



PERSPECTIVA

Lixiviación *in situ*: Una mirada hacia
el futuro de la lixiviación en pilas

DICIEMBRE, 2023

APLICACIÓN
DE LIS EN
MINERÍA

LIS IN SITU

FUTURO DEL
MÉTODO DE
LIS

ÍNDICE

Sobre GEM.....	3
Editorial.....	4
Introducción.....	5
Lixiviación <i>In Situ</i>	6
Análisis comparativo de la LIS.....	15
Futuro del Método de LIS	17
Bibliografía.....	18
Contacto.....	19
Clientes.....	20



SOBRE GEM

QUIÉNES SOMOS

Somos una empresa de Ingeniería Industrial cuyo foco es apoyar a la industria minera en temas de gestión y economía. Contamos con seis áreas de negocios, las cuales abarcan toda nuestra experiencia, a su vez que desarrollamos las más avanzadas herramientas aplicadas en la minería. Con más de 14 años de experiencia y más de 400 proyectos exitosamente implementados a nivel mundial.

MISIÓN

Somos una empresa proveedora de productos y servicios de ingeniería industrial de excelencia para la industria minera mundial. Buscamos pavimentar el camino para la minería del futuro, a la vez que maximizamos el valor del negocio de nuestros clientes a través de mejorar su capacidad para tomar decisiones estratégicas, por medio de servicios innovadores entregados de manera efectiva por un equipo profesional altamente calificado.



Contamos con 6 áreas de negocios:



EDITORIAL

Desde sus inicios, la industria minera, ha estado en permanente búsqueda de procesos y tecnologías más eficientes y sostenibles en el tiempo. Esto ha llevado al desarrollo de técnicas innovadoras que desafían las prácticas tradicionales. La lixiviación *in situ* se destaca como una revolución silenciosa, con el potencial de transformar la manera en que se extraen los minerales.

La lixiviación *in situ*, en esencia, implica la disolución de minerales directamente en su ubicación natural, sin necesidad de extraer grandes cantidades de mineral para su procesamiento. Este enfoque contrasta fuertemente con los métodos convencionales, que implican la extracción de millones de toneladas de mineral para su transporte en camiones, ferrocarril, tubería o correas a plantas de procesamiento a distancias considerables desde la mina.

Uno de los beneficios más destacados de la lixiviación *in situ* es su menor impacto ambiental. Al evitar la excavación extensiva, se reducen drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el transporte de materiales. Además, el impacto en el suelo se minimiza, preservando los ecosistemas locales y evitando la degradación del paisaje. Esta técnica se alinea estrechamente con los requerimientos de sostenibilidad y de responsabilidad ambiental que son cada vez más cruciales en la minería moderna.

Otro aspecto clave es la eficiencia operativa. La lixiviación *in situ* reduce significativamente los costos asociados con la tronadura, transporte, trituración y apilamiento de grandes cantidades de material.

Sin embargo, no se puede pasar por alto los desafíos y preocupaciones asociados con la lixiviación *in situ*.



Juan Esteban Fuentes
Head Business Development

El manejo del agua y de los productos químicos utilizados en el proceso es crítico para evitar la contaminación del suelo y del agua subterránea. La transparencia y la participación comunitaria son esenciales para abordar las inquietudes locales y garantizar que las operaciones sean socialmente responsables.

En resumen, la lixiviación *in situ* representa un paso audaz hacia una minería más sostenible y eficiente. Al abrazar esta técnica, la industria minera puede avanzar hacia un futuro donde la extracción de minerales sea menos invasiva y más armoniosa con el entorno natural. Sin duda, estamos presenciando una transformación en la forma en que extraemos los minerales de la tierra, y la lixiviación *in situ* podría ser una alternativa futura que lidere este cambio hacia una minería más eficiente y sostenible.

INTRODUCCIÓN

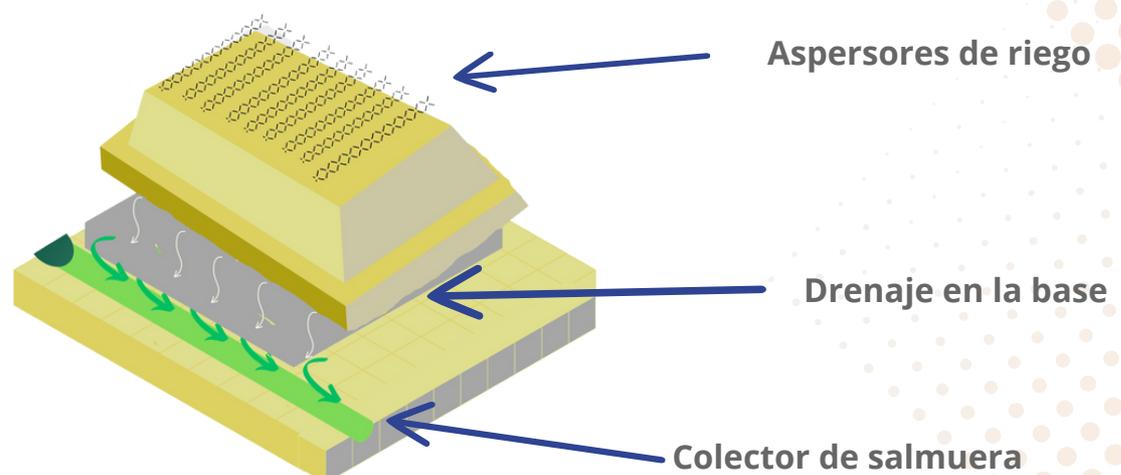
La lixiviación en pilas es una técnica ampliamente utilizada en minería para extraer diferentes tipos de minerales como cobre, oro, uranio, níquel, yodo, nitratos, entre otros. Este método consiste en la extracción del mineral mediante perforación y tronadura, para luego acumularlo sobre pilas a través de camiones. Las pilas formadas se riegan en la superficie con un agente lixivante para la disolución de los compuestos de interés, la solución lixiviada se drena al inferior de la pila y se transporta a través de canales a la planta para la recuperación de los minerales (ver **Figura 1**).

La tendencia a la disminución de las leyes en minería ha llevado a un aumento significativo en los costos de este método, dado que para mantener la producción – dada la caída de leyes del mineral – se requiere un aumento en la cantidad de mineral extraído y procesado, lo que a su vez conlleva un aumento en el consumo de energía y agua, lo que implica una mayor huella de carbono e hídrica, generación de residuos, costos de almacenamiento y riesgos asociados (Karami, 2022).

Adicionalmente, muchos depósitos de oro y cobre que se encuentran a gran profundidad o que contienen minerales de baja ley no son rentables de explotar mediante lixiviación en pilas debido a los altos costos asociados a la perforación, tronadura y transporte del mineral para su extracción.

En los últimos años han aumentado las exigencias ambientales y la preocupación por el desarrollo de una minería sostenible. El método de lixiviación en pilas no parece ser sostenible en el largo plazo por su tendencia al aumento significativo de los costos y su alto consumo energético e hídrico, además de considerarse un método invasivo en términos del uso de suelo y generación de residuos.

FIGURA 1: LIXIVIACIÓN EN PILAS



Fuente: GEM en base a SQM (2023)

LIXIVIACIÓN *IN SITU* (LIS)

La LIS corresponde a un método de disolución y extracción de minerales que se lleva a cabo directamente en el yacimiento en donde se encuentran originalmente, sin la necesidad de extraer y transportar el mineral a la superficie.

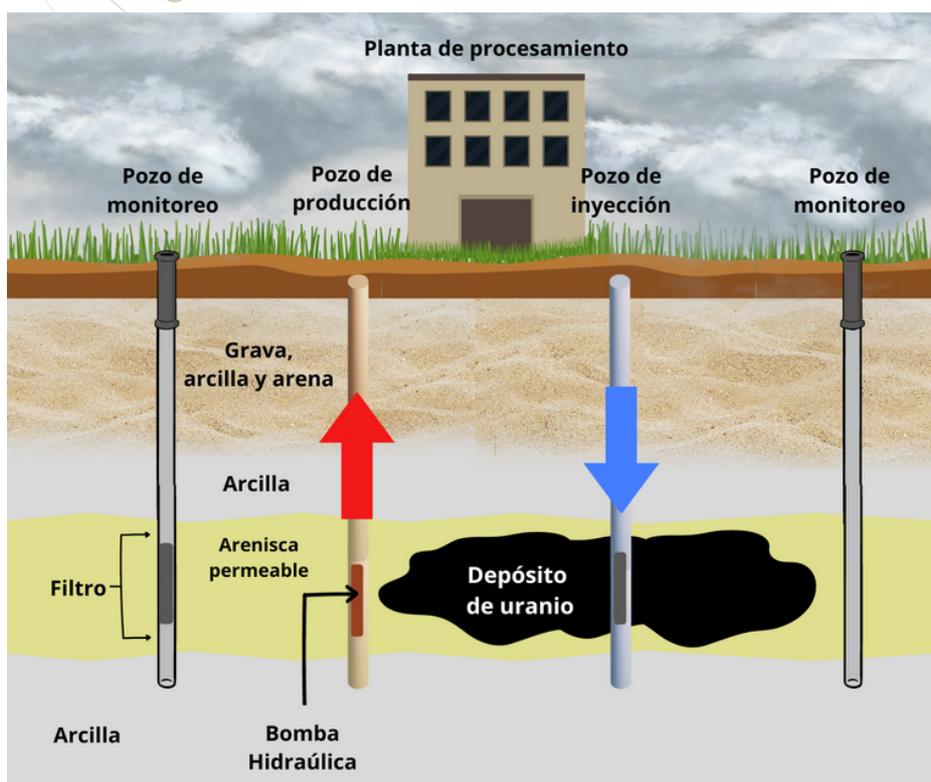
La solución lixivante se bombea al interior del depósito mediante pozos de inyección y luego, se extrae la solución lixiviada a través de pozos de recuperación. Además, se tienen pozos de monitoreo para controlar la operación y prevenir la contaminación del suelo y las aguas subterráneas, ya que muchas veces la solución lixivante corresponde a reactivos químicos. Finalmente, la solución lixiviada se envía a planta para la recuperación del metal.

El depósito ideal para aplicar este método debería tener una alta permeabilidad, es decir, una alta capacidad para transmitir fluidos, en el cuerpo de minerales en el que se realiza la lixiviación para facilitar el flujo de la solución inyectada y la lixiviación de los minerales.

Adicionalmente, los estratos del subsuelo que delimitan el cuerpo de minerales deberían ser impermeables, especialmente el estrato inferior, ya que sirven como barrera para aislar el fluido lixivante y evitar la contaminación de acuíferos, además de la pérdida de eficiencia en la recuperación.

Este es el caso del depósito de uranio y por esta razón la LIS es ampliamente utilizada para su extracción, en la **Figura 2** se puede observar el sistema de lixiviación y las características de este yacimiento.

FIGURA 2: LIXIVIACIÓN *IN SITU* EN DEPÓSITO DE URANIO



Fuente: GEM en base a López 2021

Aplicaciones de LIS en minería

La LIS se ha aplicado en depósitos de uranio en Estados Unidos utilizando sistemas de lixiviación alcalina y en la Unión Soviética mediante sistemas de lixiviación ácida. El método más común corresponde a la lixiviación ácida y también se utiliza en las minas de uranio en Australia. Las recuperaciones en uranio mediante LIS varían entre 60% y 90% dependiendo de la geología y lixivante utilizado (Karami, 2022).

Se han implementado varios proyectos industriales de LIS de cobre en Estados Unidos. Sin embargo, solo uno de estos se estableció a escala comercial en San Manuel. Actualmente, Excelsior Mining está desarrollando el **“Proyecto de Cobre Gunnison” en el sureste de Arizona.**

Existen pocas aplicaciones de LIS a escala comercial para cobre, oro y níquel, principalmente porque estos minerales generalmente se encuentran en rocas compactas e impermeables que dificultan el acceso de lixivante al mineral y limitan el contacto entre la solución lixivante y el mineral (Karami, 2022).

Por lo tanto, se tienen recuperaciones más bajas y mayores tiempos de lixiviación en comparación con la lixiviación convencional, lo que puede provocar que este tipo de minería no sea rentable. Sin embargo, avances recientes en investigaciones relacionadas con técnicas para aumentar la permeabilidad del medio poroso y la velocidad de lixiviación posicionan a la LIS como una alternativa prometedora a largo plazo para la extracción de cobre, oro, níquel y sales.



Beneficios y limitantes del método de LIS

Como se mencionó anteriormente, en un contexto donde las limitaciones de recursos y la conciencia ambiental adquieren cada vez mayor relevancia y preocupación, tanto en la industria minera como en la sociedad en general, la LIS ha despertado un notable interés.

Esta tecnología se presenta como una solución innovadora para potenciar la rentabilidad y sostenibilidad de la industria minera, y se prevé que su desarrollo y adopción continúe en aumento debido a sus numerosos beneficios, en contraste con la lixiviación de pilas convencional. En el diagrama se presentan los principales beneficios.

REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA

Se tendría un menor consumo de agua debido a una menor tasa de evaporación del agente lixivante por su acción subterránea, la disminución de formación de caminos de flujo debido a una menor fractura de poros, y una mayor difusión del agente lixivante debido a la pluma de propagación inyectada por pozos. Esto se traduce en la reducción de la huella hídrica y de los gastos en su consumo

RECUPERACIÓN DE MINERALES EN YACIMIENTOS NO RENTABLES CON LIXIVIACIÓN CONVENCIONAL

Permite la extracción de minerales en yacimientos de baja ley, de tamaño pequeño y/o de gran profundidad, ahorrando los altos costos de excavación y ampliando considerablemente las oportunidades de aprovechamiento de recursos valiosos

REDUCCIÓN DE COSTOS EN MANO DE OBRA Y CONDICIONES DE TRABAJO MÁS SEGURAS

Se requiere de una menor cantidad de operarios, ya que el proceso de lixiviación subterránea se basa principalmente en el funcionamiento de los pozos de inyección y recuperación. Como resultado, las condiciones de trabajo son considerablemente más seguras al no formar pilas que puedan representar riesgos de accidentes o derrumbes debido a su altura y exposición superficial

REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN VISUAL, EMISIONES DE CO2 Y MAYOR OPTIMIZACIÓN DE ESPACIO

La LIS prescinde de la necesidad de formar pilas y botaderos en la superficie, lo que implica la eliminación de los procesos de tronadura, transporte y apilamiento, y, por lo tanto, una significativa reducción de las emisiones de CO2 que se generan durante los procesos mencionados

REDUCCIÓN DE COSTOS DE PREPARACIÓN Y DISPOSICIÓN DEL MINERAL

Al no requerir del uso de pilas para lixiviar el mineral, no se tienen los costos asociados a tronadura, transporte y apilamiento del material

BENEFICIOS LIXIVIACIÓN IN SITU





COSTOS DE LIXIVIACIÓN

La LIS incluye costos asociados a las bombas y pozos de inyección y recuperación, lo que podría involucrar un alto consumo de energía. Mientras que en las pilas la lixiviación ocurre por percolación, por lo que el principal costo está asociado al sistema de riego superficial

LIMITANTES EN SU APLICABILIDAD SEGÚN LAS CONDICIONES HIDRGEOLÓGICAS DEL DEPÓSITO

Para que la LIS sea factible, es necesario contar con una considerable conductividad hidráulica en el cuerpo de minerales de interés y una baja permeabilidad en los estratos adyacentes, especialmente en el inferior al depósito

POSIBLE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y DISMINUCIÓN DE LA RECUPERACIÓN

La ausencia de impermeabilidad en los estratos que limitan el cuerpo de minerales puede propiciar la filtración de solución lixiviante, lo que puede comprometer la calidad del agua subterránea y afectar negativamente en el rendimiento de la recuperación. Por esta razón, es importante contar con pozos de monitoreo al interior del depósito

BAJA VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN Y NIVEL DE RECUPERACIÓN EN COMPARACIÓN CON EL OBTENIDO POR MÉTODOS DE LIXIVIACIÓN CONVENCIONAL

La lixiviación en pilas generalmente permite una mayor velocidad de lixiviación producto de una mayor permeabilidad y contacto entre el agente lixivante y el mineral gracias a la previa trituración del material en el proceso de tronadura. En el mismo período de tiempo, esto se traduce en una mayor recuperación del mineral en comparación con la LIS

2

3

4

LIMITANTES LIXIVIACIÓN IN SITU

1



Sin embargo, es importante tener en cuenta que la tecnología no está exenta de limitaciones que deben considerarse y/o abordarse, las cuales se detallan en el diagrama.

Reconocer estas limitaciones es fundamental para analizar la efectividad de aplicar el método de LIS según el mineral que se desea extraer y el depósito en el que se encuentra, dado que la solución lixiviante requerida y las características hidrogeológicas del medio dependen de estos factores.

Métodos complementarios a la LIS para depósitos de baja permeabilidad

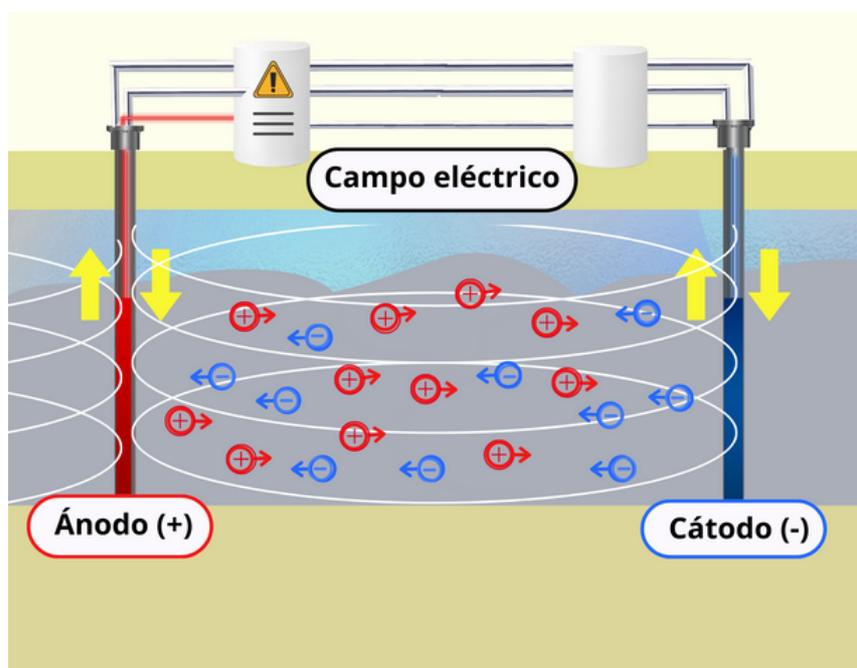
Una de las principales limitantes del método de LIS es que podría no ser eficiente en depósitos de baja permeabilidad, algo común en el caso de oro y cobre. Sin embargo, para aumentar la tasa de transferencia de masa o velocidad en que se mueve el fluido de un punto a otro en este tipo de depósitos se podrían utilizar métodos modernos tales como la promoción de transferencia de masa electrocinética, ultrasónica, mediante pulsos de solución o fracturación hidráulica.

En primer lugar, el método de transferencia electrocinética consiste en inducir la migración de iones mediante la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico. Se instalan dos electrodos en el interior del depósito de carga opuesta (un cátodo y un ánodo), generando un campo eléctrico entre ellos que promueve el movimiento de los iones contenidos en los minerales hacia el electrodo de carga opuesta (ver **Figura 3**).

Esta técnica permite mejorar la movilidad y el transporte de los iones metálicos a través del medio poroso, facilitando así su recuperación.

Por ejemplo, en experimentos realizados por Voinitchi et al. (2008) se encontró que la tasa de extracción únicamente por difusión fue de 20% aproximadamente, mientras que utilizando el método de transporte electrocinético fue casi 74%. Una de las limitantes de aplicar esta técnica es que el consumo de energía representa aproximadamente el 25% del costo operativo (Karami, 2022). Sin embargo, los avances recientes en energía renovable podrían compensar este consumo.

FIGURA 3: PROMOCIÓN DE TRANSFERENCIA DE MASA ELECTROKINÉTICA



Fuente: GEM en base a World Energy Trade (2021)

El acero inoxidable puede ser un material de electrodo prometedor debido a su alta resistencia y bajo costo (Karami, 2022). Adicionalmente, es importante considerar que se debe realizar una investigación significativa para comprender los mecanismos de este método en el entorno y su efecto en diferentes parámetros de transferencia de masa en la LIS.

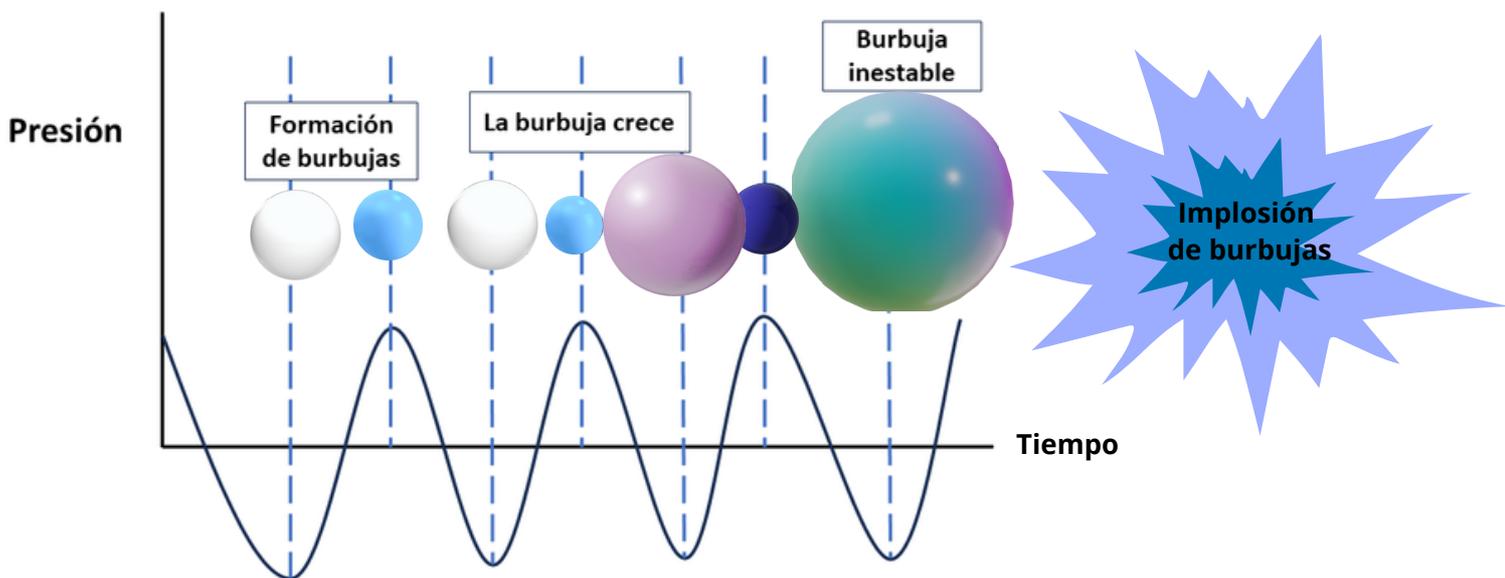
En segundo lugar, el método de transferencia mediante ultrasonidos consiste en propagar ondas ultrasónicas en el medio con el objetivo de generar variaciones intensas de presión y aumentos de temperatura. Por un lado, las diferencias de presión aumentan la penetración de la solución de lixiviación en el medio poroso y promueven el transporte de iones entre sólido y líquido.

Por otro lado, el incremento de temperatura genera un aumento de la solubilidad de las sustancias en la solución de lixiviación y una mayor difusividad de los compuestos a través del medio.

Estos cambios de temperatura y presión producen un colapso de las cavidades en el líquido denominadas burbujas, lo que genera calentamiento, aumento de la velocidad de agitación y activación de procesos químicos, mejorando la transferencia de masa en el medio poroso (ver **Figura 4**).



FIGURA 4: FOMENTO DE LA TRANSFERENCIA DE MASA MEDIANTE ULTRASONIDOS



Fuente: GEM elaboración propia

Se ha demostrado experimentalmente que el método ultrasónico permite aumentar la velocidad de las reacciones químicas y de lixiviación del cobre y otros metales. También contribuye a la reducción del tamaño

de partículas y, por ende, permite aumentar la recuperación y disminuir el tiempo de lixiviación.

Es fundamental seleccionar una potencia y frecuencia adecuada para aumentar la eficiencia del método. Si bien se han estudiado muchos procesos de extracción con ultrasonidos, su aplicación en LIS sólo se ha investigado a escala de laboratorio.

Las limitaciones para su implementación a escala industrial incluyen el diseño del transductor, efectos de calentamiento y ruido, y su alto consumo energético. Para ahorrar energía y lograr un proceso más económico se podría aplicar este método en forma pulsada (unas pocas horas al día) en lugar de continua (Karami, 2022).

La combinación de los métodos de transferencia de masa electrocinética y mediante ultrasonidos podría ser efectiva y aumentar aún más la recuperación en la LIS. La aplicación conjunta de estos métodos se ha experimentado en la remoción de contaminantes del subsuelo, alcanzando una tasa de remoción de 90% aproximadamente (Karami, 2022). Sin embargo, es importante considerar los costos de instalación de los equipos y el alto consumo energético de ambos métodos.

En tercer lugar, el método de transferencia de masa mediante pulsos de solución consiste en bombear el líquido hacia el sólido en forma intermitente en lugar de continua, con el fin de generar una transferencia de masa lenta desde los poros sin salida hacia los poros bien conectados o zonas permeables.

En la **Figura 5** se puede observar la diferencia entre estos dos tipos de poros. Este método se ha aplicado principalmente en la descontaminación de aguas subterráneas. El sistema debe bombear cuando la concentración de contaminantes en los poros bien conectados es alta.

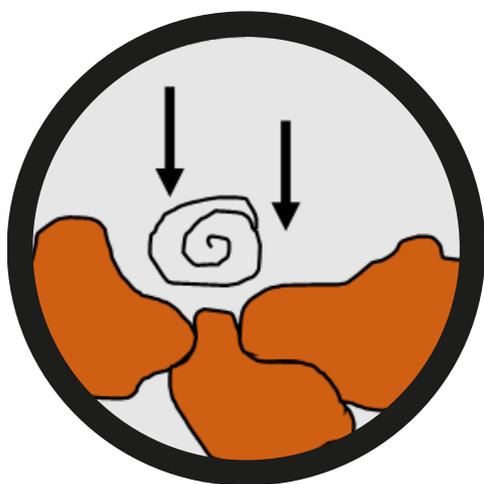
Una vez que esta concentración ha disminuido significativamente, la bomba debe apagarse. El gradiente de concentración impulsa los contaminantes desde los poros sin salida hacia los poros bien conectados, aumentando nuevamente la concentración en estas zonas. De esta forma, solo se elimina agua que contiene un alto nivel de contaminantes en la zona permeable.

El tiempo total de bombeo y el volumen total de agua extraída puede disminuir utilizando este método, lo que se traduce en una reducción de los altos costos de bombear agua a través de pozos de inyección.

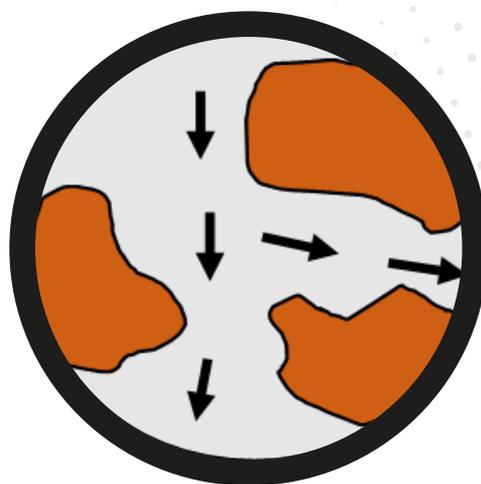




FIGURA 5: PROMOCIÓN DE TRANSFERENCIA DE MASA MEDIANTE PULSOS DE SOLUCIÓN



Poro mal conectado



Poro bien conectado

Fuente: GEM elaboración propia

Finalmente, el método de fracturación hidráulica o *fracking*, utilizado principalmente en la extracción petrolera, consiste en inyectar una mezcla de agua, arena y aditivos químicos a alta presión en un pozo de petróleo para crear fracturas en la roca subterránea y liberar los hidrocarburos atrapados en ella. Una vez que se elimina la presión hidráulica del pozo, las fracturas se mantienen abiertas gracias al fluido inyectado, lo que facilita la extracción de petróleo y gas del interior (ver **Figura 6**).

Tanto las fracturas naturales como las provocadas artificialmente pueden ampliarse mediante *fracking*.

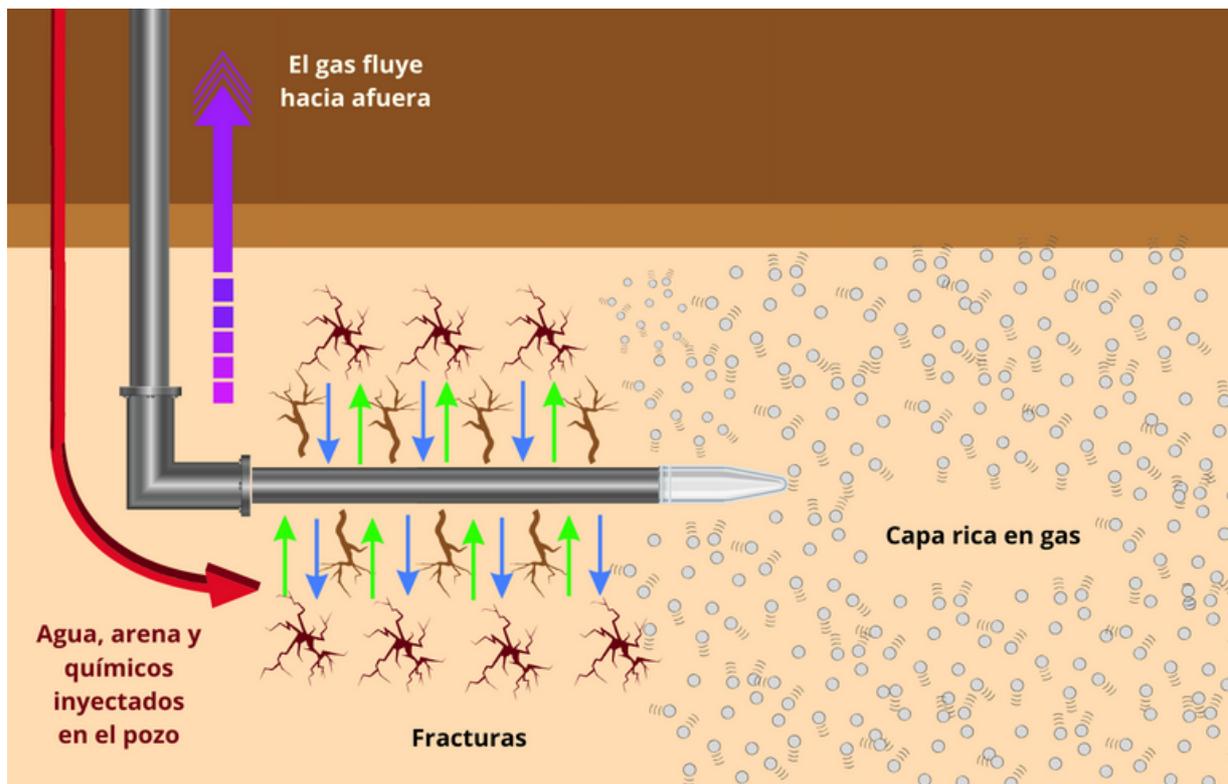
Otro punto a considerar es que las aguas residuales de este proceso pueden filtrarse a las fuentes de agua circundantes y contaminar el agua potable, para evitar este riesgo se podría inyectar una mezcla sin agentes químicos. Cabe destacar que algunos estudios indican que esta técnica podría influir potencialmente en la generación de sismos.

Este método permite aumentar la velocidad de recuperación incrementando la permeabilidad del depósito. Una de las limitantes de este proceso corresponde a las emisiones de metano generadas que pueden tener un impacto negativo en la calidad del aire y el medio ambiente.

Sin embargo, en el caso del petróleo este método se realiza a más de 4.000 metros de profundidad, lo que puede aumentar la presión de las rocas subterráneas y la ocurrencia de deslizamientos. Si esta técnica se aplica para minerales cercanos a la superficie no se generaría suficiente presión para desencadenar deslizamientos en fallas geológicas profundas, descartando la inducción de sismos.



FIGURA 6: PROMOCIÓN DE TRANSFERENCIA DE MASA MEDIANTE *FRACKING*



Fuente: GEM elaboración propia

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA LIS

Análisis comparativo de la LIS mejorada con métodos de transferencia de masa respecto al método de lixiviación convencional

Como se observó anteriormente la LIS podría tener muchos beneficios respecto al método convencional de lixiviación en pilas, principalmente asociados a las posibles exigencias ambientales y a la sostenibilidad de la minería en el largo plazo. Sin embargo, una de las principales limitantes para **aplicar la LIS está relacionada con la conductividad hidráulica y la permeabilidad del depósito, lo que generalmente conlleva a un menor rendimiento y velocidad de lixiviación** en comparación con la lixiviación en pilas.

No obstante, en los últimos años se han descubierto métodos complementarios prometedores, explicados en la sección anterior, como la transferencia electrocinética que podrían aumentar la permeabilidad del depósito y, por lo tanto, el rendimiento y la velocidad de lixiviación, lo que justifica una investigación adicional de estos métodos para mejorar y/o acelerar la recuperación de minerales mediante LIS.



Otras limitantes corresponden al riesgo de filtración del lixiviante y contaminación del agua subterránea en el caso de estratos inferiores no impermeables, por esta razón es muy importante estudiar en profundidad las características hidrogeológicas del depósito y construir pozos de monitoreo para controlar el flujo.

También es relevante considerar los altos costos energéticos asociados al bombeo y a los métodos complementarios de transferencia de masa para mejorar el rendimiento de la LIS.

Sin embargo, se podrían aprovechar las condiciones climáticas para utilizar fuentes de energía renovable. En la **Figura 7** se observa un cuadro de análisis comparativo entre la LIS mejorada con posibles métodos de transferencia de masa y la lixiviación convencional en pilas.

FIGURA 7: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA LIXIVIACIÓN IN SITU MEJORADA VERSUS LA LIXIVIACIÓN EN PILAS

Criterio	Lixiviación <i>in situ</i> mejorada vs. Lixiviación en pilas	Observaciones
Limitantes hidrogeológicas	?	La lixiviación <i>in situ</i> requiere condiciones hidrogeológicas de los depósitos para ser factible (conductividad y permeabilidad). Sin embargo, con la adopción de métodos complementarios se podría aumentar la transferencia de masa y permeabilidad del depósito
Rendimiento	?	La lixiviación en pilas generalmente permite un mayor contacto entre el agente lixivante y el mineral producto de la tronadura. Sin embargo, el método de lixiviación <i>in situ</i> mejorado con técnicas de promoción de transferencia de masa permitiría aumentar la recuperación, alcanzando niveles cercanos a los de la lixiviación en pilas
Tiempo de lixiviación	?	La lixiviación en pilas generalmente permite una mayor velocidad de lixiviación producto de una mayor permeabilidad adquirida por la trituration del material. Sin embargo, al complementar la lixiviación <i>in situ</i> con métodos que podrían aumentar la velocidad de lixiviación, se podrían alcanzar tiempos incluso menores que en la lixiviación en pilas
Riesgo de filtración del lixivante y contaminación del agua subterránea	+	La lixiviación <i>in situ</i> tiene mayor riesgo de pérdidas del lixivante y contaminación de cuerpos de agua circundantes producto de estratos inferiores no impermeables
Costos de lixiviación	+	La lixiviación <i>in situ</i> incluye costos asociados a las bombas y pozos de inyección y recuperación, lo que podría involucrar un alto consumo de energía si además se incluyen métodos complementarios. Mientras que en las pilas, la lixiviación ocurre por percolación, por lo que el principal costo está asociado al sistema de riego superficial
Consumo de agua	-	La lixiviación <i>in situ</i> tendría un menor consumo de agua debido a: una menor tasa de evaporación del agente lixivante por su acción subterránea, la disminución de formación de caminos de flujo debido a una menor fractura de poros, y una mayor difusión del agente lixivante debido a la pluma de propagación inyectada por pozos
Emisiones de CO ₂	-	La lixiviación <i>in situ</i> podría disminuir las emisiones de CO ₂ ya que reduce el uso de maquinaria asociada a procesos de tronadura, transporte y apilamiento
Contaminación visual	-	La lixiviación <i>in situ</i> no origina pilas o botaderos en la superficie, reduciendo así el uso de maquinarias
Condiciones de trabajo seguras	+	Pilas de lixiviación más propensas a causar accidentes o derrumbes producto de su altura y exposición superficial
Aplicabilidad en depósitos profundos y/o de baja ley	+	La lixiviación <i>in situ</i> permitiría explotar de forma rentable depósitos profundos y de baja ley debido a la utilización de pozos, ahorrando los altos costos de excavación
Costos de preparación y apilamiento del mineral	-	La lixiviación <i>in situ</i> no incluye costos relacionados a procesos de tronadura, transporte y apilamiento
Mano de obra	-	La lixiviación <i>in situ</i> requiere una menor cantidad de operarios, ya que el proceso depende principalmente del funcionamiento de los pozos de inyección y recuperación

Fuente: GEM elaboración propia

Nota: El signo + o - representan que el método de LIS muestra un mayor o menor valor del criterio respecto a la lixiviación en pilas, respectivamente. El signo ? indica que se requiere una investigación adicional.

FUTURO DEL MÉTODO DE LIS

Antes de tomar cualquier decisión sobre posibles operaciones mediante LIS es importante evaluar la eficiencia y rentabilidad del proyecto, desde la etapa de estudio preliminar hasta la etapa de operación piloto e ingeniería de factibilidad.

En primer lugar, **las empresas interesadas en investigar el potencial de la LIS en sus depósitos deberían realizar un estudio conceptual de las opciones y riesgos asociados a la implementación del método para identificar las variables claves que determinan el proceso.**

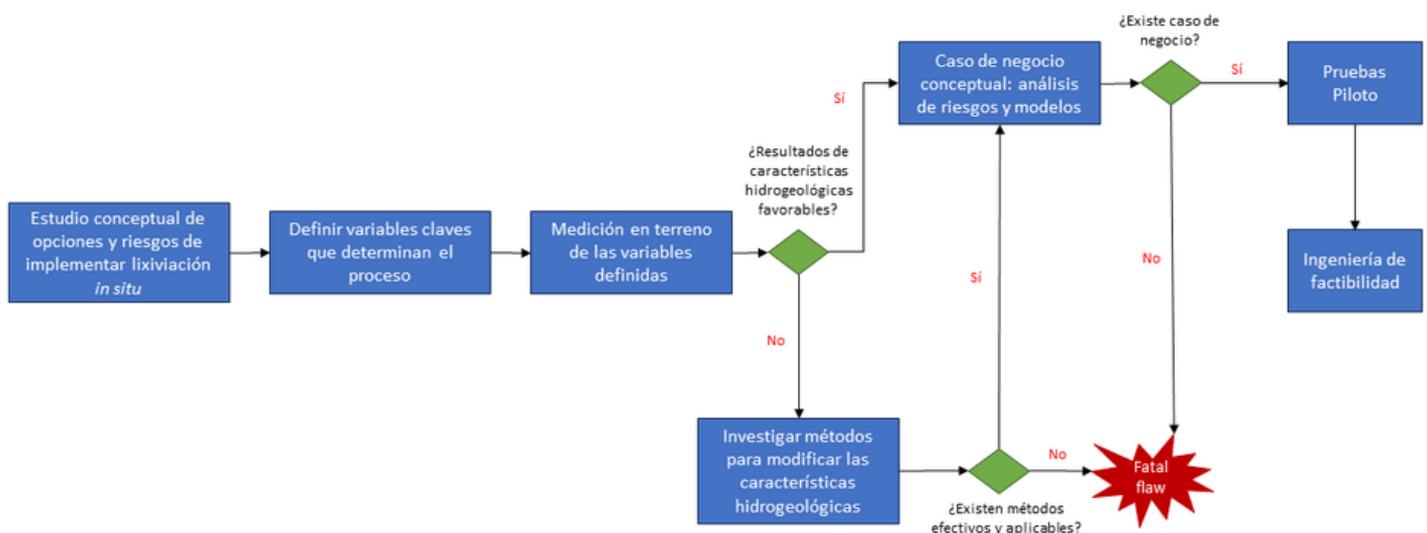
Una vez que se han definido las variables se deberían recopilar datos medidos in situ para estas. Si las características hidrogeológicas del depósito no son favorables, por ejemplo, la conductividad hidráulica es muy baja, se tendrían que investigar técnicas para modificar dichas características como los métodos de transferencia de masa presentados en este documento.

Por el contrario, si las características del depósito se encuentran dentro de un rango razonable, se debería realizar un análisis de riesgos y modelos de transporte reactivo para identificar si existe un caso de negocio.

El análisis de riesgos es una herramienta fundamental para determinar la viabilidad del proyecto, ya que permite cuantificar la incertidumbre asociada al negocio, incluyendo variables como el rendimiento, costos del proceso y precios de mercado.

Si efectivamente existe un caso de negocio se entraría a la etapa de operación piloto e ingeniería de pre-factibilidad y factibilidad. En el diagrama de la **Figura 8** se resumen los pasos propuestos para analizar la factibilidad de implementar LIS en un depósito cualquiera.

FIGURA 8. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA LIXIVIACIÓN *IN SITU*



Fuente: GEM elaboración propia

BIBLIOGRAFÍA

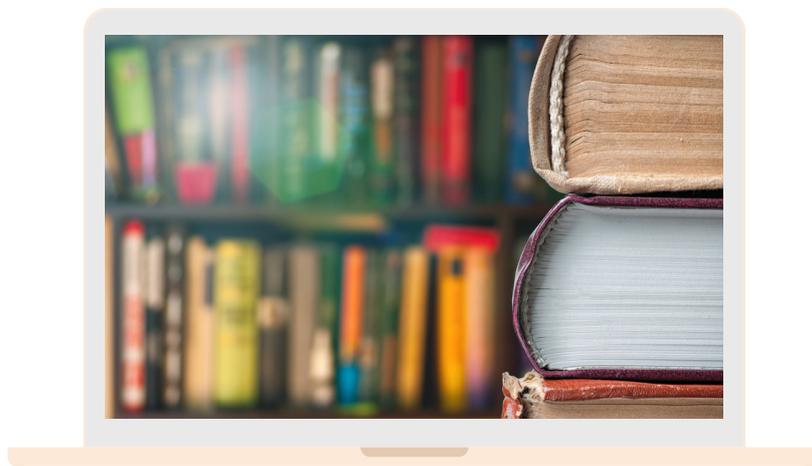
Hayes, A. (2022). Fracking: Overview, Advantages and Disadvantages, FAQ. Accedido desde <https://www.investopedia.com/terms/f/fracking.asp>.

Karami, E. (2022). Mass transfer promotion in in-situ recovery processing. Murdoch University.

López (2021). Una mirada a la minería del uranio por lixiviación in situ (ISL). Energía Nuclear Latinoamericana. Accedido desde <https://enula.org/2021/12/una-mirada-a-la-mineria-del-uranio-por-lixivacion-in-situ-isl/>.

SQM (2023). Procesos actuales: caliche y salmuera. Anatomía de una pila de lixiviación. Accedido desde <https://www.sqm.com/sqmeninfografias/procesos.html>.

World Energy Trade (2021). De la excavación a los campos eléctricos: nueva técnica para extraer metales del mineral de roca dura. Accedido desde <https://www.worldenergytrade.com/metales/mineria/de-la-excavacion-a-los-campos-electricos-nueva-tecnica-para-extraer-metales-del-mineral-de-roca-dura>.



Para más información
sobre GEM



Escanea el QR

AUTORES



ISAAC PAREDES
Chief Operating Officer
iparedes@gem-mc.com



MARÍA FRANCISCA REBOLLEDO
Ingeniera Analista
frebolledo@gem-mc.com



MARÍA JESÚS OVALLE
Ingeniera Analista
jovalle@gem-mc.com

CONTACTO



JUAN ESTEBAN FUENTES
Head Business Development
jefuentes@gem-mc.com



Chile: Av. Las Condes 12.461,
torre 3, offices 805-806,
Las Condes, Santiago

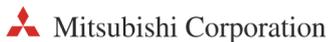
Singapur: 1 Raffles Place #40-02
One Raffles Place Singapore
(048616)

<https://www.gem-mining-consulting.com>



Cualquier forma no autorizada de distribución, copia, duplicación, reproducción, o venta (total o parcial) del contenido de este documento, tanto para uso personal como comercial, constituirá una infracción de los derechos de copyright. Cualquier tipo de reproducción total o parcial de su contenido está totalmente prohibida, a menos que se solicite una autorización expresa.

NUESTROS CLIENTES



CAMBIA LAS REGLAS DEL JUEGO CON DEEPMINE



OBTÉN RESULTADOS ROBUSTOS CON DEEPMINE

**EL SOFTWARE DE PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA
MINERA CON EL MOTOR MÁS POTENTE DEL MERCADO**

