PROPUESTA TÉCNICA, ECONÓMICA Y AM BIENTAL PARA LA PRODUCCIÓN DE PRECURSORES CATÓDICOS DE BATERIAS ION LITIO DEL TIPO $LiFePO_4$ (LPF) EN ORURO CON MATERIAS PRIMAS BOLIVIANAS

[1] Dr.- Ing. Gerardo Zamora E.
[2] M. Sc. Ing. Jorge Gutierrez
[3] Ing. Riorvi Brandon Ninavia Colque
[4] Sergio Favian Fernandez Ventura
1 Docente - Carrera de Metalurgia y Ciencia de Materiales - Universidad Técnica de Oruro
gerardozamoraechenique@yahoo.es
2 Docente – Carrera de Geología - Universidad Técnica de Oruro
fni.jorge@gmail.com
3 Tesista Carrera de Metalurgia y Ciencia de Materiales - Universidad Técnica de Oruro
brandonninavia4@gmail.com
4 Tesista Carrera de Metalurgia y Ciencia de Materiales - Universidad Técnica de Oruro
sergiometfni@gmail.com

RESUMEN

En Bolivia, el Litio es el precursor catódico que se encuentra en los Salares de Uyuni y Coipasa. En Potosí, se han mostrado esfuerzos por producir baterías de óxido de litio-manganeso (LMO) y Níquel-Manganeso-Cobalto (NMC) en la planta piloto de YLB; sin embargo, su escalonamiento a nivel industrial, enfrentará el mayor desafío que es la falta de reservas minerales de dichos precursores, los que deberán ser importados.

La batería LFP (Lithium Ferrum Phosphate, litio-ferrofosfato o LiFePO4) es una variante de la batería de litio convencional donde las sales de Carbonato de Litio, Ácido Fosfórico y Sulfato de Hierro Heptahidratado, se constituyen en los principales precursores para la fabricación del material catódico, pero que además, pueden ser obtenidos por procesamiento metalúrgico a partir de materias primas que se encuentran en Bolivia.

El presente trabajo de investigación se circunscribe al estudio técnico, económico y ambiental para la producción de precursores catódicos de baterías LFP en Oruro de precursores catódicos de baterías LiFePO4 a partir de materias primas existentes en Bolivia.

En base a la caracterización geoquímica de las salmueras del Salar de Coipasa, se ha propuesto un método de producción sostenible de LiCO3 por medio del proceso de extracción directa de litio; por otra parte, a partir de la caracterización de muestras de roca fosfórica de Cochabamba, la producción de H3PO4 por procesos de lixiviación ácida y evaporación - cristalización; y finalmente, a partir de una caracterización de muestras de hierro esponja a ser obtenido en el proceso de reducción carbotérmica de los concentrados del Mutún, en parte y sin pasar a su transformación en acero, mediante la adición de ácido sulfúrico y agua oxigenada para así obtener una solución de FeSO4 con una cantidad mínima de impurezas que posteriormente se llevará a cristalización por medio del método de evaporación, generando así un sulfato de hierro heptahidratado de alta calidad como precursor para la producción de baterías de ion Litio, pudiendo generar un mayor valor agregado.

Palabras clave: Precursores catódicos - Carbonato de litio (DEL) - Ácido Fosfórico Capinota – Hierro esponja Mutún

ABSTRACT

In Bolivia, lithium is the cathodic precursor found in the Uyuni and Coipasa salt flats. In Potosí, efforts have been made to produce lithium-manganese oxide (LMO) and Nickel-Manganese-Cobalt (NMC) batteries at the YLB pilot plant; however, scaling up to an industrial level will face the major challenge of a lack of mineral reserves of these precursors, which will need to be imported.

The LFP battery (Lithium Ferrum Phosphate, or $LiFePO_4$) is a variant of the conventional lithium battery in which lithium carbonate, phosphoric acid, and heptahydrated ferrous sulfate salts are the main precursors for the manufacture of the cathode material. These, moreover, can be obtained through metallurgical processing of raw materials found in Bolivia.

This research focuses on the technical, economic, and environmental study for the production of LFP battery cathodic precursors in Oruro, based on raw materials available in Bolivia. Based on the geochemical characterization of the brines from the Coipasa salt flat, a sustainable method for producing Li_2CO_3 through the direct lithium extraction process has been proposed. Additionally, from the characterization of phosphate rock samples from Cochabamba, phosphoric acid (H_3PO_4) production is considered through acid leaching and evaporation-crystallization processes. Finally, from the characterization of sponge iron samples—obtained through the carbothermic reduction of Mutún concentrates, in part and without transforming them into steel—by adding sulfuric acid and hydrogen peroxide, a $FeSO_4$ solution with minimal impurities can be obtained. This solution can then be crystallized via the evaporation method, producing high-quality heptahydrated ferrous sulfate as a precursor for lithium-ion battery production, thereby creating greater added value.

Key words: Cathodic precursors – Lithium Carbonate (DLE) – Phosphoric Acid Capinota – Sponge Iron Mutún

1. Introducción

La batería LFP (Lithium Ferrum Phosphate, litio-ferrofosfato o LiFePO4) es una variante de la batería de litio convencional donde las sales de Carbonato de Litio, Ácido Fosfórico y Sulfato de Hierro Heptahidratado, se constituyen en los principales precursores para la fabricación del material catódico.

Bolivia presenta las materias primas requerida para la fabricación del material catódico de las baterías LiFePO4; es decir, LiCO3 que puede ser obtenido a partir de los Salares e Uyuni y Coipasa; H3PO4 a partir de los yacimientos de roca fosfórica que se encuentran en el Departamento de Cochabamba; y FeSO4 * 7 H2O que puede ser obtenido a partir del Fe chancho de la Siderúrgica del Mutún.

En el marco de la Federal Direction for International Cooperation, la Universidad belga de Liege y la Universidad Técnica de Oruro, la prospección del Salar de Coipasa muestra una concentración media de litio de 339.1 mg/L y relaciones de Mg/Li y SO4/Li de 42.74 y 83.14, respectivamente. De acuerdo a esos indicadores técnicos, “es técnicamente difícil la posibilidad de extracción de litio de las salmueras de Coipasa a través de procesos convencionales”. Es decir, la extracción de litio del salar de Coipasa debe efectuarse por el método de extracción directa. El proceso propuesto involucra el proceso de adsorción – desorción, membranas y ósmosis inversa, y finalmente la precipitación del LiCO3, que se constituiría en el proceso más adecuado para la obtención de LiCO3 de las salmueras del salar de Coipasa, zona de alta escases hídrica o una variante que implica los procesos de desulfatación con cal, eliminación de Mg por precipitación iónica en forma de fosfatos, membranas y ósmosis inversa, y finalmente la precipitación del LiCO3.

Por otra parte, se ha estudiado la obtención de ácido fosfórico a partir de la roca fosfórica proveniente del municipio de Capinota - Cochabamba - Bolivia. Actualmente la roca fosfórica de dicho municipio, sólo se comercializa como fertilizante a los agricultores para su aplicación directa. La muestra de roca fosfórica de está constituida por 42.37 % P2O5, 29.73 % CaO, 5.49 % MgO y 12.38 % SiO2. El proceso propuesto involucra la lixiviación ácida con H2SO4, que puede ser producido a partir de la combustión de Azufre del yacimiento de Capurata, la separación del CaSO4 generado, y por último, por evaporación – cristalización para la obtención de H3PO4.

Finalmente, cuando arranque la planta siderúrgica del Mutún en Santa Cruz de la Sierra, los minerales de hierro que pasen por el alto horno, darán la formación del arrabio, que casi siempre presentan los siguientes rangos de composición: 92% de hierro, 3 o 4% de carbono, entre 0,5 y 3% de silicio, del 0,25 al 2,5% de manganeso, del 0,04 al 2% de fosforo y algunas partículas de azufre; por lo que una parte del hierro chancho podría lixiviarse mediante la adición de ácido sulfúrico y agua oxigenada para así obtener una solución de FeSO4 con una cantidad mínima de impurezas que posteriorme

nte se llevará a cristalización por medio del método de evaporación.

El objetivo del presente trabajo de investigación se circunscribe a contribuir al desarrollo tecnológico nacional a partir del estudio técnico, económico y ambiental de la producción de precursores catódicos de baterías LFP en Oruro a partir de materias primas existentes en Bolivia (producción sostenible de LiCO3 a partir de las salmueras del salar de Coipasa; producción de H3PO4 a partir de la roca fosfórica del yacimiento de Capinota; y finalmente, la producción de FeSO4 * 7 H2O a partir del hierro chancho producido de la reducción carbotérmica de los minerales concentrados del Mutún.

2. Fundamento teórico de la propuesta

2.1. Salar de Coipasa

El salar de Coipasa tiene mayor significancia como recurso estratégico para el departamento de Oruro en Bolivia. Se encuentra mayormente (99%) en territorio nacional, penetrando en menor parte la frontera con Chile del lado de la comuna de Colchane, Región de Tarapacá (1%) (Sanjines,2022). La figura siguiente, muestra una vista satelital del Salar de Coipasa.

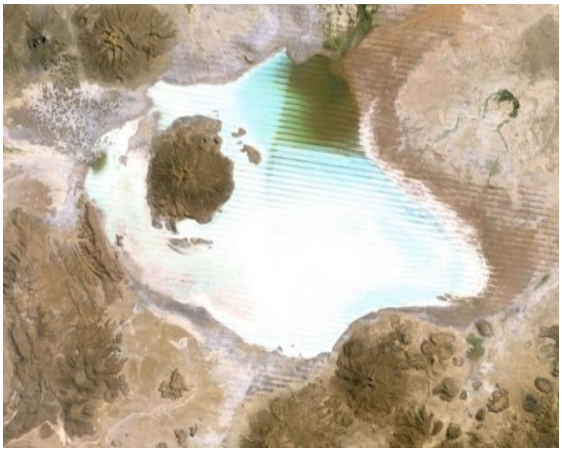


Figura 1.- Vista Satelital del Salar de Coipasa. (Google Earth - 2024)

En el marco de la Federal Direction for International Cooperation, la Universidad de Liege y la Universidad Técnica de Oruro, han efectuado una prospección del Salar de Coipasa sistemática con una malla de 2 por 2 km superpuesta a la corteza salina que ha permitido la recolección de muestras de salmueras superficiales rompiendo la costra salina con una barra de hierro hasta alcanzar el nivel de la capa de salmuera (de 5 a 20 cm por debajo de la costra salina). J. Andrew Nunnerya, et al., 2002). La figura siguiente muestra la ubicación y los puntos de muestreo:

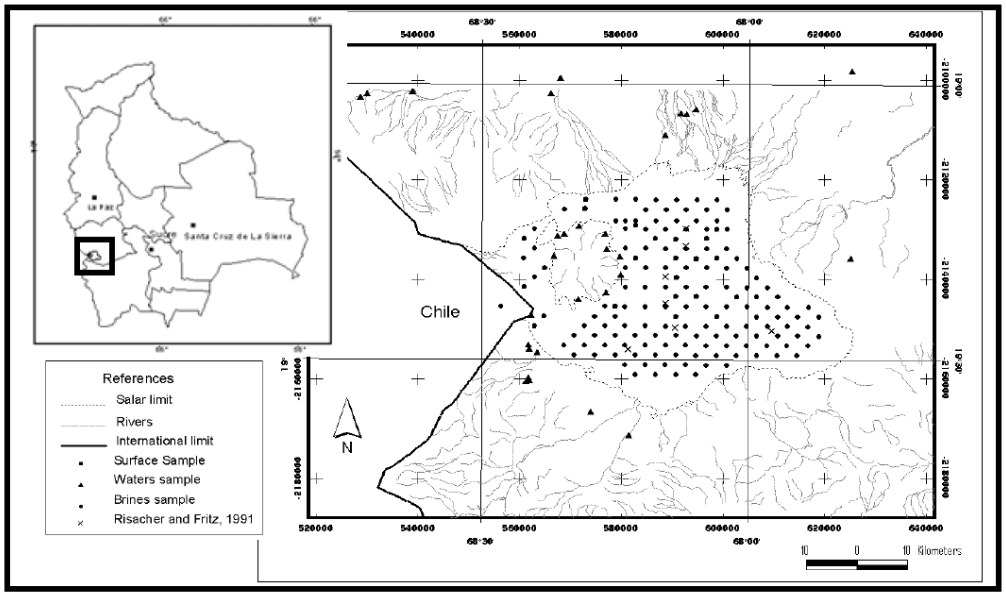


Figura 2.- Localización del Salar de Coipasa en la frontera con Chile y ubicación de las muestras en la corteza salina (V. Lebrun et al., 1997)

La tabla siguiente, muestra los resultados de los análisis de 220 muestras de salmueras del Salar de Coipasa (V. Lebrun et al., 1997; Risacher, F. & Fritz, B. (1991); Pirard, Eric (2011).

Coipasa (220 Salmueras – mg/lt) *Proyecto Coipasa 1997*

	Mg	K	Li	Ca	Na	SO_4	Cl
Mínimo	1131.3	2588.1	56.9	29.4	60162.3	1739.5	64350
Máximo	39205.6	23493.6	988	3665.1	121024.7	66706.1	204000
Media	**14494.7**	9306.1	**339.1**	**1506.8**	**99213.9**	**28193.2**	186049.2

Tabla 1.- Datos estadísticos de las concentraciones de las especies iónicas más importantes presentes en las salmueras de Coipas (V. Lebrun et al., 1997 y Risacher y Fritz, 1991)

Las curvas de isoconcentración espacial del Litio en el Salar de Coipasa se determinaron mediante un algoritmo de distancia cuadrática inversa (Figura 3).

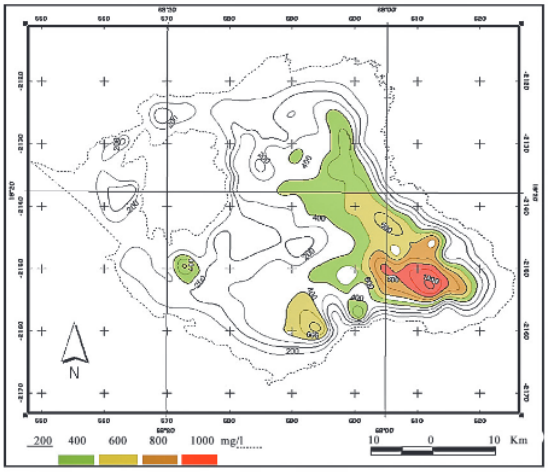


Figura 3.- Curvas de isoconcentraciones de Li en el Salar de Coipasa (V. Lebrun et al., 1997)

2.2 Yacimiento de roca fosfórica de Capinota

Los estudios de prospección y exploración geológica llevados a cabo en el territorio nacional por GEOBOL (Servicio Geológico de Bolivia) han determinado la existencia de material fosfórico en rocas de la edad precámbrica, ordovícica en emplazamientos recientes o cuaternarios. (Bellott Juan 1991).

De los depósitos reconocidos, el de Capinota ubicado en el departamento de Cochabamba, constituye el de mayor importancia. En él se han reconocido capas de fosfato de 1.60 m de espesor con tenores promedio que varían entre 12 - 25 % de P_2O_5 con una reserva que alcanza un aproximado de 3 millones de toneladas de material fosfático.

Actualmente el yacimiento de Capinota está siendo explotado de una manera rustica y obtienen roca fosfórica, la cual es un fosfato de calcio que es un fertilizante que está siendo utilizado para la producción de hortalizas en una dosificación de 250 a 500 kilos de la roca fosfórica por hectárea permitiendo regular la acides del suelo, una mayor capacidad de retención y aporte de nutrientes, resistencia frente a placas y enfermedades, crecimiento en el desarrollo de las raíces, fomento a la fructificación y mejora de la calidad del producto. (Antonio José, 2015).

2.3 Yacimiento del Mutún y producción de hierro chancho

Uno de los más grandes yacimientos de hierro en el mundo, es el del Mutún, ubicado en dentro del pantanal boliviano, con una extensión aproximada de 75 km2 de superficie y una reserva estimada de cerca de 40 mil millones de toneladas de minerales de hierro, cuya explotación permitirá la producción de hierro chancho (conocido también como hierro esponja) y acero.

El proceso consiste en la explotación de los minerales de hierro, transporte, preparación y concentración mediante procesamiento mineral, para obtener un concentrado con contenido de hierro superiores a 60% de Fe que es sometido a un proceso de reducción directa utilizando gas natural y producir el hierro chancho con rangos de composición de hasta 92% de hierro, que luego es fundido en hornos eléctricos hasta producir acero.

3. Desarrollo o metodología utilizada (3300 caracteres sin contar espacios)

3.1 Obtención de carbonato de litio a partir de salmueras del Salar del Coipasa por extracción directa

Los salares que tienden a ser más competitivos en su explotación, son aquellos que presentan una alta concentración de litio en la salmuera, bajas relaciones de magnesio/litio y sulfato/litio;

además que, en el sitio de operación se tenga una elevada tasa de evaporación y bajas precipitaciones pluviales, además de cuantificable reserva, adecuada infraestructura (electricidad y accesibilidad) y la disponibilidad de agua dulce (CEPAL -2023).

En el caso específico de las salmueras de Salar de Coipasa, las elevadas relaciones de Mg/Li y SO4/Li de las salmueras del Salar del Coipasa (42.74 y 83.14 respectivamente), hacen pensar que los procesos convencionales de extracción pueden ser técnicamente inviables y darían lugar a obtener muy bajas recuperaciones de Litio. Por tanto, se propone un flujograma para la extracción directa de Li de las salmueras de Coipasa que contempla las etapas siguientes:

- Enriquecimiento de Li por procesos de adsorción y desorción. Para la desorción se requiere agua pura procedente de la ósmosis inversa, la que debe ser calentada por energía solar.
- Eliminación de Mg+2, Ca+2 y Sulfato por nano filtración por membranas, considerando que el diámetro del radio iónico del ion Li+ es el más pequeño que el resto de los otros iones presentes.
- Enriquecimiento de la salmuera residual por osmosis inversa que permite la separación y posterior precipitación del NaCl por evaporación controlada, dejando por una parte una salmuera residual concentrada en LiCl, además de Mg+2, Ca+2 y Sulfato residuales, y por otra, agua pura requerida en el proceso de desorción e incluso para su uso por los pobladores, previa adición de sales.
- Calentamiento de la salmuera residual y adición de Na2CO3 para precipitar el Mg+2, Ca+2 y Boratos remanentes y separación por filtración.
- Recuperación del LiCO3 por precipitación de la salmuera residual a 75 °C.

El flujograma propuesto se presenta en la figura siguiente:

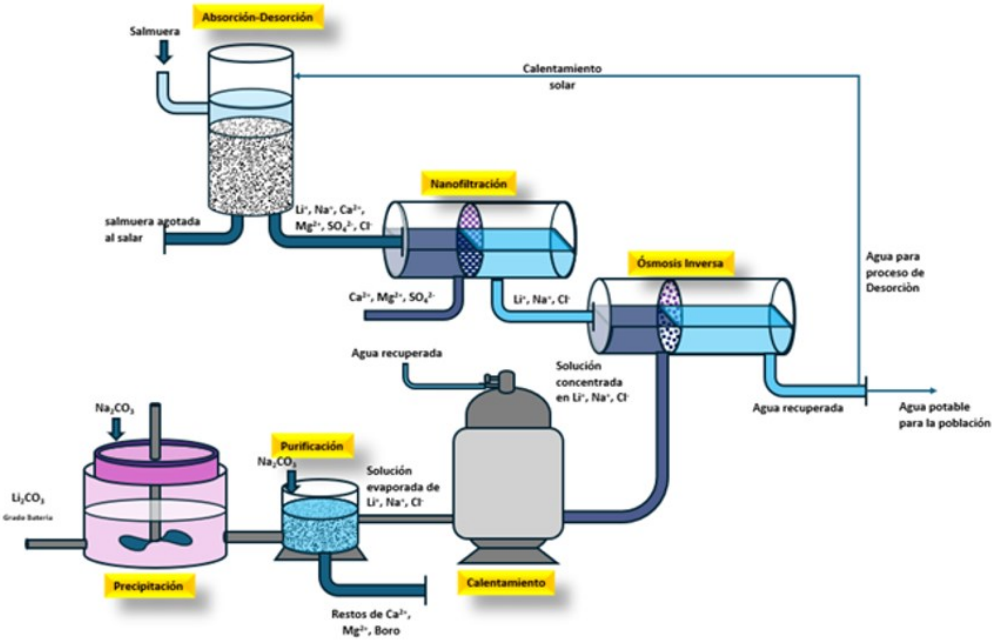


Figura 4.- Propuesta de flujograma para la extracción directa de Li de las salmueras de Coipasa (Zamora et al., 2023)

3.2 Obtención de ácido fosfórico a partir de rocas fosfóricas del yacimiento de Capinota

La obtención de ácido fosfórico se realizó mediante ataque de roca fosfórica de una muestra de Capinota con ácido sulfúrico en un reactor agitado. Este reactor se quiere que opere a 70 ºC y con una concentración de ácido del 30 % (expresado como P_2O_5). Junto con el ácido se forma sulfato de calcio dihidrato (yeso). Después se filtra la pulpa para separar el yeso del ácido fosfórico.

Finalmente, se calienta la solución y hasta alcanzar la concentración de ácido fosfórico deseada.

El flujograma de la obtención de ácido fosfórico a partir de rocas fosfóricas del yacimiento de Capinota se presenta en la figura siguiente:

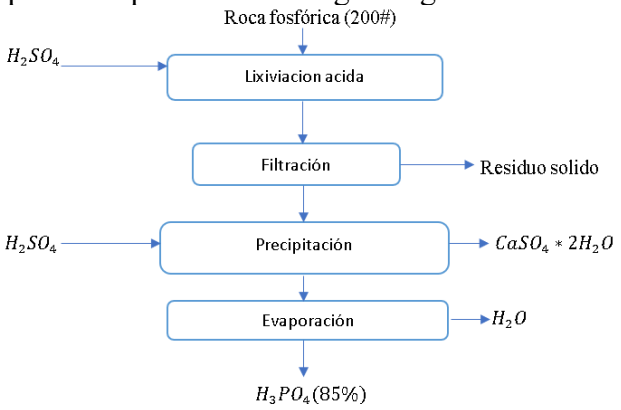


Figura 5.- Propuesta de flujograma para la producción de ácido fosfórico a partir de roca fosfórica (Zamora et al., 2023)

3.3 Obtención de sulfato de hierro heptahidratado a partir de hierro esponja del Mutún

La obtención de hierro heptahidratado a partir de una muestra de hierro esponja de una siderúrgica peruana (Aceros Arequipa), que tiene características similares a las que tendrá dicho material en el proceso a implementarse en el Mutún, ha sido sometido a un proceso de lixiviación ácida a alta temperatura con ácido sulfúrico diluido a objeto de formar sulfato ferroso acuoso en solución y liberar hidrógeno; la solución es filtrada para separar el material oxidado y los residuos metálicos presentes; y luego someter la solución filtrada a un proceso de cristalización mediante enfriamiento a objeto de que se formen los cristales puros de FeSO4 * 7 H2O.

El flujograma de la obtención de sulfato de hierro heptahidratado a partir de hierro chancho del Mutún se presenta en la figura siguiente:

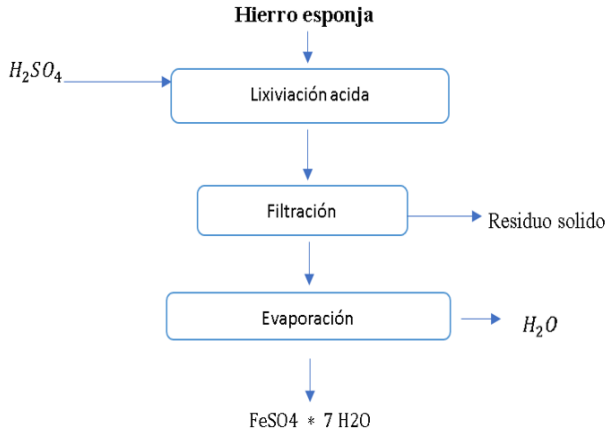


Figura 6.- Propuesta de flujograma para la producción de sulfato de hierro heptahidratado a partir de hierro chancho del Mutún

4. Resultados obtenidos (3300 caracteres sin contar espacios)

4.1 Obtención de carbonato de litio a partir de salmueras del Salar del Coipasa por extracción directa

Los resultados de los trabajos de campo en el Salar de Coipasa se resumen a continuación:

- Las relaciones de concentraciones entre Mg/Li y de SO4/Li de las salmueras de Coipasa son de 42.74 y 83.14; además, una baja concentración de Litio de 339.1 mg/L en la salmuera.
- La evaporación es menor a 1500 mm y las precipitaciones fluviales oscilan entre 100 y 200 mm.
- Las tasas de extracción de salmueras serían por encima de 140 m3/s y las extracciones por el proceso convencional estarían por debajo del 20 % por el arrastre del Li por los fenómenos de coprecipitación, adsorción y oclusión.

Por otra parte, los resultados de la obtención de LiCO3 a partir de las salmueras del Salar de Coipasa por el proceso de extracción directa propuesto, y que han sido inferidos de la experiencia práctica, se resumen a continuación:

- Con concentraciones de 339 mg/L de Li en las salmueras, las recuperaciones en el proceso de extracción directa propuesto son menores a 60%; por lo que, se hace necesario enriquecer el contenido de Li en las mismas mediante evaporación previa.
- El enriquecimiento de la salmuera hasta concentraciones de 650 mg/L de Li, permiten mejorar la recuperación de Li en el proceso de extracción directa propuesto hasta por encima de 84%.
- Los consumos de agua requeridos por el proceso propuesto están por encima de 60 - 100 m3/t LiCO3 producido.
- El calentamiento de la salmuera previa a la adsorción y de la solución pura que sale de la ósmosis inversa, incrementan notablemente la cinética tanto de adsorción como de desorción; por ende, el tiempo de extracción directa del Li.

4.2 Obtención de ácido fosfórico a partir de rocas fosfóricas del yacimiento de Capinota

4.2.1 Estudio del proceso de lixiviación de la muestra de roca fosfórica de Capinota

Los resultados de las extracciones de fósforo de las pruebas para un tiempo de una hora de lixiviación y variando diferentes parámetros, se presentan en la tabla siguiente:

N.°	% Sólidos	T °C	Granulometría [#]	%Extracción P
1	10	20	-100 # Tyler	**78.84**
2	20	20	-100 # Tyler	**76.49**
3	30	20	-100 # Tyler	**55.36**
4	40	20	-100 # Tyler	**49.67**
5	50	20	-100 # Tyler	**33.53**
6	Mejor %S	30	-100 # Tyler	**81.80**
7	Mejor %S	45	-100 # Tyler	**84.69**
8	Mejor %S	60	-100 # Tyler	**87.15**
9	Mejor %S	75	-100 # Tyler	**92.19**
10	Mejor %S	Mejor T	-150 # Tyler	**94.17**
11	Mejor %S	Mejor T	-200 # Tyler	**91.18**
12	Mejor %S	Mejor T	-270 # Tyler	**86.20**
13	Mejor %S	Mejor T	-325 # Tyler	**86.03**

Tabla N° 1.- Resumen de pruebas de variación de parámetros, en ambiente cerrado

En resumen, las mejores condiciones de lixiviación de la muestra de roca fosfórica estudiada son: 30 % solidos, Temperatura de 75℃ y tamaño de partícula de -150# Tyler, y la máxima extracción obtenida a esas condiciones es de 94.17 % de Fósforo.

4.2.2. Estudio del proceso de precipitación

Para la eliminación del Ca de la solución lixiviada, se adicionó ácido sulfúrico extra, para su precipitación en forma de yeso.

4.2.3. Estudio de concentración del ácido bórico por evaporación

Finalmente, después de la filtración, mediante una evaporación de 20 min, se alcanzó una solución concentrada de ácido fosfórico con un contenido 81.09 %, pero con un mayor tiempo de evaporación, se logra alcanzar hasta 87%.

4.3 Obtención de sulfato de hierro heptahidratado a partir de hierro chancho del Mutún

4.3.1 Lixiviación de hierro chancho de la industria siderúrgica

La lixiviación de hierro aumenta cuando hay un incremento de la concentración en (%) de H2SO4 de la solución lixiviante hasta el 30%. A partir de esta concentración, incrementos mayores del agente lixiviante, generan una disminución en la disolución del hierro.

Por otra parte, considerando una concentración de 30 % de H2SO4 en la lixiviación, se determinó que a mayores relaciones de sólido/líquido, hay una mejor lixiviación de hierro hasta alcanzar una relación de 1/6, donde se genera el pico máximo de extracción, que alcanza a 87%; una mayor relación S/L, genera una disminución de la extracción de hierro.

Finalmente, a las mejores condiciones de agente lixiviante y relación de S/L, son requeridos 180 min para alcanzar disoluciones del 100% de Fe.

4.3.2 Evaporación-cristalización de sulfato de hierro heptahidratado

Al elevar el volumen de solución evaporada, se inicia la cristalización del FeSO4 * 7H2O. Dado a que la solución está libre de contaminantes, la calidad del producto obtenido es muy buena.

5. Discusión de resultados

5.1 Obtención de carbonato de litio a partir de salmueras del Salar del Coipasa por extracción directa

- La etapa de adsorción – desorción no es totalmente selectiva como se esperaba. Iones Ca+2, Mg+2, SO4-2, Cl- y Na+ se encuentran todavía presentes en el efluente de descarga.
- En la etapa de nanofiltración, con membrana de 0,01 μm y 1,5 MPa, es posible descartar la mayor parte de las especies iónicas de Ca+2, Mg+2, SO4-2; por el contrario, Cl- y Na+ se encuentran todavía presentes en el efluente de descarga.
- En la etapa de ósmosis inversa, con membrana de 0,0001 μm y 8 MPa, las especies iónicas de Li+, Cl- y Na+ se encuentran todavía presentes en el efluente de descarga; mientras que, el eluado es de H2O de alta pureza que puede ser usado por una parte en la etapa de desorción, y por otra, para suministrar agua potable a la población.
- El efluente de descarte de la ósmosis inversa debe ser calentado a objeto de permitir la eliminación del NaCl; luego pasar por una etapa de encalado para la eliminación de los restos de Mg+2 y Ca+2.
- Finalmente, el efluente de descarga del proceso de encalado señalado, es sometido a la precipitación con la adición de Na2CO3 a una temperatura de 70 grados centígrados, para obtener el LiCO3 de alta pureza.
- El CAPEX estimado del proceso propuesto está por el orden de 1.6 millones de dólares por tonelada de LiCO3 producido y un OPEX de 7800 $us/ tonelada de LiCO3.
- Es posible reinyectar el efluente de la salmuera del proceso de adsorción en el salar hasta en un 98%, evitando así la caída crítica de nivel freático en la zona de explotación de salmueras.

5.2 Obtención de ácido fosfórico a partir de rocas fosfóricas del yacimiento de Capinota

- La muestra de roca fosfórica de Capinota presenta las siguientes características $d_{90} = 770.22\mu m$, humedad 1.07% y está constituido por 42.37 % P2O5, 29.73 % CaO, 5.49 % MgO y 12.38 % SiO2.
- Los minerales más abundantes son la apatita, oxido de magnesio, oxido de calcio y dióxido según el análisis mineralógico. Esta mena de fosforo es de origen ígneo por la presencia de apatita.
- Las mejores condiciones encontradas para obtener hasta un 94.17 % de extracción de Fósforo en la etapa para un tiempo de lixiviación de una hora son 10 % solidos, Temperatura de 75℃ y tamaño de partícula de -150# Tyler.
- La adición de ácido sulfúrico permitió eliminar el Ca+2 disuelto en forma de yeso.

- La concentración de ácido fosfórico obtenido final tiene una pureza de hasta 85%.
- El análisis de factibilidad económica con los indicadores Valor actual Neto y Tasa interna de retorno dieron como resultado 99430,93 $us y 26,04 % respectivamente.

5.3. Obtención de sulfato de hierro heptahidratado a partir de hierro chancho del Mutún

- Las granallado del hierro chancho es necesario para obtener una mayor superficie específica.
- La cinética de la lixiviación de las granallas de hierro chancho en soluciones de 30% de H2SO4 es favorida a 70 ºC, y en tiempos de 180 minutos se obtienen extracciones del 100%.
- El enfriamiento lento de la solución lixiviada, permite la formación de los cristales de FeSO4 * 7H2O.

5.4 Aplicabilidad o impacto en caso de concretarse la propuesta

Los impactos logrados con el estudio desarrollado se sintetizan en:

I. Ámbito de aplicación industrial

Se ha generado una investigación "pionera, única e innovadora" para el ámbito del desarrollo tecnológico para la fabricación de precursores catódicos de baterías LiFePO4 con materias primas bolivianas para la obtención de precursores catódicos de baterías LiFePO4.
A partir de la implementación de la propuesta, se espera que se pueda generar un polo de desarrollo tecnológico regional y nacional que permita:

- Impulsar la cadena de valor del Litio en Bolivia, pasando de una simple extracción a la fabricación de materiales de alto valor agregado.
- Fomentar la transferencia tecnológica y el desarrollo de capacidades locales de procesos industriales.
- Fortalecer la infraestructura industrial nacional.

a) Impactos económicos.

- Introducir a Bolivia en el mercado global de tecnología energética
- Generar nuevos empleos directos e indirectos.
- Atraer nuevas inversiones y cooperación tecnológica internacional.
- Generar valor agregado nacional, incrementando los ingresos por exportaciones.

b) Impactos ambientales y sociales

- Mostrar la explotación sostenible de los recursos primarios del Litio, Fósforo y Hierro a partir de materia primas nacionales.
- Posesionar a Bolivia como actor estratégico en la transición energética global y convertir a Oruro en un polo de desarrollo tecnológico para mejorar la calidad de vida de los pobladores.

6. Conclusiones

Las conclusiones de los resultados de la obtención de LiCO3 a partir de las salmueras del Salar de Coipasa por el proceso de extracción directa mediante el proceso de adsorción – desorción, membranas y ósmosis inversa, y que han sido inferidos de la experiencia práctica, son las siguientes:

- En la etapa de adsorción – desorción las recuperaciones de Li partiendo de una salmuera con 339 mg/L no superan el 60%.
- El enriquecimiento de la salmuera mediante evaporación controlada, hasta concentraciones de 650 mg/L de Li, mejora la extracción del proceso hasta un 84%, con consumos de agua de hasta 100 m3/t LiCO3 producido.
- La etapa de adsorción con salmueras precalentadas hasta 40 °C y del agua de desorción procedente de la ósmosis inversa hasta 75 °C, permiten alcanzar extracciones máximas del proceso hasta un 84% de Litio.

Las conclusiones de los resultados de la obtención de ácido fosfórico a partir de rocas fosfóricas del yacimiento de Capinota son las siguientes:

- ✓ Las mejores condiciones de la lixiviación de la roca fosfórica del yacimiento de Capinota son: $t = 1\,hr$, $\%Solidos = 30$, $T = 75℃$, Granulometría$= 150\,\#$. La máxima extracción obtenida a esas condiciones es de 94.17 % de Fósforo
- ✓ La etapa de evaporación se efectúa a una T Evaporación $de\,85℃$. La cantidad de energía requerirá es obtenida de 57.58 m^3/hr de combustible metano.
- ✓ El análisis de factibilidad económica arroja criterios favorables debido a que el VNA es de 77422.60 $us y la tasa interna de retorno es de 30.11%, mayor a la TMAR de 7%. Se concluye que es viable realizar el proyecto de obtención de ácido fosfórico a partir de la roca fosfórica de Capinota.

Las conclusiones de los resultados obtención de sulfato de hierro heptahidratado a partir de hierro chancho del Mutún son las siguientes:

- ✓ Las granallado del hierro chancho es necesario para obtener una superficie específica más grande, favoreciendo su disolución en la etapa de lixiviación.
- ✓ La cinética de la lixiviación a 30% de H2SO4 es favorida a 70 ºC, y en tiempos de 180 minutos se obtienen extracciones del 100% de hierro.
- ✓ El enfriamiento lento de la solución lixiviada, permite la formación de los cristales de FeSO4 * 7H2O.

Referencias bibliográficas

PARTE I: Obtención de carbonato de litio a partir de salmueras del Salar del Coipasa por extracción directa

Sanjinez Zeballos, Rosendo (2022). "El oro blanco de los Andes"

Lebrun, P. Pacosillo, J. Gutierrez, F. Caceres, E. Pool & E. Pirard. (2002). "Geochemistry of bitter brines in the Salar de Coipasa - Bolivia.".

J. Andrew Nunnerya, Sherilyn C. Fritz, Paul A. Bakera, (2018). Wout Salenbiena Lake-level variability in Salar de Coipasa, Bolivia during the past ~40,000 yr. Quaternary Research.

Risacher, F. & Fritz, B. (1991). Quaternary geochemical evolution of the salars of Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia. Chemical Geology 90, 211-231.

Pirard, Eric (2011). "Les ressources du sous-sol bolivien: mirage ou véritable "El Dorado". Université de Liége.

División de Recursos Naturales de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2023).

Zamora E, Gerardo, Gutierrez, Jorge, & Conde, Omar. (2024). Bases técnicas para el diseño conceptual sustentable para la producción de carbonato de litio de las salmueras del salar de Coipasa. Revista de Medio Ambiente y Mineria, 9(1), 61-77. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522024000100005&lng=es&tlng=es

Parte II: Obtención de ácido fosfórico a partir de rocas fosfóricas del yacimiento de Capinota

Antonio Lora José A. (2015), Métodos físicos y químicos para mejorar la concentración del contenido de P_2O_5 de la roca fosfórica proveniente de la provincia de Capinota.

Bellott Juan (1991). Eficiencia de la roca fosfórica en suelos de Bolivia. Universidad Mayor de San Simón. Agroecología de Cochabamba-Bolivia.

Gilmour Rodney (2015), Phosphoric Acid, Purification, Uses, Technology and Economics, CRC Pres London New York.

Hernandez Anavel (2019). Diseño de una planta química para la producción de ácido fosfórico a partir de la fosforita cubana. Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central ´´Marta Abreu´´ de las villas.

Zamora E, Gerardo, & Ninavia C, Riorvi Brandon. (2024). Estudio técnico y económico de la obtención de ácido fosfórico a partir de roca fosfórica del yacimiento de Capinota - Cochabamba -Bolivia. Revista de Medio Ambiente y Mineria, 9(2), 37-46. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522024000200005&lng=es&tlng=es.

Parte III: Obte nción de sulfato de hierro heptahidratado a partir de hierro chancho del Mutún
Grand view reserch (2023). Lithium Iron Phosphate (LiFePO4) Battery Size, Share & Trends Analysis Report By End-use, By Application, By Region And Segment Forecasts 2024-2030. https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lithium-iron-phosphate-lifepo4-material-battery-market
Grupo Pytes. (2025). Aplicaciones de as baterías de fosfato de hierro y litio. https://es.pytesusa.com/industry-news/The-Applications-of-Lithium-Iron-Phosphate-Batteries.html
International iron metallics association (2025). Pig Iron. https://www.metallics.org/pig-iron.html
https://www.marketresearchfuture.com/reports/ferrous-sulfate-market-22721
Sharipov, M. (2024). https://doi.org/10.1051/bioconf/202413006013
Verified market research. (2024). Global Ferrous Sulfate Market Size By Product, By Form, By End-User Industry, By Geographic Scope And Forecast. https://www.verifiedmarketresearch.com/product/ferrous-sulfate-market/

Artículo recibido en: 02.04.2025
Artículo aceptado: 08.05.2025

PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN MINAS SUBTERRÁNEAS

Dr. Felipe Calizaya
Profesor Emérito, Universidad de Utah
Salt Lake City, Utah USA
Felipe.calizaya@utah.edu

RESUMEN

Los incendios y explosiones son los peligros de mayor riesgo en minas subterráneas. Ambos, si ocurren, tienen costos elevados en daños al personal, gastos incurridos durante la mitigación, y finalmente, pérdidas de producción y equipos. Los incendios consumen el oxígeno del aire y producen gases tóxicos, calor y humo. Durante un incendio, los productos de combustión pueden ser esparcidos con la misma rapidez de distribución del oxígeno que nos sustenta la vida. La prevención de incendios es la herramienta más practica para controlar incendios. Un programa de prevención requiere de la participación del de todos los trabajadores, supervisores y empleados. Es responsabilidad del gerente proveer a los trabajadores un manual completo de prevención y control de incendios especificando las normas y regulaciones, deberes y obligaciones de los trabajadores, y los procedimientos para facilitar una evacuación ordenada del personal de la mina. Es responsabilidad de cada trabajador entender los procedimientos de operación de equipos, realizar inspecciones por condiciones y practicas inseguras, reportar los defectos a los supervisores, y cuidar por la salud y seguridad de otros.

El presente artículo presenta un resumen de los requerimientos básicos para identificar los peligros asociados con incendios y explosiones, determinar y evaluar los riesgos, y establecer medidas correctivas necesarias para reducir o controlar los riesgos.

Palabras clave: Incendios y explosiones, prevención, entrenamiento, y control de riesgos.