

“EXTRACCIÓN DE URANIO DE MINERALES ARGENTINOS”

**TESINA DE ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE**

Alumna: Ing. María Jimena Arias

Directora: Lic. Elena Becquart

Noviembre 2011



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

ÍNDICE

Resumen.....	2
Objetivos	3
<i>Capítulo 1: Procesamiento de mineral de uranio</i>	4
1.1 Introducción	5
1.2 Proceso de Hidrometalurgia del uranio	5
1.3 Pretratamiento del mineral antes de la lixiviación.....	6
1.4 Lixiviación del uranio.....	6
1.4.1 Lixiviación Ácida	6
1.4.2 Lixiviación Alcalina	10
1.4.3 Técnicas de Lixiviación	12
❖ Lixiviación in situ	12
❖ Lixiviación “en pilas” (“heap leaching”).....	14
❖ Lixiviación por percolación	15
❖ Lixiviación Convencional	16
1.5 Separación sólido-líquido	17
1.6 Plantas de procesamiento del mineral de uranio en la Argentina.....	18
1.6.1 Tecnologías implementadas para el procesamiento del mineral de uranio en Argentina	19
➤ Planta Córdoba	19
➤ Complejo Fabril Tonco (Estación de lixiviación Don Otto).....	19
➤ Complejo Fabril Malargüe	20
➤ Complejo Minero Fabril Pichiñán	23
➤ Complejo Minero Fabril San Rafael.....	23
➤ Complejo Minero Fabril Los Gigantes.....	25
➤ Complejo Minero Fabril La Estela.....	25
➤ Complejo Minero Fabril Los Colorados.....	25
<i>Capítulo 2:Desarrollo del proceso de extracción de uranio del yacimiento Cerro Solo</i>	26
2.1 Descripción del yacimiento.....	27
2.2 Desarrollo experimental.....	28
2.2.1 Consideraciones generales	28
2.3 Lixiviación en dos etapas	30
2.3.1 Lixiviación alcalina.....	30
2.3.2 Lixiviación ácida	33
2.3.3 Diseño factorial de los ensayos realizados:	33
Estimación de los efectos	35
2.4 Lixiviación en una etapa	37
2.4.1 Lixiviación Ácida	37
2.4.2 Determinación del modelo de agitador y geometría del tanque	37
2.4.3 Ensayo Factorial.....	38
Conclusiones.....	42
Referencias Bibliográficas.....	43
Anexos	44
Anexo 1:Ubicación de lo complejos mineros fabriles	45
Anexo 2: Diagrama de flujo de Planta Malargüe.....	46
Anexo 3: Diagrama de flujo de Planta San Rafael.....	47
Anexo 4:Ubicación del yacimiento Cerro Solo.....	48
Anexo 5: Análisis granulométrico.....	49

Resumen:

En este trabajo de tesina se presentan el esquema del proceso de hidrometalurgia del uranio, las reacciones químicas involucradas según el medio utilizado y las técnicas operativas de lixiviación utilizadas en el mundo. En el estudio de los antecedentes de plantas de tratamiento de minerales de uranio construidas y operadas en Argentina, se detallan cuáles de esas técnicas se han implementado desde el año 1952 en cada uno de los complejos minero-fabriles.

En segundo lugar se explica la metodología experimental aplicada en el desarrollo del estudio para la obtención de soluciones ricas en uranio mediante la técnica de lixiviación convencional en laboratorio, a partir de muestras de mineral que contienen uranio y molibdeno, provenientes del yacimiento Cerro Solo, ubicado en la provincia de Chubut.

Objetivos:

Los objetivos del presente trabajo de tesina son, en primer lugar, efectuar un estudio de antecedentes de las técnicas hidrometalúrgicas y de su implementación en las plantas de tratamiento de minerales de uranio de la Argentina y luego desarrollar experimentalmente, a escala de laboratorio, el proceso de extracción de uranio a partir de diferentes muestras del yacimiento Cerro Solo, sito en la provincia de Chubut. Este yacimiento contiene molibdeno asociado al uranio y se deberá establecer la factibilidad química y operacional de maximizar la recuperación de ambos elementos

Capítulo 1

Procesamiento de mineral de uranio

1.1 Introducción

El mineral de uranio es la materia prima para la fabricación del combustible nuclear utilizado en los reactores nucleares generadores de energía eléctrica.

Con el objetivo de abastecer a las Centrales Nucleares con combustible nuclear, se han desarrollado técnicas para la obtención de concentrado de uranio a partir de minerales argentinos. Este concentrado actualmente se importa y es procesado en el país para la obtención de dióxido de uranio (UO_2), componente esencial para la producción de combustibles nucleares. El uranio se presenta en una gran variedad de ambientes geológicos y para su extracción se han desarrollado y mejorado diferentes técnicas de tratamientos hidrometalúrgicos, para producir el concentrado comercial, conocido como “yellow cake” que contiene un 60-70% de uranio. Este concentrado pasa a una segunda etapa que corresponde a su purificación y su posterior conversión a polvo de dióxido de uranio. A partir de este último compuesto de calidad nuclear, se fabrican las pastillas mediante técnicas pulvimetalúrgicas, para luego ser utilizadas en los reactores.

1.2 Proceso de Hidrometalurgia del uranio

El proceso de obtención de la “torta amarilla o yellow cake” está compuesto por varias etapas.

Primeramente el mineral es extraído de la mina mediante diferentes métodos: a cielo abierto o por el método subterráneo, a través de túneles.

El mineral extraído de la mina previa trituración, es molido empleando generalmente la molienda húmeda, para pasar a la etapa de lixiviación. El grado de la molienda está determinado por la técnica de lixiviación implementada, mediante la cual el uranio es extraído en solución acuosa.

Después de la lixiviación, se separan del líquido los sólidos, los cuales se lavan para recuperar los restos de licor de lixiviación adheridos. En la mayoría de las plantas de tratamiento, la operación de lavado se efectúa en circuitos de espesadores en contracorriente.

El licor o jugo fuerte, rico en uranio, obtenido en la lixiviación es sometido a procesos de purificación y/o precipitación, de acuerdo a la técnica utilizada, para la obtención del producto final, concentrado de uranio, conocido como torta amarilla, “yellow cake”, luego es enviado a la planta de purificación y conversión.

1.3 Pretratamiento del mineral antes de la lixiviación:

Una vez extraído el mineral de la mina mediante los métodos de minería subterránea o a cielo abierto, el mineral pasa a la etapa de pre acondicionamiento que consiste en una trituración primaria y en una trituración secundaria, según la granulometría que se requiera en la etapa de lixiviación.

La trituración primaria se realiza para una primera reducción de tamaño, se lleva a cabo normalmente en trituradoras de mandíbulas (chancadora) o en trituradoras giratorias. Luego pasa a la etapa de trituración secundaria, si el proceso lo requiere en medio húmedo, los equipos utilizados son generalmente trituradoras Cónicas o de Rodillos.

Puede ocurrir que los minerales lixiviables contengan cierta proporción de finos y arcillas que pueden interferir en la percolación y lixiviación. Según la cantidad y tipo de material fino puede ser necesario una etapa de aglomeración de la mena para mejorar sus características permeables.

1.4 Lixiviación del uranio:

El proceso de lixiviación elegido para disolver uranio desde el mineral depende en parte de las características físicas del mineral, su facilidad de liberación y la naturaleza de los otros minerales que lo constituyen.

La lixiviación del uranio se puede realizar en medio ácido cuyo reactivo lixivante más utilizado es el ácido sulfúrico o en medio alcalino en el cual se emplea una mezcla de carbonato y bicarbonato de sodio como lixivante.

Las principales variables que controlan el proceso son: la concentración del reactivo, la concentración del reactivo oxidante (si el proceso lo requiere), la temperatura de operación, el tiempo de ataque, la molienda del mineral y la densidad de la pulpa.

1.4.1 Lixiviación Ácida:

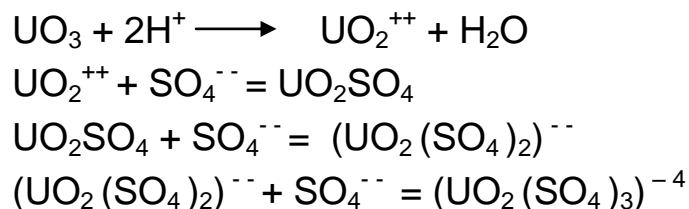
El reactivo lixivante más utilizado en la lixiviación ácida es el ácido sulfúrico. También se ha usado el ácido nítrico, el cual presenta fuertes propiedades oxidativas pero es mucho más caro que el ácido sulfúrico y forma nitrato de uranilo en soluciones acuosas, los cuales son incompatibles con los

intercambiadores iónicos tipo aniónicos en la etapa de purificación. Este se sigue usando para el procesamiento de concentrados para los cuales el costo no es un factor importante. El ácido clorhídrico tiene la desventaja de ser demasiado caro y altamente corrosivo. El cloruro férrico y el sulfato férrico también se emplean como lixiviantes para muchos minerales de uranio.

Los principales oxidantes utilizados para mantener las condiciones de oxidación apropiadas durante la lixiviación y por lo tanto obtener un alto rendimiento en la extracción de uranio, son el dióxido de manganeso (pirulosita) y el clorato sódico, otros agentes oxidantes utilizados son el permanganato de potasio fuerte poder oxidante pero de alto costo, el cloro es altamente corrosivo y de difícil manipulación y el nitrato sódico, requiere altas temperaturas. También se utilizan como agentes oxidantes las bacterias oxidantes (*Thiobacillus ferrooxidans*) muy empleadas en la "lixiviaciones en pila".

Mecanismo de la reacción:

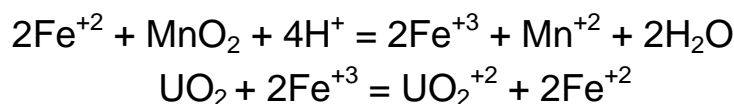
El ácido sulfúrico se ioniza en solución y reacciona con el uranio hexavalente, el cual se disuelve como UO_2^{+2} produciendo sulfato de uranio y el complejo sulfato de uranio, como se muestra en las siguientes reacciones:



El uranio disuelto puede aparecer en cualquiera de las formas anteriores, dependiendo del ácido y del uranio.

El oxidante se incorpora debido a que el uranio presente en el mineral puede estar en forma tetravalente, entonces debe ser oxidado antes de que ocurra la disolución. El hierro férrico actúa como el principal oxidante del uranio tetravalente en la operación de lixiviación ácida. El hierro siempre está presente tanto como componente del mineral, o incorporado como hierro metálico, el cual se desprende de los equipos de molienda.

El dióxido de manganeso actúa para oxidar al hierro de ferroso a férrico y luego este oxida al uranio como se muestra en la siguiente reacción:



Las condiciones óptimas para la oxidación se logran con un potencial de oxido-reducción entre el rango de -400 a -500 milivolt, en estas condiciones el uranio soluble estaría en estado hexavalente y la mayor parte del hierro presente se encontraría en estado férrico.

La ventaja de trabajar en medio ácido es que no se requiere de una molienda muy fina ya que el ácido sulfúrico es un reactivo fuerte que facilita el ataque. Otros factores importantes en la lixiviación son el tiempo de ataque y la temperatura, estos son dependientes entre sí. Incrementando la temperatura de operación se reduce el tiempo requerido de reacción, de este modo aumenta la capacidad del equipo y mejora la extracción del mineral.

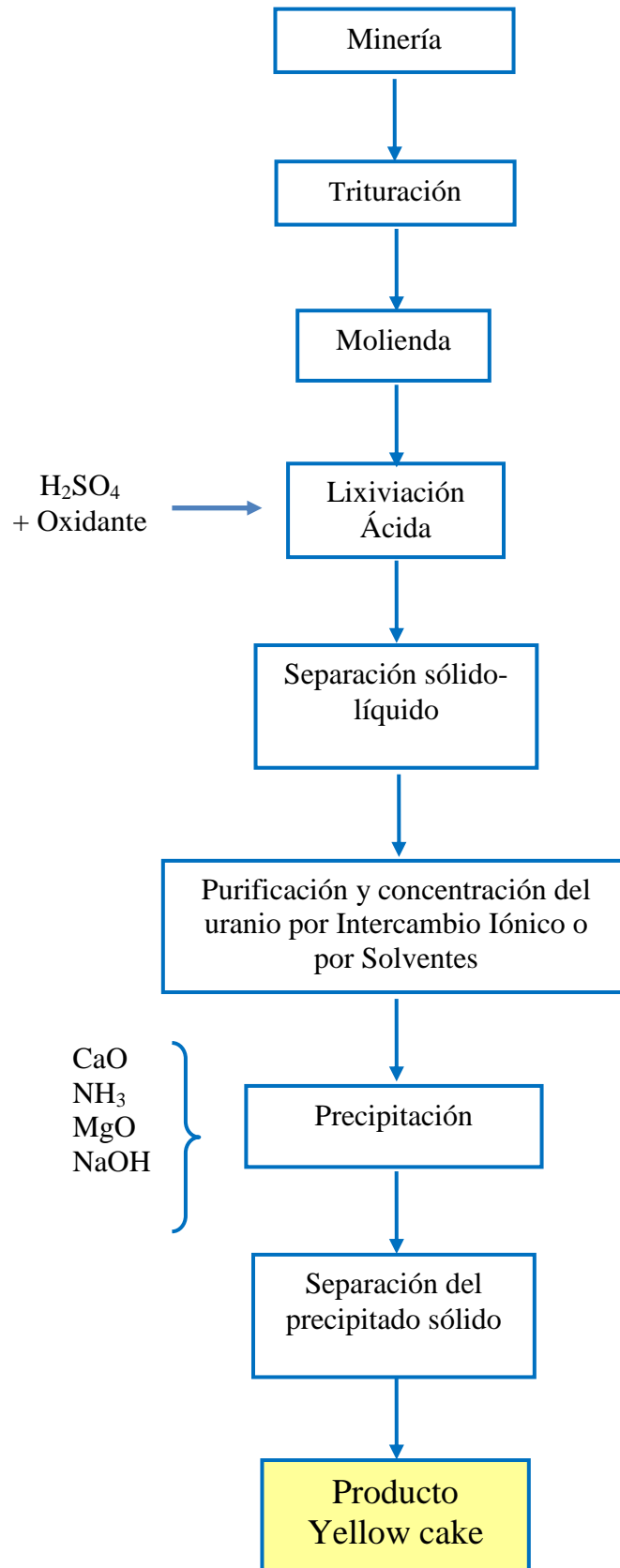
El inconveniente de las altas temperaturas es el aumento de corrosión en el equipo.

El tiempo de lixiviación también depende de la concentración de ácido, el tipo de mineral, y su exposición, etc.

La desventaja de la lixiviación en medio ácido es que se obtienen soluciones con alto contenido de impurezas, por lo que es necesaria una etapa de purificación antes de la precipitación del uranio.

En la etapa de purificación y concentración, la solución rica en uranio es tratada mediante resinas de intercambio iónico o con solventes aminados que actúan reteniendo el uranio y dejando pasar la mayoría de los contaminantes como silicio, aluminio, hierro y calcio. En la etapa final del proceso a partir de la solución concentrada de uranio obtenida de la elución de las resinas de intercambio iónico o de la reextracción de los solventes aminados, se realiza la precipitación con NH_3 gaseoso, que es el más utilizado debido a que permite tener un producto con menos impurezas, o con CaO , NaOH , MgO . La pulpa obtenida formada por el precipitado de uranio, se concentra mediante una centrífuga de separación sólido-líquido, y luego se transporta a través de un horno de secado. El concentrado de uranio que sale del horno, diuranato de amonio (ADU) o uraniltricarbonato de amonio (AUC), contiene de 3 a 5% de humedad, y es conocido como torta amarilla, "yellow cake", por su color amarillo característico, se descarga en tambores de envasado de 200 kg, los que son enviados a la planta de purificación y conversión.

A continuación se presenta el Flowsheet del proceso implementado la lixiviación ácida:



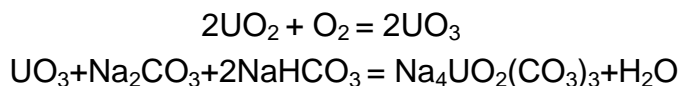
1.4.2 Lixiviación Alcalina:

La lixiviación alcalina de los minerales de uranio utiliza como reactivo lixivante una solución de carbonato-bicarbonato de sodio y se emplea generalmente cuando el mineral contiene muchos carbonatos, ya que si se utiliza la lixiviación ácida ésta resultaría antieconómica por el alto consumo de ácido.

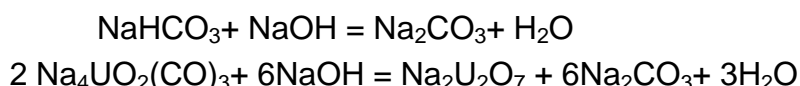
El bicarbonato es agregado a la solución lixivante para prevenir la precipitación de parte del uranio disuelto a través de la reacción con el ion oxhidrilo.

Los minerales de uranio oxidados son normalmente disueltos en un medio de bicarbonato-carbonato sin dificultad, pero si el uranio presente en el mineral está en forma tetravalente, éste no se disuelve hasta que está oxidado por reacción directa sobre la superficie del sólido, con lo cual es convertido al estado hexavalente y entonces disuelto en esa forma. Por tal motivo es requerida la incorporación de un agente oxidante. La oxidación se puede realizar en forma directa por aire, o con el agregado de oxidantes como el permanganato de potasio, muy utilizado o el H_2O_2 , pero éste es muy caro y tiende a descomponerse en solución.

Las reacciones que gobiernan la dilución del uranio oxidado con la solución de carbonato-bicarbonato son:



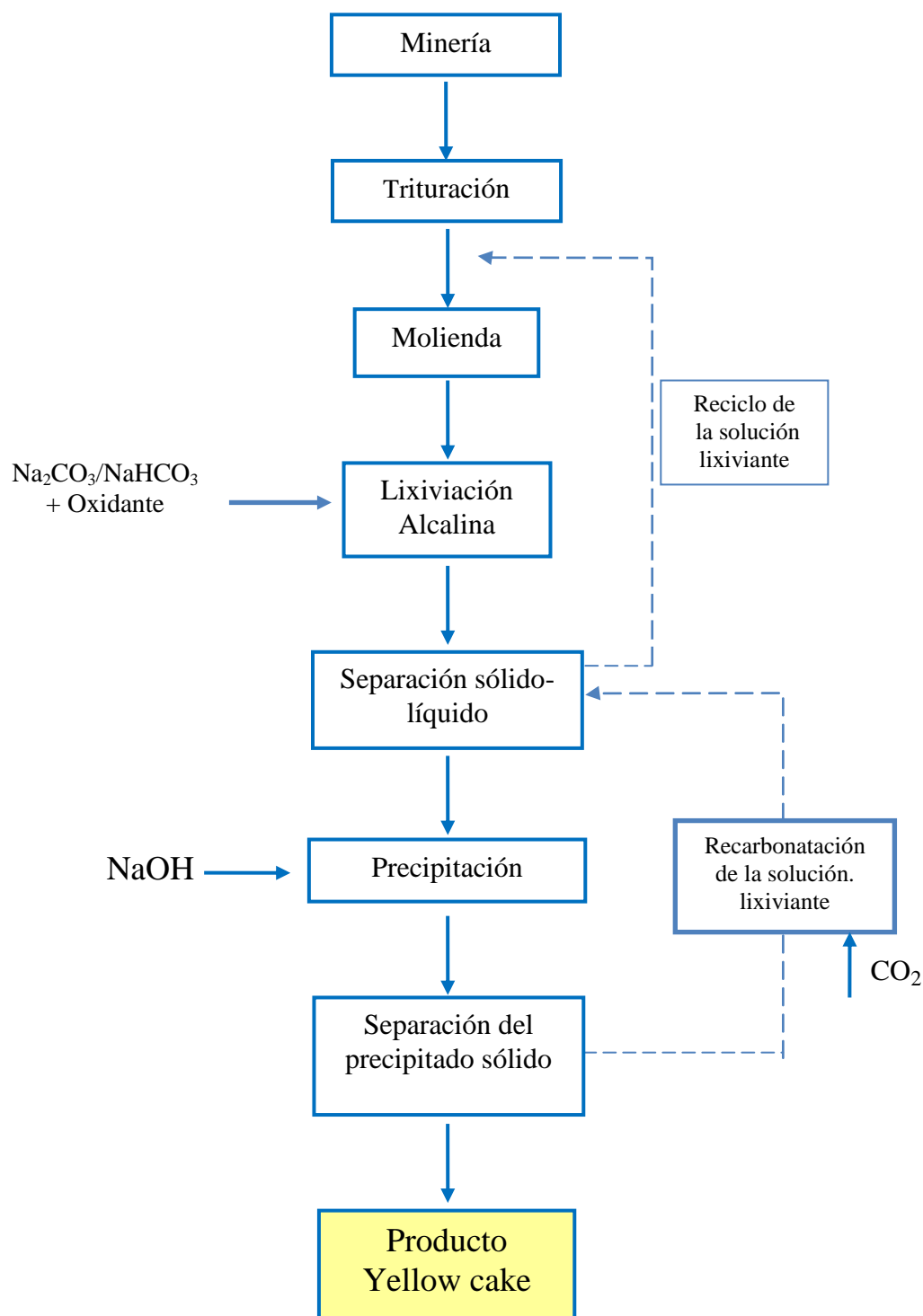
Las ventajas de utilizar la lixiviación alcalina es que es un proceso no corrosivo, selectivo para los minerales de uranio y como consecuencia de ello se obtienen soluciones más puras. El uranio se recupera directamente añadiendo hidróxido de sodio a la solución, el cual primero neutraliza el exceso de bicarbonato presente y luego destruye el complejo aniónico precipitándose el uranio como diuranato de sodio, formación de la torta amarilla “yellow cake”.



Después de realizada la precipitación la solución es contactada con CO_2 para regenerar el bicarbonato y convertir cualquier diuranato de sodio que haya quedado después de la separación del precipitado, al complejo uranil tricarbonato antes de que la solución sea reciclada.

La desventaja de utilizar una lixiviación alcalina es que la solución de carbonato-bicarbonato de sodio es un reactivo débil, por lo que requiere un tratamiento intensivo de largos tiempos de ataque, altas temperaturas y oxidante para la disolución del uranio. Además para lograr un ataque más efectivo es necesario una molienda más fina que la necesaria para la lixiviación ácida, por lo que termina siendo un proceso más costoso.

Flowsheet del proceso implementando lixiviación alcalina:



1.4.3 Técnicas de Lixiviación:

Las diferentes técnicas de lixiviación pueden ser:

❖ Lixiviación in situ:

En la lixiviación en situ la solución lixivante se introduce en las capas mineralizadas del yacimiento a través de una serie de inyecciones. El producto de la lixiviación es recolectado en galerías subterráneas y luego bombeado a una planta de tratamiento.

El yacimiento debe presentar ciertas características para llevar a cabo la lixiviación in situ, que son: el cuerpo del yacimiento debe ser permeable a la solución lixivante pero los estratos circundantes tienen que ser no porosos, no presentar fracturas ni canales para evitar la pérdida del líquido lixivante y evitar además la contaminación de las napas de agua.

Dependiendo de la zona a lixiviar, que puede ser subterránea o superficial, se distinguen tres tipos de lixiviación:

Tipo I: Se trata de la lixiviación de cuerpos mineralizados fracturados situados cerca de la superficie, sobre el nivel de las aguas subterráneas. Puede aplicarse a minas en desuso, que se hayan fracturado hidráulicamente o con explosivos (IN PLACE LEACHING).

Tipo II: Son lixivitaciones IN SITU aplicadas a yacimientos situados a cierta profundidad bajo el nivel de aguas subterráneas, de al menos de 300 – 500 m de profundidad. Estos depósitos se fracturan en el lugar y las soluciones se inyectan y se extraen por bombeo.

Tipo III: Se aplica a depósitos profundos, situados a más de 500 m bajo el nivel de aguas subterráneas.

Esta técnica se aplica para la recuperación de uranio contenido en zonas marginales. Los rendimientos de extracción son bajos, menores al 50%.

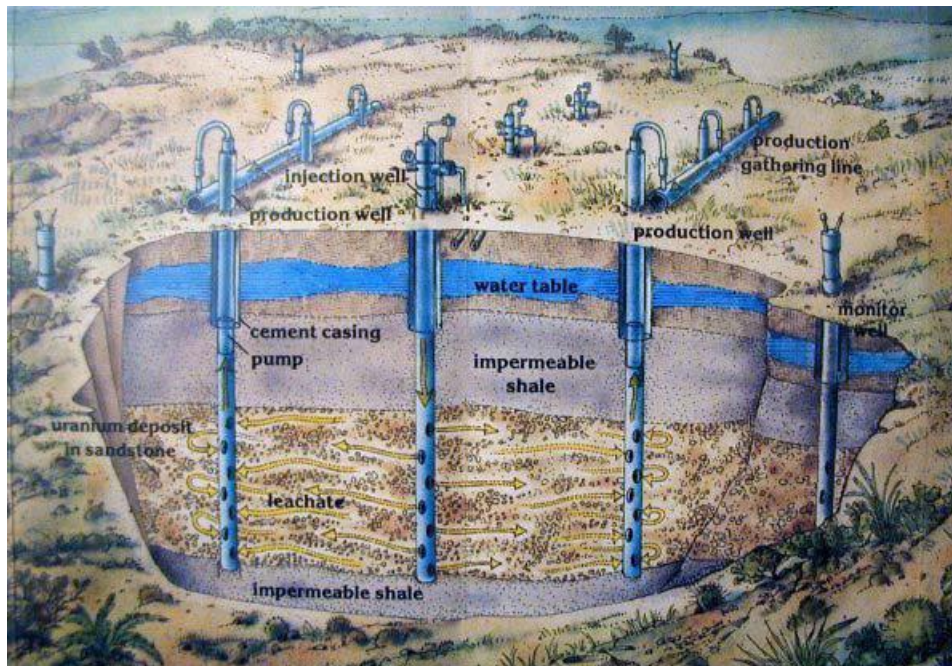


Figura 1: Esquema de inyección y extracción de la solución lixiviante.



Figura 2: Vista de un yacimiento implementando la lixiviación in Situ.

❖ Lixiviación “en pilas” (“heap leaching”):

El mineral ligeramente triturado en una planta de chancado, es colocado en pilas sobre una base impermeabilizada para controlar las pérdidas de solución y evitar contaminación del medio ambiente, luego se riegan las pilas con la solución lixivante, la cual al percolar va disolviendo el mineral, la solución lixivante se recicla continuamente hasta obtener una concentración aceptable de uranio y luego esta solución se recoge en piletas.

La base impermeabilizada está formada por una superficie firme sobre la cual se coloca un lecho granular luego se apoya una lámina o capa de impermeabilización que generalmente son láminas de polietileno o también pueden ser materiales arcillosos compactados sobre el propio terreno, como hormigón o asfalto. Una vez conformada la base impermeabilizada se instala el sistema de recolección de la solución rica en el mineral de interés, que está formado por grana o material filtrante sobre la lámina y tuberías perforadas drenantes de plástico.

El riego de las pilas tiene que ser homogéneo. Existen dos formas de realizarlo: por aspersión o por distribución de goteo, este último se utiliza cuando hay escasez de líquidos y cuando se trabaja en ambientes de baja temperatura. Además es muy importante que el lecho de partículas que conforman la pila sea bien permeable para asegurar una buena percolación y dispersión de la solución lixivante en la pila, sin escurrimiento preferencial.

Esta técnica es muy utilizada en la industria debido a sus bajos costos.

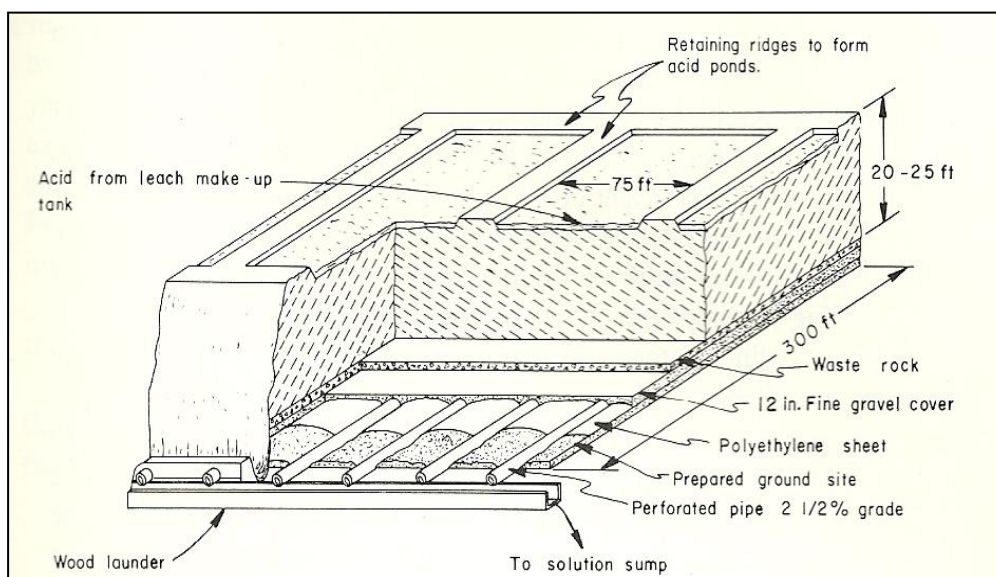


Figura 3: Esquema de la construcción de una pila.

❖ Lixiviación por percolación:

Esta técnica consiste en cargar el mineral en tanques especiales o cubas construidos con un falso fondo para formar el lecho filtrante. Se contacta la solución acuosa con el lecho de mineral, la cual inunda la cuba y percola a través del lecho, logrando la lixiviación del mineral de interés.

Requiere una molienda mediana o gruesa para permitir la percolación de las soluciones y evitar largos tiempos de lixiviación.

La lixiviación por percolación no es adecuada para minerales muy finos o con materiales arcillosos ya que impiden la circulación de la solución. Tales minerales requieren un pretratamiento de aglomeración.

Una gran ventaja de esta técnica es la obtención de soluciones relativamente limpias, lo que permite evitar la etapa de separación sólido-líquido.

Los rendimientos de extracción no son muy altos.

En la actualidad esta técnica está en desuso.

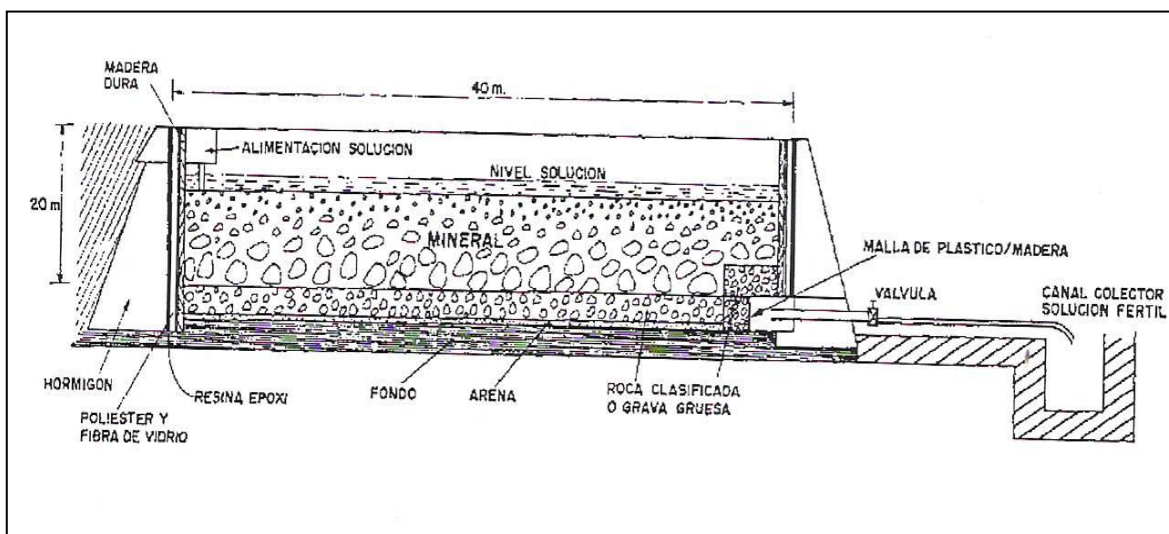


Figura 4: Esquema del equipo de lixiviación por percolación.

❖ Lixiviación Convencional:

La lixiviación convencional consiste en la agitación de la pulpa formada por la solución lixiviante y el mineral molido hasta lograr la disolución completa del elemento de interés, siendo el tiempo de contacto de los sólidos con la solución del orden de horas comparado con el proceso de lixiviación en pilas que requiere meses.

Se utiliza en los minerales con alta concentración del elemento de interés, cuando el mineral deseado está tan bien diseminado que es necesario molerlo para liberar sus valores y exponerlos a la solución lixiviante.

Mecanismos de agitación:

- Agitación mecánica: Se emplean los agitadores mecánicos del tipo impulsor o de turbina. Además de mezclar la pulpa, da lugar a una mayor atrición entre partículas.
- Agitación por aire: consiste en la agitación mediante burbujeo (tanques del tipo "Pachuca"). La gran ventaja de la lixiviación en Pachuca es que el agente mezclador, es al mismo tiempo suministrador de oxígeno que actúa como reactivo oxidante del uranio en la lixiviación. Este tipo de agitación proporciona una suave mezcla que puede ocasionar sedimentación.
- También se han utilizado tambores rotatorios para mezclar principalmente pulpas de grano grueso y cuando se requiere una alta concentración de reactivos o intensa atrición.

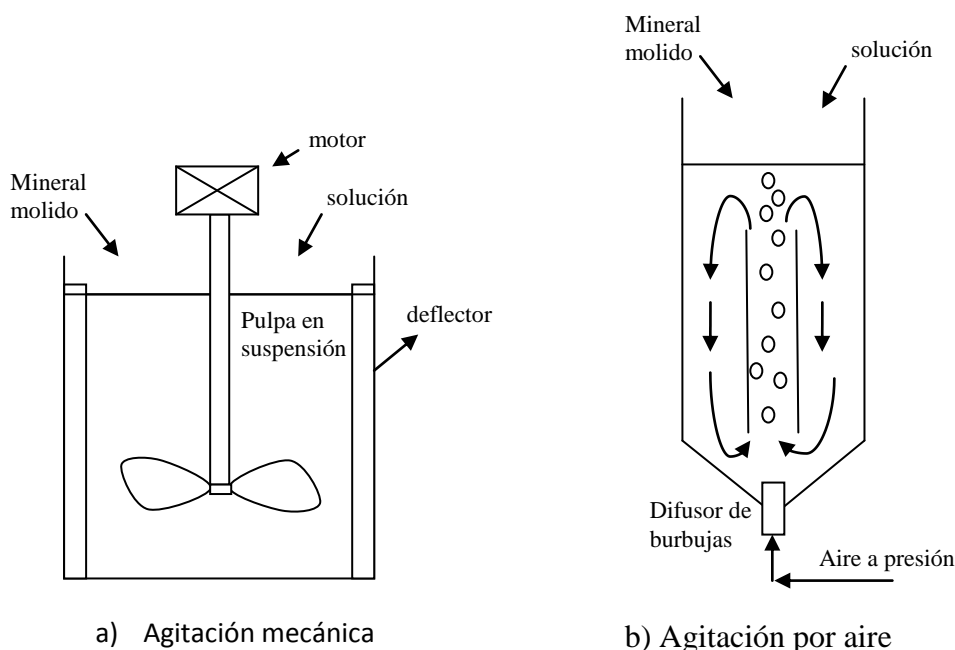


Figura 5: Esquemas de lixiviación con agitación mecánica y neumática

❖ En la industria también son utilizadas las autoclaves cuando se requiere trabajar a altas temperaturas y presiones, al emplear lixiviaciones en medio alcalino.

1.5 Separación sólido-líquido:

Esta etapa depende de la técnica de lixiviación que se haya implementado, en una planta de lixiviación en pilas, la solución que escurre de las pilas es bastante clara y contiene muy pocos sólidos en suspensión, no hay etapa específica de separación sólido - líquido. La solución rica se almacena en piscinas donde pueden decantar los pocos sólidos que contiene.

En cambio en las plantas en donde se implementan la lixiviación convencional es importante la etapa de separación sólido - líquido para separar los sólidos de la solución y enviarlos a diques de estériles y la solución clarificada enviarla a la etapa de concentración y purificación.

La separación sólido – líquido se puede realizar mediante los métodos de espesamiento (hasta 55% sólidos) y filtración (hasta 92% sólidos).

Los espesadores son equipos que efectúan la separación sólido-líquido por decantación de los sólidos en grandes tanques.

El sólido (barro decantado) siempre viene acompañado de solución fértil, por lo cual es importante recuperar el uranio que queda en dicha solución.

Por tal motivo la pulpa que se obtiene después del período de lixiviación debe pasar por, además de la etapa de separación sólido – líquido, por etapas de lavado, antes de desechar los sólidos lixiviados. El lavado se puede realizar en varios espesadores, en los cuales el agua de lavado y la pulpa fluyen en contracorriente. La pulpa fértil proveniente del sector de lixiviación es diluida con los líquidos provenientes del espesador anterior, antes de ingresar a la primera etapa de separación, este procedimiento se repite en cada etapa, de manera que del primer espesador sale la solución exenta de sólidos que continúa el proceso y del último, el mineral agotado.

Este proceso de lavado de los sólidos en contracorriente, se denomina como etapas DCC (decantación en contracorriente).

El uso de filtros permite recuperar líquido retenido a partir de precipitados (en el caso de la lixiviación alcalina) o de pulpas de 55-60% en sólidos procedentes de la etapa de decantación en contra corriente como también tratar directamente soluciones de lixiviación, para disminuir la cantidad de sólidos en suspensión que pueden afectar procesos posteriores de tratamiento.

Los filtros pueden ser de vacío como el filtro de tambor, de discos (o cerámica), horizontal, de cinta o filtros de presión, como el filtro prensa y de arena.

1.6 Plantas de procesamiento del mineral de uranio en la Argentina:

La explotación y tratamiento de minerales uraníferos comenzó en 1952.

En el país hubo ocho centros productores de concentrado de uranio, cinco operados por la Comisión Nacional de Energía Atómica y tres por empresas privadas estos fueron: Planta Córdoba, Complejo Fabril Malargüe, Complejo Minero Fabril Tonco, Complejo Minero Fabril Pichiñán, Complejo Minero Fabril San Rafael, Complejo Fabril Los Gigantes, Complejo Fabril La Estela, Complejo Minero Fabril Los Colorados (ver ubicación en Anexo1).

La producción histórica en la Argentina fue de 2540819 kilogramos de uranio como concentrado, de los cuales el 88,7% fue procesado por instalaciones operadas por la Comisión Nacional de Energía Atómica y el 11,3% por empresas privadas.

Las toneladas procesadas por cada complejo se detallan a continuación:

Centros productores de concentrados de uranio	Ubicación (Provincia)	Toneladas Procesadas
Planta Córdoba	Córdoba	18 000
Complejo Fabril Malargüe	Mendoza	710 000
Complejo Minero Fabril Tonco	Salta	460 000
Complejo Minero Fabril Pichiñán	Chubut	145 000
Complejo Minero Fabril San Rafael	Mendoza	1 700 000
Complejo Minero Fabril Los Gigantes	Córdoba	2 400 000
Complejo Minero Fabril La Estela	San Luis	70 000
Complejo Minero Fabril Los Colorados	La Rioja	155 000
	Total	5.658 000

Los procesos empleados para la recuperación de uranio fueron: Lixiviación convencional mediante la cual se procesaron 600.000 toneladas de mineral (10,6%) y por lixiviación en pilas con la cual se procesaron 5.058.000 toneladas de mineral (89,4%).¹

¹ 2003.H.C. Plaza. La industria del uranio. Seguridad Radiológica, no 22, p. 16-21.

1.6.1 Tecnologías implementadas para el procesamiento del mineral de uranio en Argentina:

➤ Planta Córdoba (1952-1977):

La finalidad de este complejo fue la del estudio y aplicación a escala piloto de métodos de lixiviación y purificación para la obtención del producto final de “yellow cake”. Esta planta comenzó su actividad en 1952, procesando minerales provenientes de distintos yacimientos (Mendoza, San Luis y Córdoba) y el retratamiento de concentrados primarios provenientes de la Estación de Lixiviación de “Don Otto” en Salta para llegar a la obtención de “yellow cake”.

El esquema empleado en esta planta, para el tratamiento de las diferentes menas fueron: lixiviación por percolación y lixiviación por agitación, sometiéndose luego los líquidos fértiles clarificados a una acción de complejamiento directo mediante carbonato de sodio. El complejo soluble uranil-tricarbonato de sodio era separado de las impurezas y la solución filtrada era acidificada y sometida a ebullición dando lugar a la precipitación del diuranato de sodio.

La extracción del uranio de los preconcentrados provenientes de “Don Otto se realizaban con solventes en mezcladores-sedimentadores de tipo compacto.

Esta instalación operó durante 7 años con un índice de producción del orden de 10.000 Kg anuales de U_3O_8 como “yellow cake”.

➤ Complejo Fabril Tonco (Estación de lixiviación Don Otto) (1964-1981):

A 150 Km de la ciudad de Salta se construyeron en 1964 instalaciones en las cuales se desarrollaron a nivel industrial las técnicas de extracción de uranio mediante la lixiviación en pilas o “heap leaching”. Dichas instalaciones fueron ampliadas en 1971 y trabajaron hasta 1981, cuando se agotaron las reservas del yacimiento Don Otto.

La mena era triturada groseramente (30% entre 12 y 50 mm y 70% de 12mm). Cada pila tenía una capacidad de carga de 2.000 toneladas. Su geometría era la de un paralelepípedo de 36m de largo, 8m de ancho y una altura media de 4m, con una suave inclinación hacia uno de sus lados. Las pilas se construían sobre planchadas impermeabilizadas. Se construyó un cerco perimetral para

contener a las pilas con parantes de madera y con tejido de alambre y finalmente, sobre este último, se colocaron sucesivas bandas de fieltro asfáltico.

Entre la superficie impermeabilizada y el mineral apilado se dispuso un lecho filtrante de canto rodado, que permitía el drenaje de los líquidos. Estos se colectaban en tanques de fibro-cemento recubiertos con pintura asfáltica.

La solución lixiviante era ácido sulfúrico diluido a pH 1,2, esta solución se vertía sobre la superficie de cada pila, regulándose la velocidad de percolación mediante una capa de arcilla de espesor variable, dispuesta sobre el mineral. Las soluciones lixiviantes circulaban a través del mineral y se colectaba en la base de la planchada, donde el lecho de cantos rodados facilitaba el drenaje normal. En el tanque colector se ajustaba el pH de la solución y se recirculaba por bombeo a la superficie de la pila.

La solución se recirculaba hasta obtener la máxima solubilización del uranio presente en el mineral. Luego se lavaban las pilas con una solución fresca de ácido sulfúrico a pH 1,2 y las soluciones fértiles se precipitaban con lechada de cal, el producto conteniendo entre 1 y 3% de uranio, se despachaba como preconcentrado cálcico a la Planta de Córdoba, para la obtención de "yellow cake".

La capacidad de producción fue de 15.000 a 20.000 t de mineral por año.

➤ **Complejo Fabril Malargüe:**

La operación de la Fábrica Malargüe se divide en tres períodos totalmente diferentes:

1º Primera Planta (1954-1960):

Comenzó a operar en una pequeña escala y su capacidad era de 10t de mineral por día.

La recuperación del uranio se realizaba sobre la fracción gruesa del mineral triturado a 4mm, mediante percolación en cubas, con agregado de ácido sulfúrico y oxidante y reciclado de la solución lixiviante. Este método solo era aplicable a los minerales cuprouraníferos de la parte superficial de la Mina "Huemul".

Luego de la eliminación del hierro, por adición de caliza hasta pH 2,7 y posterior filtración, la solución resultante se neutralizaba con hidróxido de sodio, obteniéndose un precipitado de uranio y cobre "torta verde", de la que

separaba el uranio con una solución caliente de carbonato de sodio, manteniéndose el cobre como un precipitado de óxidos “torta negra”.

De la solución con el uranio, previa neutralización con ácido sulfúrico y precipitación de uranio con solución de hidróxido de sodio, se obtenía un concentrado sódico con un 50 a 60% de U_3O_8 .

Los rendimientos de recuperación eran del 70% para el uranio y del 86% para el cobre.

2º Planta Convencional (1961-1978):

Comenzó a operar a fines de 1964, con una capacidad de tratamiento de 100t de mineral por día.

La Fábrica se abasteció con una mezcla de mineral (25% del sector Huemul y 75% de Agua Botada), cuya ley media fue de 1,68% de U_3O_8 y 9% de Cu. El total de mineral procesado fue de 167.000t con 283 t de U_3O_8 .

El proceso de iniciaba con una trituración primaria a malla de 50mm, almacenamiento en un silo, una trituración secundaria y molienda con molino de barras, obteniéndose un 95% de mineral a malla 35 Tyler (0,5 mm).

La pulpa proveniente del molino que contenía un 60% de sólidos, era sometida a un proceso de lixiviación ácida, con una solución de ácido sulfúrico a pH 1 y dióxido de manganeso como oxidante. La operación se realizaba en forma continua, a 50°C, en 8 cubas de madera con agitación mecánica. El tiempo total de retención era de 15 horas y la pulpa pasaba de una cuba a otra por diferencia de nivel. La operación se regulaba de manera de mantener un valor de pH=1 desde la cuba tres hasta la descarga. Además se verificaba que la fuerza electromotriz fuera mayor o igual a 450mV. Se alcanzaban rendimientos de lixiviación del orden del 93%.

Las pulpas luego pasaban a la etapa de separación sólido-líquido mediante un circuito combinado de espesadores y filtros rotativos, a vacío que operaban en contra corriente.

Las soluciones ricas en uranio se enviaban a la etapa de extracción y purificación con solventes (se utilizaban aminas terciarias).

Los rendimientos de recuperación oscilaron en el orden del 90% de U y del 80-85% de Cu.

3º Ampliación y adecuación de la Planta Convencional (1976-1986):

A principios de 1976, agotado el yacimiento Huemul-Agua Botada, se comenzó a tratar mineral del Distrito Sierra Pintada (Yacimiento “Tigre III”). Con este mineral, la capacidad de tratamiento se vio reducida,

fundamentalmente por problemas de separación sólido-líquido, a 85t/día, por lo que se realizaron obras para la adecuación y ampliación de la planta.

El mineral proveniente de Sierra Pintada poseía una ley media de 1 a 1,1% de U_3O_8 .

El nuevo proceso implementado consistió en:

El mineral era triturado mediante una trituradora de mandíbula y reducido a un tamaño menor de 50mm, luego era sometido a una trituración secundaria para reducir su tamaño a 12mm mediante un equipo tipo "Cono Symons", en dicha etapa se dosificaba en forma automática dióxido de manganeso, el cual ingresaba como oxidante en la etapa de lixiviación.

La molienda se efectuó por vía húmeda en un molino de barras, el que proporciona una pulpa con una densidad equivalente al 55% de sólidos y granulometría inferior a malla 20 (0,84 mm).

La pulpa del mineral era lixiviada por la acción de ácido sulfúrico, en una batería de cubas de madera, en caliente y con agitación mecánica, se mantuvo el número de 8 etapas de lixiviación.

En la época invernal se adicionaba vapor vivo para mantener la temperatura de lixiviación. El rendimiento de lixiviación fue superior al 90%. El consumo de ácido fue de 100 a 120 Kg/t.

La etapa de separación sólido-líquido contaba con cinco espesadores en serie, en los que se producía un efecto de lavado en contra corriente, de manera tal de que se aseguraba una mínima pérdida de uranio soluble.

Las recuperaciones del uranio de las soluciones se realizaban mediante dos líneas de recuperación, una era con resinas de intercambio iónico y la otra línea era mediante solventes aminados.

Luego se realizaba la precipitación del uranio mediante el agregado de amoníaco para la obtención del diuranato de amonio "yellow cake", el cual contenía un 82% de U_3O_8 .

Transitoriamente, durante 1977 y hasta mediados 1979, mientras se completaba la ampliación y adecuación de la planta convencional y a efectos de satisfacer los requerimientos de concentrados se construyó una instalación de lixiviación en pilas, con capacidad del orden de 50.000t de mineral/año.

Se trataban minerales de Sierra Pintada, en pilas de 10.000 a 15.000t cada una, con el mineral triturado a malla de 50mm, dispuesto sobre superficie impermeable y lechos filtrantes, se lixiviaba con soluciones de ácido sulfúrico

a pH 1, recirculando las mismas de 2 a 3 ciclos diarios, por períodos de 5 a 6 meses, hasta el adecuado agotamiento del mineral.

Las soluciones, naturalmente clarificadas, ingresaban directamente a las unidades de extracción del uranio, (resinas o solventes), completando el proceso con la precipitación a diuranato de amonio, filtración, secado y envasado del producto final.²

Esta instalación funcionó hasta fines de 1986, ya que la operación no era rentable por los costos de transporte del mineral hasta Malargüe.

Figura del Flow Sheet de la Planta Malargüe (Anexo 2)

➤ **Complejo Minero Fabril Pichiñán (1976-1981):**

La instalación estaba ubicada en la provincia de Chubut, la planta comenzó a operar en 1976, con mineral proveniente de dos pequeños yacimientos (Los Adobes y Cerro Cóndor). Esta planta desarrollaba la técnica de lixiviación en pilas, en medio de ácido sulfúrico, para la extracción del uranio. Cesó sus operaciones en 1981.

➤ **Complejo Minero Fabril San Rafael (1979-1997):**

Está ubicado a 20 Km de la ciudad de San Rafael (provincia de Mendoza), Procesó minerales provenientes del distrito uranífero Sierra Pintada, de los yacimientos "Tigre III", "Gaucha I y II", "Tigre I" y "La Terraza".

Se extrajeron 2500000 t de mineral, la planta procesó 1600 t de U un concentrado de amonio que contenía 70% de U.

La concentración del mineral básicamente consistía en: trituración, lixiviación ácida del mineral en pilas; posterior captación del uranio del lixiviado mediante resinas de intercambio iónico, y posterior precipitación con amoníaco para obtener el concentrado de uranio.

La trituración se realiza en dos etapas consecutivas, pasando en primer término por una trituradora a mandíbulas y en segundo término por una trituradora de conos, con una zaranda vibratoria intercalada para separar los finos antes de la segunda máquina. De esta manera, el mineral acondicionado granulométricamente se acumula en un silo intermedio y de allí se transporta, mediante cintas, a una tolva de carga para camiones, y luego de ser cargado

² (Mayo 1979) Fabrica Malargue, Planta de producción de concentrados de uranio, Malargue provincia de Mendoza, Comisión Nacional de Energía Atómica.

en éstos y pesado, se traslada a las pilas de lixiviación. Durante la carga, se realiza un muestreo continuo de la corriente de mineral que luego pasa a una planta de muestreo que procesa la muestra para realizar la determinación analítica del tenor químico de U contenido en el mineral (ley de carga).

El mineral triturado se llevaba a una planchada de lixiviación donde se lo acopiaba en pilas de forma tronco-piramidal, cuyo piso estaba impermeabilizado con una membrana asfáltica resistente a los ácidos y la cual tenía una pendiente adecuada para la circulación de los líquidos que atravesaba el mineral. Cada pila tenía una altura promedio de 3 metros y en la superficie superior, nivelada a cero, donde se producía el riego a manto del mineral.

El proceso de lixiviación, se llevaba a cabo mediante el riego del mineral con una solución acuosa de ácido sulfúrico de diversas concentraciones, de acuerdo a la antigüedad de la pila. La solución lixivante descendía por gravedad atravesando la masa de mineral disolviendo el uranio contenido en el mismo junto con otras impurezas asociadas. Los lixiviados que salían de las pilas eran conducidos por gravedad a través de canaletas hasta las cisternas colectoras, en las cuales se efectuaba el ajuste de acidez y se reciclaban conformando un circuito escalonado de riego que comenzaba con solución fresca sobre las pilas más antiguas (con menor tenor de U) y prosperaba hacia las más modernas con el fin de aumentar la concentración del licor en uranio.

La lixiviación duraba 10 meses de operación, luego se sacaba la pila agotada del circuito de lixiviación.

El lixiviado obtenido, con la concentración y pH adecuados, ingresaba a la planta de concentración donde previo paso por un sistema de filtración era conducido a las columnas de intercambio iónico, donde se fijaba a la resina selectiva, proceso por el cual se eliminan gran parte de las impurezas disueltas en el efluente líquido de la planta.

El licor que proviene de la elución de las resinas se los trasladaba a los precipitadores, tanques agitados con calefacción indirecta por vapor, en los cuales se producía la neutralización haciendo burbujear amoníaco anhidro en el seno del líquido, con lo que se obtenía un precipitado compuesto principalmente por diuranato de amonio.

En 1997 se completó la última partida de concentrado previo a la parada de la producción que continúa hasta la fecha, limitándose desde entonces los trabajos de mantenimiento del complejo.

Figura del Flow Sheet de la Planta de Concentrado San Rafael (Anexo 3).

➤ **Complejo Minero Fabril Los Gigantes (1982-1989):**

Para la explotación del yacimiento “Schalagintweit” (provincia de Córdoba), y la producción de concentrado comercial de uranio se contrató a una empresa privada.

El método utilizado fue el de lixiviación en pilas y recuperación por resinas de intercambio. Este complejo procesó mineral de baja ley de 0,27 Kg U/t mineral.

En 1989 al no cumplirse con la producción estipulada se rescindió el contrato con la empresa contratada por la CNEA.

➤ **Complejo Minero Fabril La Estela (1985-1990):**

La planta se ubicaba en la provincia de San Luis y procesó mineral proveniente del yacimiento “La Estela”, esta planta también fue operada por empresas privadas contratadas por CNEA.

Allí se instaló un sistema de lixiviación en pilas y una planta de recuperación de uranio por resinas de intercambio. Esta instalación poseía algunas características que hacían posible su desarme e instalación en otro sitio. Operó hasta 1989.

➤ **Complejo Minero Fabril Los Colorados (1993-1996):**

El complejo se encontraba ubicado en la provincia de La Rioja, fue operado por la misma empresa que operó el Complejo La Estela.

El tratamiento del mineral también se realizó con la técnica de lixiviación en pilas y recuperación del uranio con resinas de intercambio iónico.

El Complejo Minero Fabril Los Colorados dejó de operar en agosto de 1996, al terminarse las reservas económicamente explotables de dicho yacimiento.

Capítulo 2

Desarrollo del proceso de extracción de uranio del Yacimiento Cerro Solo

2.1 Descripción del yacimiento:

La Comisión Nacional de Energía Atómica llevó a cabo desde 1990 un proyecto de evaluación del yacimiento de uranio y molibdeno Cerro Solo.

El yacimiento Cerro Solo pertenece a un distrito uranífero, situado en la región central de la Provincia del Chubut. Los niveles mineralizados se distribuyen en las areniscas y conglomerados fluviales cretácicos del Grupo Chubut y presentan las siguientes características: un ambiente químico reducido; abundante materia orgánica; zona de máxima permeabilidad inicial determinada por la mayor proporción de las fracciones clásticas psefítica-psamítica y escasa participación de pelitas; importante concentración de sulfuros; abundancia relativa de carbonatos actuando como cemento y sellando diaclasas; canalizaciones cuyos clastos corresponden a "vulcanitas ácidas silicificadas ferruginosas".

Los minerales de uranio que se encuentran en el yacimiento son, en orden de importancia: asociación uranio-materia orgánica, Uraninita y Coffinita. El yacimiento presenta además contenidos importantes de molibdeno, presente como jordisita e ilsemannita, estrechamente relacionados con la mineralización uranífera y con la presencia de materia orgánica.

Mapa de la ubicación del Yacimiento Cerro Solo en el Anexo 4.

2.2 Desarrollo experimental

2.2.1 Consideraciones generales:

Las muestras del mineral analizadas provenientes de yacimiento Cerro Solo, contienen una ley de 0,2% de uranio y 0,1% de molibdeno con relación variable Mo/U, las concentraciones de este último permiten estudiar la potencial explotación del mismo como subproducto.

De los estudios preliminares realizados por CNEA, se concluye que se descarta la lixiviación in situ por la escasa permeabilidad de la roca portadora de la mineralización y además, por las fallas geológicas de la zona que generarían pérdidas de la solución lixivante e impacto ambiental en el acuífero.

El molibdeno se disuelve junto con el uranio tanto en la lixiviación en medio alcalino como en medio ácido y puede causar graves problemas en la etapa posterior de purificación, provocando un envenenamiento o “taponamiento” de las resinas de intercambio iónico y dificultades operativas en la extracción por solventes. Esto último ocurre cuando la solución presenta una gran concentración de molibdeno.

Basado en lo expuesto anteriormente, el estudio se ha enfocado en desarrollar dos líneas de trabajo implementando en ambas la técnica de lixiviación convencional, en tanque con agitación mecánica. Una línea de trabajo consistió en la extracción selectiva del molibdeno y del uranio mediante una lixiviación en dos etapas, logrando de esta forma una solución de uranio con muy bajo contenido de molibdeno y la otra línea consistió en una sola etapa de lixiviación para la extracción conjunta de ambos elementos, obteniendo una solución con mayor contenido de molibdeno .

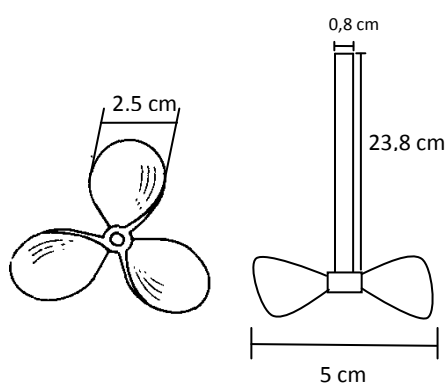
En ambas líneas de trabajo se estudió la influencia de los distintos parámetros del proceso: concentración de lixivante, concentración de oxidante, tiempo de ataque y temperatura.

El análisis químico del uranio y del molibdeno en cada una de las soluciones se realizó mediante Espectrometría de Emisión Óptica con fuente de Plasma Inductivo (ICP-OES).

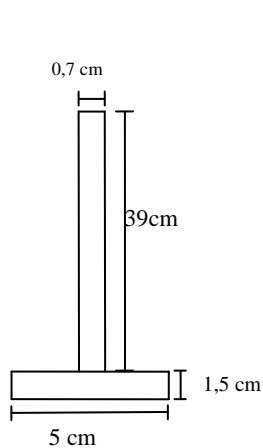
2.2.2. Equipos de laboratorio:

Los equipos para el desarrollo experimental, a escala laboratorio utilizados en ambas líneas de trabajo fueron:

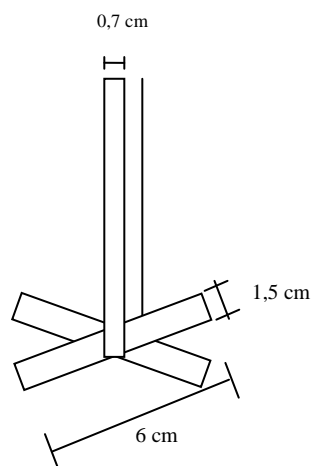
- Divisor de muestras de laboratorio Tipo PT 100 (marca Retsch).
- Máquina cribadora para análisis AS 200 (marca Retsch)
- Recipiente de lixiviación: tanque de vidrio, (diámetro: 9,5 cm, 8,8 cm y 8cm; altura: 12cm, 15cm y 13,5cm)
- Agitadores de acero AISI 316:



Agitador de acero tipo Hélice



Agitador de acero tipo Paleta



Agitador de acero tipo paleta cruzada

Figura 5: Esquema de Agitadores

En la etapa de filtración para ambos procesos se utilizó:

- Kitasatos de vidrio
- Embudos Büchner con aplicación de vacío

2.3 Lixiviación en dos etapas:

Se desarrolló una metodología de trabajo en dos etapas, con el objetivo de extraer en forma selectiva el uranio y el molibdeno, ya que este último podría ser considerado como un subproducto y además se logra obtener un lixiviado ácido final con menor relación Mo/U, de más fácil tratamiento en la etapa de purificación.

En las lixiviaciones alcalinas tradicionales se utilizan carbonatos de sodio o amonio para solubilizar al uranio mediante la formación del anión soluble uranil tricarbonato $(\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3)^{-4}$, pero como en este caso se desea solubilizar al molibdeno y no al uranio se utilizó como lixivante alcalino una solución de hidróxido de sodio para la extracción selectiva del molibdeno, luego al residuo de la primera etapa, se le realizó una lixiviación en medio ácido, con ácido sulfúrico para la extracción de uranio.

2.3.1 Lixiviación alcalina:

La lixiviación en medio alcalino requiere, para facilitar el ataque del reactivo lixivante, que el tamaño de la partícula del mineral sea lo más pequeña posible, mientras permita la fluidez suficiente en la pulpa para evitar un pobre contacto entre el líquido y la superficie del sólido, por tal motivo las muestras fueron molidas a malla menos 50 (tamaño de partícula 0,297 mm). El análisis granulométrico de las muestras estudiadas se presenta en la tabla A del Anexo 5.

Los ensayos se realizaron con una solución de NaOH al 1%, con relación sólido-líquido 1:2, se emplearon distintas concentraciones de permanganato de potasio KMnO_4 como oxidante y se variaron también la temperatura y el tiempo de ataque, para estudiar sus influencias en el rendimiento de extracción.

En esta etapa se utilizó el agitador de acero inoxidable tipo hélice, y tanque de vidrio de 9,5cm de diámetro y 12cm de altura.

Se observó que existe una relación lineal entre la concentración de oxidante utilizada en la solución de hidróxido de sodio y la ley del molibdeno presente en el mineral, si se utilizan concentraciones menores a la óptima se logran rendimientos pobres, mientras que si se utilizan concentraciones superiores a la óptima se obtienen soluciones con una coloración violeta y con presencia de precipitados.

Muestra N°	1	2	3	4
U (ppm)	2180	2600	1740	2000
Mo (ppm)	1700	950	760	1100
KMnO ₄ (%)*	0,87	0,40	0,3	0,5

*Porcentaje de oxidante en la solución de hidróxido de sodio 1%.

Tabla 1. Relación entre la concentración de KMnO₄ y la ley de molibdeno

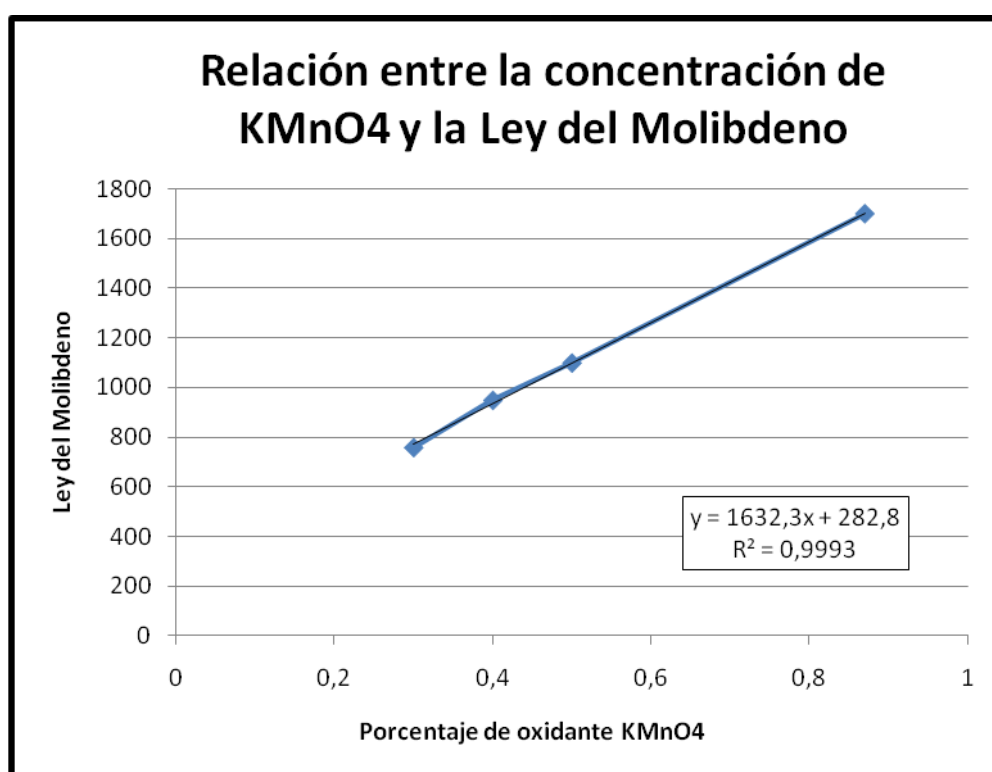


Gráfico 1: Representación lineal entre la concentración de KMnO₄ y la ley del molibdeno

Los tiempos de ataque empleados fueron de 6, 8 y 10hs a altas temperaturas y de 30 hs a temperatura ambiente. Se comprobó que el aumento del tiempo mejora los rendimientos, pero que la influencia de la temperatura es más significativa. Trabajando a temperatura ambiente, aún con 30 hs de lixiviación, el ataque no es satisfactorio, y a 50°C el rendimiento todavía es bajo. Las mejores recuperaciones de molibdeno se obtuvieron utilizando temperaturas entre 82-85°C.³

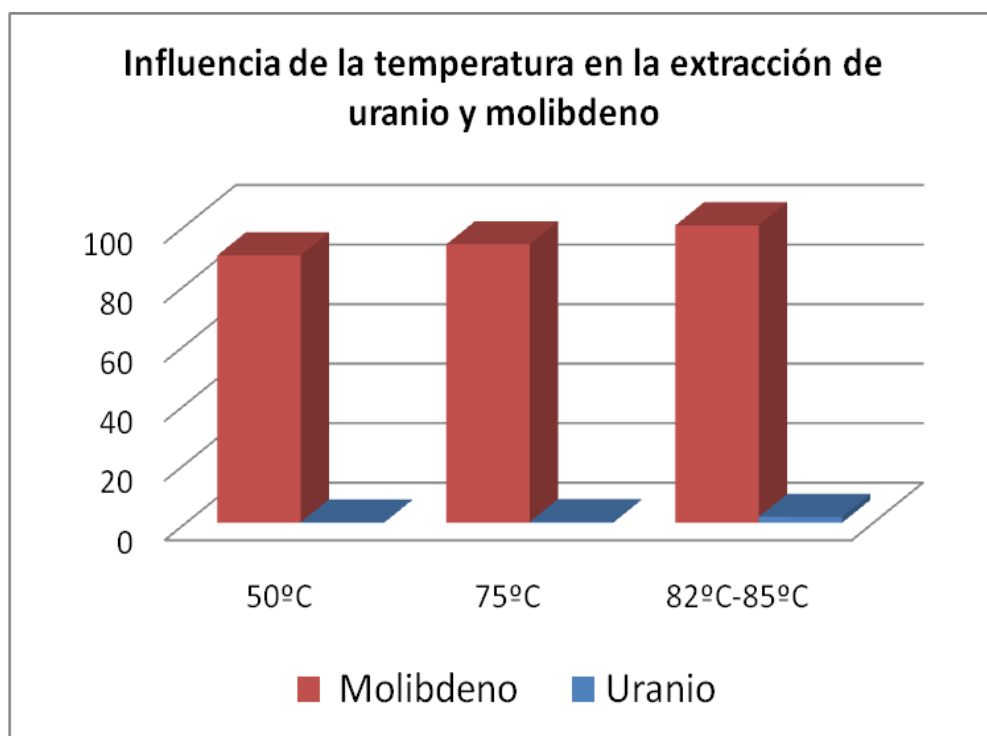


Gráfico 2: Influencia de la temperatura en los rendimientos de extracción de uranio y molibdeno.

En cada ensayo realizado las pulpas se filtraron al vacío y las tortas obtenidas se lavaron con cuatro porciones de una solución de NaOH al 0,01%. Esta etapa no presentó inconvenientes.

³ E.T. Becquart, G. Tomellini, M. J. Arias, J.C de la Fuente, Y.A. Mischia, D.E. Santa Cruz. 2009. Extracción de uranio y molibdeno de un mineral del yacimiento Cerro Solo. XXXVI Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear.

2.3.2 Lixiviación ácida:

Sobre el residuo de la lixiviación alcalina se realizó una lixiviación en medio ácido para extraer el uranio, utilizando como lixivante ácido sulfúrico (H_2SO_4) y dióxido de manganeso (MnO_2) como oxidante. Se trabajó con una concentración de sólidos del 55% p/p, se estudió la cantidad de ácido sulfúrico necesaria para neutralizar las impurezas de carbonatos presentes en el mineral, las cuales reaccionan antes que el uranio y favorecer la extracción del uranio en solución y la cantidad de oxidante óptima para el proceso. Además se varió la temperatura entre 60 y 82°C y el tiempo de ataque utilizado fue de 6 hs.

El modelo de agitador y el tanque de lixiviado utilizados en esta etapa fueron los mismos que se emplearon en la etapa alcalina.

En cada ensayo, la pulpa se filtró al vacío y la torta obtenida se lavó con una solución de ácido sulfúrico a pH= 1.

2.3.3 Diseño factorial de los ensayos realizados:

Para tener en cuenta la influencia recíproca de las variables en la extracción del uranio, se diseñaron y realizaron experiencias como un diseño factorial, técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental. En el diseño experimental factorial, se analizan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada réplica del experimento, para estudiar el efecto conjunto de éstos sobre una respuesta.

El diseño factorial se diseñó con dos niveles de tres variables, computándose los efectos de: A: cantidad de H_2SO_4 (Kg/t), B: cantidad de oxidante MnO_2 (Kg/t) y C: temperatura (°C) en la recuperación de uranio

Las condiciones de los ensayos se detallan en la siguiente tabla:

Cantidad de H ₂ SO ₄ (kg/t)	Oxidante MnO ₂ (kg/t)	Temp (°C)	Ensayo	pH	ORP (mv) (26°C)	Recup. U (%)	Recup. Mo (%)	Relación Mo/U
108	8.5	60	F1	1.54	433	78.5	2,9	0,037
		82	F2	1.08	457	71.5	7,1	0,099
	17	60	F3	1.51	456	80.5	0,2	0,002
		82	F4	1.05	470	73.5	7,4	0,100
126	8.5	60	F5	0.67	467	69.5	7,7	0,110
		82	F6	0.94	467	77.0	1,0	0,012
	17	60	F7	0.79	539	79.5	4,0	0,050
		82	F8	1.21	470	82.5	5,6	0,068

Tabla 2: Diseño factorial.

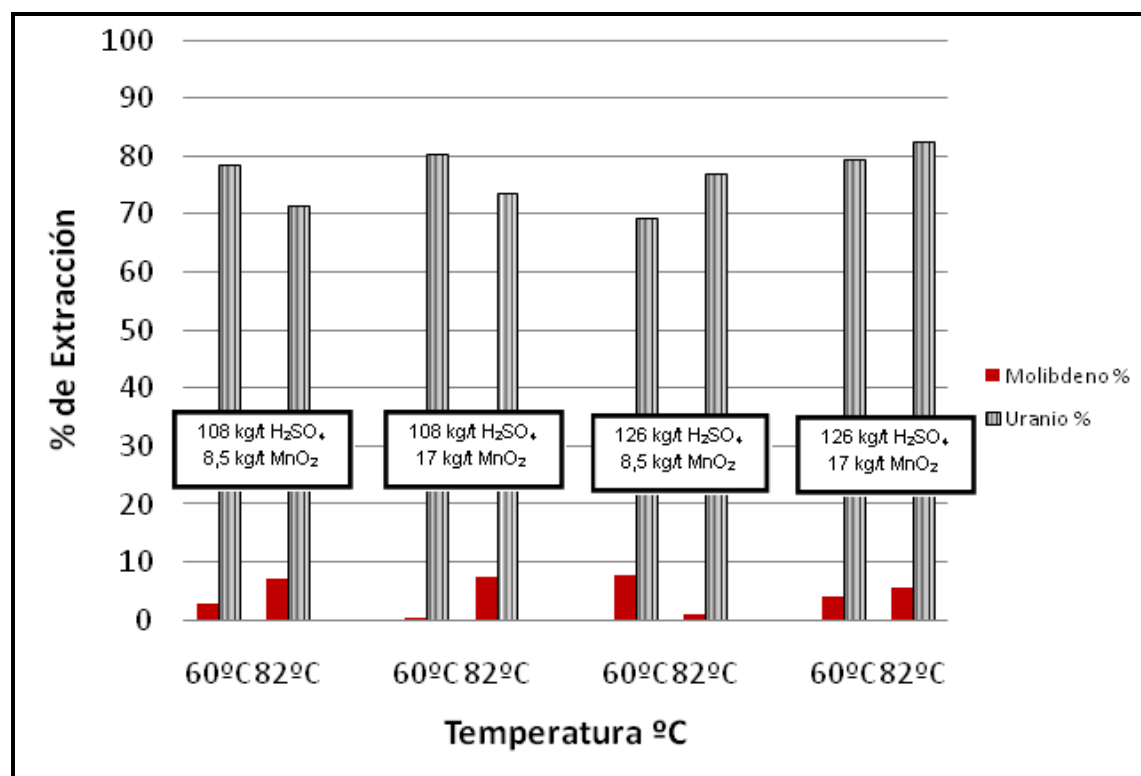


Gráfico 3: Diseño factorial

Estimación de los efectos:

Se computan los efectos de las variables A: cantidad de H₂SO₄ (kg/t), B: cantidad de oxidante (kg/t), C: temperatura (°C) en la recuperación de uranio y molibdeno.

Para el uranio:

$$\text{Efecto A: } (-(78,5+71,5+80,5+73,5) + (69,5+77,0+79,5+82,5))/4 = 1,13$$

$$\text{Efecto B: } (-(78,5+71,5+69,5+77,0) + (80,5+73,5+79,5+82,5))/4 = 4,88$$

$$\text{Efecto C: } (-(78,5+80,5+69,5+79,5) + (71,5+73,5+77,0+82,5))/4 = -0,88$$

Para el molibdeno:

$$\text{Efecto A: } (-(2,9+7,1+0,2+7,4) + (7,7+1,0+4,0+5,6))/4 = 0,18$$

$$\text{Efecto B: } (-(2,9+7,1+7,7+1,0) + (0,2+7,4+4,0+5,6))/4 = -0,38$$

$$\text{Efecto C: } (-(2,9+0,2+7,7+4,0) + (7,1+7,4+1,0+5,6))/4 = 0,75$$

	Efecto A	Efecto B	Efecto C
U	1,13	4,88	-0,88
Mo	0,18	-0,38	0,75

Tabla 3: Efectos del diseño factorial

Los resultados obtenidos muestran que el aumento en la cantidad de ácido produce un efecto positivo moderado en la recuperación del uranio y algo menor en la recuperación del molibdeno. Por otra parte, el efecto del aumento en la cantidad de oxidante es muy positivo para el uranio pero negativo para el molibdeno.

En cuanto a la temperatura, se observa un efecto negativo para la extracción de uranio, pero favorable para el molibdeno.

Análisis de los efectos combinados:

	Efecto A	Efecto B	Efecto C	AB	BC	AC
U	+	+	-	+	-	-
Mo	+	-	+	-	-	+

Tabla 4: Resultados del cálculo de los efectos combinados.

La combinación del aumento de ácido como del oxidante (AB) mejora la extracción del uranio favoreciendo la separación uranio-molibdeno.

Se observa un efecto negativo para la extracción de uranio al aumentar la concentración de ácido y temperatura (AC), pero positivo para el molibdeno, siendo no favorable para la extracción de uranio libre de molibdeno. El aumento del oxidante acompañado con el aumento de la temperatura (BC) es negativo para ambos elementos.

Para comprobar los resultados obtenidos del análisis de los efectos, se realizó un ensayo aumentando la concentración del ácido en las condiciones de mayor temperatura y concentración de oxidante.

	F8	Ensayo 1
H2SO4 (Kg/t)	126	200
MnO2 (Kg/t)	17	17
Temp. (°C)	82	82
Tiempo (hs)	6	6
pH	1,21	1,37
ORP	470	438
Extra. U %	82,5	93,0
Extra. Mo %	5,6	3,4
Mo/U	0,068	0,037

Tabla 5: tabla comparativa de los ensayos con aumento de ácido.

Se comprueba que el aumento de ácido mejora la extracción del uranio, logrando una solución con menor contenido de molibdeno.

Conclusiones de la línea de trabajo:

Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios, en la primera etapa de lixiviación alcalina se lograron rendimientos del 96% de extracción para el molibdeno, con una muy baja pérdida de uranio. En la etapa ácida los resultados del diseño factorial se aplicaron en un ensayo posterior llegándose a extraer el 93% del uranio siendo la relación Mo/U presente en la solución de 0,037.

2.4 Lixiviación en una etapa

El esquema de trabajo diseñado consiste en una lixiviación ácida convencional en tanque con agitación mecánica, en una etapa, para extraer uranio y molibdeno en forma conjunta. El objetivo de este estudio es simplificar la etapa de lixiviación y reducir sus costos. Será objeto de la etapa de purificación comprobar si es posible tratar el lixiviado obtenido, con mayor relación Mo/U.

Se trabajó con minerales molidos a malla menos 20 (tamaño de partícula 0,840 mm), ya que la lixiviación en medio ácido, no requiere una molienda muy fina.

El análisis granulométrico de la muestra de mineral tratada se presenta en la tabla B del Anexo 5.

Los ensayos se realizaron empleando pulpas más densas (70% de sólido en pulpa), como mejora del proceso y se variaron los distintos parámetros de operación: temperatura, concentración de reactivo lixivante, concentración de oxidante.

2.4.1 Lixiviación Ácida:

La lixiviación se realizó empleando ácido sulfúrico como reactivo lixivante y dióxido de manganeso como oxidante, el tiempo de ataque fue de 6 hs, la temperatura se varió entre 40 y 60°C.

Recipiente de lixiviación: tanque de vidrio.

Agitador de acero AISI 316.

2.4.2 Determinación del modelo de agitador y geometría del tanque

Al cambiar la densidad de la pulpa del mineral y ser ésta más densa se realizaron ensayos para determinar las mejores condiciones de agitación y tamaño de tanque que permitan un buen mezclado de la pulpa.

Las condiciones de acidez, concentración de oxidante, temperatura y tiempo de lixiviación fueron las mismas en todos los ensayos, se variaron los modelos y tamaños de agitador y tanque, resultados se detallan en la tabla 4.

	LAG A	LAG B	LAG C
Tipo de Agitador	Paleta doble en cruz Longitud total: 6 cm	Paleta doble en cruz Longitud total: 6 cm	Paleta Simple Longitud total: 5 cm
Tanque de vidrio	Diámetro: 8,8 cm Altura: 15 cm	Diámetro: 8 cm Altura: 13,5 cm	Diámetro: 8 cm Altura: 13,5 cm
Extra. U %	80,9	85,0	87,5
Extra. Mo %	69,8	72,9	78,2

Tabla 6: Influencia del tamaño y modelo de agitador y tanque de lixiviación en los rendimientos de extracción.

Durante los ensayos se observó que al utilizar el agitador de paleta doble en cruz y el tanque de 6 cm de diámetro no se lograba una buena agitación quedando pulpa pegada en la pared del tanque, al cambiar el tamaño del recipiente mejoró la agitación pero seguía quedando pulpa adherida a la pared sin ser mezclada. Cuando se reemplazó el agitador por el modelo de paleta simple se logró una buena agitación de la pulpa, mejorando aún más los rendimientos, por tal motivo se eligieron el modelo de agitador de paleta simple y el tanque de 8 cm de diámetro y 13,5 cm de altura para realizar los ensayos posteriores.

2.4.3 Ensayo Factorial

Se realizó un esquema de diseño factorial de dos niveles de tres variables ($2^3 = 8$ ensayos) para ensayar la dependencia del porcentaje de extracción del uranio y del molibdeno con cada variable. Las condiciones de los ensayos se detallan en la tabla 5.

Cantidad de H ₂ SO ₄ (kg/t)	Oxidante MnO ₂ (kg/t)	Temperatura (°C)	Ensayo	pH	ORP(mv) (26°C)	Recup U (%)	Recup Mo(%)	Relación Mo/U
160	5	40	A1	0,18	497	87,5	78,2	0,56
		60	A2	0,38	456	92,2	79,2	0,55
	20	40	A3	0,55	643	93,1	83,1	0,56
		60	A4	0,59	561	92,7	81,8	0,55
175	5	40	A5	0,28	484	89,7	78,2	0,55
		60	A6	0,27	450	89,9	78,7	0,55
	20	40	A7	0,40	616	87,7	78,8	0,57
		60	A8	0,49	610	87,7	82,2	0,56

Tabla 7: Diseño Factorial

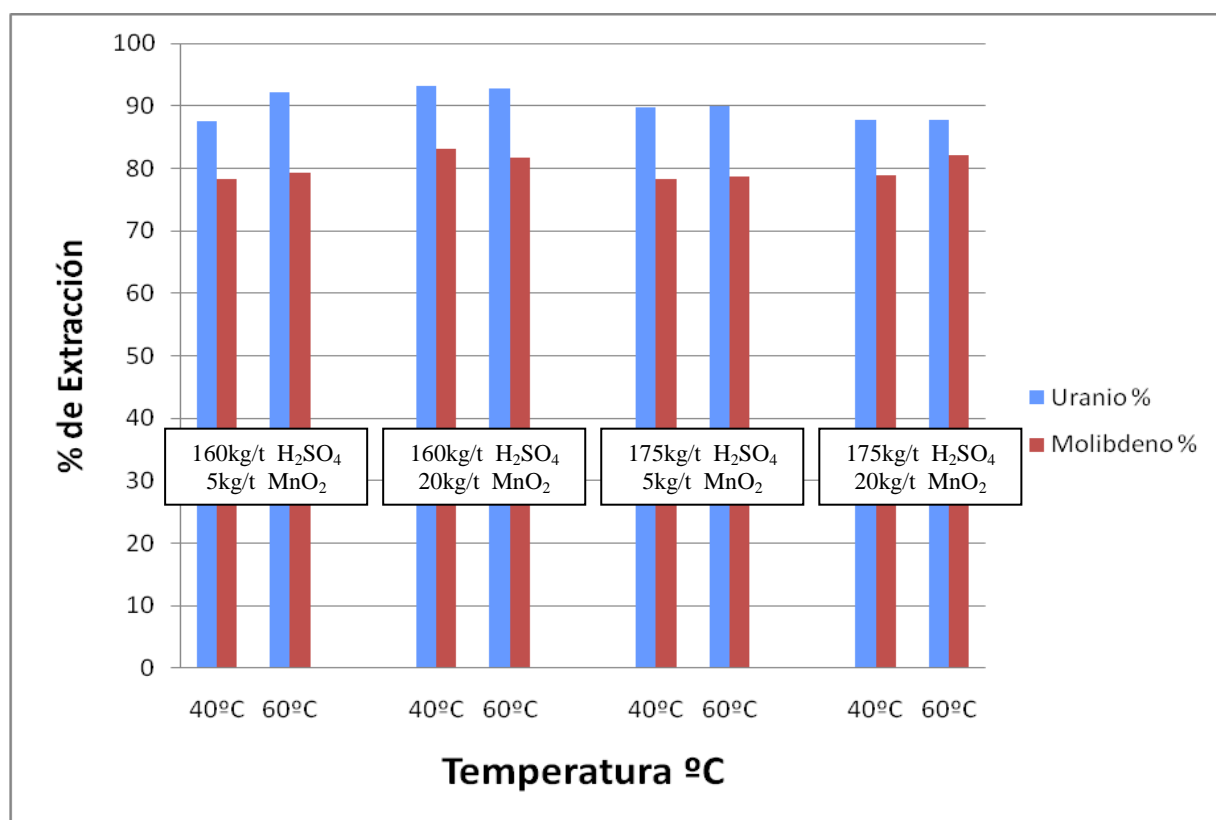


Gráfico 4: Diseño Factorial

Se computan los efectos de las variables A: cantidad de H₂SO₄ (kg/t), B: cantidad de oxidante (kg/t), C: temperatura (°C) en la recuperación de uranio y del molibdeno.

Para el uranio:

$$\text{Efecto A} = (-(87,5+92,2+93,1+92,7) + (89,7+89,9+87,7+87,7))/4 = -2,6$$

$$\text{Efecto B} = (-(87,5+92,2+89,7+89,9) + (93,1+92,7+87,7+87,7))/4 = 0,5$$

$$\text{Efecto C} = (-(87,5+93,1+89,7+87,7) + (92,2+92,7+89,9+87,7))/4 = 1,1$$

Para el molibdeno:

$$\text{Efecto A} = (-(78,2+79,2+83,1+81,8) + (78,2+78,7+78,8+82,2))/4 = -1,1$$

$$\text{Efecto B} = (-(78,2+79,2+78,2+78,7) + (83,1+81,8+78,8+82,2))/4 = 2,9$$

$$\text{Efecto C} = (-(78,2+83,1+78,2+78,8) + (79,2+81,8+78,7+82,2))/4 = 0,9$$

Se puede observar que el aumento de la concentración de ácido tiene efecto negativo en la extracción tanto de uranio como de molibdeno. El aumento de oxidante es más favorable para la extracción de molibdeno y en menor medida para la de uranio. El incremento de la temperatura tiene un efecto favorable más significativo en el uranio que en el molibdeno.

Análisis de los efectos combinados:

	Efecto A	Efecto B	Efecto C	AB	BC	AC
U	-	+	+	-	+	-
Mo	-	+	+	-	+	-

Tabla 8: Resultados del cálculo de los efectos combinados.

Los resultados muestran que el efecto combinado del aumento de ácido acompañado con el aumento de oxidante (AB) no es favorable ni para la extracción de uranio ni para la del molibdeno, así como tampoco el aumento de ácido acompañado con el aumento de temperatura (AC). Por otra parte se verifica en los cálculos que la combinación del aumento de oxidante con el aumento de la temperatura si es favorable para ambas extracciones.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, sumados a los valores muy bajos de pH obtenidos, se efectuaron dos ensayos disminuyendo aún más la concentración de ácido, en las condiciones extremas de temperatura y concentración de oxidante empleadas en el factorial. Los resultados se presentan en la tabla 7.

	LAG D	LAG E
H2SO4 (Kg/t)	130	130
MnO2 (Kg/t)	5	20
Temp. (°C)	40	60
Tiempo (hs)	6	6
Tipo de Agitador	Paleta Simple Longitud total: 5 cm	Paleta Simple Longitud total: 5cm
Tanque de vidrio	Diámetro: 8 cm Altura: 13,5 cm	Diámetro: 8 cm Altura: 13,5 cm
pH	0,52	0,9
ORP(mV)	480	584
Extra. U %	84,7	97,2
Extra. Mo %	73,6	81,6
Mo/U	0,54	0,54

Tabla 9: Rendimientos de extracción en ensayos realizados con menor contenido de ácido.

Al disminuir la concentración de ácido se puede observar que el efecto combinado del aumento de oxidante y de temperatura es muy positivo tanto para la extracción de uranio como para la del molibdeno.

En esta línea de trabajo las pulpas fueron filtradas al vacío y la tortas obtenidas se lavaron con 4 porciones de una solución de ácido sulfúrico a pH=1.

Conclusiones de la línea de trabajo:

Los resultados obtenidos mediante esta metodología fueron muy satisfactorios, se logró obtener altos rendimientos de extracción, 97% para el uranio y 81,6 % para el molibdeno, utilizando el menor consumo de ácido de 130 Kg/t. La relación Mo/U presente en la solución es de 0,54.

Conclusiones:

Se demostró la factibilidad de ambos procesos estudiados. Con el proceso empleando dos etapas de lixiviación se logra una buena separación de ambos elementos y se obtiene una solución final con relación Mo/U muy conveniente para ingresar a la etapa de purificación y concentración empleando solventes. En el proceso de lixiviación ácida en una sola etapa se logran altos rendimientos de extracción tanto para el molibdeno como para el uranio, obteniendo soluciones con mayor relación Mo/U y será estudio de la etapa de purificación determinar si estas soluciones son aptas para dicho proceso.

La etapa de filtración no presentó ningún inconveniente en ambas líneas de trabajo, aún con pulpas más densas.

La elección del proceso estará sujeta a un estudio de costos.

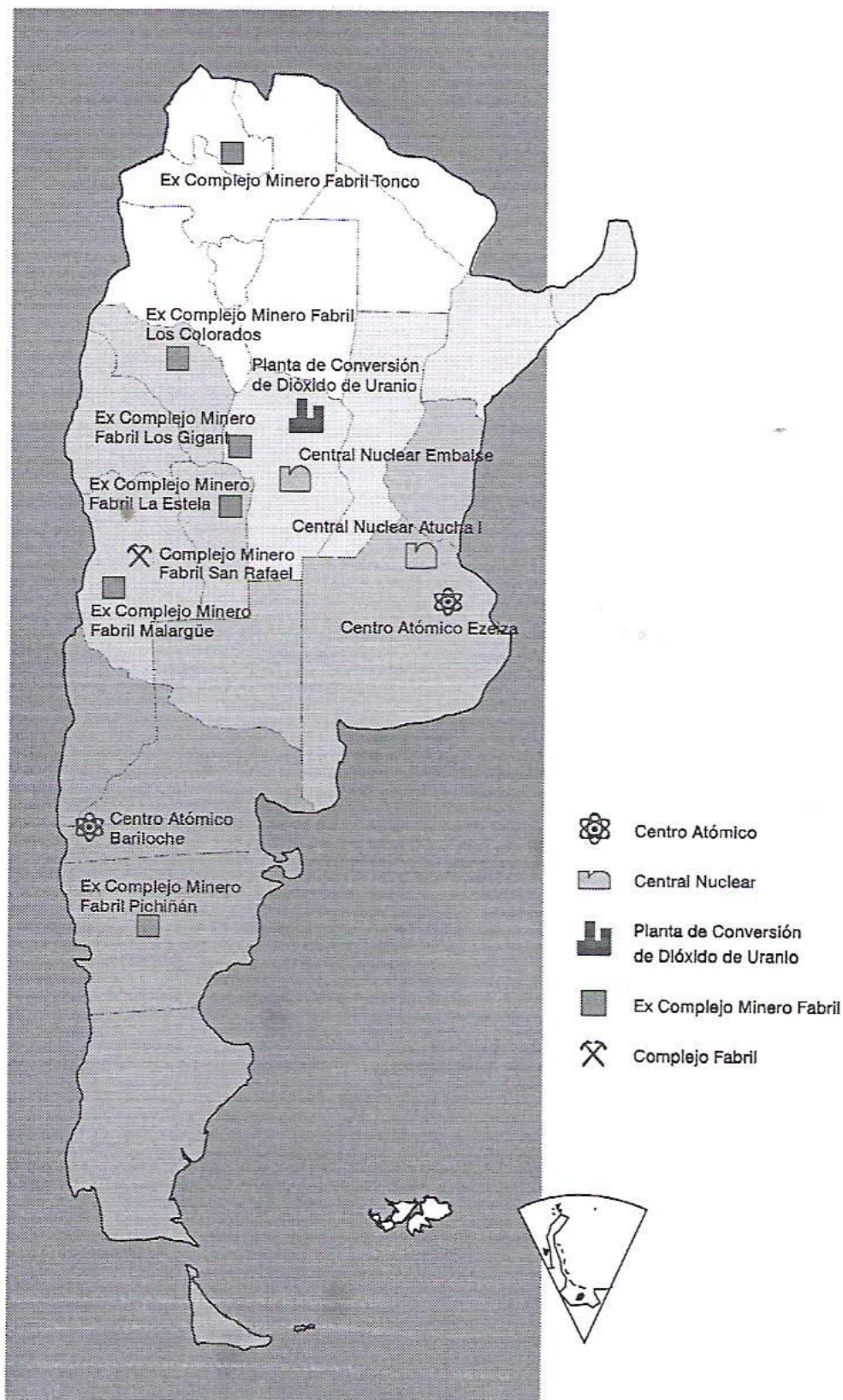
Referencias Bibliográficas:

- * Robert C. Merritt. 1971. The Extractive Metallurgy of Uranium. Colorado School of Mines Research Institute.
- * International Atomic Energy Agency. Vienna 1971. The Recovery of Uranium. Proceedings of a symposium on the recovery of uranium from its ores and other sources.
- * Desiré Luc Massart, B. G. M. Vandeginste, L. M. C. Buydens. 1997. Handbook of Chemometrics and Qualimetrics, Volumen 20. Parte 1.
- * P.M. Stipanovic, R.C. Coppa, E.G. Macchiaverna y J.M. García Bourg. 1970. La Industria del uranio en la Argentina: Presente y Futuro.
- * Comisión Nacional de Energía Atómica. Dirección de Suministros Nucleares. 1979. Fabrica Malargüe, Planta de producción de concentrado de uranio.
- * H.C. Plaza. 2003. La industria del uranio. Seguridad Radiológica, no. 22, p. 16-21.
- * P. Navarra. S. Aldebert. 2005. Actualidad del Complejo Minero Fabril San Rafael. Comisión Nacional de Energía Atómica.
- * E.T. Becquart, G. Tomellini, M. J. Arias, J.C de la Fuente, Y.A. Mischia, D.E. Santa Cruz. 2009. Extracción de uranio y molibdeno de un mineral del yacimiento Cerro Solo. XXXVI Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear.
- * Proyecto Cerro Solo. Provincia de Chubut. Un emprendimiento provisorio. Disponible en internet:
<http://caebis.cnea.gov.ar/geologia/cerrsolo/FOLLETO.htm>.
- * In Situ Uranium Recovery Technology. Disponible en internet:
www.uraniumresources.com/technology/uri_tech.

Anexos

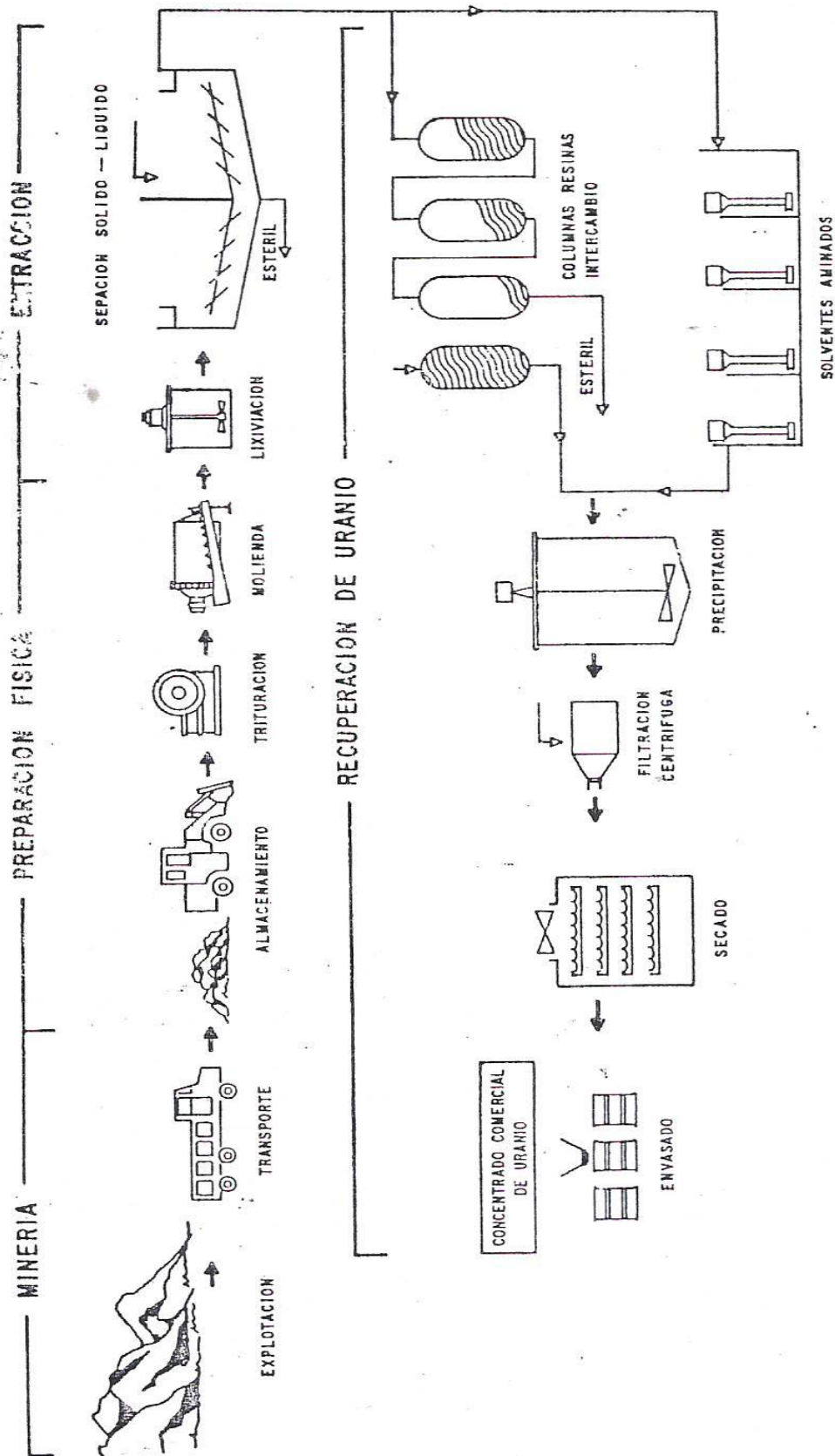
Anexo 1:

Complejos minero fabriles productores de concentrado de uranio.



Anexo 2:

Diagrama de flujo de Planta Malargüe

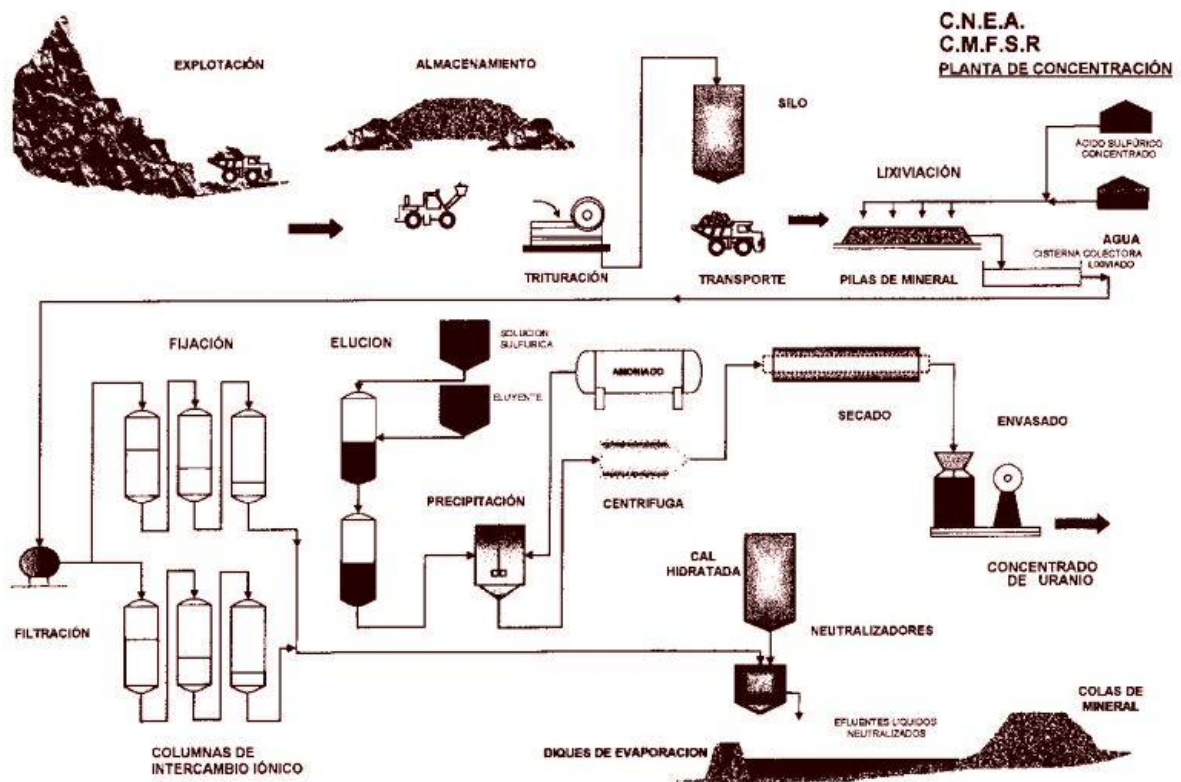


C. N. E. A.

PLANTA MALARGÜE
FLOW - SHEET

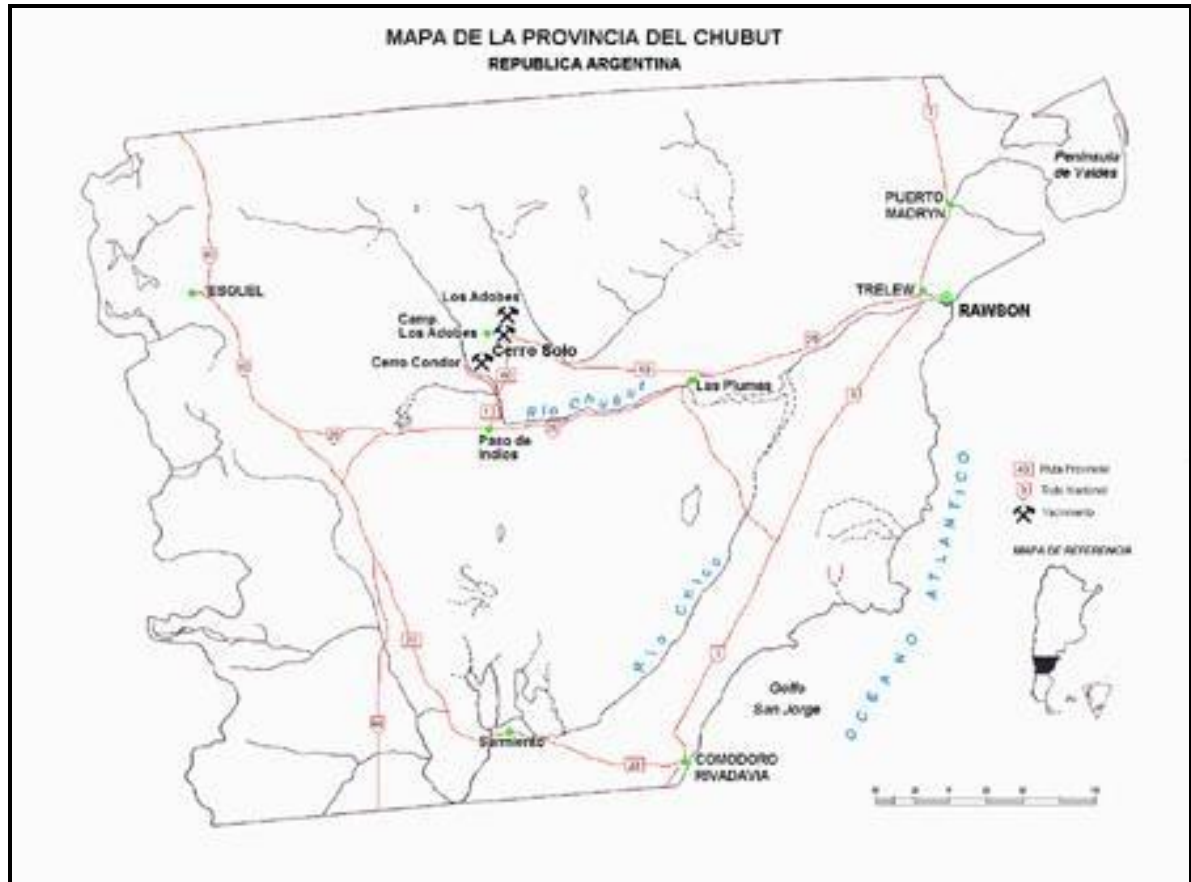
Anexo 3:

Diagrama de flujo de la Planta de Concentrado San Rafael



Anexo 4:

Mapa de la ubicación del Yacimiento Cerro Solo.



Anexo 5:

Tabla A: Análisis granulométrico de las muestras estudiadas en la línea de lixiviación en dos etapas:

	Masa acumulada (%)		
Tamiz	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
# 20	0,3	0,3	0,03
# 50	19,3	0,9	0,14
#70	62,3	22,3	51,7
#100	86,3	80,1	92,2
#200	96,5	97,6	97,1
-#200	100,1	99,7	100,0

Tabla B: Análisis granulométrico de la muestra de mineral utilizada en la línea de una etapa de lixiviación.

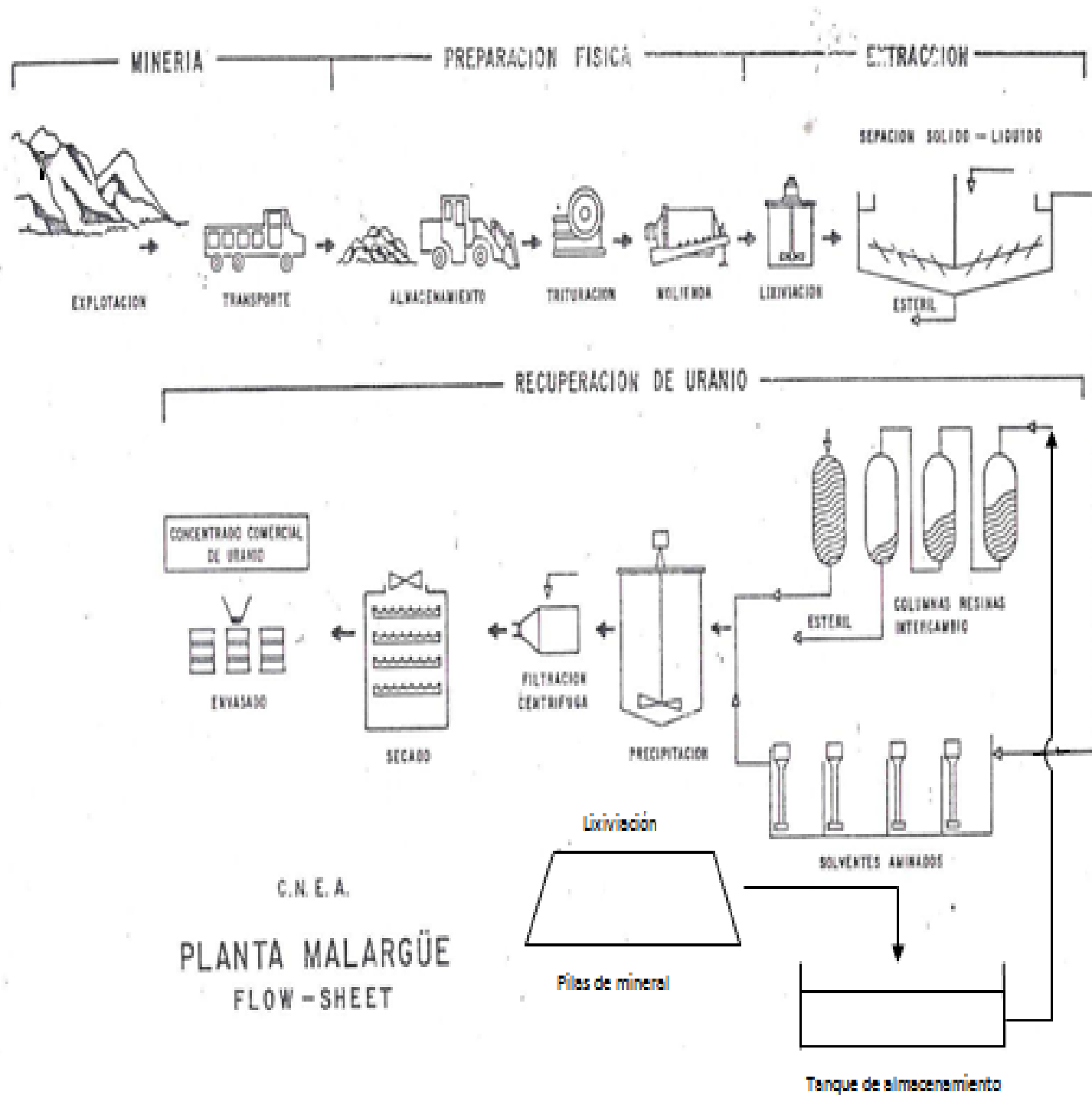
Tamiz	Masa acumulada (%)
# 20	0
# 50	54,2
#70	84,2
#100	98,8
#200	99,5
-#200	99,8
-#-270	100,0

Aclaraciones

Complejos mineros fabriles productores de concentrado de uranio:

En el complejo minero fabril Tonco (estación de lixiviación Don Otto) se instaló en 1971 una planta de purificación con resinas de intercambio iónico, para el tratamiento de las soluciones provenientes de la etapa de lixiviación en pilas, logrando completar el proceso para la obtención del concentrado de uranio por el método de precipitación invertida por agregado de amoníaco. Esta planta procesó mineral hasta 1981.

Diagrama de flujo de Planta Malargüe



Transitoriamente, durante 1977 y hasta mediados de 1979, mientras se completaba la ampliación y adecuación de la planta convencional, se operó una instalación de lixiviación en pilas, para tratar mineral proveniente de Sierra Pintada.