, La Serena – Chile.

Reinmann. C. Filzmoser P. Garret R.G. Background and threshold; Critical comparison of methods of determination. .Science of the Total Environment Elsevier. 2004

Rose A.W., Hawices H. E., Webd, J. S, 1979, Geochemistry in Mineral Exploration, 2nd Ed., London, Academic Press.

Siegel F. R., 1992, Geoquímica Aplicada, Departamento de Geología, The Washinton University, Washington, D.C., Estados Unidos de America.

Sinclair, A.J., 1976, Probability graphs in mineral exploration, The Association of exploration geochemists. Vancouver, Canada.

Wedepohl K. H., (1969-1978), Hand Book of Geochemistry, Vol. 2-4, Sannger-Vellac-Berlin.

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO GEOTÉRMICO EN EL MUNICIPIO DE ORURO

Antonio Carrasco Cortez



RESUMEN

Para determinar el potencial energético geotérmico de una zona, y poder considerarlo como una “**zona energética geotérmicamente rentable**” se deben reunir ciertas características y condiciones mínimas. El presente estudio se enfoca en determinar si el municipio de Oruro, puede ser considerado una zona de energía Geotérmica de capacidad considerable.

El potencial energético de los yacimientos geotérmicos del municipio no ha sido evaluado y por eso se procedió a evaluar el potencial geotérmico en base a mediciones e interpretación de datos correlativos de geotermometría, geofísica y modelado geoestadístico recabados a partir de diversas fuentes y obtención propia.

La evaluación concluye que las áreas con potencial geotérmico considerable, (catalogadas como de alta temperatura) en el municipio de Oruro representarían alrededor del 13%. Estas zonas coinciden con en el sector de Capachos, donde se estima un calor almacenado total in situ de 20.838.347 GWh, de los que el máximo extraíble teórico es de 2.049.211 GWh. El restante 87 % sería catalogado como zonas de baja a media temperatura, esto es corroborado por los estudios llevados a cabo, donde se estima un calor almacenado total de 161.257.075 GWh, de los que el máximo extraíble es de 29,778,867 GWh considerado como reserva energética.

En el caso de las zonas de elevado potencial energético geotérmico y elevadas temperaturas, este estudio propone la instalación de un sistema de generación eléctrica con tecnología de ciclo binario geotermoeléctrico, aplicable, bajo las condiciones presentes en el yacimiento de elevada temperatura, ya que este opera en un rango de temperaturas entre los 95 y 150 °C y puede además adecuarse a sistemas de agua subterránea de elevada salinidad, característica asociada a los acuíferos subterráneos en la zona de estudio.

Finalmente se determina para el total del área prospectada en el municipio que comprende las zonas de baja y alta temperatura, un calor almacenado total de 182.095.422 GWh, cuyo máximo extraíble es de 31.828.077 GWh considerado como la reserva energética total del potencial geotérmico en el municipio.

Palabras Claves: Geotermoeléctrico, Potencial geotérmico, Alta temperatura, Reserva energética.

INTRODUCCIÓN

En el municipio de Oruro actualmente pese a conocerse la existencia de potenciales focos de energía geotérmica, no se ha planteado ni indagado más en su potencial como fuente energética, por desconocimiento de los verdaderos alcances y bondades de su explotación.

Para ser considerado como un área con recursos energéticos renovables de explotación factible, este debe reunir condiciones respecto a la existencia de ciertos factores litológicos estructurales que deberán formar el complejo sistema geotérmico.

Se ha realizado una revisión acerca de la información de los yacimientos geotérmicos del municipio de Oruro, hallándose que los mismos no se encuentran evaluados respecto a su

potencial energético, como tampoco las condiciones litológico estructurales e hidrogeológica que los albergan, tomando en cuenta estos factores de vacío acerca del conocimiento de este recurso energético, el objetivo del trabajo de investigación es el de determinar y caracterizar la reserva energética geotérmica en el municipio.

UBICACIÓN GEOLÓGICA

El área Oruro está ubicada en el margen Este del Altiplano Central, donde afloran rocas de los sistemas Silúrico y Devónico desarrolladas en un ámbito de trasarco, así como rocas volcánicas del Mioceno asociadas a mineralizaciones, y depósitos cuaternarios que cubren gran parte del área de estudio.

La interpretación más reciente vincula al complejo volcánico de Oruro con una caldera resurgente (Avila-Salinas, 1992). En el área de La Joya, un grupo de stocks dacíticos (ca 15 Ma), considerados también raíces de domos, se emplazaron intruyendo sedimentitas de la formación Catavi, que hospedan mineralización polimetálica de Au-Ag-Cu.

Al N y NE de Soledad aflora la Formación Khollpana (espesor 100 m) de edad Mioceno Medio a Superior, compuesta por conglomerados y areniscas correspondientes a facies fluviales de ríos entrelazados, así como a conos progradantes. Supra yacen a esta unidad, las volcanitas Soledad vinculadas a la evolución de una caldera no resurgente. El colapso de la caldera (edad 5,4 Millones de años) estuvo acompañado por la erupción de tobas dacíticas. Volcanismo post-colapso asociado a fracturas anulares, dio lugar a lavas dacíticas que sobreyacen a las tobas en la parte Sud de la caldera, el centro no resurgente de la caldera es ahora ocupado por sedimentos lacustres correspondientes al efímero lago Soledad.

AREA DE ESTUDIO

El área de estudio es parte de la provincia cercada del departamento de Oruro, el municipio de Oruro colinda geográficamente al norte con el municipio de Caracollo, al este con el municipio de Soracachi, al sur con el municipio de el Choro y al oeste con el municipio de Toledo.

MÉTODOS Y MATERIALES

Se han utilizado diversos métodos que se explican más adelante, en la identificación de los componentes del sistema geotérmico y su potencial, para establecer la relación causa-efecto entre estos componentes, finalmente, estos análisis condujeron a la determinación cuantitativa y caracterización geotérmica del municipio de Oruro.

Los datos obtenidos en el presente trabajo de investigación pueden ser considerados de tipo primario debido a que los parámetros de medida físicos del sistema geotermal analizados (temperatura, valores de conductividad y resistividad de sub suelo, etc.) se obtuvieron

mayoritariamente *in situ* mediante diferentes pruebas y estudios geofísicos ubicados en zonas estratégicas, con el fin de ser lo más representativo posible al respecto.

La unidad de investigación se encuentra estructurada por un equipo multidisciplinario, el espacio y materiales, dedicados a la investigación, son proporcionados por las instalaciones y equipo de la empresa TRILOBITE S.R.L. la cual cuenta con todo el equipamiento en el área los cuales hacen posible el proyecto de investigación.

HIDROGEOLOGÍA

La ocurrencia de aguas subterráneas en el municipio de Oruro se encuentra plasmado en el mapa hidrogeológico adjunto al presente artículo. Esta ocurrencia, se ha clasificado en tres unidades hidrogeológicas principales: la primera representada por unidades hidrogeológicas relacionados con acuíferos porosos no consolidados, la segunda unidad hidrogeológica relacionados con acuíferos fisurados y finalmente las unidades hidrogeológicas relacionados con acuíferos locales y limitados.

GEOFÍSICA

Se realizaron 47 sondeos, distribuidos en 6 perfiles 4 transversales y 2 longitudinales cubriendo una longitud total de 35 km de perfil, y un área de aproximadamente 300.000 m².

La distancia media entre los puntos de medición es de aprox. 0,7 km., en la configuración Wenner Schlumberger, para obtener una gran profundidad de detección, la media distancia máxima de los electrodos de corriente generalmente era de 400 a 500 m, en algunos casos hasta 600 m, los perfiles son designados por los números 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

El estudio geofísico ha permitido estimar el espesor de los sedimentos no consolidados que rellenan la cuenca, encontrando sedimentos de menor espesor en la zona central de la cuenca aumentando hacia el norte hasta llegar a 180 m de potencia.

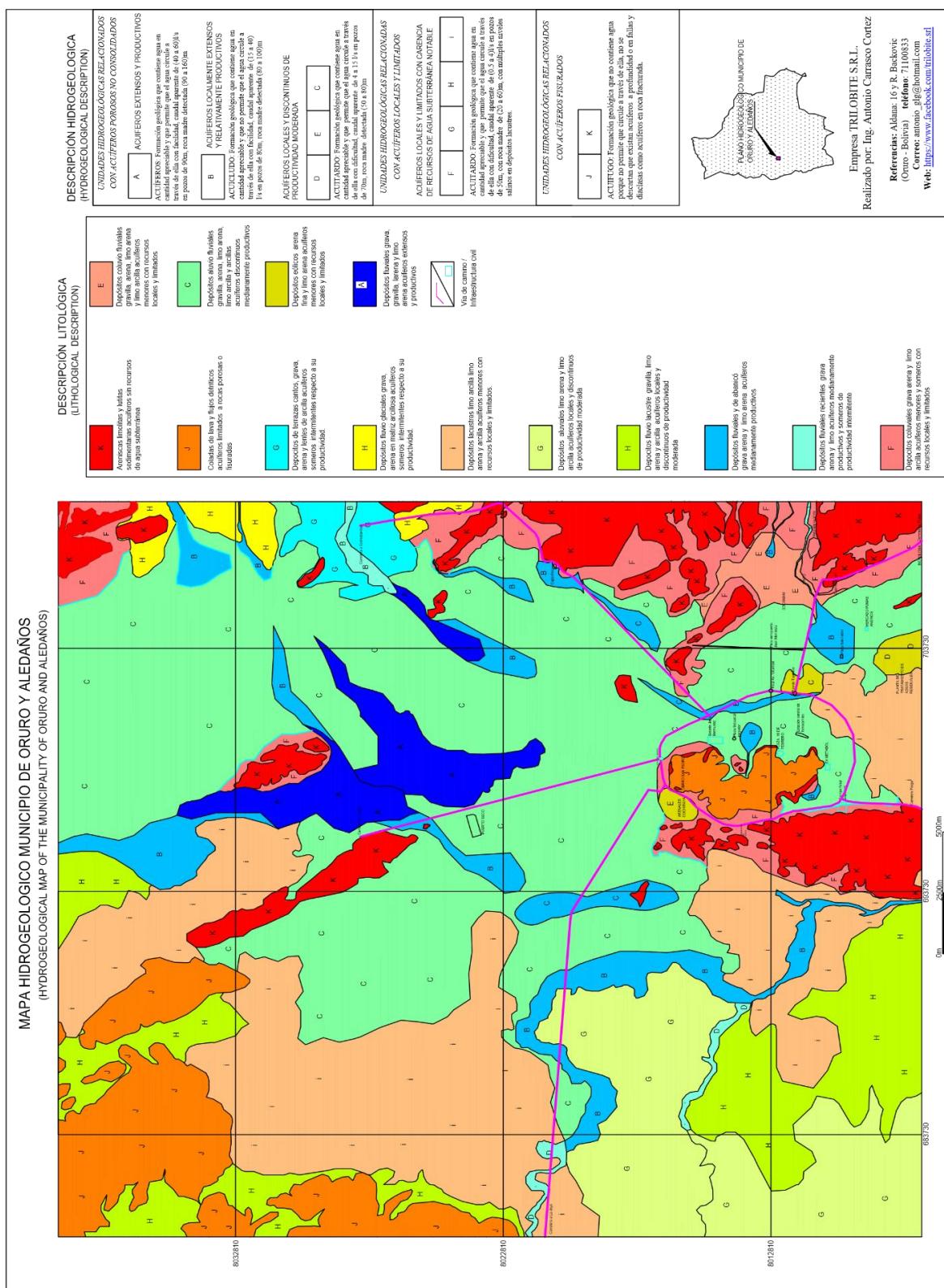


Figura 1. Mapa hidrogeológico municipio de Oruro fuente elaboración propia.

La zona de mayor potencia, abarca la zona norte sector Jatita, y sur zona arenales sud y áreas cercanas. Los datos de sondeos geoeléctricos obtenidos en la cuenca sedimentaria del municipio de Oruro, dieron informaciones valiosas sobre la estructura de la cuenca esta para su mejor comprensión fue dividida en 3 sectores:

Sector 1: La parte central y septentrional de la cuenca, la topografía del techo del terreno está caracterizada por una profundización entre la meseta lacustre al este y una cresta topográfica al oeste ligada al ascenso del techo de los afloramientos volcánicos, el espesor de los depósitos varía progresivamente a lo largo de un eje de dirección norte-sur. Es máximo al norte, esta zona conforma todo un sistema de lentes aluviales con características favorables a la explotación de aguas subterráneas.

Sector 2: La zona este de la cuenca, se extiende, entre Vinto y Socomani. Está limitada al este por una serranía de rocas silúricas noroeste-sureste, cuya altitud es de 3.780 m y que se sobrepone a una estructura de cuarcitas del sistema paleozoico que aflora al sur de Vinto. En su centro se encuentra un surco de espesores de aluviones de hasta 60 m que correspondería al eje de aportación del Río de sepulturas.

Sector 3: En la parte meridional de la cuenca, al sur y al suroeste las resistividades medidas son muy bajas, esta disminución concierne a todas las unidades geoeléctricas,

sin embargo, los contrastes de resistividad entre los diferentes terrenos son conservados, son características de depósitos muy finos a la imagen de los limos arenosos o arcillosos visibles en superficie y de origen lacustre y de inundación.

GEOTERMOMETRIA

La superficie del suelo intercambia calor con la atmósfera y sufre las variaciones diarias de temperatura hasta una profundidad de 0,5 m., por tanto se determina la profundidad de las medidas de geotermometría a 1m desde la cota superficie, con un rango de medida respecto al horario de 10 am a 5 pm, la profundidad de medida y los horarios diarios establecidos corrigen la variación diaria y horaria para evitar que la temperatura ambiente en superficie varíe la medición, esta variación evitada es debida al calor recibido del sol.

Debido a que el área de estudio comprende 283.627.664 m² el tiempo de la medición supera los 120 días lo cual obliga a las mediciones a ser corregidas por una variación estacional o anual. Para esta corrección se realiza la medición de temperaturas a 1m de profundidad de una estación base. Con las variaciones estacionales medidas en la estación base es posible corregir los datos del área de trabajo bajo el principio de ajuste aritmético por compensación.

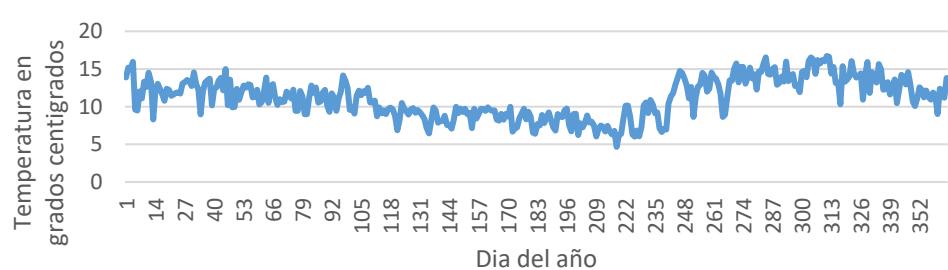


Figura 2. Variación anual de la temperatura a 1 metro, en estación (Análisis en base a periodo del año 2021).

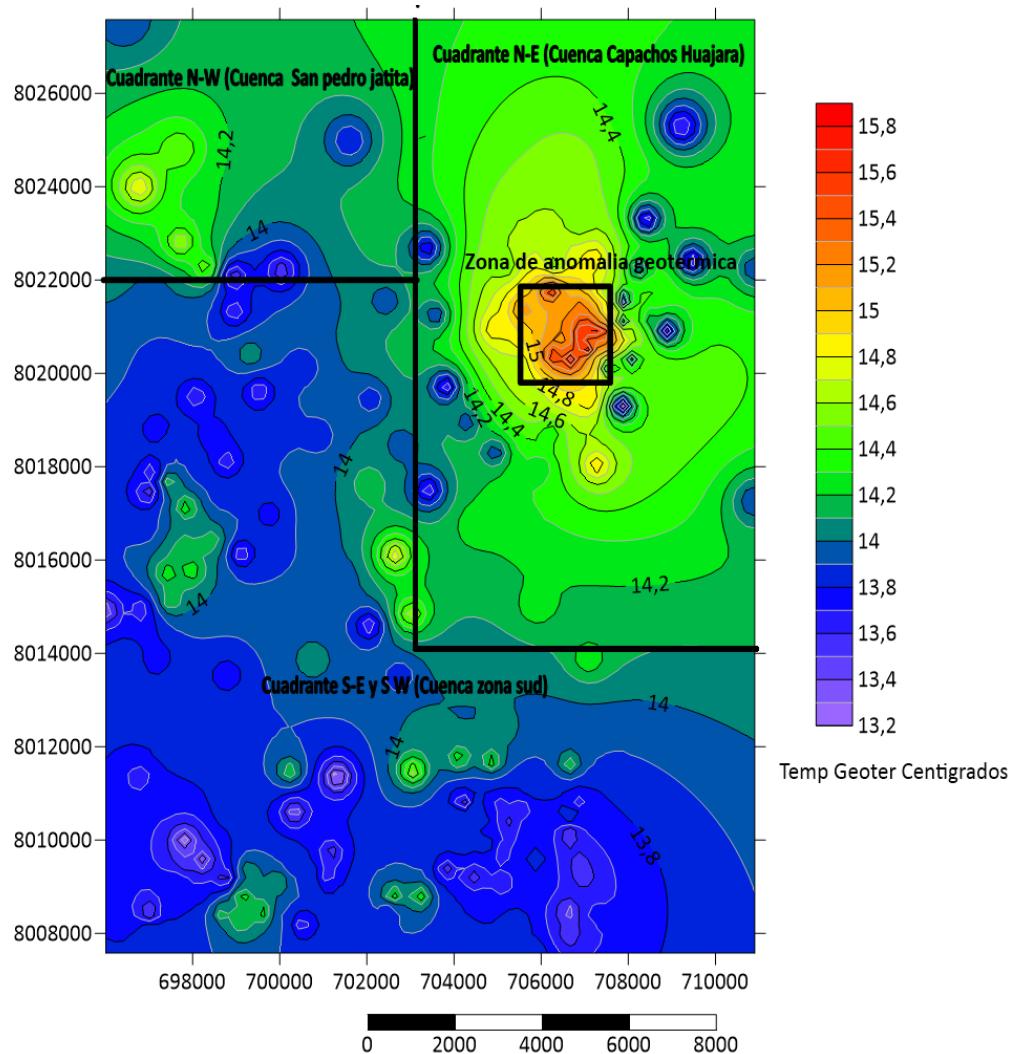


Figura 3. Mapa Geotermometrico y división en cuadrantes por zonas geotérmicas según la temperatura prospectada y denominación por cuencas sedimentarias aledañas del Municipio de Oruro

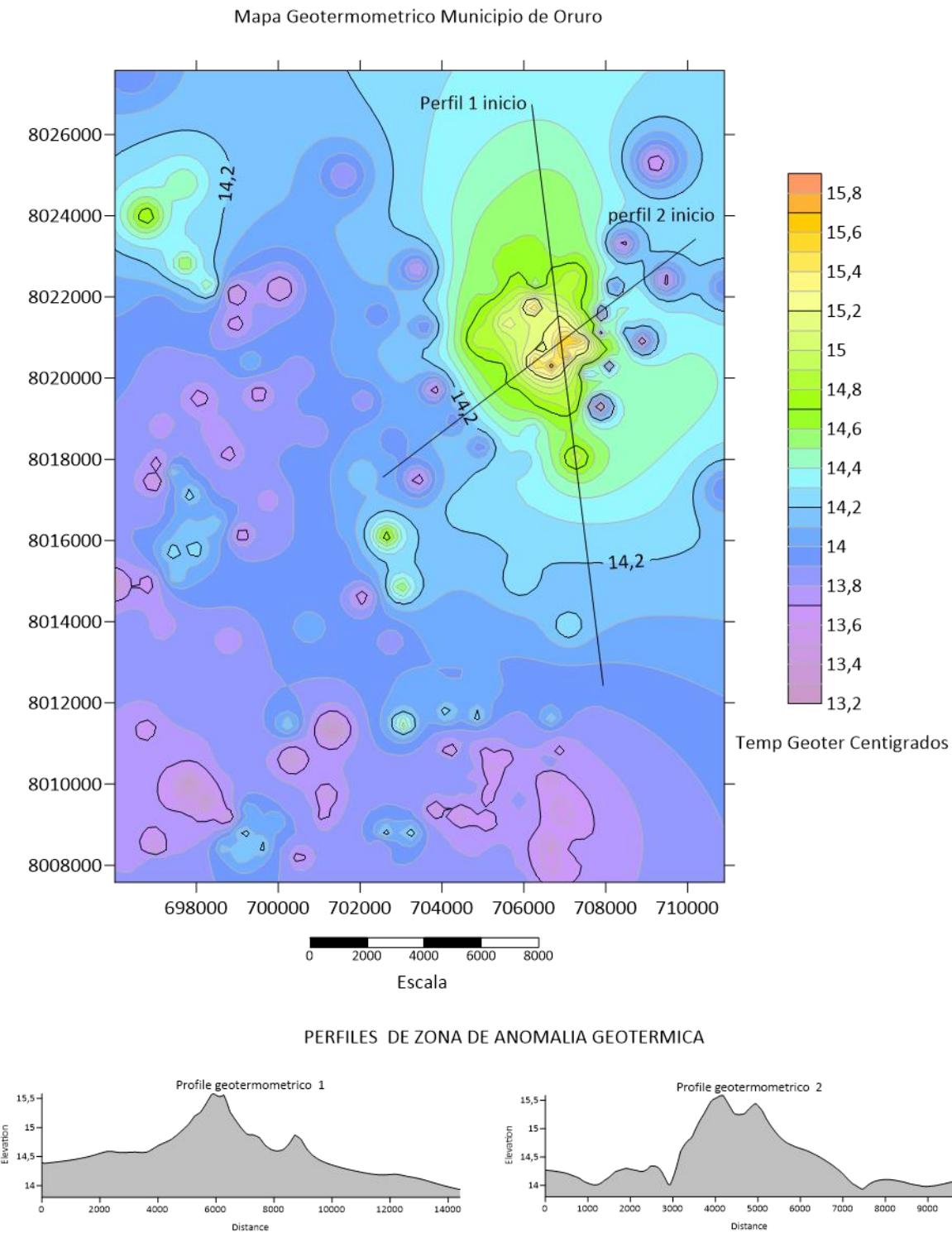


Figura 4. Mapa geotermometrico municipio de Oruro y perfiles de anomalia.

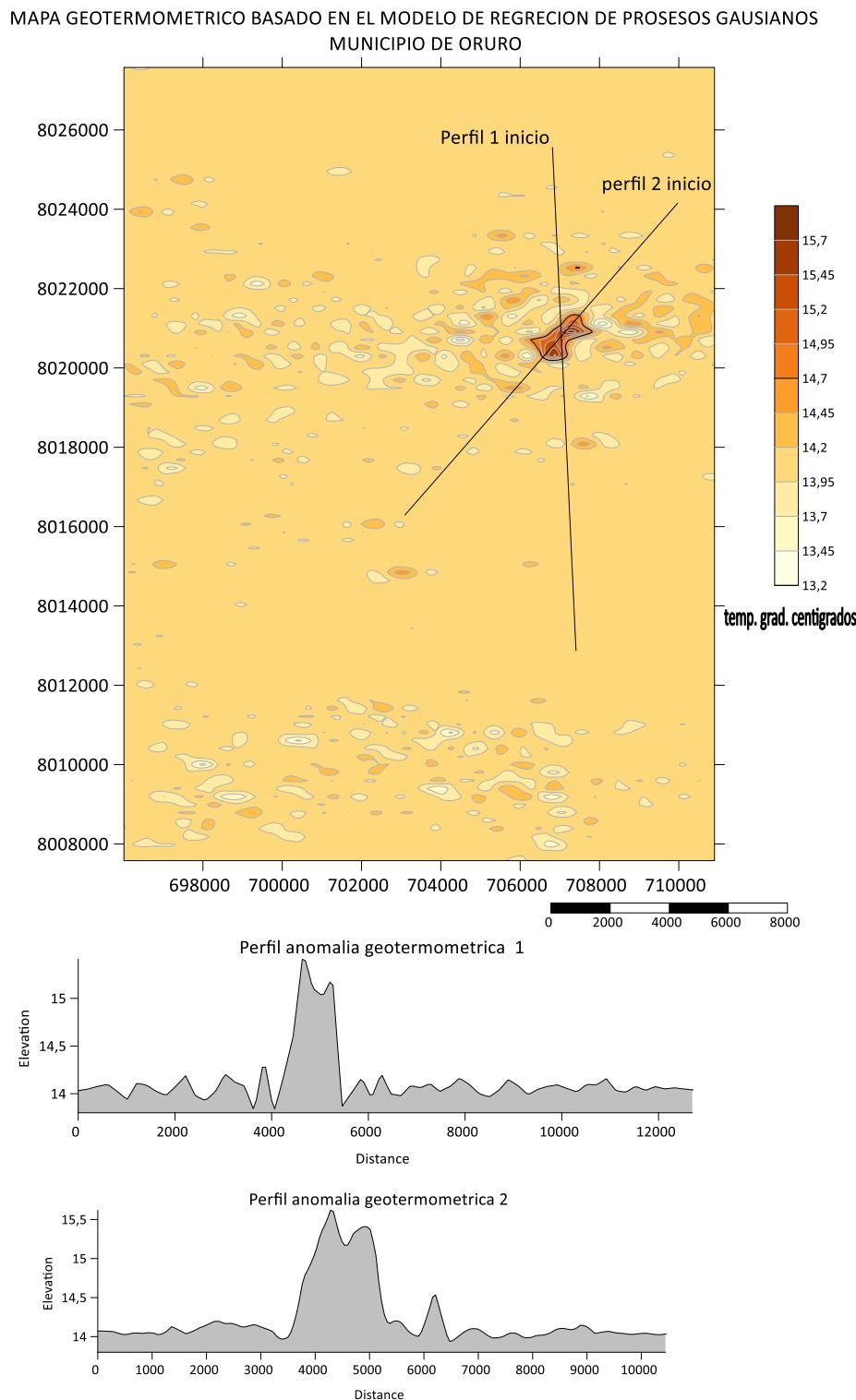


Figura 5. Mapa geotermometrico basado en la regresión de procesos gaussianos (kriging) municipio de Oruro y perfiles de anomalía.

El análisis estadístico por regresión de procesos gaussianos de la prospección geotermométrica en el municipio de Oruro, señala el cuadrante Nor Este en el mapa modelado (figura 4) , con rangos de temperaturas que superan con 4 grados centígrados los valores de fondo geotermométrico. Estos valores son considerados anómalos por tener una temperatura superior al valor de fondo que es de 12 grados, esta temperatura anómala es significativamente mayor que la temperatura media anual calculada para el gradiente geotérmico en Oruro a 1m de profundidad que es de 11,09 grados.

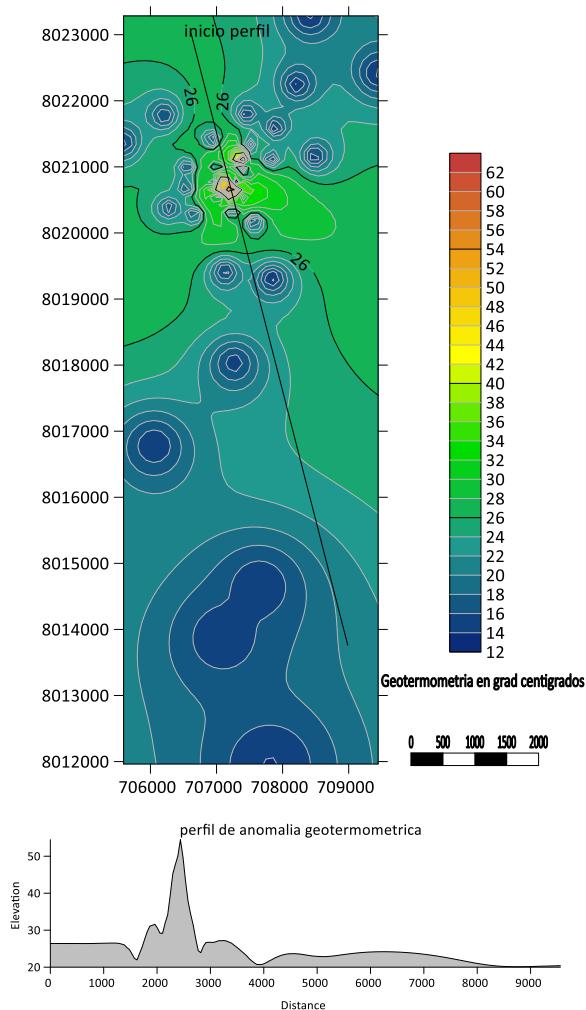


Figura 6. Mapa geo termométrico cuadrante noreste municipio de Oruro y perfil de anomalía.

Para cada una de las áreas geotérmicas existentes en el municipio, se ha llevado a cabo de acuerdo con lo estipulado en el pliego de prescripciones técnicas que rige este trabajo,

una evaluación de recursos y calor almacenado en sus diferentes formaciones permeables.

La evaluación de recursos se ha realizado como una estimación de los Recursos de Base Accesible a la profundidad propugnada de 3 km. Siguiendo la metodología descrita anteriormente, para el cálculo del calor almacenado se ha seguido el método volumétrico que permite fijar con buena precisión los recursos geotérmicos, de hecho, casi siempre es posible subdividir la región de estudio en zonas distintas, en función de sus condiciones geológicas.

En vertical, la separación se ha realizado en forma de unidades litológicas a las que se atribuye una potencia, porosidad y temperaturas medias. En zonas donde la información geológica, térmica o de sondeos es insuficiente o inadecuada, siempre se puede estimar la temperatura del almacén mediante geo termometría geofísica, esta aproximación requiere fijar un techo y una base al almacén y suponer que sus aguas se hallan en equilibrio térmico con la roca del acuífero, para cada una de estas unidades o formaciones geológicas permeables se calcula el calor almacenado.

Tabla 1. Zonas geotérmicas del municipio de Oruro

Zona geotérmica	Temperatura media del almacén en °C a 3 km de profundidad
Zona geotérmica 1 Cuadrante N-W (Cuenca San pedro Jatita)	104
Zona geotérmica 2 Cuadrante N-E (Cuenca Capachos Huajara)	104.4
Zona geotérmica 3 Cuadrante S-E y S W (Cuenca zona sud)	103.9
Zona geotérmica 4 Zona de anomalía geotérmica	915

Tabla 2. Planilla de cálculo de la energía geotérmica extraíble $HR = R \times Hi$, se conoce también como Recurso Identificado o Reservas.

R	Hi(GW-Hora)	HR(GW-Hora)	Tt °C	To °C	Ti °C	e (m)	zona geotérmica
0,2	2.546.561	470.266	45	9,26	25	1.000	1
0,2	5.469.168	1.009.975	45	9,26	25	1.500	
0,2	20.834.298	3.847.408	45	9,26	25	3.000	
0,2	7.375.391	1.361.992	45	9,26	25	1.000	2
0,2	15.785.520	2.915.065	45	9,26	25	1.500	
0,2	59.905.638	11.062.597	45	9,26	25	3.000	
0,2	9.823.590	1.814.093	45	9,26	25	1.000	3
0,2	21.116.181	3.899.463	45	9,26	25	1.500	
0,2	80.517.140	14.868.862	45	9,26	25	3.000	
0,1	2.344.719	230.576	120	9,26	87	1.000	4
0,1	5.242.602	515.549	120	9,26	87	1.500	
0,1	20.838.347	2.049.211	120	9,26	87	3.000	

PRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

RECURSOS GEOTÉRMICOS DE BAJA TEMPERATURA

Para las áreas geotérmicas seleccionadas en el municipio de Oruro y puestas en evidencia por los estudios llevados a cabo, para recursos geotérmicos de baja a media temperatura se estima un calor almacenado total de 161.257.075 GWh, de los que el máximo teórico extraíble es de 29.778.867 GWh considerado como recurso identificado o reserva energética.

RECURSOS GEOTÉRMICOS DE ALTA TEMPERATURA

Para las áreas geotérmicas seleccionadas en el municipio de Oruro y puestas en evidencia por los estudios llevados a cabo, para recursos geotérmicos de alta a media temperatura se estima un calor almacenado total de 20.838.347 GWh, de los que el máximo teórico extraíble es de 2.049.211 GWh considerado como recurso identificado o reserva energética.

RECURSOS GEOTÉRMICOS TOTAL MUNICIPIO DE ORURO

Se estima un calor almacenado total de 182.095.422 GWh, de los que el máximo teórico extraíble es de 31.828.077 GWh considerado como recurso identificado o reserva energética.

Tabla 3. Resumen valores calor almacenado y reserva geotérmica de alta y baja temperatura municipio de Oruro.

Zona geotérmica Municipio de Oruro			
Recurso geotérmico	Prof. extracción (m)	Ho (GW-Hora)	HR (GW-Hora)
Total	1.000	22.090.261	3.876.927
	1.500	47.613.471	8.340.052
	3.000	182.095.422	31.828.077
	Prof. extracción (m)	Ho (GW-Hora)	HR (GW-Hora)
Baja a media temperatura	1.000	19.745.542	3.646.351
	1.500	42.370.869	7.824.503
	3.000	161.257.075	29.778.867
	Prof. extracción (m)	Ho (GW-Hora)	HR (GW-Hora)
Alta temperatura	1.000	2.344.719	230.576
	1.500	5.242.602	515.549
	3.000	20.838.347	2.049.211

PROPUESTAS A PARTIR DE LOS RESULTADOS

A partir de los datos obtenidos en el estudio, enfocándose en las zonas donde el potencial geotérmico es elevado, se propone implementar sistemas de generación de energía geotérmica a fin de explotar esa energía latente que actualmente no es aprovechada en su totalidad generándose de este modo beneficios extra, tanto para los habitantes de la zona mediante trabajos estables como para el estado mediante la venta de energía eléctrica.

Para generar energía limpia se propone un sistema de generación de energía eléctrica basado en tecnología de ciclo binario para fuentes geotérmicas, el cual se adecua a las condiciones presentes en los yacimientos estudiados, por cuanto permite extraer energía de yacimientos de temperatura elevada (entre 95 y 150 °C) además es capaz de operar con sistemas subterráneos de elevada salinidad de forma eficiente, generando energía eléctrica a un coste ambiental menor, comparada con las plantas flash u otras tecnologías de extracción con mayores impactos ambientales.

CONCLUSIONES

En base a los datos de termometría, geología, geofísica y modelado geo estadístico se ha concluido que:

En el municipio de Oruro, como el resultado de la caracterización, se tienen 4 zonas geotérmicas, tres zonas de baja a media temperatura y uno de alta a media temperatura.

El municipio de Oruro puede ser caracterizado hasta el grado de recurso y reserva energética renovable, y su potencial

energético intrínseco es de 31.828.077 GWh considerado como recurso identificado o reserva energética.

Se recomienda con los datos y resultados obtenidos en el presente estudio establecer las bases para la implementación de futuros proyectos de abastecimiento de energía renovable tipo geotérmica tanto para el recurso de baja y alta temperatura para la generación de energía térmica o eléctrica respectivamente, dichas iniciativas mejoran y potencian el desarrollo energético del municipio y la ciudad de Oruro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Paolo Bona y Manlio F. Covilleo (2016). Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur. Naciones Unidas, Santiago: CEPAL.
- V. Jakubovskii L. L. Liajov. (1970). Exploración eléctrica España: Paraninfo.
- E. W. Petrascheck. (1960). Yacimientos y criaderos. España: Omega.
- R. Alfonso Gonzales Orias. (2003). Métodos Geoelectricos. Bolivia: Geofisi k. Gs.
- Tecnología y recursos de la tierra, S.A.: José Sanchez Guzmán, Laura Sanz López, Luis Ocaña Robles. (2011). Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020. España: Plan de Energías Renovables (PER) en España 2011-2020



La publicación de esta revista no solo simboliza un logro institucional, sino también un compromiso renovado con la ciencia y la sociedad. Es un homenaje a todos los pioneros que sentaron las bases de la carrera, a los docentes que han forjado generaciones de profesionales, y a los estudiantes que, con su entusiasmo y curiosidad, aseguran la continuidad de esta noble disciplina.

CARRERA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
Ciudadela Universitaria
Telf.: 2 5261375