

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISION DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y MINAS

30 de septiembre de 2009

2429:085

P.I.M. DULCE MARIA MENDOZ PERALTA

**PROCESOS HIDROMETALURGICOS EN LA
MINERIA DE ORO, PLATA, COBRE Y URANIO.**

Por este conducto le informo que después de presentar ante los miembros de ACADEMIA DE MINAS, su solicitud de aprobación de tema de TESIS: "PROCESOS HIDROMETALURGICOS EN LA MINERIA DE ORO, PLATA, COBRE Y URANIO" usted propone para obtener el título de INGENIERO MINERO, me es grato haber de conocimiento que hemos acordado la propuesta que nos ha enviado, a fin de brindarle la oportunidad de presentar el examen profesional según lo establecido por la normatividad vigente.

TESIS

Asimismo le informo que la Academia Revienta de Tesis a la que integra como sigue:

- DIRECTOR: DR. SERGIO ALAN MORENO ZAJUSTA
ASESOR: M.A. VICTOR MANUEL CALLES MONTUJO
ASESOR: M.C. JUAN MANUEL RODRIGUEZ ZAVALA

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MINERO**

Aprovecho la oportunidad para agradecer su esfuerzo para el bien de la institución.

ATENTAMENTE
EL PRESIDENTE DE LA ACADEMIA DE MINAS

**PRESENTA:
DULCE MARIA MENDEZ PERALTA**

DR. SERGIO ALAN MORENO ZAJUSTA
PRESIDENTE, ACADEMIA DE MINAS

HERMOSILLO, SONORA.

OCTUBRE DE 2009

INDICE

1. ANTECEDENTES.....	2
1.1 .Fundamentos básicos de la minería química.....	6
1.1.2. Geología y Mineralogía.....	7
1.1.3. Agentes Lixiviantes.....	9
1.1.4. Reacciones Químicas.....	12
2. SISTEMAS DE MINERIA POR LIXIVIACION.....	14
3. MINERIA DE LIXIVIACION EN SITIO (IN SITU).....	17
4. MINERIA DE LIXIVIACION EN VERTEDEROS (DUMP LEACHIN).....	19
4.4.1. Técnicas de Vertederos.....	21
4.4.2. Soluciones Lixiviantes.....	24
4.4.3. Características de los sistemas de riego.....	25
5. MINERIA DE LIXIVIACION EN ERAS O PILAS (HEAP LEACHING).....	27
5.5.1. Características de los sistemas de eras.....	29
5.5.2. Emplazamiento.....	30
5.5.3. Diseño de eras.....	31
5.5.4. Membranas de sellado.....	33
5.5.5. Técnicas de construcción.....	34

6. MINERIA DE LIXIVIACION DINAMICA (DYNAMIC LEACHING).....	37
7. LIXIVIACION DE MINERALES DE ORO Y PLATA.....	40
7.7.1.Aspectos químicos del proceso.....	43
7.7.2.Equipos que se usan en la cianuración.....	53
7.7.3.Agitador de lamas.....	57
8.RECUPERACION DE SOLUCIONES.....	63
9.LIXIVIACION DE MINERALES DE COBRE.....	72
9.9.1. La lixiviación “in situ”.....	79
9.9.2. Planta ESDE.....	81
9.9.3. Precipitación electrolítica.....	87
10. TRATAMIENTO DE MINERALES DE URANIO.....	91
10.10.1. Proceso de precipitación-pre concentración.....	93
10.10.2. Trituración y clasificación selectiva.....	95
10.10.3.Proceso de concentración.....	96
10.10.4.Proceso de extracción.....	99
10.10.5. Alternativas de la lixiviación de uranio.....	107
ANEXO 1.....	109
BIBLIOGRAFIA.....	116

PROCESOS HIDROMETALURGICOS EN LA MINERIA DE ORO, PLATA, COBRE Y URANIO.



Aunque durante la revolución industrial del siglo XIX se comenzó con lixiviación pudo sufrir un menor desarrollo que otras técnicas químicas, no por ello olvidarse su fuerte contribución en la producción de sales y cobre.

1. ANTECEDENTES

La propia naturaleza ha llevado a cabo el proceso de disolver algunas sustancias mineras, transportarlas y precipitarlas en depósitos de otro tipo. Una buena parte de los yacimientos sedimentarios han sufrido en mayor o menor grado un proceso químico de disolución y depreciación en su génesis.

Cabe por tanto pensar, que el hombre en su búsqueda y aprovechamiento de sustancias minerales, haya imitado a la propia naturaleza para la extracción de aquellas sustancias solubles que necesitaba. Por ello, la más antigua minería química podría ser la extracción de sal común a partir del agua del mar, por un enriquecimiento natural a base de evaporación y una precipitación a través de desecación por energía solar.

Así mismo, los antiguos mineros onubenses imitaban a la propia naturaleza de sus ríos para recuperar el cobre y los sulfatos de sus enriquecidos caudales de agua, e incluso para disolver algunos vertederos o explotaciones antiguas. No había más que comprobar cuál era el agente precipitante, que en este caso no sería difícil, a partir de la era de hierro.

Mucho mayor avance fue el descubrimiento en el siglo XVI por el minero químico onubense Alonso Barba de la técnica de la amalgamación de los metales preciosos, que permitió el fuerte desarrollo minero español de la época de Felipe II, tanto en la propia península como en todo los países americanos que en aquella época constituían el imperio español, así como el control de la producción de oro y plata del Nuevo mundo, a través de la producción y venta de mercurio.

Aunque durante la revolución industrial del siglo XIX el método de lixiviación pudo sufrir un menor desarrollo que otras técnicas mineras, no puede olvidarse su fuerte contribución en la producción de sales y cobre.

A finales del siglo XIX y comienzos del XX, nuevas técnicas de disolución revolucionan el mundo minero y otorgan prioridad a la minería sajona sobre las demás. Son el desarrollo del proceso de cianuración para la recuperación del oro y plata, la extracción del azufre por disolución a través del proceso Flach, así como la producción de aluminio a partir de la bauxita por el proceso Bayer.

Ya en este siglo, la aparición de una demanda de minerales de uranio ha producido una nueva aplicación de la técnica de disolución, para recuperar los bajos contenidos que en general tienen los yacimientos sedimentarios u otros recursos interesantes, como ciertos depósitos residuales de oro, rocas fosfáticas y lignitos.

Por último, el extraordinario valor adquirido por el oro, ha impulsado el desarrollo de la minería química para el tratamiento de depósitos pequeños o con bajos contenidos en metales preciosos.

Los procesos de lixiviación son de mucha importancia en el beneficio de minerales metálicos.

Para que un mineral metálico sea económico obtenido por el proceso de lixiviación, es necesario que haya un solvente económico que tenga las características de que sea selectivo, es decir que disuelva de una manera particular al metal o metales que se pretende recuperar y no se combine químicamente con la ganga o parte no valiosa de la roca mineral.

Las roca minerales que contienen el metal o metales por recuperar, tienen diferentes especies mineralógicas desde metales nativos, sulfuros, sulfosales, óxidos, carbonatos y otros compuestos metálicos que deben tener las características de poder ser atacados por el solvente, disolviendo éste a los metales, los que pasan de una fase sólida a una líquida, soluble en agua, la cual, separada del mineral por asentamiento o filtración, es posteriormente sometida a la acción de un precipitante que hace que los contenidos metálicos pasen a la fase

sólida, con una concentración de los metales por recuperar, siendo esta mucho mayor que la que tiene originalmente el mineral por tratar.

Estos precipitados son posteriormente tratados para obtener metales refinados. En algunos casos las soluciones líquidas son sometidas a electrólisis precipitándose los contenidos metálicos en los cátodos.

Los procesos de lixiviación son de muy antiguo conocidos. El proceso de amalgamación, conocido desde el siglo XV, es en cierto modo una lixiviación en la que los valores de oro y plata se disuelven en mercurio metálico, pero con la variable de que la amalgama, combinación de oro y plata con el mercurio, no queda en fase líquida sino sólida y es posteriormente separada del mineral molido por concentración gravimétrica. Este proceso lo trataremos más adelante en estos apuntes.

El proceso de lixiviación de minerales de cobre es muy antiguo. Desde mediados de siglo XVIII se usa en Río Tinto en España y se dice que en Croacia desde el siglo XVII.

Actualmente el proceso de lixiviación es muy usado y tiene tendencia de mayores aplicaciones, por ser más económico, y en general, menos contaminante que en los casos que tiene que usarse la fundición.



Los principales metales que se obtienen actualmente por lixiviación son:

Oro y plata	Usando como solvente (cianuro de sodio principalmente), pero también se pueden usar otros solventes como tiosulfato de sodio, tiourea, bromuros, etc.
Cobre	Usando como solvente aguas aciduladas con H_2SO_4 o sulfato férrico.
Cobre, níquel, cobalto y uranio	Usando como solventes sosa cáustica y carbonatos de sodio cuando los depósitos minerales contienen abundante $CaCO_3$ y $MgCO_3$.
Zinc, contenido en concentrados tostados	Usando H_2SO_4 como solvente con ayuda de calor.
Bauxitas para obtener alúmina	Usando como solvente sosa cáustica en caliente.
En concentrados de tungsteno y molibdeno	Usando como solvente sosa cáustica en caliente.
Titanio y manganeso	Con gas de cloro formando cloratos solubles con ayuda de calor.
Sales de sodio, nitratos, carbonatos, sulfatos	Usando como solvente agua
Azufre	Usando como solvente vapor de agua que licua y arrastra el S (proceso Frach)

Se está experimentando la dilución de minerales de plomo con hipoclorito de calcio pero resulta incosteable cuando hay valores de plata que no se disuelven. Trataremos cada caso por separado.

1.1 Fundamentos Básicos de la Minería Química:

En la Minería Química o Minería por Disolución, el proceso básico es Hidrometalúrgico por lixiviación estática, en el cual los reactivos o agentes lixiviantes, simples o combinados, se ponen en contacto a través de un lecho estático con la mena a tratar.

El alcance general de este método de minería abarca una serie de ciencias y tecnologías interdisciplinarias que requieren la aplicación de principios y conocimientos geológicos, químicos, físicos, bioquímicos, mineros, mineralúrgicos, económicos y en general de ingeniería de procesos básicos.

Bajo otro punto de vista, los conceptos fundamentales y puntos de partida para la realización de un proceso de Minería Química son:

- Geología, mineralogía y características físicas de los componentes del yacimiento a explotar.
- Agentes lixiviantes.
- Cinética de las reacciones químicas de la mena con el agente o agentes lixiviantes seleccionados.

El pobre conocimiento de estos tres conceptos, por una investigación inadecuada, conduce en la mayoría de los casos a escasas recuperaciones de los metales o minerales, altos costos y como consecuencia al posible cierre de la mina.

Dependiendo de la complejidad de la mena y según la evaluación de recursos y reservas del yacimiento, esta investigación puede realizarse con mayor o menor extensión y rigor, aceptando un razonable riesgo.

1.1.2 Geología y Mineralogía

Desde un punto de vista conceptual, es interesante indicar que la tecnología del proceso químico de disolución consiste, en convertir los metales o sales valiables a recuperar de una mena sólida, en un estado móvil en condiciones similares a aquellas por las que se depositaron originalmente. Es decir, debe existir una relación entre la génesis del yacimiento y el proceso químico a seleccionar.

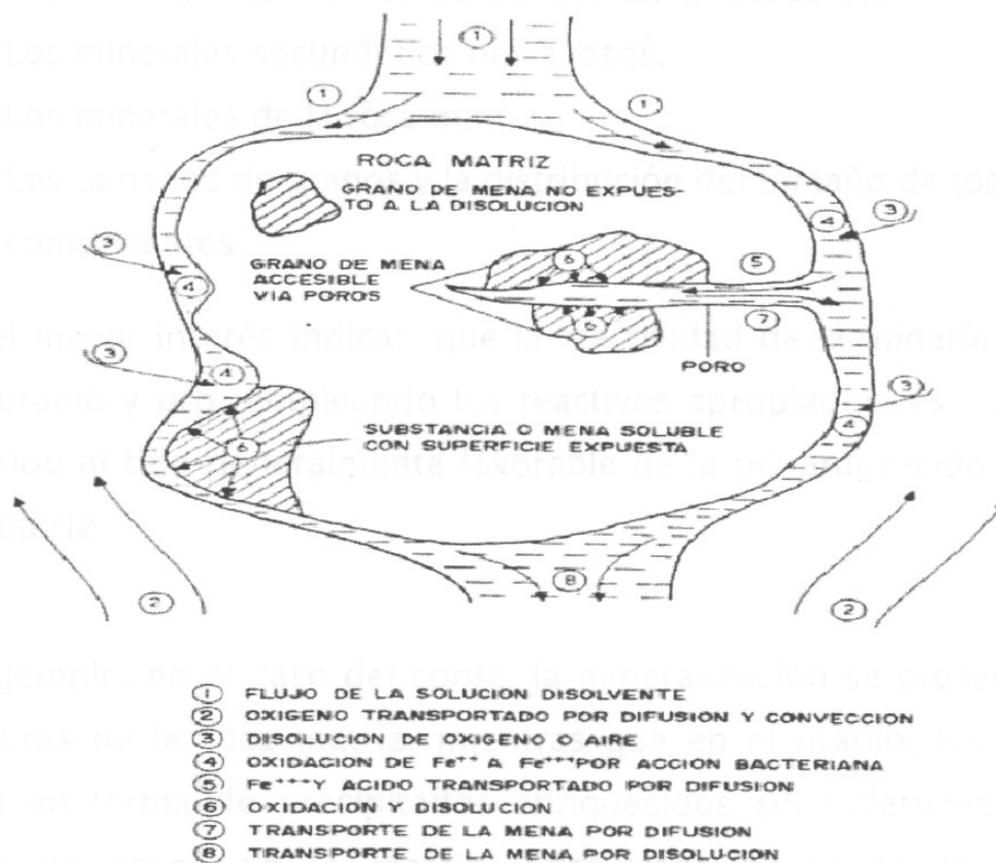


Figura 1.1. Proceso típico del sistema de lixiviación.
(Fuente: Warren Spring Laboratory. Estudio para CEE. 1981)

Por consiguiente es de gran ayuda e imprescindible en ciertos casos como en la minería en sitio, el conocimiento de la geología del yacimiento, desde el punto de vista de la posible minería por disolución.

Por otro lado, en las investigaciones mineras efectuadas hasta la fecha, es lógico pensar que se haya prestado poca atención a las leyes bajas, depósitos pequeños o de minerales complejos, pudiendo haber pasado inadvertidos ciertos recursos potenciales para la Minería Química. Por ello, la investigación minera debe prever la posibilidad de este proceso de explotación.

En cuanto a la mineralogía, esencial para cualquier proceso de tratamiento de menas, no lo es menos para la Minería Química y como datos prácticos deben llegar a conocerse.

1. Los minerales portantes de los metales a recuperar.
2. Los minerales secundarios no valiosos.
3. Los minerales de la roca matriz.
4. Los tamaños de granos y la distribución del tamaño de todos los componentes.

Es del mayor interés indicar, que la efectividad de la minería por disolución del cobre, uranio y oro, empleando los reactivos apropiados, es económicamente factible debido al tipo generalmente favorable de la mineralización de los metales en la roca matriz.

Por ejemplo, en el caso del cobre, la mineralización se presenta en macro y micro fracturas de la roca matriz, mientras que en el uranio, los valores suelen presentarse en forma de precipitados enriquecidos secundariamente cubriendo los granos de arena en la matriz. Otro caso típico es la lixiviación de minerales de oro, oxidados, en el que la mena contiene partículas de oro en tamaños de submicras depositadas en las cavidades y fracturas de la roca matriz, consistente en sedimentos silíceos, arcillosos o dolomíticos.

En todos los casos, las rocas matrices deben ser lo más porosas posible y permanecer permeables durante los ciclos de lixiviación.

1.1.3 Agentes Lixiviantes

Los reactivos, en este caso agentes lixiviantes, constituyen uno de los apartados más importantes de cualquier proceso de tratamiento de minerales, en el orden técnico y económico.

La obtención de nuevos reactivos más selectivos y más baratos pueden contribuir significativamente a las mejoras de los procesos actuales o al desarrollo de nuevos procesos en vías de experimentación. Su preparación, concentración, formas de adición y control a lo largo de los sistemas de tratamiento son vitales, con objeto de reducir su consumo (con o sin recuperación) con el máximo rendimiento del proceso.

La importancia de los reactivos hizo que en 1984 tuvieran lugar por primera vez unas conferencias, en Roma, dedicadas exclusivamente a "Reactivos en la Industria Minera". Fueron organizadas por "The Institution of Mining and Metallurgy" en asociación con el "Institutn per ir Tratamiento del Mineral"

Los métodos comunes analíticos sobre muestras del proceso en la operación industrial, suministran resultados periódicos sobre los que actúan con cierto retraso los operadores, a veces con pérdidas significativas de producción. Por ello hoy día, como en otros tipos de procesos, se tiende al análisis continuo de los flujos ("on-stream solution analysis") tomando muestras automáticamente y analizándolas en una cabina central, o al análisis directo en los mismos flujos ("in stream solution analysis") empleando técnicas instrumentales.

En una reacción química simple, con un solo reactivo, el grado de lixiviación puede ser proporcional a la concentración del reactivo, hasta un valor máximo con una cierta concentración.

Sin embargo, los sistemas de lixiviación son más complejos y pueden intervenir dos o más reactivos, dependiendo la actividad de uno de la concentración del otro; es el caso de la lixiviación de minerales de oro con cianuro que requiere la presencia de oxígeno.

Los sólidos y líquidos se preparan normalmente por disolución en agua a diversas concentraciones, dependientes de su solubilidad, estabilidad (hidrólisis) y consumo de la planta. Son los casos del cianuro, sosa caustica, cloruro sódico, ácido sulfúrico, etc.

Un caso especial lo constituye la cal viva o hidratada como regulador del pH, siendo el reactivo de mayor consumo en minería. Normalmente se suele preparar una lechada, lo cual conlleva una planta de preparación con o sin molienda, según el tamaño de grano de suministro. Hoy en día se emplea la cal micronizada fácilmente soluble en agua y que se puede añadir incluso en forma sólida al sistema, sin necesidad de preparación.

Con los reactivos gaseosos, como por ejemplo el O_2 , SO_2 , NH_3 , etc, su concentración viene limitada por las solubilidades en agua. El oxígeno en condiciones normales de presión y temperatura, solo es soluble de 4 a 10 ppm, dependiendo de la altitud de la localidad.

Para mayores concentraciones hay que recurrir a la lixiviación a presión, como es el caso de la lixiviación de los concentrados de sulfuros de níquel a presiones de 10,5 kg/ m² .La mayoría de las veces se suele emplear aire, en lugar de oxígeno. Cuando se emplea anhídrido sulfuroso o amoniaco, los tanques deben ser cerrados para evitar la inhalación por el personal.

En sistemas, donde se necesita una oxidación intensa, se emplean agentes oxidantes. También se puede realizar una lixiviación en condiciones reductoras, empleando agentes reductores.

El control de estos agentes reductores oxidantes se efectúa midiendo el potencial "redox", en las soluciones en voltios o mili voltios, es decir, la tensión que se establece, sin corriente, entre un electrodo de platino bañado por el oxidante o reductor a concentración normal y un electrodo normal de hidrógeno.

Son ejemplos de lixiviación oxidante las lixiviaciones ácidas de sulfuros de cobre y de minerales de uranio, en las cuales la oxidación con oxígeno es muy lenta y se añaden oxidantes como $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ y MnO_2 o NaClO_3 . Su adición se controla manteniendo el potencial Eh de la pulpa con valores apropiados.

Como agentes lixiviantes se incluyen también las bacterias o microorganismos, por su acción en la lixiviación estática tradicional de minerales de cobre y uranio. Hoy en día han adquirido un gran desarrollo en el tratamiento de otros minerales, por ejemplo de oro y zinc. Su control se basa principalmente en el mantenimiento de unas condiciones apropiadas de temperatura, acidez y aireación.

Conviene aclarar, que la acción de las bacterias más conocidas actualmente, como son los *Thiobacillus ferrooxidans* y *thiooxidans*, son realmente reactivos vivos oxidantes de hierro y azufre en condiciones acidas, pero no disolventes del cobre o uranio. Su crecimiento y acción a temperaturas moderadas, hacen que no sean aptas para temperaturas superiores a los 35 °C.

Un avance en este campo de la lixiviación con bacterias, lo constituye el descubrimiento de nuevos microorganismos, termofilicos, como por ejemplo las especies *Sulfolobus*, que se desarrollan a temperaturas más altas entre 50° y 80 °C.

Sin embargo, el futuro de la lixiviación bacteriana, dependerá del descubrimiento de nuevos reactivos vivos (bacterias, algas, hongos, etc.), que no se alimenten exclusivamente de hierro y azufre, sino de otros minerales. Es decir, nuevos microorganismos más selectivos. El gran avance de la flotación se debió principalmente al desarrollo de reactivos más específicos y más baratos; igual puede ser el caso de la lixiviación bacteriana y de la Biolixiviación en general.

1.1.4 Reacciones Químicas

La lixiviación estática o dinámica de los minerales o metales componentes de una mena, se efectúa siempre por la reacción química con un agente o agentes lixiviantes en medio acuoso, pasando a disolución.

Es pues una reacción química por disolución, cuyo equilibrio nos dará la solubilidad de cada componente.

Al mismo tiempo, los minerales o componentes estériles deben tener una solubilidad lo suficientemente baja para no disolverse y ser rechazados. A partir de la solución, con una aceptable concentración y grado de pureza, se recuperará el mineral o metal valioso.

Básicamente, se deben conocer las reacciones químicas de los diferentes componentes de la mena con el reactivo seleccionado, así como las variables más sensibles del sistema, tales como tamaño de grano o liberación, temperatura, pH, concentración del reactivo, etc.

Desde un punto de vista práctico, aplicable a la Minería Química, vamos a describir algunos tipos de reacciones en función de la mineralogía de la mena, agente lixivante y compuestos solubles formados, con mención de algunos principios químicos básicos.

Disolución de sales en agua POR LIXIVIACIÓN

Es la reacción química más simple, ya que el agente lixivante es el agua

Existen minerales, principalmente sales, (cloruros, sulfatos y nitratos) que se disuelven y disocian en agua según la ecuación:



Los minerales pueden ser solubles, poco solubles o insolubles. Si el mineral es soluble, la solubilidad S se expresa, a temperatura constante, por la cantidad de sólido en una disolución saturada de agua pura y en equilibrio con el sólido. Se mide en gramos por 100 cc de agua, gramos por 100 g de solución saturada o gramos por litro.

Para sustancias poco solubles, la solubilidad se expresa según una constante, llamada producto de solubilidad K_{ps} igual al producto de las concentraciones de iones disociados, elevados a sus coeficientes correspondientes.

$$K_{ps} = (A)^M \cdot (B^+)^N$$

Existen en la literatura muchas tablas sobre solubilidades de compuestos en agua, para sustancias puras, con referencia solo a la temperatura, cuyos datos a veces no concuerdan. Ello es debido a que existen una serie de factores, como veremos más adelante, que afectan al proceso de disolución, lo cual tiene mayor influencia cuando se trata de sustancias impuras como son los minerales que tratamos. Por ello dichas tablas solo pueden tomarse como referencias, a efectos cualitativos. En este sentido, en las tablas de solubilidades, aunque a veces no se indica, se suele emplear agua destilada. En la práctica industrial, el agua de tratamiento puede tener influencia en el proceso de disolución como en otros muchos procesos, por ejemplo en flotación. Es conveniente tener análisis del agua, respecto a su alcalinidad o acidez, dureza y sales disueltas, que pueden interferir o impurificar la disolución.

2. SISTEMAS DE MINERIA POR LIXIVIACION

Una de las grandes ventajas del método de minería química o por disolución, está en la posibilidad histórica de comenzar a pequeña escala con la inversión y gradualmente expande el tamaño y mejorar la recuperación, pasando hacia sistemas operativos más perfeccionados tecnológicamente.

Así los cinco sistemas operativos no son opuestos, sino que en muchas operaciones han sido complementarios y sucesivamente empleados, a medida que se iban dominando los parámetros y se tomaba la decisión de innovar, mejorando esencialmente la preparación del mineral para conseguir una cinética y recuperación mejores, que compensaba la mayor inversión necesaria. Una clasificación lógica en el tiempo y en función de los parámetros mineros básicos se muestra en la tabla .1

Preparacion sistema	Preparacion mineral	Costo de inversion	Costo de operacion	Niveles de recuperacion
1 En sitio	Fracturado soluble	pequeno	Muy bajo	Bajo:40-50%
2Vacie o vertedero	Volado o directo	Minimo	Bajo	Bajo:30-60%
3 Eras o pilas	Trituracion primaria	Medio	Medio	Medio:60-70%
4 Depositos	Trituracion secundaria	Alto	Medio alto	Alto:70-80%
5 Dinamica	Molienda	Elevado	Alto	Elevado:80-90%

Tabla 1. Métodos de lixiviación.

Si al crecer la extracción minera, se va complementando con una planta de preparación y deposición ordenada del mineral de mayor calidad que en los primeros sistemas, el proceso químico se introduce más en la propia minería,

alcanzando un mayor desarrollo tecnológico por un mayor control de todas las variables y logrando una mayor recuperación, aun a costa de una mayor inversión y costo operativo.

Generalmente, y para los productos valiosos como oro, uranio y cobre, esta compensado por una mayor recuperación del producto y una mayor vida y aprovechamiento del yacimiento.

Así en Huelva se comenzó por la natural utilización de las aguas cobrizas que desaguaban de las operaciones mineras subterráneas o cielo abierto, como si de un residuo se tratara, para recuperar su contenido o para regar con ella los vertederos de minerales marginales de poca ley y lograr un enriquecimiento secundario. Posteriormente, se paso a la construcción de pilas o montones de mineral calcinado (oxidado) y triturado para lograr una mayor recuperación.

Finalmente, se llegó a la ejecución de grandes depósitos de mineral con poca altura para regarlos o inundarlos, logrando mayor recuperaciones de cobre con costos más competitivos y menor necesidad de personal. Tan solo faltó la última etapa de una lixiviación dinámica al estilo de lo que años después se hizo para el oro y la plata de los antiguos vertederos de gossan.

Similar caso con la explotación de uranio de Shirley Bassin de Utah Construction and Mining Co., que paso de una minería in situ por sondeos en el estado de Wyoming, desde 1960 a 1969, a un sistemas convencional de cielo abierto con mayores recuperaciones del yacimiento , por lixiviación en depósitos de mineral regado por aguas ácidas preparadas y controladas.

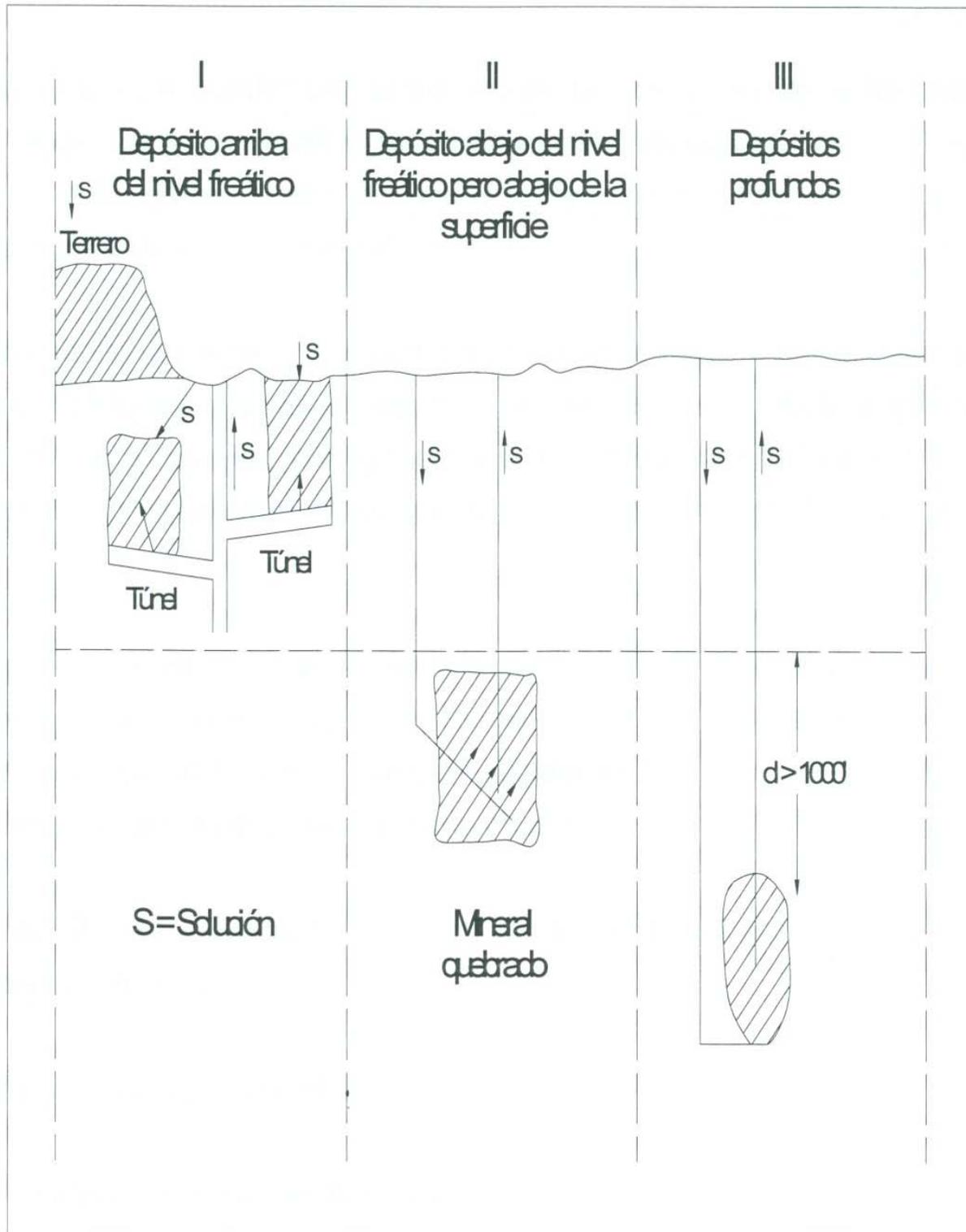
Parecido puede ser el ejemplo de Saelices el Chico para el uranio español de Salamanca y, probablemente, ejemplos similares se podrían citar para las sales evaporíticas próximas a Madrid, Burgos y Alicante, y para el carbonato sódico en Torrelavega, en donde al cabo del tiempo se ha ido pasando de sistemas lentos y

de poca recuperación a otros sistemas mas caros, pero con menores tiempos y mejores porcentajes de aprovechamiento.

Puede concluirse que el avance en la lixiviación está por conseguir una mejora de la recuperación del metal o mineral, al tiempo que se acelera la cinética del proceso mediante una mayor inversión, al explotar mas convencionalmente el yacimiento y preparar mejor el mineral, exponiendo más cantidad de la mena a la superficie atacable. Por ello, y en contra de la creencia normal, la minería química tiene más futuro en la expansión de una minería convencional para seguir con un tratamiento químico más controlado en entradas y residuos, que en la introducción de los lixiviantes en el yacimiento, cuyo máximo aprovechamiento y recuperación es la mayor exigencia del minero, tras la siempre difícil labor del geólogo en su descubrimiento.

Evidentemente no debería evitarse el cálculo económico del valor no recuperado en el residuo contra la inversión y costo de descubrir el mineral, y explotarlo más racionalmente para lograr su recuperación y venta.

3. MINERÍA DE LIXIVIACIÓN EN SITIO (IN SITU LEACHING)



4. M Se define como tal aquella técnica en que la mena no es transportada del lugar en que se formó geológicamente, y que el elemento valioso (mineral) es disuelto de la matriz rocosa que la almacena, a través de una solución especialmente preparada, que circula por el depósito y es extraída en forma líquida.

Esta definición puede, por tanto, incluir la utilización de la fragmentación mediante explosivos o técnica de fracturación hidráulica, que permitan la exposición y circulación a través del depósito para poner en contacto a la solución con las demás partículas del mineral.

Aun cuando otros términos como minería en el lugar o minería por sondeos se hayan utilizado en otras publicaciones, por ser más extendida, puede ser más oportuno utilizar el término más general de la "minería en sitio" para diferenciarla claramente de los conceptos expuestos más adelante de otras formas de minería química.

Una de las minerías más antiguas y desarrolladas en sitio es la explotación del azufre por el método Frach, que no corresponde realmente a una minería química sino física, al lograr el paso al estado líquido del azufre mediante una reacción térmica (vapor+aire+agua) más que química.

Dentro de los sistemas mineros en sitio se deben de clasificar o separar dos técnicas bien diferenciadas.

- 1- Minería por disolución en sondeos.
- 2- Minería por fracturación de la roca.

4. MINERÍA DE LIXIVIACIÓN EN VERTEDEROS (DUMP LEACHING)



Una buena parte de las antiguas minas de cobre, en todo el mundo, producen un vertido de aguas que tienen un contenido en metal apreciable, visible por el propio teñido azul-verdoso y por el coloreado de las márgenes de los arroyos y riachuelos que forman.

En determinados casos pueden llegar a provocar la total contaminación del agua superficial, como sucede en los ríos históricamente acidulados. Además de las disoluciones naturales, otra parte procede del riego de los vertederos internos o externos de las antiguas explotaciones mineras, en algunos casos milenarios, como Rio tinto y Tharsis en España o Timna en la península del Sinal.

Inevitablemente, el abandono de las minas produce unos efluentes contaminantes debido a la percolación y lavado superficial de las galerías, pozos y otras labores en que por reacciones químicas de oxidación y disolución se van cargando en metales.

Este fenómeno natural, condujo desde hace siglos al intento de recuperación de metales de dichas aguas, por ejemplo el cobre, en forma de sulfato y por precipitación en forma de cascara, fácil de fundir. Ya en siglos XVI y XVII, el arzobispo de Sevilla tenía el derecho a la explotación del sulfato de cobre de las márgenes del río Tinto en el área de su jurisdicción.

No tiene pues nada de extraño que los propios mineros desde hace un siglo, aprovecharan las mismas aguas ácidas para regar los vertederos de estériles o minerales pobres que contenían todavía algún mineral perdido entre los escombros.

Si se considera como vertedero todo el depósito, mas o menos controlado, que contiene los residuos no aprovechados de una explotación minera, la lixiviación de vertederos se podrá definir como la técnica que trata de recuperar, mediante un riego con aguas semipreparadas, el contenido en mineral que pueda haber quedado sin explotar entre los escombros o labores mineras antiguas.

Normalmente los vertederos no han sido preparados para esta función y, por lo tanto, suelen estar constituidos por materiales heterogéneos en origen, forma y granulometría e incluso puede afirmarse, que no existe formación geológica más difícil de evaluar, ya que las exigencias históricas y las evoluciones impuestas por el hombre al crear tales depósitos son mucho mas anárquicas que las formaciones naturales que casi siempre obedecen a unas reglas genéticas. En pocas palabras y a causa del desconocimiento del contenido, la regla general es la de "aprovechar lo que se pueda", que algunas veces es mucho, sin ningún ánimo de obtener un gran rendimiento, sino de obtener un producto barato y cómodo.

Los antiguos vertederos que se construían mediante el vertido de vagones de ferrocarril, eran generalmente más regulares y de menor altura que los más modernos establecidos por vertido desde volquetes de gran capacidad, lo cual ha producido una más irregular distribución de los estériles más o menos diluidos con mineral. Sin embargo, la mayor altura de los vertedores produce una segregación de tamaños que puede beneficiar al posterior tratamiento, ya que los tamaños gruesos van al fondo del talud y permiten la aireación y oxidación a través de los espacios vacíos que dejan entre sí. En cambio, los finos se acumulan en la parte alta y pueden perjudicar la percolación.

4.4.1 Técnicas de formación de vertedores

En algunas explotaciones modernas y con un concepto más integral de recuperaciones en la minería, se proyectan los vertedores para una posterior lixiviación; así Butte en Montana, Bluebird en Arizona y Rio tinto en España, han construido vertedores especiales con criterios de separación de minerales marginales por debajo de la ley de corte y oxidados, para el posterior riego controlado con aguas procedentes de la mina.



En estos casos, el vertedero se construye mediante técnicas y procesos mineros como los siguientes:

- 1) Se eligen zonas cerradas y con poca altura, alargadas y estrechas.
- 2) Se remueve y conserva aparte la tierra vegetal o suelo orgánico del fondo del depósito.
- 3) Se compacta el fondo y se coloca una capa de 50 cm de arcilla, debidamente compactada sobre la roca firme o no alterada, para impermeabilizarla y conducir los líquidos.
- 4) Se comienza a depositar el escombro o mineral marginal en bancos de 10 a 15 m de altura, con longitudes de 300 a 500m y anchuras de 30a 50 m, para lograr una cierta oxidación y un buen tonelaje.
- 5) Los minerales más sulfurados se procura depositarlos en los laterales o superficies, para lograr una mayor aireación/oxidación.
- 6) Si es posible se separan lateralmente los minerales más lamosos o finos, para evitar zonas de posterior percolación difícil.
- 7) En lo posible se evita la compactación del material con los propios volquetes, empujando los montones con el tractor de baja presión específica.
- 8) Finalmente se remueven los primeros 50 cm del material que normalmente son finos producidos por el trafico de volquetes, tractores y niveladoras, que se colocan en lugares laterales para que no sellen el riego.

- 9) Se escarifica, con tractores de oruga con varios dientes de rizado toda la superficie del vertedero. En ocasiones no es malo realizar una prevoladura de los primeros 3 a 4 metros.
- Durante el vertido se procede a un riego previo con aguas preparadas, para mantener el material húmedo con unas condiciones químicas idóneas.
- 10) Si es posible, tras alcanzar una altura de 15 m, se lixivia el vertedero antes de recrecerlo en un segundo banco, y este se explota antes de colocarle un tercer banco con la misma técnica. No se debe olvidar la escarificación de la superficie, antes de colocar nuevos materiales para romper la costra sulfatada u oxidada que se forma normalmente en los primeros niveles.
- 11) El esponjamiento inicial que es oxidación y camino de circulación del líquido lixivante puede alcanzar un 40% que al cabo de un año se reduce en un 30% y posteriormente puede alcanzar un 20%, por auto compactación y recolocación de finos y gruesos. En algunas ocasiones al cabo de 2-3 años se puede efectuar una pre voladura con barrenos largos para remover y aumentar la generación de nuevos caminos preferentes de circulación, a la vez que se reoxigenan nuevas superficies, y con ello se reactiva la recuperación del metal o sustancia lixiviable y su cinética o tiempo de recuperación.
- 12) Es buena práctica construir una represa de líquido fértil, tanto para absorber las normales variaciones del flujo que se producen por efecto de lluvias y otras circunstancias, como para reciclar, en el caso de que la ley no haya alcanzado el nivel deseado de riqueza. Al mismo tiempo, en esta presa se pueden reacondicionar las condiciones físicas y químicas del líquido lixivante para mejorar la capacidad de extracción o precipitación.

13) A esta represa o depósito intermedio de líquidos de riego, se suelen conducir todos los efluentes procedentes de las explotaciones mineras viejas en operación para aprovechar el pequeño o medio contenido de metales o sustancias aprovechables. Como es natural que estas aguas lleven un cierto porcentaje de sólidos en suspensión, es conveniente frenar su velocidad para decantarlos, mediante reposadores que se limpian por temporadas.

14) En algunas ocasiones es práctico efectuar barrenos en el vertedero para :

- Favorecer la oxidación en zonas interiores.
- Medir la temperatura y grado de oxidación.
- Comprobar el volumen de circulación en algunas áreas.
- Controlar el proceso.

4.4.2 Soluciones Lixiviantes

El riego de los vertederos se puede realizar fundamentalmente por tres procedimientos, similares a las técnicas de riego agrícolas.

- a) Por inundación o canales de riego.
- b) Por aspersion.
- c) Por distribución de goteo o sondeos.

Los líquidos proceden normalmente de tres fuentes:

- 1) De aguas de viejos minados o vertederos.
- 2) De aportación nuevas lluvias.
- 3) De recirculación del sistema.

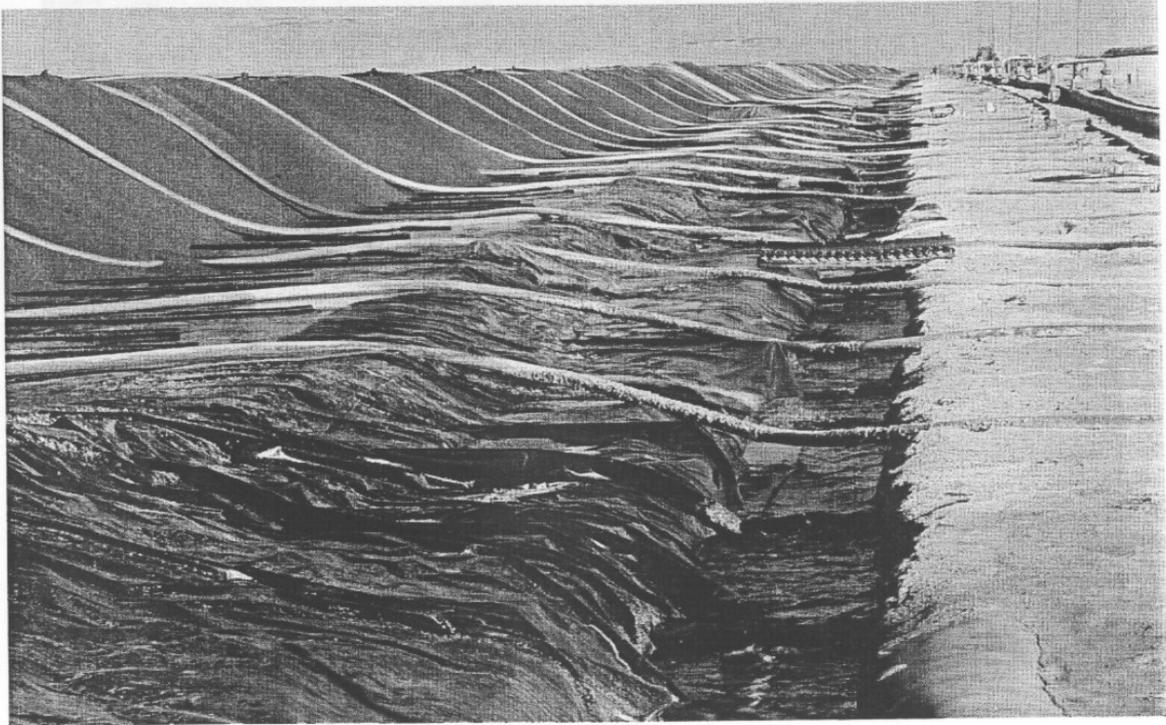
Las cantidades de riego, localmente variables, deben de estar en orden de 10 litros por hora y por m² (variando entre 2 y 20) la forma de aportarlas controladamente al terreno, varía en cada operación, dependiendo de la inversión y del costo operativo. En la tabla 2 se indican las características de los distintos sistemas de riego.

4.4.3 Características de los Sistemas de Riego

<u>Forma de riego</u>	<u>Inversión</u>	<u>Operación</u>	<u>Recomendada en caso de</u>
Inundación	Mínima	Barata	Exceso de agua
Canaleo	Barata	Media	Sustancias poco valiosas
Aspersión	Media	Media	Mayor recuperación
Goteo	Alta	Media	Escasez de líquidos y bajas temperaturas
Sondeo	Elevada	Barata	Materiales difíciles

TABLA 2
Tipos de riego en montones de lixiviación.

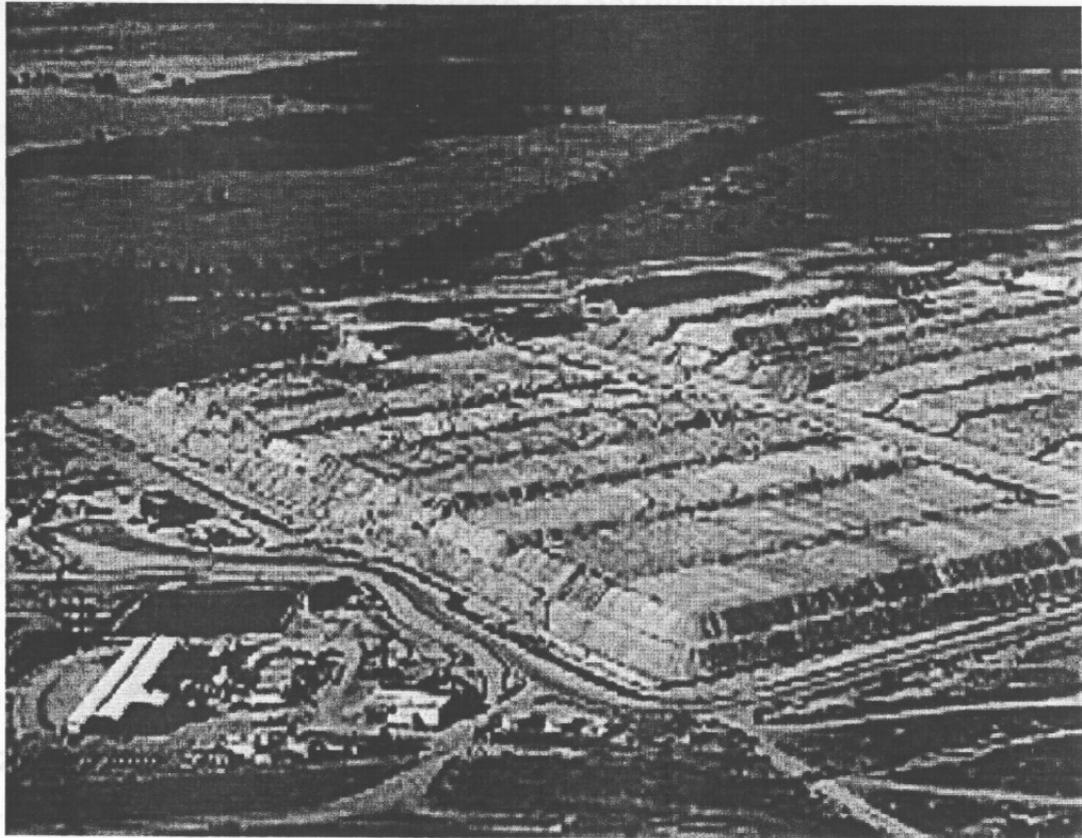
El método más recomendado es el sistema de **riego por aspersión**. La efectividad del método viene dada por obtener una mejor recuperación, al combinar efectivamente los efectos necesarios de oxidación-aireación y el mayor contacto superficial con el mineral.



Cuando los minerales son suficientemente valiosos para ser procesados, cuando el líquido o solución lixivante es escaso, como ocurre en las zonas desérticas, es recomendable la utilización del goteo para evitar la fuerte evaporización del sistema de operación, pudiendo reducirse el caudal de riego a niveles de 4 a 5 litros/hora/m², para conseguir el mismo efecto de recuperación en el tiempo. A veces también se emplea el goteo enterrado, en lugares de largos periodos de heladas.

En los casos de excedentes de líquidos en el sistema, se puede provocar una fuerte evaporación, para eliminar agua del sistema y un excelente modo es el riego por aspersión e incluso el riego de las superficies de minas a cielo abierto, caminos y zonas de posible mineralización, para luego recuperar esas aguas en diques con alta relación superficie/altura, que enriquecen su contenido por simple evaporación.

5. MINERÍA DE LIXIVIACIÓN EN ERAS O PILAS (HEAP LEACHING)



Cuando los minerales son suficientemente valiosos para intentar reducir las pérdidas en el residuo, pero no bastante ricos como para pagar un proceso de tratamiento más desarrollado y caro, o cuando no se dispone del suficiente capital para lograr un óptimo aprovechamiento, se ha extendido en los últimos tiempos la minería de lixiviación en montones de mineral, con un mayor control geométrico y químico que en el caso de los vertederos.

La minería de lixiviación en eras consiste en la construcción de unos montones perfectamente definidos y controlados de un mineral, con una granulometría estudiada y comprobada para mejorar y acelerar las reacciones, a partir de una disposición de las pilas y del riego de las mismas con un líquido ajustado a las necesidades de las reacciones y tiempos de disolución.

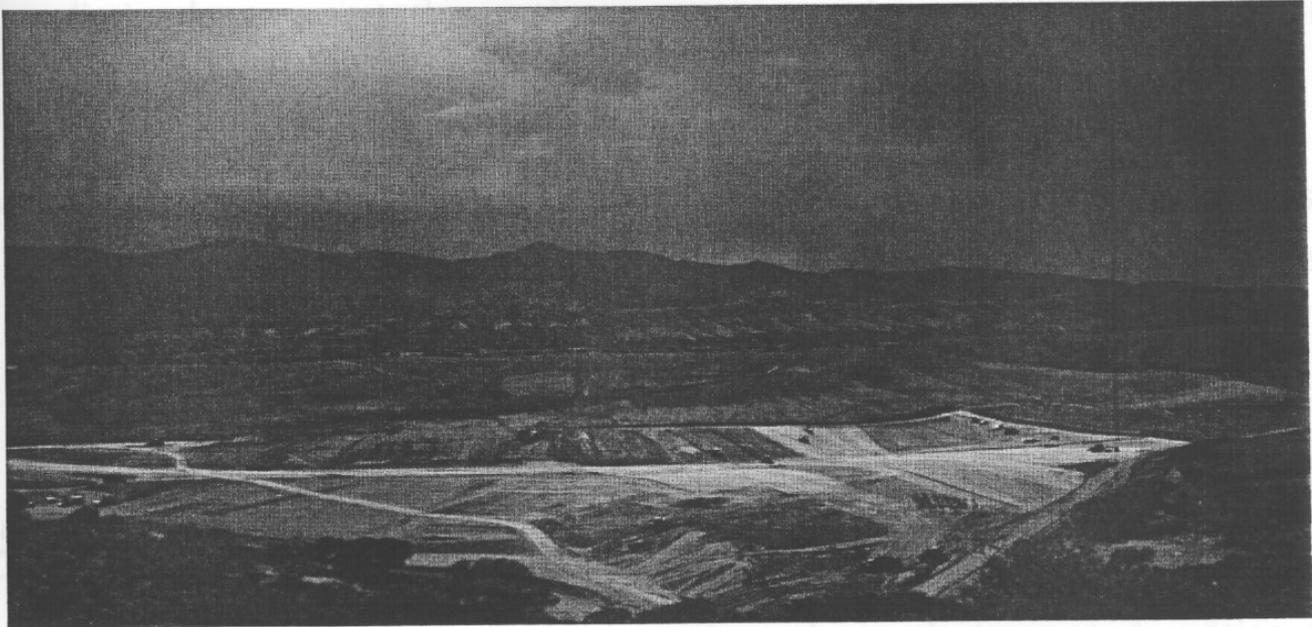
El mineral procedente de la explotación, a cielo abierto o subterráneo, o bien del aprovechamiento de viejos vertederos debe ser ligeramente procesado en una planta de trituración y/o aglomeración, para conseguir una granulometría controlada que permita un buen coeficiente de permeabilidad.

Una vez preparado el mineral, se coloca en montones de sección trapezoidal y altura calculada para proceder su riego con una solución preparada. Tras percolar a través de toda la pila, se recolectan los líquidos enriquecidos que se llevan a la planta de proceso de recuperación de la sustancia mineral (sal o metal). Las aguas sobrantes del proceso vuelven a ser acondicionadas, para ser recirculadas hacia las eras. También se aprovechan las aguas de desagüe de la mina e incluso en algunos casos es preciso añadir agua nueva, para reponer las fuentes perdidas de evaporación del circuito.

Se denomina patio a la superficie de apoyo de la era donde se coloca la impermeabilización. Cuando el patio es recuperado para reutilizar lo con nuevo mineral se trata de minería de lixiviación en depósitos, mientras que si el patio no es recuperado, y por tanto, el mineral agotado queda en la era como vertedero que se restaura, se está en la verdadera minería de lixiviación por eras o pilas.

5.5.1. Características del Sistema de Eras

Las características del sistema de eras exige algunas condiciones, como:



- ✚ Disponibilidad de amplias superficies de terreno (relativamente menos de 10% de pendiente).
- ✚ Cálculo de flujos de aportación y evaporación para mantener el balance equilibrado de líquidos fluyentes. Represas de líquidos intermedios y finales.
- ✚ Sobrecapacidad del sistema para absorber situaciones de exceso por tormentas o lluvias en el área en explotación o explotada.
- ✚ Admitir grandes variaciones de leyes y tiempos de lixiviación.
- ✚ Utilización de laminas impermeable sencillas para evitar pérdidas por filtración y contaminación del subsuelo.
- ✚ Estudio geomecanico del material depositado para evitar el derrumbe del montón y su máxima altura posible.

- ✚ Preparación del material al tamaño adecuado para lograr la liberación en superficie del mineral y percolación que logre una permeabilidad mínima suficiente. En caso de presencia de finos, si son pocos, es preferible eliminarlos o apartarlos y si son muchos, aglomerarlos, si no es posible correr un cierto riesgo de fallos en el proceso.
- ✚ La existencia de un conjunto de eras permite ordenar el flujo de líquidos en forma seriada, para lograr un enriquecimiento progresivo del licor al pasar de una era a otra.

5.5.2. Emplazamiento

El primer problema es elegir el emplazamiento de la zona de patios que, además de tener suficiente extensión para admitir todo el mineral durante la fuerte explotación (vida del proyecto), debe de cumplir unas características topográficas y geológicas.

El diseño de las eras debe tener en cuenta los siguientes factores:

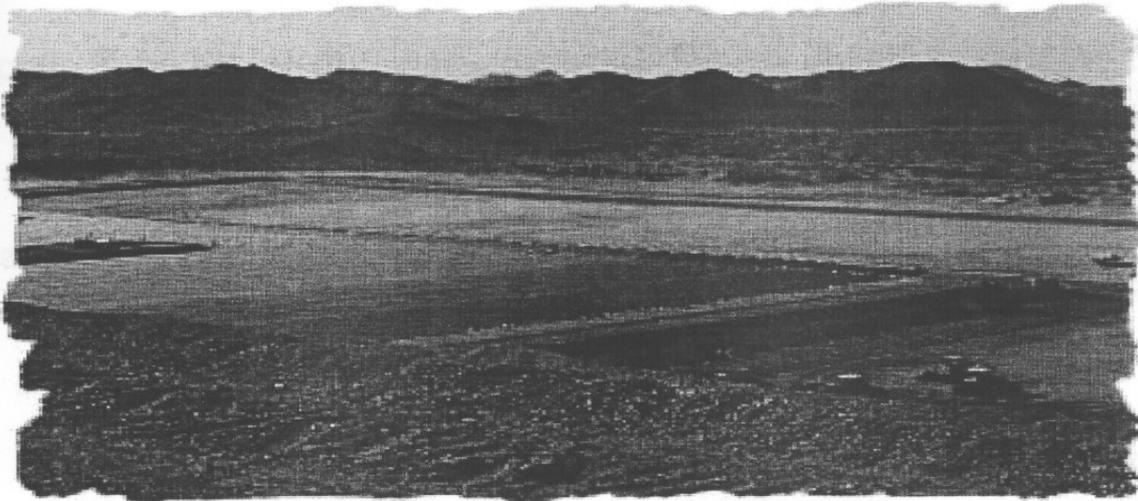
En primer lugar, debe de tener una pendiente mínima y máxima, primero para que los líquidos fluyan y segundo bien para que sean estables, para no tener que realizar una importante excavación de preparación del terreno.

La estabilidad del terreno seco y saturado es igual.

En segundo lugar, debe realizarse sondeos de reconocimiento del suelo ya que no interesa ni terrenos excesivamente sueltos, ni tan duros que compliquen y encarezcan las preparaciones de la cimentación. Las características geomecánicas del suelo marcan las necesidades de este para lograr una estabilidad global de la era o pila a lo largo de un proceso, en condiciones de humedad saturada del material a lixiviar. Así mismo, la calidad de los materiales del suelo deben tener presente su posible utilización en obras complementarias y necesarias como tanques, presas, bermas de protección, regatas de recolección y conducción de líquidos.

En general, debe tenerse en cuenta los factores geológicos o hidrogeológicos que pueden presentar riesgos futuros de destrucción del sistema, llegando al límite de un diseño contra posibles terremotos o colapso del terreno en áreas mineras proclives a los riesgos sísmicos.

5.5.3. Diseño de Eras



El diseño de las eras debe tener en cuenta los siguientes factores:

- ✚ *La calidad del patio o base de apoyo.*
- ✚ *Las facilidades de riego y recolección o drenaje del efluente.*
- ✚ *La estabilidad del montón seco y saturado en agua.*
- ✚ *Los tanques de soluciones ricas y pobres.*
- ✚ *La forma de construcción o deposición del material lixiviable en toda su altura.*

El principal objetivo del diseño debe ser lograr un montón lo más homogéneo posible, que evite la existencia de circuitos preferenciales y con ello una extracción incompleta y/o desigual del mineral.

La construcción del patio mediante técnicas normales de obra civil con suelos debe perseguir el alcanzar no solo la resistencia adecuada para soportar las cargas aplicadas, sino también impedir los asentamientos diferenciales del montón una vez sometido al riego y aireación, ya que estos últimos afectan gravemente al drenaje, recuperación y pueden dañar a las láminas de impermeabilización.

Por esta razón, deberá evitarse la pendiente fuerte del terreno que inevitablemente conducirán a deslizamientos de la era, parciales o totales.

El patio debe de ser considerado con su sistema de impermeabilización, para controlar las pérdidas de soluciones y evitar contaminaciones del medio ambiente.

El sistema consiste en:

- ✚ *Una base firme y consolidada, debidamente preparada.*
- ✚ *Una capa de lecho granular sobre el que apoyar suavemente la lamina.*
- ✚ *La lámina o capa de impermeabilización.*
- ✚ *Un conjunto de drenaje o capa de recolección de líquidos.*
- ✚ *Una capa protectora del sistema.*

El diseño de la alternativa más conveniente para membrana o sistema de sellado es una parte muy importante de la ingeniería y no debe hacerse solo por criterios económicos.

Las evaluaciones económicas de selección de las alternativas posibles, deben considerar el conjunto del sistema y no solo el valor de la lámina a colocar.

requiere la presencia de ingenieros experimentados.

Se pueden disponer de membranas o sellados similares desde 1 hasta 10, de acuerdo con el número de capas impermeables o membranas de igual o diferente tipo que se hayan utilizado.

5.5.4. Membranas de Sellado

Las membranas o láminas de impermeabilización del patio pueden ser:



- ✦ *De materiales arcillosos compactados sobre el propio terreno.*
- ✦ *Del propio suelo mejorado o enmendado con aditivos químicos o minerales.*
- ✦ *Geomembranas de origen sintético (plásticos, polímeros, asfaltos, etc).*

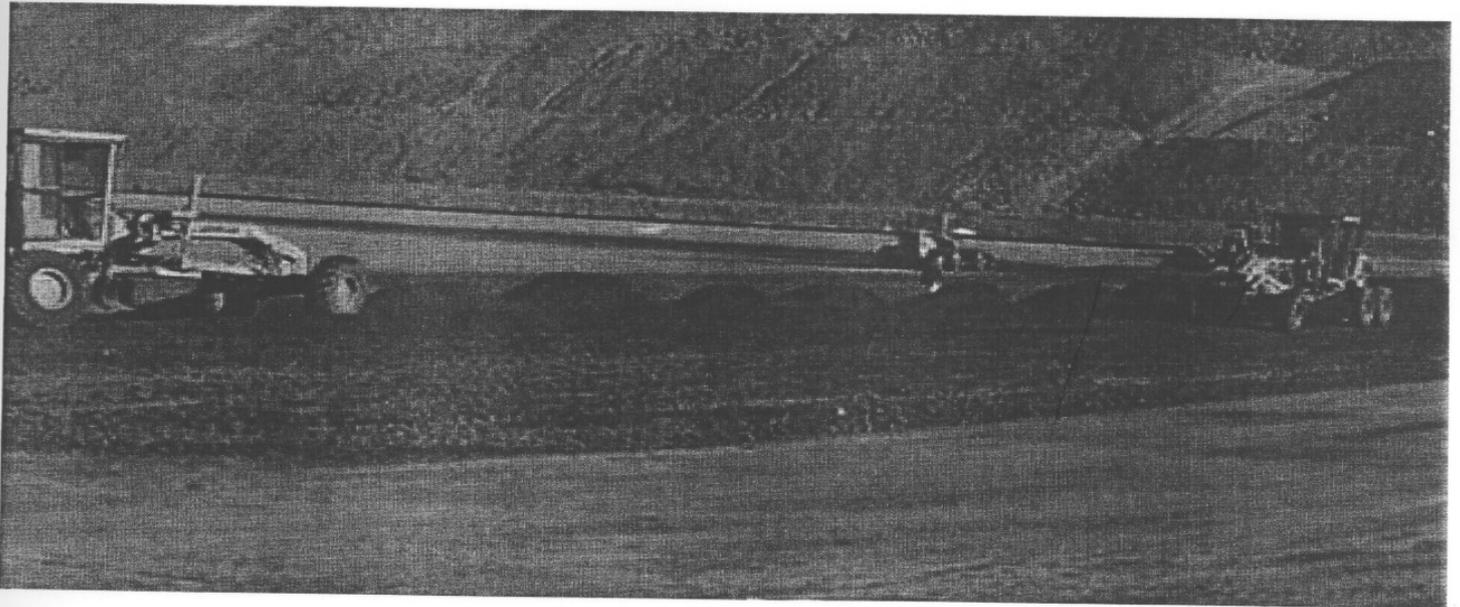
El diseño de la alternativa más conveniente de membrana o sistema de sellado es una parte muy importante de la ingeniería, y no debe hacerse solo por criterios económicos o de permeabilidad, sino por otros factores como durabilidad, picado, resistencia a la corrosión y otras condiciones ambientales que deben requerir la presencia de ingenieros experimentados.

Se pueden disponer de membranas o sellados simples dobles o triples, de acuerdo con el número de capas impermeable o membranas de igual o diferente tipo que se hayan utilizado.

5.5.5. Técnicas de Construcción

Las técnicas de construcción de las eras son muy variadas, dadas las características de los diferentes tipos de minerales y terreros, pero con ligeras variantes, se concretan en tres:

- 1) Vaciado con volquetes y extendido con tractores en altura.
- 2) Extendido con volquetes y nivelado con tractor de los montones.
- 3) Deposición con cintas y apiladoras.



- En el primer caso, muy habitual en explotaciones a cielo abierto en que el mineral no se prepara debidamente por tener buenas características propias, se consigue un costo bajo e incluso una baja generación de finos. Tras la colocaciones el montón por el boquete , el tractor tiene la doble función de extender y nivelar lateralmente desde el camino limitado del transporte, para finalmente ripar la superficie con objeto de lograr una Buena percolación. Es un buen sistema en el caso de sucesivos bancos, de vertido y lixiviado, superpuestos.
- En el Segundo caso de vertido en montones y extendido y nivelado con tractores, se logra una mínima producción de finos y se emplea en casos en que el mineral necesita un bajo nivel de manejo, antes de lixiviarlo.

Este método es siempre utilizado para la colocación de la primera capa que protege la lámina o sellado impermeable. Podría utilizarse esta técnica para una lixiviación por capas de mínima altura.

Una variante a este sistema es la utilización de una pala frontal, para amontonar a más altura que el tractor con ganancia de tiempo y costo, pero aumenta la compactación del material por el peso de la maquina con una presión específica alta.

- La tercera técnica de aplicado con cintas ha adquirido gran popularidad, debido a la necesidad de preparar el mineral en plantas de trituración y tener ya un tamaño que permite utilizar un transporte continuo más barato, que logra mayor altura, homogeneización y coeficiente de permeabilidad del montón. Al mismo tiempo trata al mineral con suavidad y no produce mas finos. Es la técnica mas adecuada para el apilado de minerales que han sido triturados y/o aglomerados y en los que los objetivos de recuperación y velocidad son importantes por el valor de la sustancia mineral como el Au, Ag y U.

Una parte importante de la construcción de la era es el **sistema de recolección del liquido** que en general, consta de una serie de componentes que recogen los efluentes en el interior de la era y los lleva al exterior por gravedad, hasta conducirlo al tanque o presa de líquido fértil o rico.

El sistema de recolección interno tiene también la función de reducir la altura de saturación y proporcionar el caudal de solución necesario para obtener la producción.

Los sistemas más habituales de drenaje son:

- ⚡ *El propio mineral si es permeable.*
- ⚡ *Grava o material filtrante sobre la lamina o membrana.*
- ⚡ *Tuberias perforadas drenantes.*
- ⚡ *Combinación de varios sistemas.*

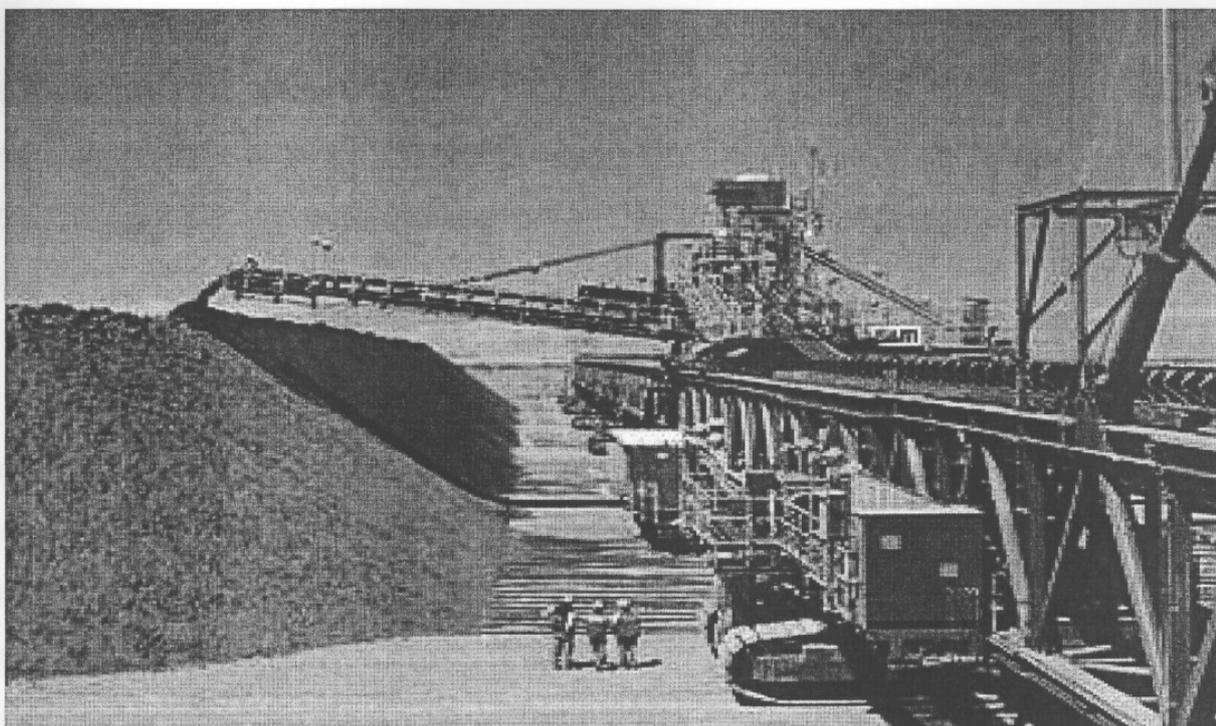
El mineral, tras su trituración y control de calidad, pasa por cintas o camiones pequeños a los depósitos de unos 150 x 50 x 15 m, con capacidad para 150.000 toneladas cada uno, en donde se procede a la lixiviación o disolución controlada de la sal o mineral, pasando la solución enriquecida a la planta de cristalización y/o recuperación.

Una vez agotados los contenidos de sal o metal de cada tanque a límites económicos, se extrae, con retroexcavadora o grúa bivalve, el residuo del depósito y se descarga adentro del vertedero exterior, mientras el tanque queda disponible para una posterior recarga de mineral.

Es importante disponer de un determinado número de tanques, y con unas secciones tales que permitan obtener la mayor y más constante solución para alimentar a la planta. Estos parámetros deben ser definidos, en colaboración con, los ensayos mineralurgicos, para determinar la velocidad de circulación y el tiempo de contacto, lo que a su vez va a obligar a unas dimensiones de los depósitos también relacionados con el volumen del líquido y la concentración a alcanzar, las técnicas de construcción de los depósitos, alturas de las pilas, sistemas de riego drenaje etc, son las mismas que para el método de lixiviación por eras, salvo que en general deben ser sistemas mas duraderos y robustos, lo cual en general es mas costoso, por lo que la única razón básica para preferir este método es lograr un diferencial importante de recuperación del metal o mineral, y/o un tiempo más reducido de lixiviación con unas soluciones fértiles más enriquecidas, lo que simplifica y reduce notablemente la planta de recuperación en inversión y tamaño .

de la bauxita para transferir el aluminio a un producto soluble que puede ser
no desarrollados ni comercializados en el extranjero. El mineral de este
complejo del Sur Oeste de Chile es, probable mente, el más rico en uranio y
problemático campo de lixiviación dinámica (a presión y temperatura), en donde
se encuentra el límite de este sistema no sólo económico sino también de
ingeniería de materiales y procesos.

6. MINERÍA DE LIXIVIACIÓN DINÁMICA (DYNAMIC LEACHING)



Proceso de lixiviación dinámica.

En los apartados anteriores, el método de lixiviación ha sido llevado a cabo en forma natural, dándole el tiempo y contacto para proceder a la disolución de la sustancia buscada. Si el proceso es acelerado, dinamizado por medios físicos, químicos o biológicos, entraríamos en el campo de la lixiviación dinámica, que en general se lleva a cabo en plantas fuera de la zona propia del yacimiento.

Este sistema puede aplicarse desde el normal tratamiento de oro por tanques "Pachucas" en Sudafrica, Rusia y Rio tinto, hasta el proceso de "digestión" de la bauxita para transformarla en aluminio. Los sucesivos intentos, hasta ahora no desarrollados ni confirmados, de tratamiento Hidrometalúrgico de los minerales complejos del Sur oeste Ibérico es, probablemente, el más avanzado, difícil y problemático campo de lixiviación dinámica (a presión y temperatura), en donde se encuentra el límite de este sistema no solo económico sino también de ingeniería de materiales y procesos.

Ciertamente en este caso la minería alcanza más alto desarrollo químico, utilizando técnicas más propias del laboratorio en grandes plantas, hasta el punto de que la inversión en la planta de lixiviación supera en 3 o 4 veces el valor de la propia inversión en la explotación y descubrimiento del yacimiento. Obviamente, la planta incluye no solo el propio proceso de lixiviación sino también los procesos de recuperación de los metales o sustancias valiosas y tratamiento de los efluentes líquidos y sólidos.

Justamente por las elevadas inversiones que la lixiviación dinámica requiere, es preciso obtener elevadas recuperaciones que compensen aquellas. Al mismo tiempo, el factor de economía a escala hace más difícil la popularización que era característica de los sistemas anteriores de la minería química. La existencia de patentes en los procedimientos, técnicas, materiales y reactivos específicos, para justificar la decisión de llegar a la lixiviación dinámica. Por el contrario, cuando la planta está construida, alguno de los recursos marginales puede convertirse en reservas explotables, dado el alto rendimiento mineralurgicos que se alcanza en estas plantas.

Se puede, pues, calificar la lixiviación dinámica como el objetivo final del proceso minero de extracción de minerales que son solubles en algún tipo de líquido con o sin reactivos. Es el final del proceso que inicio normalmente la propia naturaleza al disolverse en agua el primero de los minerales. La técnica minera, apoyada cada vez más en el avance de la química, va introduciendo más posibilidades en la recuperación de sustancias anteriormente inimaginables.

Como base fundamental la técnica de lixiviación es el contacto superficial entre el solvente y soluble, en la aplicación dinámica, la preparación mecánica del mineral alcanza límites máximos, llegándose a granulometrías muy finas para lograr la máxima exposición superficial del grano en la estructura de la matriz, de forma que puede ser atacada por la disolución. De ahí que no sea suficiente con una trituración más o menos fina, sino que sea preciso llegar a una molienda y remolienda, lo cual a su vez va a provocar la existencia de tamaños ultra finos que pueden complicar el posterior manejo de pulpas y líquidos.

Desde el punto de vista de explotación minera, la mayor dificultad está en conseguir una regularidad en las calidades físicas y químicas de los minerales a suministrar a la planta de cianuración y lixiviación. Se han llegado a esquemas detallados de almacenamiento y homogenización en el parque de la explotación, para realizar una política de mezclas que aporte un producto muy constante en sus características de tratamiento, pero esencialmente se requiere una minería muy selectiva con una planificación temporal y especial muy precisa.

Un ejemplo de una planta moderna de lixiviación dinámica, con procesos difícil, eficiente operación y buenos resultados metalúrgicos, es la planta de cianuración de Gossan de Rio tinto, para la recuperación de oro y plata.

En algunos casos, se combina el método de lixiviación dinámica para los metales finos y ricos con una lixiviación en eras o depósitos para los minerales gruesos y pobres, como es el caso de la Haba (Badajoz) o el nuevo proyecto en Saelices el Chico (Salamanca) para minerales de uranio.

Para que el proceso de cianuración sea más económico, debe instalarse en minas auroargentíferas localizadas en zona de oxidación, ya que en la zona de sulfuros ha demostrado la flotación ser más económica y eficiente. En minas de oro se ha visto que el sistema es efectivo, aun en el caso de encontrarse el oro en zona de sulfuros donde se le trata como mineral refractario.

7. LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE ORO Y PLATA

Aparte de la amalgamación usada en los minerales de oro y plata, los procesos de lixiviación utilizados para recuperar valores de oro y plata se empezaron a usar en la década que se inició en 1860. El proceso de Von Patera en el cual se disolvían los valores de oro y plata con hiposulfito de sodio y se precipitaba con sulfuro de calcio, este tratamiento no dio resultado porque la plata estaba en forma de sulfosales e incluida en sulfuros de plomo y cobre.

La disolución con hiposulfito se usó en varias minas de plata, entre ellas la de Lampazos, Sonora donde operó una planta con buenos resultados en 1890 y 1912. Este hiposulfito se utiliza también para beneficios de antiguos jaleros donde se usó con mercurio ya que éste último metal también puede recuperarse.

Se han hecho pruebas de disolver antiguos jaleros de cianuración con hiposulfito de amonio, pero no se ha pasado de plantas piloto. Se presentan algunos problemas de precipitación.

El proceso de cianuración inventado en la última década del siglo XIX, pronto adquirió mucha importancia en el beneficio de minerales auroargentíferos.

En México se instalaron gran número de plantas de cianuración en Pachuca, Guanajuato, Chihuahua, Sonora y otros lugares tradicionalmente mineros. En Sonora hubo un molino en La Colorada, en El Picacho De Bacoachí, en El Tigre y algunas otras pequeñas minas.

Para que el proceso de cianuración este correctamente aplicado, debe instalarse en minas auroargentíferos localizadas en la zona de oxidación, ya que en la zona de sulfuros ha demostrado la flotación ser más económica y eficiente. En minas de oro se ha visto que el sistema es efectivo, aún en el caso de encontrarse el oro en zona de sulfuros donde se le trata como mineral refractario.

La textura, el fracturamiento, el tamaño de los minerales solubles, la distribución de estos dentro de la roca mineralizante, son factores que determinan el tamaño a que debe ser quebrado o molido el mineral, con el fin de lograr un contacto óptimo entre la solución disolvente y los valores que se desean disolver.

El desarrollo en los últimos años del proceso de lixiviación en montones, hace que este se pueda dividir en dos grandes grupos, a saber:

- a) El proceso tradicional con molienda fina y
- b) El proceso de lixiviación en montones "heap leaching" aplicable principalmente a minerales de baja ley.

El proceso tradicional con molienda fina, ha seguido un desarrollo de acuerdo a los sistemas de separación de la solución preñada, que contiene los valores del mineral, que ya ha sido despojado de sus valores.

En un principio se usaba el sistema llamado de lamas y arenas en el cual el mineral más grueso (arenas), era lixiviado en tanques con doble fondo por el paso de las soluciones de cianuro entre las arenas que eran depositadas en dichos tanques. Las lamas o mineral fino eran agitados en tanques especiales y después eran separadas las lamas estériles de las soluciones preñadas; esta separación se hacía en tanques asentadores o en filtros, que por medio de vacío separaban las soluciones, haciéndolas pasar a través de lonas que no permitían el paso de las lamas.

Posteriormente se desarrolló el proceso de contracorriente que se extendió casi a todos los molinos de cianuración convencional.

En años recientes y para minerales de oro con poca o ninguna plata, se ha desarrollado un proceso llamado Carbón en Pulpa que detallaremos más adelante.

En los últimos veinte años también se han desarrollado una variedad de procesos que se aplican a los minerales llamados refractarios, los cuales explicaremos posteriormente.

El proceso de lixiviación en montones, que se desarrolló en los años 70's del siglo XX y que ahora es ampliamente aplicado sobre todo para minerales auríferos, consiste principalmente en que el mineral no es molido sino solamente quebrado y depositado en patios especiales donde se riega con cianuro. Este proceso se aplica principalmente a minerales de baja ley, por tener un costo de inversión y de operación mucho menor que el tradicional, que permite operar económicamente con depósitos auríferos de baja ley, aunque las recuperaciones sean menores que en sistema tradicional.

La determinación del tamaño al que debe ser quebrado o molido un mineral, se hace por pruebas metalúrgicas y por consideraciones económicas, teniendo en cuenta lo siguiente:

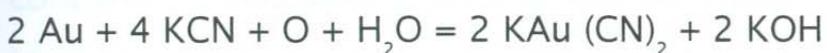
1. El tamaño de los minerales por disolver y la liberación necesaria para exponer los valores al contacto del solvente.
2. Consideraciones económicas que incluyen el costo de diferentes grados de trituración y molienda, comparados contra el valor de los metales recuperados para cada caso.
3. Costos de capital e inversión necesaria para instalar las diferentes plantas de beneficio considerando el valor presente del dinero invertido en cada caso.

Independientemente de las instalaciones que se consideran más convenientes, es indispensable estudiar un mineral para que sea lixiviable, teniendo en cuenta las siguientes características:

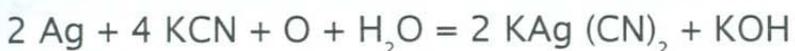
- a) Que el mineral por beneficiar no contenga sustancias que se disuelvan en el cianuro o que reaccionen con éste provocando un consumo excesivo de éste, haciendo la operación antieconómica.
- b) Que el mineral no contenga algunas sales que al reaccionar con el cianuro en alguna forma, interfiera con el proceso.
- c) Que los minerales por disolver, especialmente el oro, no tenga un tamaño tal que el tiempo necesario para disolverlo afecte el costo de la operación.
- d) Que el metal que se pretende disolver no esté en parte ligado químicamente, que lo haga resistente a la acción del solvente.
- e) Que el mineral no contenga sustancias que precipitan los valores ya disueltos en el cianuro.

7.7.1. Aspectos Químicos del Proceso:

La reacción de disolución de los valores de oro en las soluciones de cianuro, se puede representar por la siguiente fórmula:

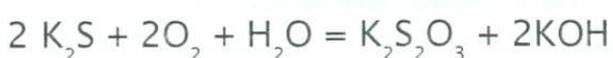


En relación a la plata, si ésta está como plata nativa es igual:

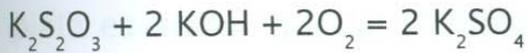


Pero si está como sulfuro:

$\text{Ag}_2\text{S} + 4 \text{ KCN} = 2 \text{ KAg (CN)}_2 + \text{K}_2\text{S}$, esta reacción es reversible pero el K_2S es fácilmente oxidable.



Y el tiosulfato tiende a transformarse en sulfato:



Si se trata de haloides de plata:



En todos los procesos de cianuración de oro y plata, el oxígeno es un factor indispensable con excepción cuando se trata de disolver halógenos de Ag. Debido a su menor costo y mayor concentración, se usa NaCN en vez de KCN.

Influencia de la concentración de las soluciones de cianuro: Experimentalmente se ha comprobado que la concentración de NaCN para minerales de oro, aumenta conforme la concentración lo hace, hasta llegar a un máximo con una concentración de 400 a 500 gramos de NaCN por tonelada de solución. Con diluciones menores a 100 gramos por tonelada, la dilución es muy baja. Las concentraciones más usadas varían de 150 a 350 gramos por tonelada. La determinación de la más conveniente concentración debe ser objeto de una cuidadosa experimentación.

Para el caso de minerales argentíferos, se ha comprobado que las concentraciones deben ser mayores, variando de 500 gramos a dos kilos por tonelada. Esta concentración debe fijarse por experimentación.

Descomposición de las soluciones de cianuro: Las soluciones de cianuro tienden a hidrolizarse como sigue:



Esta reacción es importantísima ya que el cianuro se convierte en gas cianógeno y se pierde. Depende básicamente de la existencia de álcali libre por lo que se agrega cal para mantener un pH alto. En general para evitar pérdidas de cianuro por hidrólisis, debe mantenerse un pH de 10.5 a 11.0.

Velocidad de disolución: Se ha comprobado que la rapidez de disolución de la plata es menor que la del oro, tratándose de metales nativos posiblemente sea el 50%. Los compuestos de plata son aún más lentos. La rapidez óptima de disolución del oro es de 3.25 mg/cm²/hora o sea una penetración de 1.68 micrones por hora. Así, una lámina de oro de 44 micrones de espesor, se disuelve en 13 horas y una partícula de 140 micrones (100 mallas) necesita 44 horas para disolverse.

Dada la velocidad de disolución, las partículas gruesas de oro deben separarse previamente a la Cianuración por métodos gravimétricos. Generalmente se usa un jig entre el molino y el ciclón clasificador. El concentrado obtenido recibe tratamiento separado.

Efecto del oxígeno en la disolución: Está comprobado que la presencia de oxígeno acelera la disolución. En pruebas de laboratorio, la rapidez de disolución cambia de 0.04 mg/cm²/hora sin oxígeno a 2.36 mg/cm²/hora teniendo un 99.5% de oxígeno requerido.

Efecto de la alcalinidad de las soluciones: El operar en un medio alcalino, no solo evita la hidrólisis del cianuro, sino también las pérdidas de éste por contacto con el CO₂ de la atmósfera, neutraliza los compuestos ácidos de las sales ferrosas y férricas, neutraliza así mismo la acción ácida de cualquier sal que se forme por descomposición de los minerales, ayuda al asentamiento de las partículas y mejora la extracción de los teluros, plata, rubí y otros componentes difíciles de disolver de los metales preciosos. El pH de las pulpas nunca debe ser menor de 10.5.

Efecto de la temperatura: La disolución del oro y la plata tiende a aumentar conforme aumenta la temperatura de la pulpa. Sin embargo, cuando se aumenta la temperatura, disminuye la cantidad de oxígeno disuelto en el agua y también la solubilidad de los metales preciosos, pero en pruebas que se han hecho, se ve que la máxima disolubilidad se alcanza a los 85° C y teniendo en cuenta el costo que significa, normalmente se opera a la temperatura ambiente y solo se calienta las

soluciones cuando se trata de despojar el oro del carbón activado o cuando se cianuran concentrados con muy altas leyes.

Minerales de zinc: Los minerales de zinc son algo solubles en soluciones de cianuro. Los más solubles son los carbonatos y óxidos y en menor proporción los

Condiciones para que un mineral sea cianurable: Para que un mineral sea cianurable, debe contener el oro y la plata en forma de minerales que pueden ser atacados por el cianuro. Generalmente solo se cianuran los minerales situados en la zona de oxidación donde la mayoría de los sulfuros ha sido convertidos en óxidos. Cuando los minerales auroargentíferos están ligados a sulfuros de plomo, cobre y zinc, la práctica general es flotarlos y posteriormente recuperar los metales preciosos en la afinación de los metales impuros obtenidos en la fundición donde se tratan los concentrados.

Minerales de cobre: El cobre contenido en los minerales es bastante soluble en solución. Cuando se trata de beneficiar minerales que contienen oro grueso, esto se hace por concentración gravimétrica y las colas, si aún tienen valores importantes de oro, se cianuran.

Los sulfuros liberan cianuro que reacciona con el alcali sodio y forma sales de sodio. La calamina forma sulfocianuros y quedando el cobre disponible. En el caso de minerales que están en la zona de transición, es decir que contienen sulfuros y óxidos, a menudo se tratan primero por flotación para recuperar los sulfuros y posteriormente se cianuran las colas de flotación.

en el consumo de cianuro. En algunos minerales se piritiza con altas temperaturas de cobre. Cuando se benefician minerales auríferos que están en la zona de sulfuros o el oro está encapsulado en piritas y arsenopiritas o que contienen carbón que obra como un precipitante, a todos estos minerales se les llama refractarios y son tratados previamente para destruir los cristales de piritita y arsenopiritita y en alguna forma eliminan el carbón y después son beneficiados por Cianuración.

Fe 5. Además de las condiciones arriba escritas, el mineral no debe tener sustancias que consuman cianuro (llamadas cianicidas) en cantidades que hagan incosteable el proceso por el excesivo consumo de éste, o que se combinen con el cianuro formando sales que perjudiquen el proceso.

A continuación se presenta una lista y una explicación sobre estos minerales:

Minerales de zinc: Los minerales de zinc son algo solubles en soluciones de cianuro. Los más solubles con los carbonatos y óxidos y en menor proporción los sulfatos y silicatos. Aparte de consumir cianuro, los cianuros de zinc y sodio, en alguna forma afectan las reacciones de disolución del cianuro con los minerales de plata y oro. Sin embargo, parece ser que son reacciones reversibles que no tienen mucha influencia en el proceso. Cuando los contenidos de zinc son del orden de 1% o menores, no tienen impacto notable sobre el proceso. Cuando los contenidos son mayores, puede haber problemas de consumo de cianuro y de disolución, principalmente en los minerales de plata.

Minerales de cobre: El cobre contenido en los minerales es bastante soluble en soluciones de cianuro. Los minerales oxidados, incluyendo la calcocita son de los más solubles; los menos son la calcopirita y la crisocola. Los carbonatos generan complejos cianógenos y liberan cianuro que reacciona con el álcali (sosa) y cianato de sodio. La calcocita forma cuprocianatos quedando el cobre disuelto. La existencia de estos complejos de cianuro y cobre estorba bastante la disolución del oro. Al parecer, para tener buenas recuperaciones, hay que aumentar la concentración de las soluciones. La presencia de cobre siempre significa aumento en el consumo de cianuro. En algunas minas con mineral con altos contenidos de cobre, se usa agregar amonio disminuyendo sensiblemente el consumo de cianuro.

La pirrotita: Esta pirita o pirita magnética, es también perjudicial cuando se trata de cianurar un mineral porque reacciona con las sales de cianuro destruyéndolas de acuerdo a la siguiente reacción:

$\text{Fe}_5\text{S}_6 + \text{NaCN} = \text{NaCNS} + 5\text{FeS}$. Posteriormente se oxida el FeS, entonces

$\text{FeS} + 2\text{O}_2 = \text{FeSO}_4$ y el sulfato de fierro reacciona con el cianuro:

$\text{FeSO}_4 + 6 \text{NCN} = \text{Na}_4\text{Fe}(\text{CN}) + \text{Na}_2\text{SO}_4$.

PRO Por consiguiente la pirrotita no solo consume cianuro, además consume oxígeno en solución retardando la Cianuración. La solución, cuando hay pirrotita, es una aeración en medio alcalino, para que la pirrotita reaccione con los alcalíes y forme hidróxido de fierro. Después se agrega el cianuro.

Otras La presencia de minerales de antimonio y arsénico puede afectar la cianuración de minerales cuando existen los sulfuros de estos metales, oro pimiento y estibnita. Esto es importante cuando el pH de la operación sube a 12 o más. Para corregir el efecto negativo de estas reacciones hay que vigilar el pH y agregar nitrato de plomo. La cantidad de nitrato para el caso de la estibnita es de 0.30 lbs. /ton. En el caso de oro pimiento es mayor.

PROCESOS DE TRATAMIENTO DE MENAS DE ORO

TIPO DE MENA AURIFERA	PROCESOS
<p>1. ORO LIBRE</p> <p>-Aluviones, Eluviones, Fluviones. -Otras menas.</p>	<p>*Concentración gravimétrica-Aglomeración-cianuración residuos (oro fino).</p> <p>*idem.</p> <p>* Concentración gravimétrica- flotación-cianuración residuos (oro fino).</p>
<p>2. ORO COMBINADO</p> <p>-Teluros</p>	<p>*flotación-oxidación (tostación) concentrados-cianuración, Cianuración residuos.</p> <p>*cianuración directa</p> <p>Tratamiento residuos con SO₂</p> <p>Flotación- tostación concentrados-cianuración.</p> <p>*flotación-cianuración concentrados-tostación residuos cianuración.</p>
<p>3. ORO ASOCIADO</p> <p>-Pirita y marcasita</p>	<p>*concentración gravimétrica (del oro y/o sulfuros si están liberados).</p> <p>*flotación-fusión de concentrados (oro en sulfuros).</p> <p>*flotación-cianuración residuos (oro en ganga).</p> <p>*flotación-cianuración concentrados con o sin tostación, cianuración residuos (oro en sulfuros y ganga).</p> <p>*flotación-concentración auríferos (para venta)-cianuración residuos.</p> <p>*cianuración -flotación residuos-recianuración</p>

<p>-Pirrotina</p> <p>-Arsenopirita</p>	<p>concentrado con o sin tostación.</p> <p>*calcinación-cianuración.</p> <p>*oxidación química-cianuración.</p> <p>*cianuración (pre aireación y baja alcalinidad).</p> <p>*cianuración-flotación residuos- recianuración concentrados con o sin tostación.</p> <p>*flotación-tostación concentrados-cianuración.</p> <p>Cianuración residuos flotación.</p> <p>*flotación-concentración auríferos (para venta)</p> <p>Cianuración. Cianuración residuos flotación.</p> <p>*tostación-cianuración.</p> <p>*cianuración directa.</p>
<p>-Minerales Complejos de Cobre (Principalmente con calcopirita).</p>	<p>*flotación-fusión concentrados de cobre (Oro en lodos electrolíticos).</p> <p>*flotación diferencial Cu-Mo-Cianuración concentrado Mo.</p> <p>*flotación-fusión de concentrados cobre (oro en sulfuros).</p> <p>*cianuración de residuos flotación (oro en ganga).</p>
<p>-Minerales Complejos Plomo-Zinc (igual a minerales complejos de cobre).</p> <p>-Óxidos de Hierro</p>	<p>*gravimetría-amalgación (si el oro se libera por conminución).</p> <p>*conminución-cianuración directa.</p>
<p>-Minerales de Uranio.</p>	<p>*flotación-lixiviación ácida, concentrado (extracción de uranio)-tostación del</p>

<p>-Minerales Carbonaceos y Grafíticos</p> <p>-Silicatos, Carbonatos (minerales sedimentarios con oro fino y pocos sulfuros).</p>	<p>concentrado-cianuración.</p> <p>*calcinación-cianuración.</p> <p>*oxidación química-cianuración.</p> <p>*pasivación superficie material carbonaceo (reactivos específicos)-cianuración.</p> <p>*pasivación superficie material carbonaceo (reactivos específicos)-cianuración.</p> <p>*flotación-oxidación concentrado-cianuración (si el oro está solo en material carbonaceo).</p> <p>*flotación carbón-cianuración residuo (si el oro no está en material carbonaceo).</p> <p>*cominución-cianuración.</p>
---	--

Tabla 3 Tratamiento de Menas de Oro.

7.7.2 Equipos que se usan en la Cianuración

PROCESOS DE TRATAMIENTO DE MENAS DE PLATA.

En una planta convencional de cianuración, se usan los sistemas

TIPO ASOCIACION PLATA	PROCESO DE TRATAMIENTO
I) y V) Sulfuros Complejos	<ul style="list-style-type: none"> *flotación-fusión de concentrados metalicos. *ídem-cianuración de residuos. *flotación-tostación de concentrados-cianuración.
II) Plata Nativa y combinaciones de Haluros.	<ul style="list-style-type: none"> *concentración gravimétrica-amalgación-cianuración (Ag). *cianuración (cloruros y sulfuros).
III) Minerales Semi- Óxidos.	<ul style="list-style-type: none"> *flotación-cianuración de residuos.
IV) Asociaciones con Óxidos.	<ul style="list-style-type: none"> *cianuración (óxidos de fe). *reducción-cianuración (óxidos de Mn). Segregación (óxidos de Mn).

Tabla 4 Tratamiento de menas de plata.

7.7.2 Equipos que se usan en la Cianuración

En una planta convencional de cianuración, se usan los sistemas tradicionales de trituración y molienda para llevar la molienda a un tamaño que indiquen las pruebas metalúrgicas. Esta molienda generalmente es de 80% a menos 150 mallas, a 80% a menos 200 mallas, según las características del mineral. Debe advertirse que la disolución de los valores empieza en el circuito de la molienda agregándose solución de cianuro en vez de agua. Una buena parte de los valores queda disuelta en el circuito de molienda y posteriormente la pulpa ya molida que entregan los ciclones pasa a unos tanques agitadores donde se le da a la pulpa un tratamiento que varía de 24 a 72 horas. *Figura 1.*

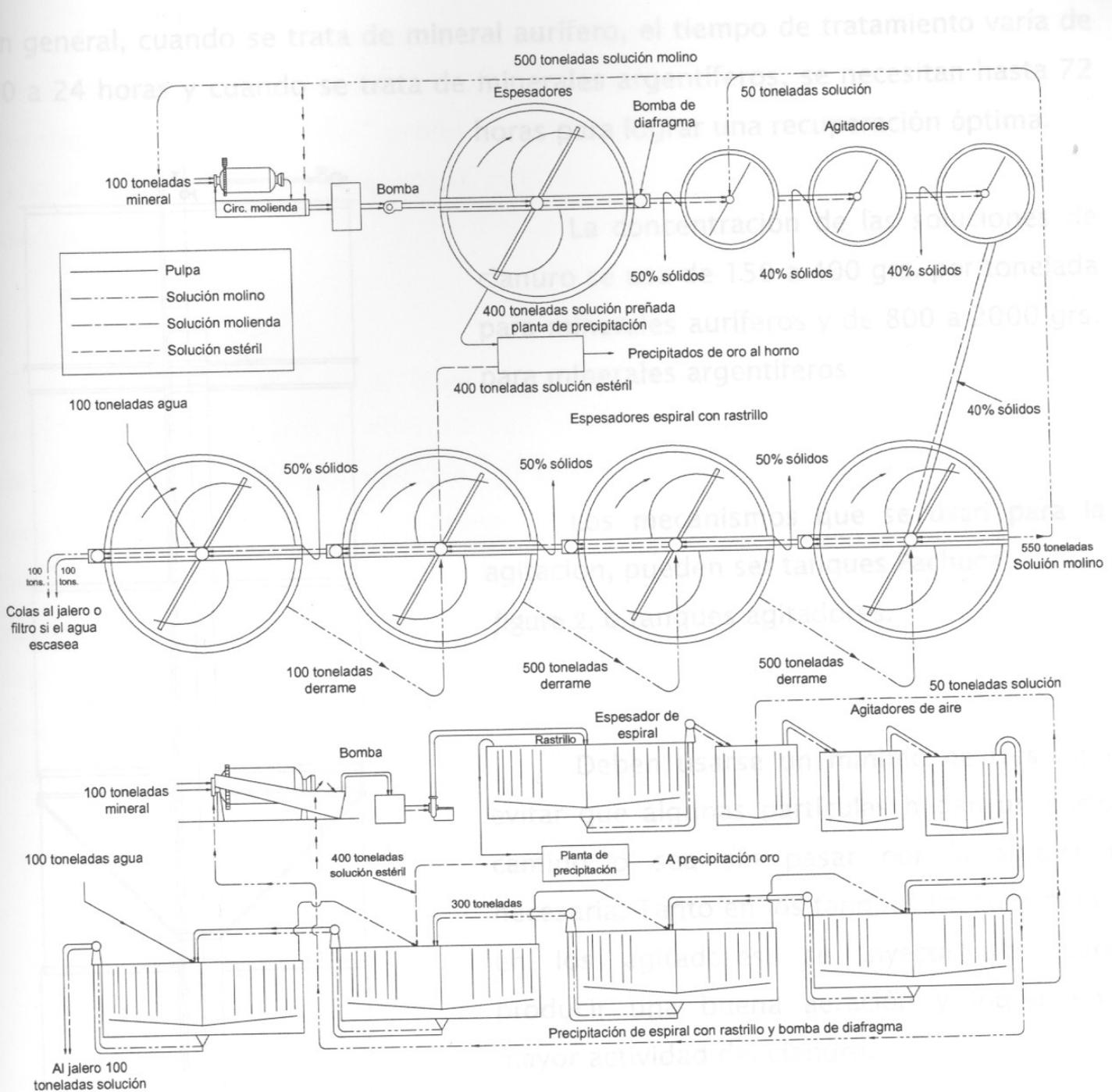
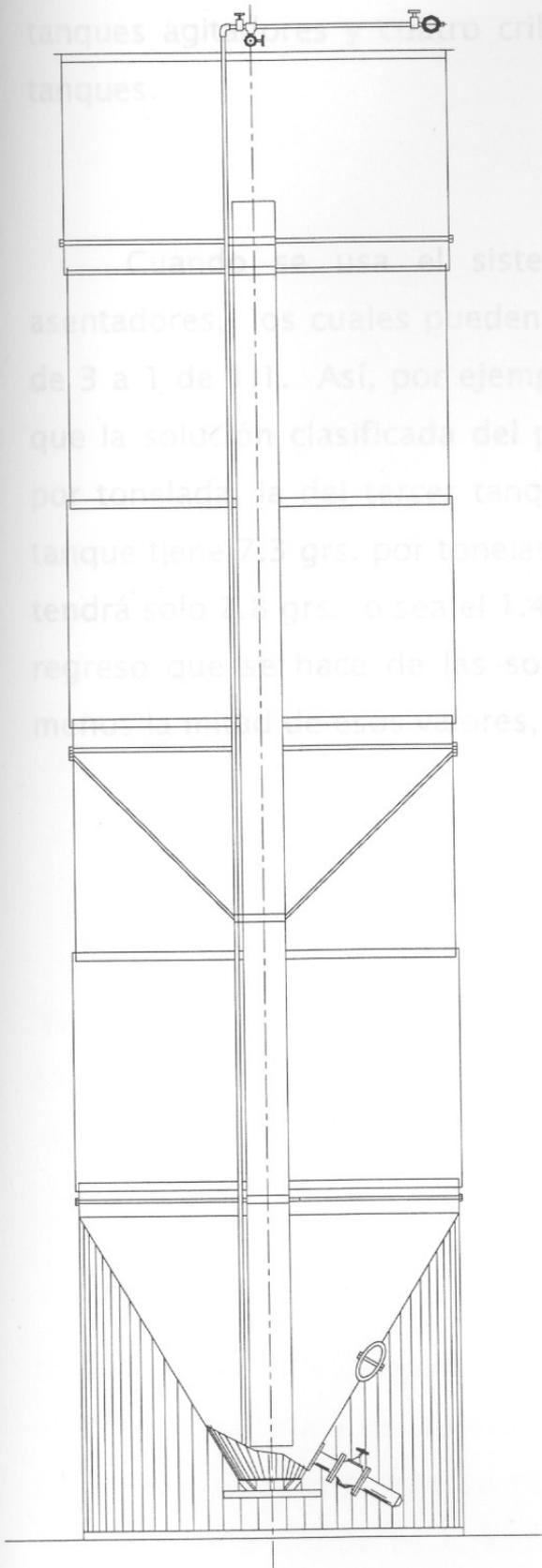


Figura 1.-Planta de Cianuración.

Figura 2. Tanques agitadores

En general, cuando se trata de mineral aurífero, el tiempo de tratamiento varía de 10 a 24 horas y cuando se trata de minerales argentíferos, se necesitan hasta 72 horas para lograr una recuperación óptima.



La concentración de las soluciones de cianuro se usa de 150 a 400 grs. por tonelada para minerales auríferos y de 800 a 2000 grs. para minerales argentíferos.

Los mecanismos que se usan para la agitación, pueden ser tanques Pachuca, o tanques agitadores.

Deben usarse un mínimo de tres para evitar que algunas partículas hagan un corto camino o sea sin pasar por la agitación necesaria. Tanto en los tanques Pachuca como en los agitadores, se inyecta aire para producir una buena aeración y lograr una mayor actividad del cianuro.

Los tanques Pachuca no tienen partes en movimiento y la agitación la produce el aire que se inyecta y trabaja como "air lift". Los tanques agitadores tienen un mecanismo que agita la pulpa y además dos "air lifts" que la inyectan con aire. (Figuras 3a y 3b).

Figura 2. Tanques agitadores

7.7.3. Agitador de Lamas

Generalmente, las pulpas que se manejan en los mecanismos de agitación, tienen 50% de mineral molido y 50% de solución de cianuro. Cuando se trata de plantas con el proceso de "carbón en pulpa" C.I.P., generalmente se usan cuatro tanques agitadores y cuatro cribas que recogen el carbón que descargan dichos tanques.

Cuando se usa el sistema de contracorriente se utilizan los tanques asentadores, los cuales pueden reducir la dilución de las pulpas de 4 a 1 a 1:1; o de 3 a 1 de 1:1. Así, por ejemplo, si se usa una dilución de 3 a 1 y suponemos que la solución clasificada del primer asentador tiene una ley de 200 grs. de Ag por tonelada, la del tercer tanque tiene solo 22 grs. por tonelada, la del cuarto tanque tiene 7.3 grs. por tonelada y la del último tanque que va a la presa de jales, tendrá solo 2.8 grs., o sea el 1.4% de los valores disueltos. De éstos, todavía en el regreso que se hace de las soluciones de la presa de jales, se recupera por lo menos la mitad de esos valores, quedando el resto en la presa.

Figura 36- Agitador de Lamas

Para una mejor comprensión de este sistema de beneficio, se adjunta el "flow sheet" de una planta de Cianuración para 100 toneladas por hora que trabaja contracorriente. Para capacidades mayores solo se usan equipos más grandes. (Figura 36.026)

Para las plantas de precipitación se han usado las cajas de zinc que trabajan con viruta de zinc. (Figura 36.027) En estas cajas el zinc está colocado sobre una tarima de madera y cada determinado tiempo se limpia la viruta con un chorro de solución y el precipitado se recoge en el fondo del tanque que tiene pendiente hacia un lado donde se colecta el precipitado, se seca y vende para obtener el Doré. Estas cajas solamente las usan algunos gambusinos que benefician terrenos y jaleros viejos o minas muy pequeñas. (Figura 36.028)

7.7.3. Agitador de Lamas

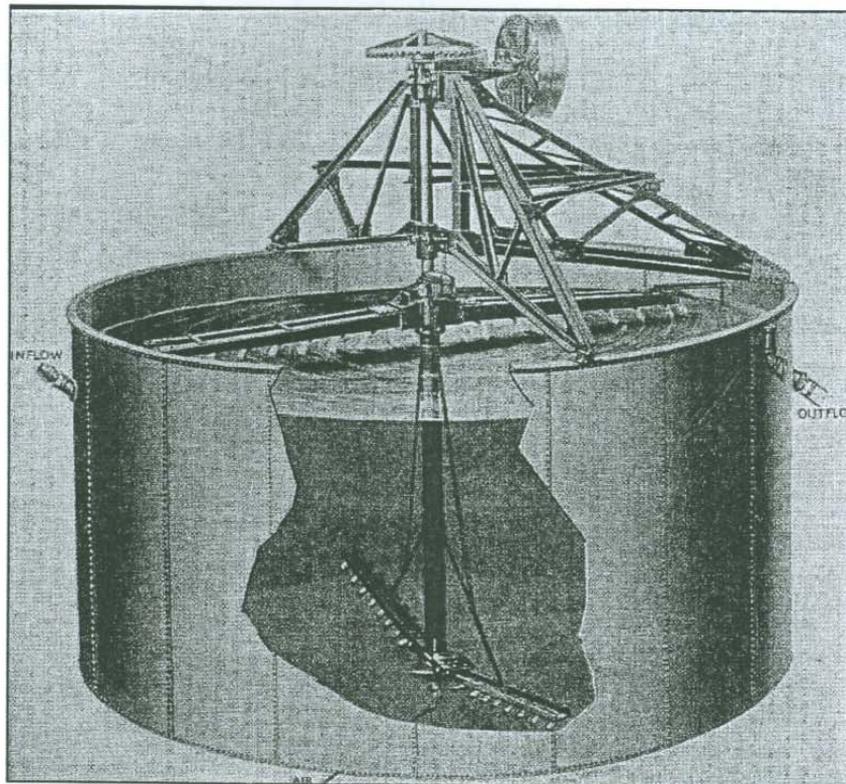


figura 3a.- Agitador de Lamas.

Para una mejor comprensión de este sistema de beneficio, se acompaña un “flow-sheet” de una planta de Cianuración para 100 toneladas diarias con contracorriente. Para capacidades mayores solo se usan equipos mayores. (Figura 5a y 5b).

Para las plantas de precipitación se han usado las cajas de zinc que trabajan con viruta de zinc. (Figura 2). En estas cajas el zinc está depositado sobre una tarima de madera y cada determinado tiempo se limpia la viruta con un chorro de solución y el precipitado se recoge en el fondo del tanque que tiene pendiente hacia un lado donde se colecta el precipitado; se seca y funde para obtener el Doré. Estas cajas solamente las usan algunos gambusinos que benefician terrenos y jaleros viejos o minas muy pequeñas. (Figura 6).

La precipitación por el sistema Merrill Crowe que ya describimos, consta del filtro de lamas, la bomba de vacío, el alimentador de zinc, la bomba que inyecta la solución al filtro y el filtro. Este se limpia cada determinado tiempo y los precipitados se secan y se funden.

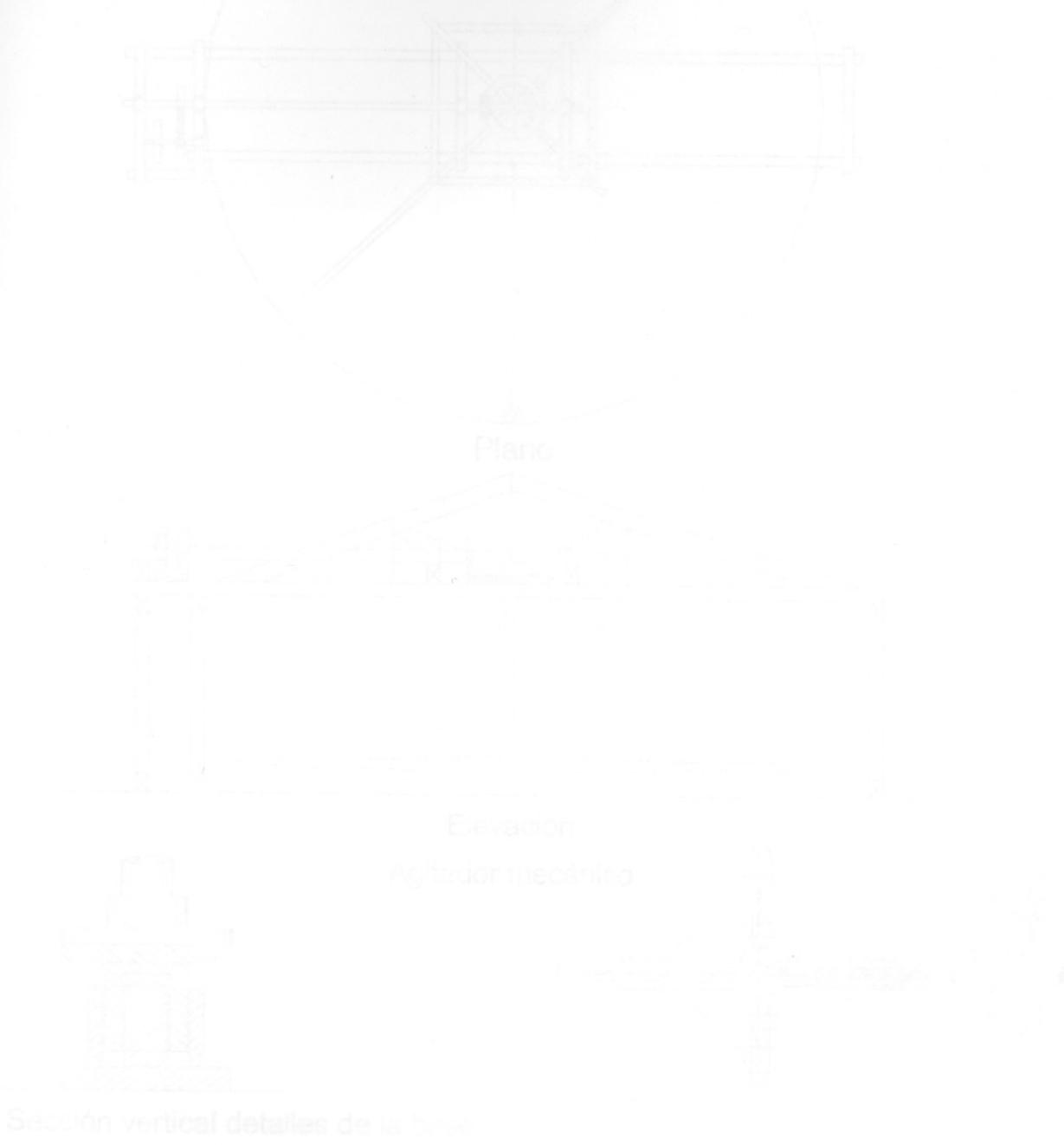


Figura 3b.- Agitador Mecánico

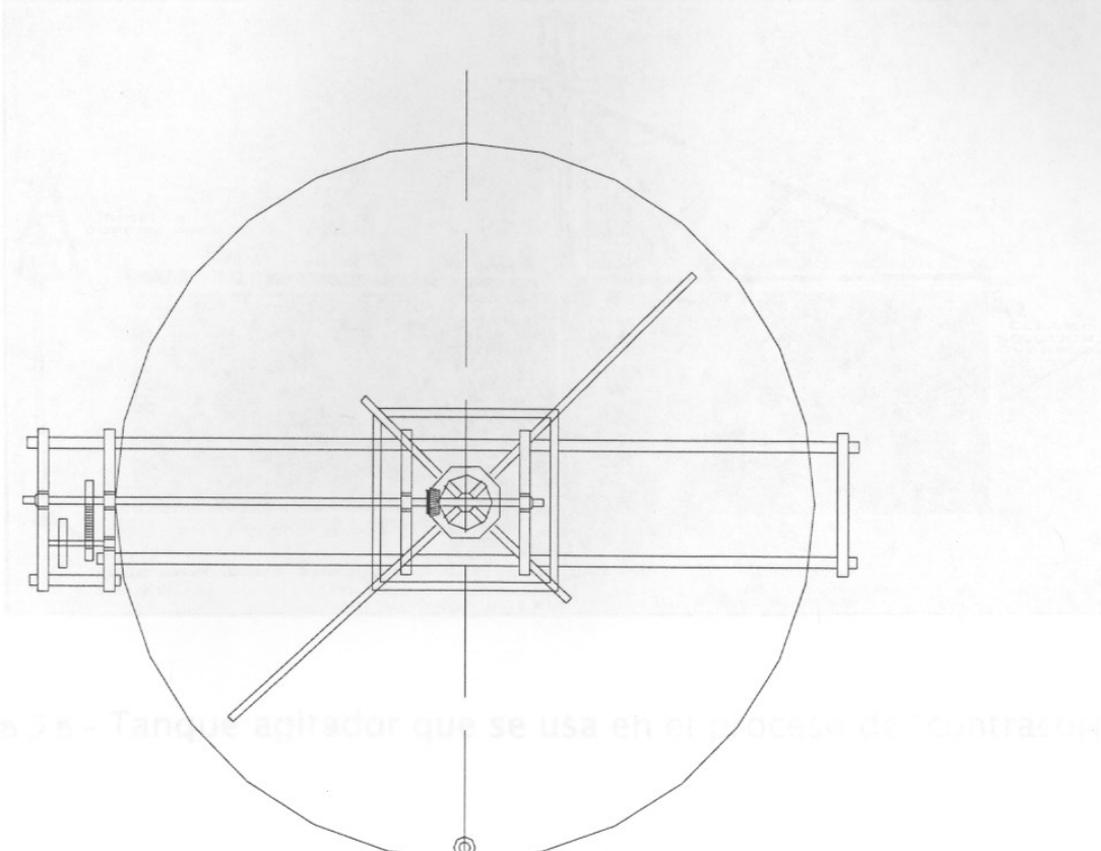
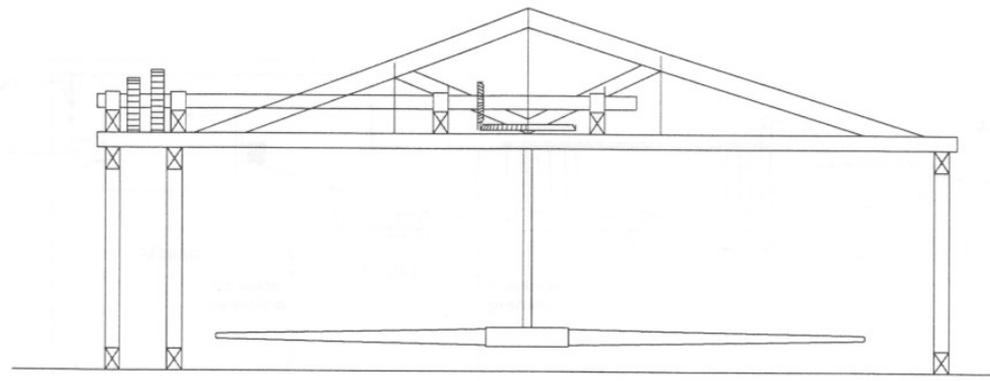


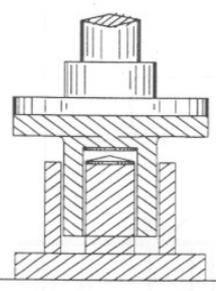
Figura 3a.- Tanque agitador que se usa en el proceso de contracción

Plano



Elevación

Agitador mecánico



Sección vertical detalles de la base

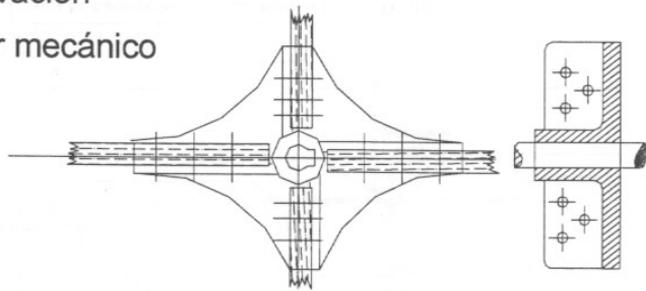


Figura 3b.- Diagrama de un Agitador Mecánico.

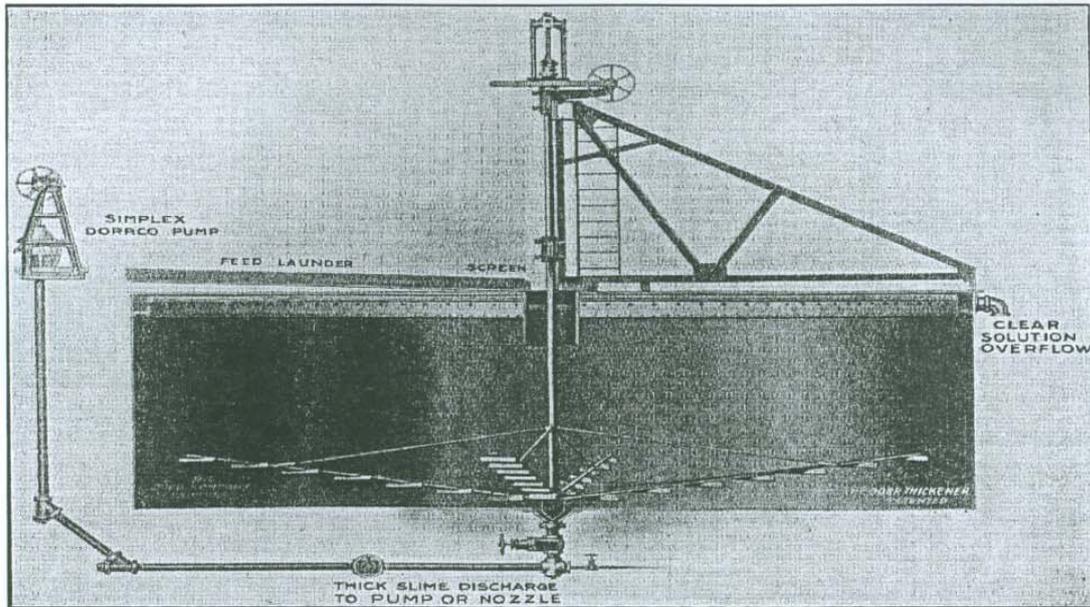


Figura 5 a.- Tanque agitador que se usa en el proceso de “contracorriente”

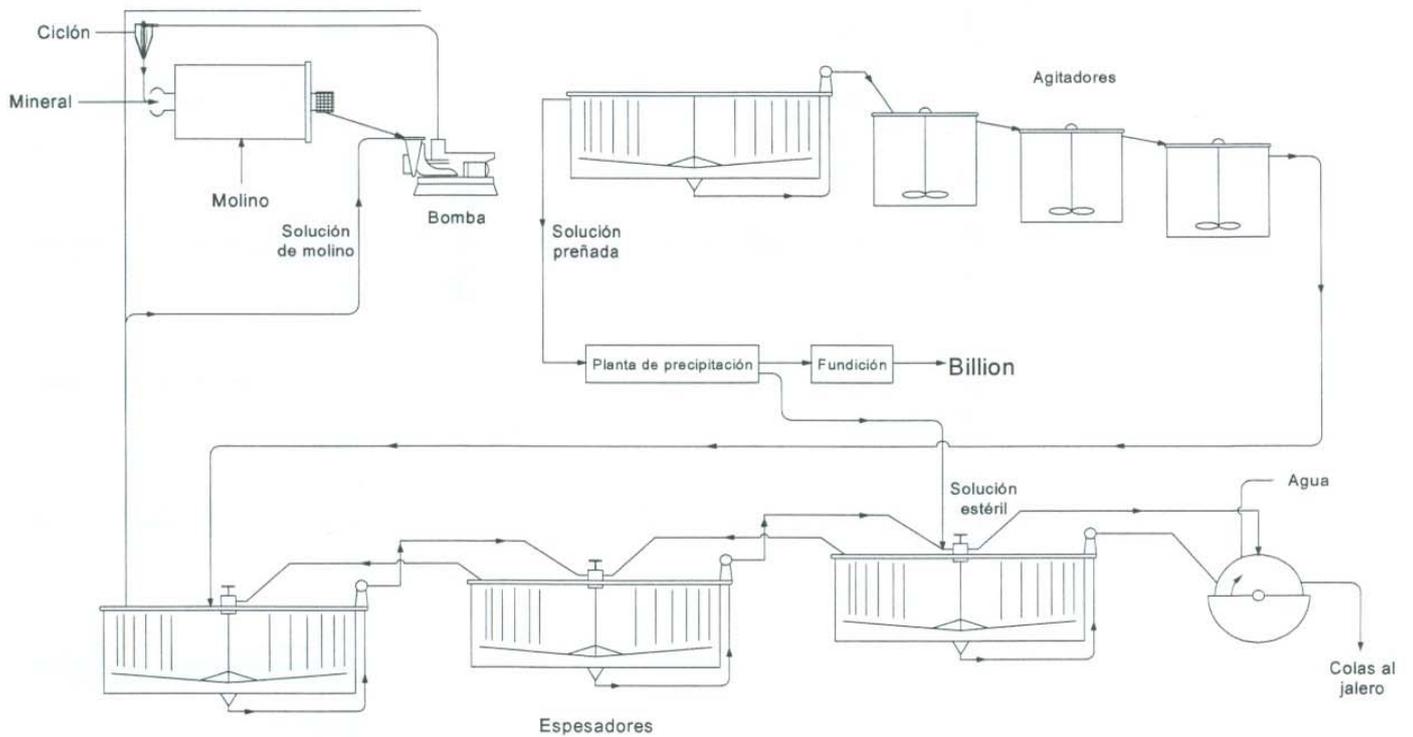
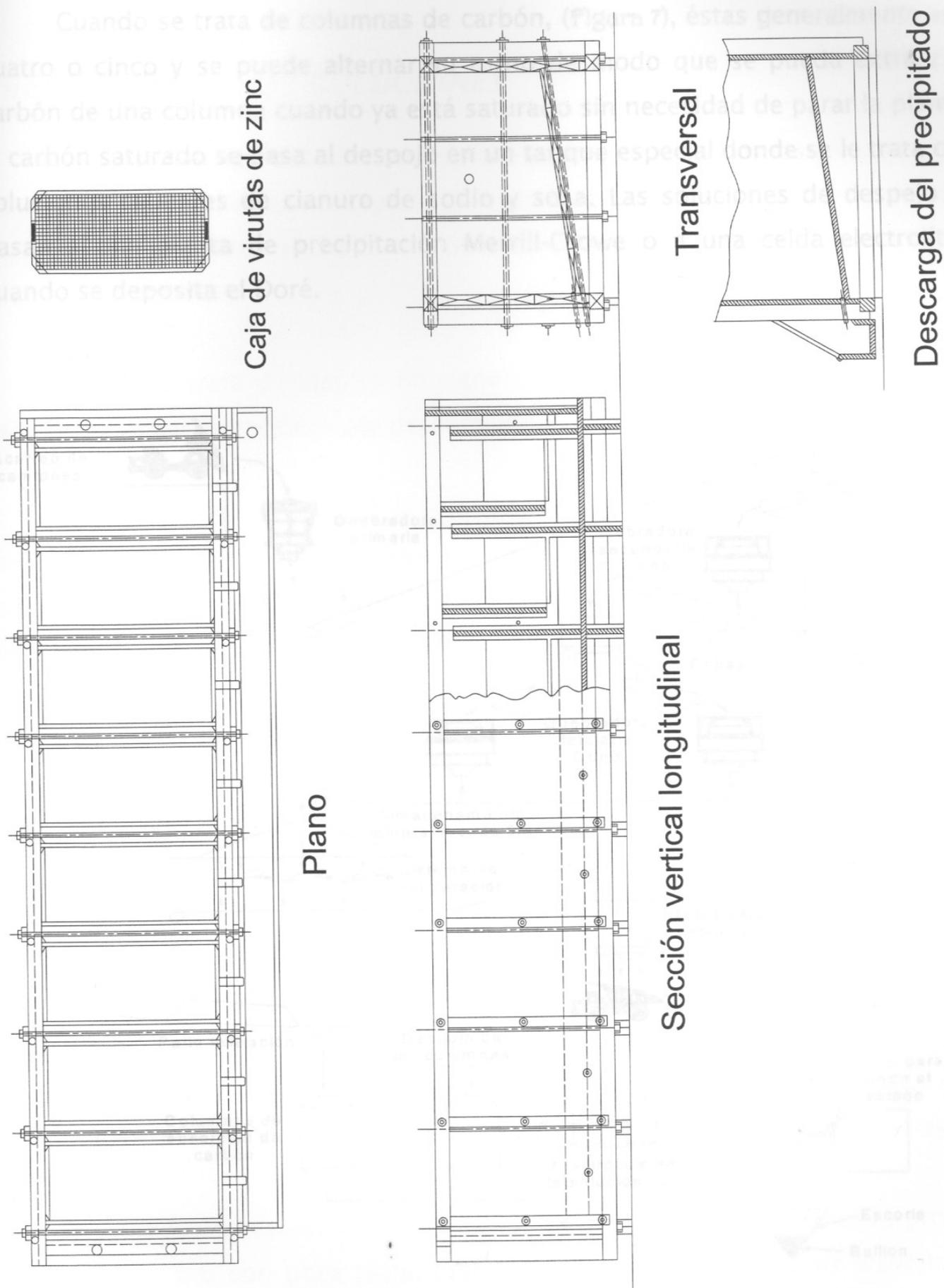


Figura 5b.- Diagrama de flujo de una planta de cianuración.



Caja de virutas de zinc

Figura 6.- Caja de Virutas de Zinc.

Cuando se trata de columnas de carbón, (Figura 7), éstas generalmente son cuatro o cinco y se puede alternar su turno de modo que se pueda extraer el carbón de una columna cuando ya está saturado sin necesidad de parar la planta. El carbón saturado se pasa al despojo en un tanque especial donde se le trata con soluciones calientes de cianuro de sodio y sosa. Las soluciones de despojo se pasan a una planta de precipitación Merrill-Crowe o a una celda electrolítica cuando se deposita el Doré.

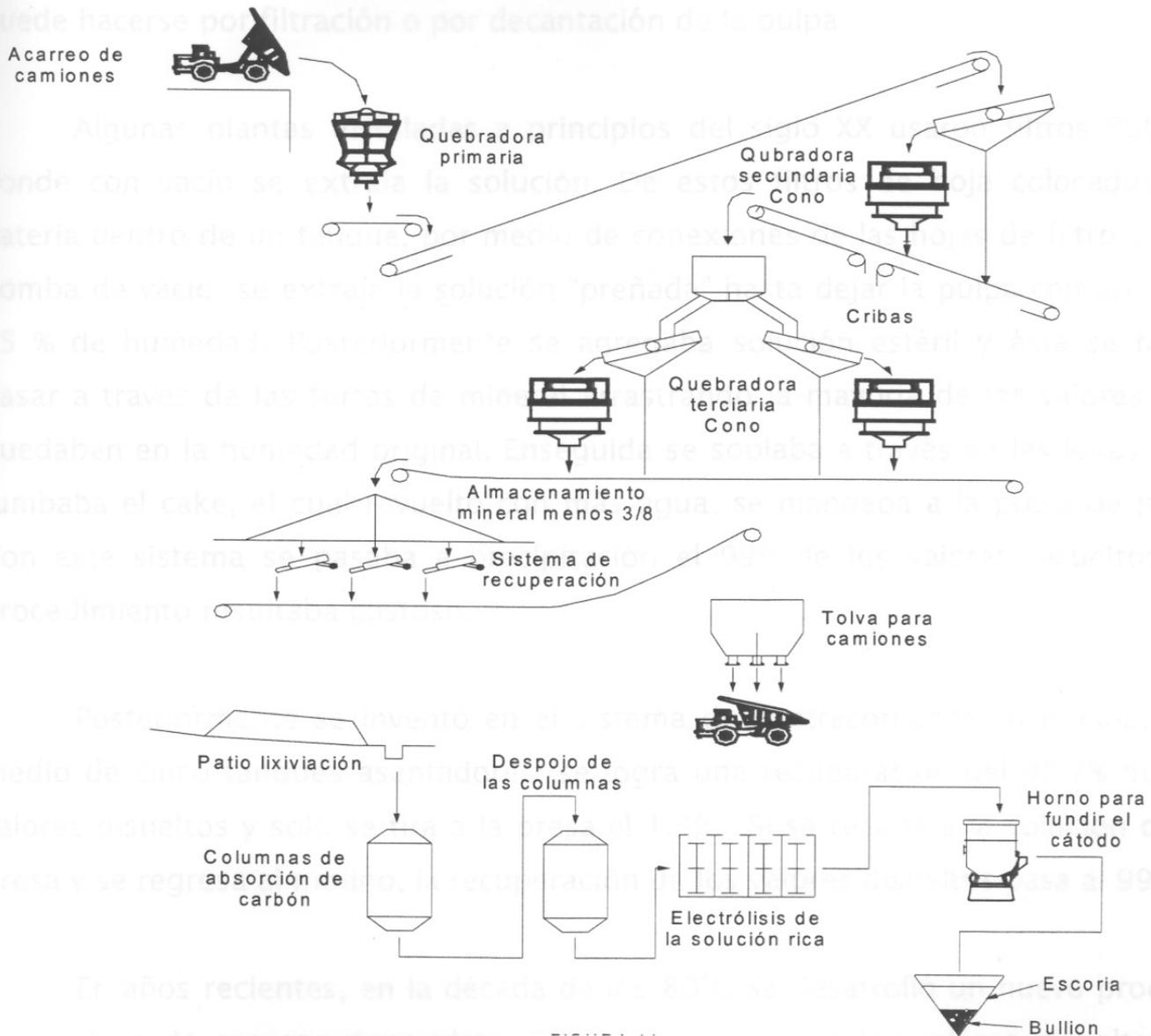


Figura 7.- Columnas de carbón.

8. RECUPERACION DE SOLUCIONES

Para poder recuperar los valores de oro y plata disueltos en las soluciones de cianuro, primero es necesario separar dichas soluciones "preñadas" de la pulpa o mineral al que se le han extraído dichos valores. Hay varios procedimientos para lograr esta separación.

Generalmente, las soluciones antes de pasar a la precipitación, son depositadas en un tanque. Cuando se trata de plantas de cianuración convencionales, esta separación puede hacerse por filtración o por decantación de la pulpa.

Algunas plantas instaladas a principios del siglo XX usaron filtros Butters donde con vacío se extraía la solución. De estos filtros de hoja colocados en batería dentro de un tanque, por medio de conexiones de las hojas de filtro a una bomba de vacío, se extraía la solución "preñada" hasta dejar la pulpa con un 12 a 15 % de humedad. Posteriormente se agregaba solución estéril y ésta se hacía pasar a través de las tortas de mineral arrastrando la mayoría de los valores que quedaban en la humedad original. Enseguida se soplabo a través de las lonas y se tumbaba el cake, el cual revuelto con más agua, se mandaba a la presa de jales. Con este sistema se pasaba a precipitación el 99% de los valores disueltos. El procedimiento resultaba costoso.

Posteriormente se inventó en el sistema de contracorriente en el cual, por medio de cinco tanques asentadores, se logra una recuperación del 98.7% de los valores disueltos y solo se tira a la presa el 1.3%. Si se recupera la solución de la presa y se regresa al molino, la recuperación de los valores disueltos pasa al 99%.

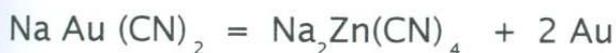
En años recientes, en la década de los 80's, se desarrolló un nuevo proceso para minas de oro con poca plata. Este consiste en que los valores disueltos se recuperan agregando carbón a la pulpa y éste atrapa el oro disuelto. Por medio de un sistema similar, en contracorriente, operando en los tanques de lixiviación, atrapando el carbón fibroso, separándolo de la pulpa por medio de cribas, se

recuperan los valores de oro sin necesidad de la fuerte inversión que significan los asentadores de contracorriente.

Cuando se trata del proceso de "heap leaching", las soluciones con las que se lavan los terreros solo arrastran pequeñas cantidades de arcilla y éstas deben pasarse por un filtro Butters para evitar que la arcilla interfiera en la precipitación.

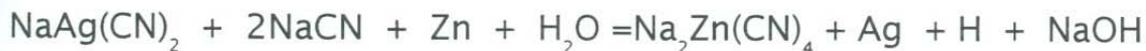
Generalmente, las soluciones antes de pasar a la precipitación, son depositadas en un tanque donde gran parte de la arcilla se asienta y después son pasadas por el filtro.

Una solución de cianuro con oro o con plata, en contacto con zinc metálico, precipita el oro y la plata y disuelve el zinc de acuerdo a las siguientes reacciones:



De acuerdo a esta reacción, se necesitan 0.166 gramos de Zn para recuperar un gramo de oro y 0.300 gramos de Zn para recuperar un gramo de plata.

Si la reacción que se efectúa es:



Se necesitan 0.303 grs. de Zn por gramo de oro recuperado 0.606 grs. de zinc por gramo de plata.

Originalmente la precipitación se hacía con viruta de zinc en cajas de doble fondo. Posteriormente se usó el polvo de zinc por el proceso Merrill-Crowe que consiste en un filtro para limpiar de lamas la solución, el que trabaja mediante vacío, el cual, a su vez, elimina el oxígeno de la solución ayudando así a una mejor

precipitación. A la solución desoxigenada se le agrega polvo de zinc el cual reacciona casi instantáneamente produciendo un precipitado de oro y plata. Debe agregarse un ligero exceso de zinc para evitar que se pasen valores y los concentrados son recuperados en un filtro prensa.

La solución estéril a la que se han quitado los valores, se recircula al proceso y los precipitados recogidos en el filtro son secados y después fundidos para obtener el Doré. Es conveniente en el proceso Merrill-Crowe, agregar un poco de solución de cianuro fresco junto al polvo de zinc. También se agrega nitrato o acetato de plomo en pequeñas cantidades 20 ó 30 granos por tonelada de solución para evitar reacciones que obstaculicen la precipitación (Figura 7).

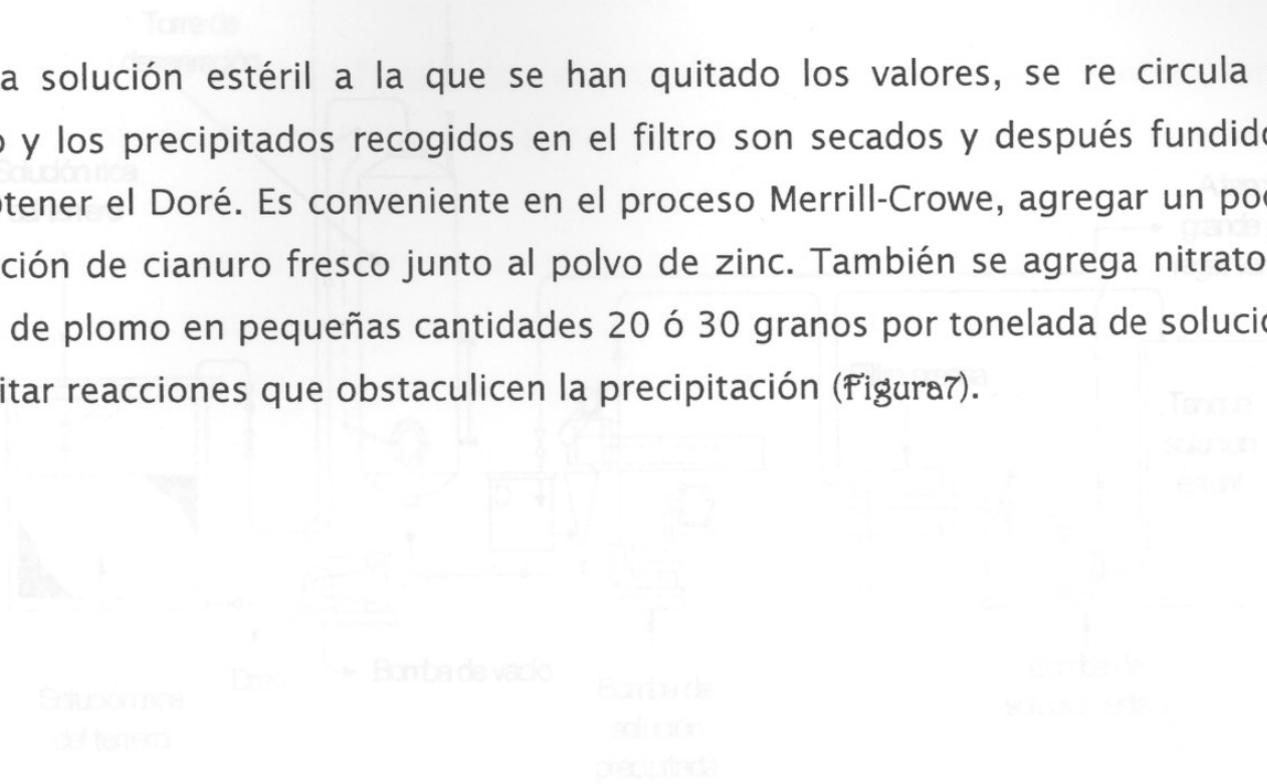


Figura 7. Planta de precipitación Merrill-Crowe (con filtro prensa).

Cuando se trata de plantas que benefician minerales de oro en alta pasta, se usa carbón activado para precipitar el oro. Este carbón que es fibroso, puede absorber hasta 6 kilos de oro por tonelada de carbón. Este se coloca en columnas donde circula la solución. Estas columnas se usan típicamente en las operaciones de "heap leaching", o cuando se usa el sistema de carbón en pulpa éste se agrega en los tanques agitadores, recuperándose el carbón en cribas vibratorias, circulando éste en contracorriente con la pulpa. Las cribas se colocan en las descargas de los tanques agitadores (Figura 8).

El carbón, ya sea recuperándolo en las columnas o en las cribas, es posteriormente pasado a un sistema de "stripping" (extracción), la que se hace

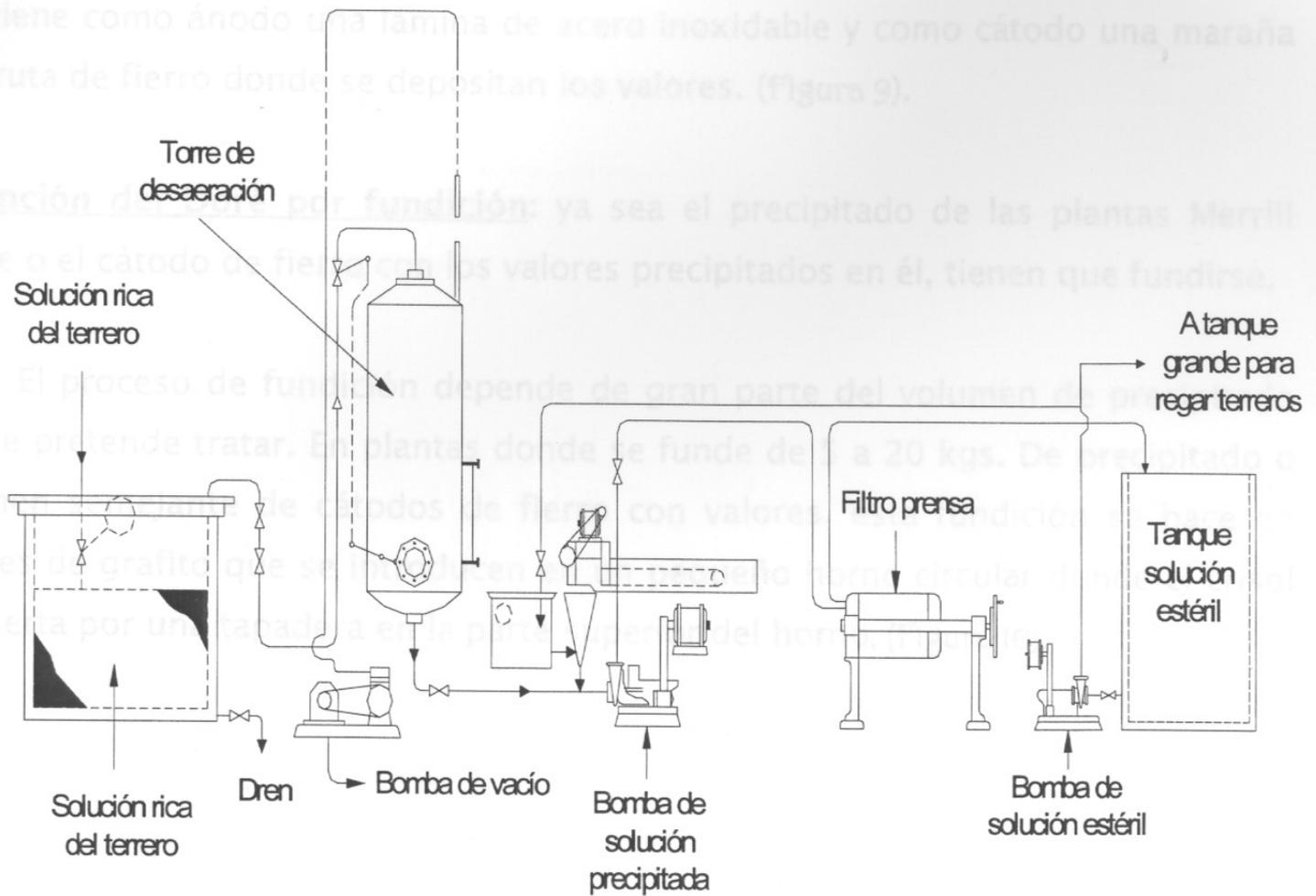


Figura 7.- Planta de precipitación Merrill Crowe (con filtro prensa)

Cuando se trata de plantas que benefician minerales de oro con poca plata, se usa carbón activado para precipitar el oro. Este carbón que es fibroso, puede absorber hasta 6 kilos de oro por tonelada de carbón. El carbón se coloca en columnas donde circula la solución. Estas columnas se usan principalmente en las operaciones de "heap leaching", o cuando se usa el sistema de carbón en pulpa éste se agrega en los tanques agitadores, recuperándose el carbón en cribas vibratorias, circulando éste en contracorriente con la pulpa. Las cribas se colocan en las descargas de los tanques agitadores (Figura 8).

El carbón, ya sea reuniéndolo en las columnas o en las cribas, es posteriormente pasado a un sistema de "stripping" (extracción), la que se hace

tratando el carbón en un tanque con una solución rica. Este oro puede precipitarse con zinc en una planta Merrill Crowe o por electrólisis en una celda electrolítica que tiene como ánodo una lámina de acero inoxidable y como cátodo una maraña de viruta de hierro donde se depositan los valores. (Figura 9).

Obtención del Doré por fundición: ya sea el precipitado de las plantas Merrill Crowe o el cátodo de hierro con los valores precipitados en él, tienen que fundirse.

El proceso de fundición depende de gran parte del volumen de precipitado que se pretende tratar. En plantas donde se funde de 5 a 20 kgs. De precipitado o volumen semejante de cátodos de hierro con valores, esta fundición se hace en crisoles de grafito que se introducen en un pequeño horno circular donde el crisol se inserta por una tapadera en la parte superior del horno. (Figura 10).

Figura 8.- Diagrama de planta de concentración de carbón en pulpa.

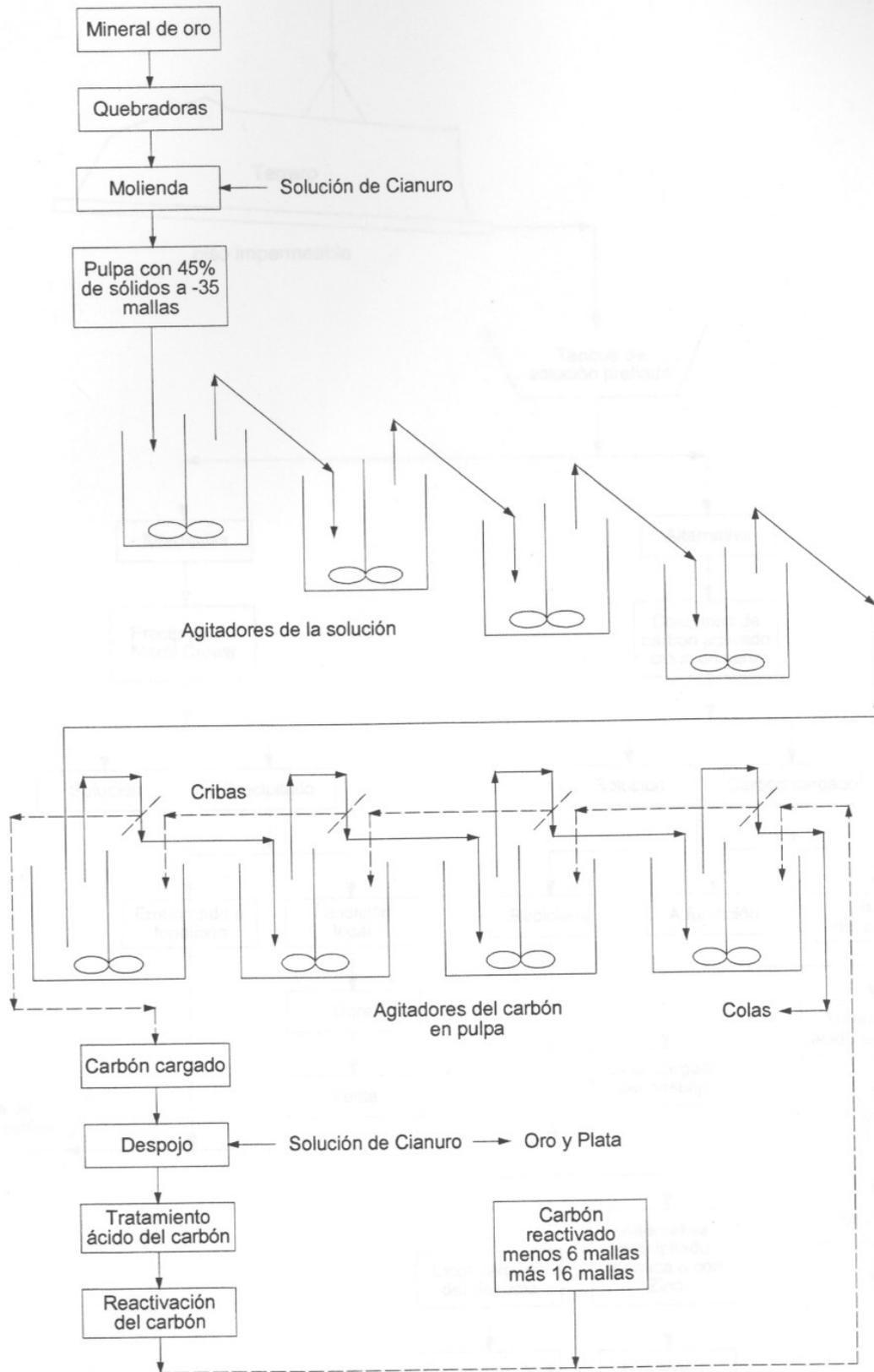


Figura 8.- Diagrama de planta de cianuración con carbón en pulpa.

Figura 9.- Alternativas de uso de Merrill-Crowe o de carbón activado

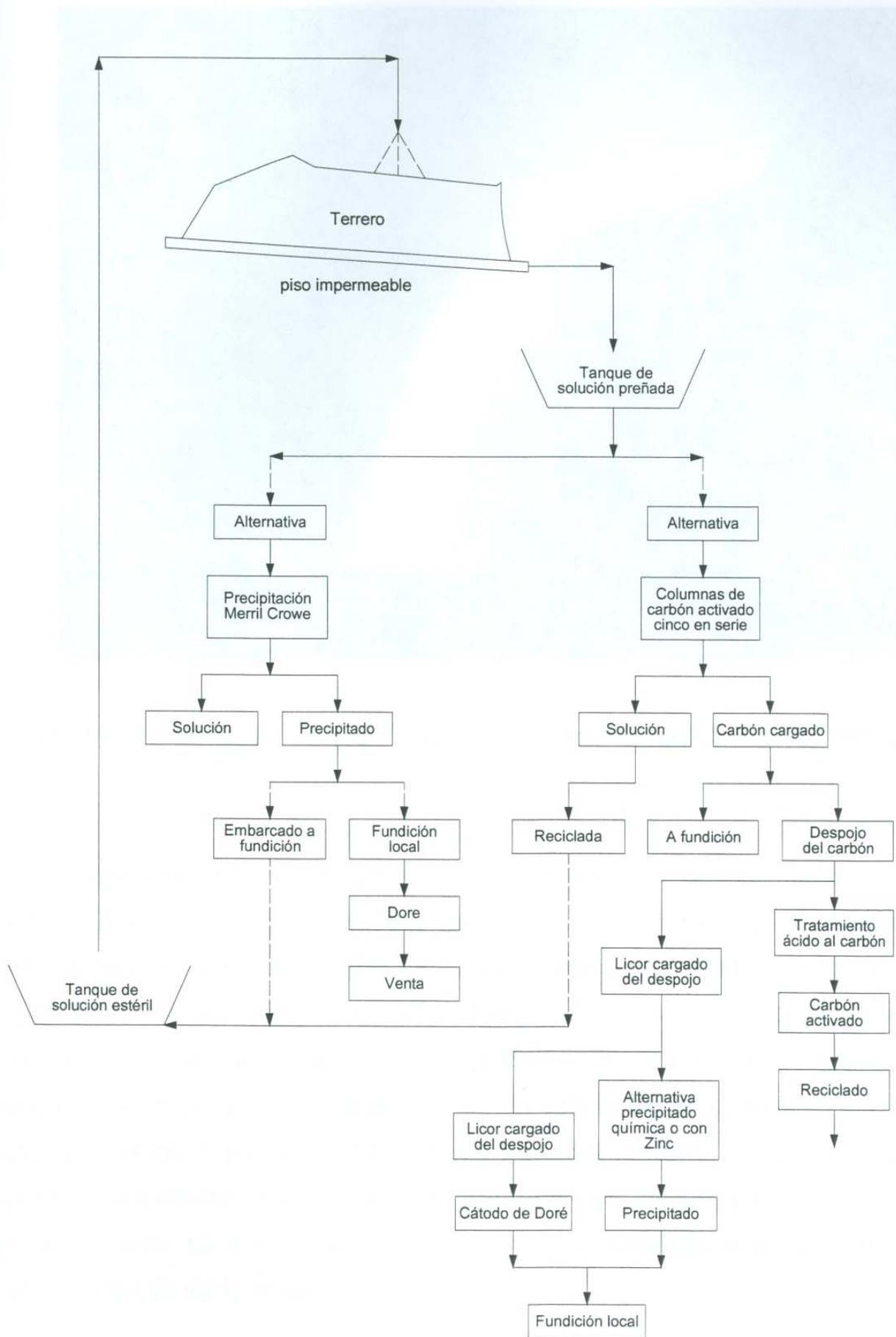


Figura 9.- Alternativas de uso de Merrill Crowe o de carbón activado



Figura 10.- Horno de crisol de grafito para fundir precipitados de oro al momento de vaciar.

El horno tiene un quemador de gas natural, de gas propano o de diesel, haciendo circular la llama alrededor del crisol. Al precipitado se le agrega sílice para escorificar el zinc, carbonato de sodio y bórax como fundentes y se calienta a unos 1200° C. Fundido el precipitado y fundentes, se saca el crisol y se re vacía en un molde de fierro en forma de pirámide invertida. Al enfriarse el producto de la fusión, el doré queda en la parte inferior en forma de una pequeña pirámide y la escoria fácilmente separable, queda como un vidrio enorme al vaciarse del molde y se quiebra fácilmente. A veces la escoria queda con valores y es práctica frecuente volverla a fundir para recuperar el doré que ha quedado repartido en forma de pequeñas gotitas en la masa de la escoria.

Cuando se trata de volúmenes mayores de precipitado, se usa un pequeño horno de reverbero al que se carga el precipitado y fundentes a través de agujeros en la banda del horno. El horno es sangrado por tapones especiales al fundir. Se usan los mismos combustibles que en los hornos de crisol de grafito y el doré se vacía directamente a moldes de barras que suelen ser de 30 a 35 kgs. Por barra. La recuperación en la fundición del Doré, es del orden de 99% o más.

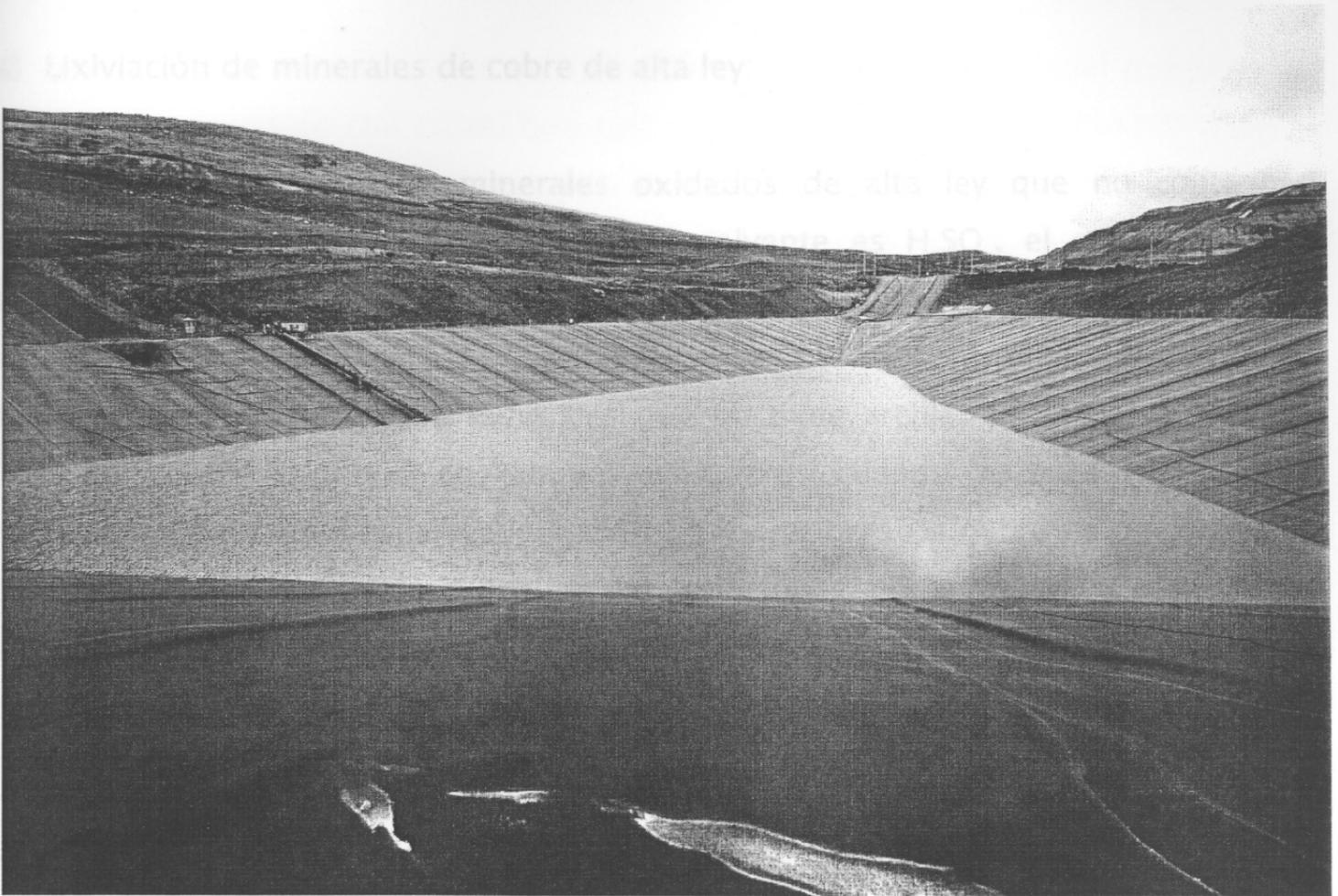


La lixiviación de minerales de cobre es un proceso que se aplica más a medida que su tecnología ha venido incrementándose, haciéndola más eficiente y económica.

Los procesos de lixiviación los podemos dividir en dos, por los solventes usados, después por diferentes procesos aplicados a minerales de alta y baja ley, así como el método de lixiviación in situ.

Los procesos de precipitación también sirven para hacer cemento de cobre precipitando este con fierro o puede usarse en el proceso de extracción por solventes y precipitación electrolítica, método que ha venido revolucionando la industria del cobre por sus bajos costos para obtener cobre electrolítico de alta

9. LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE COBRE



ferro a una planta ESDE. Este proceso lo trataremos mas adelante.

La lixiviación de minerales de cobre es un proceso que se aplica más a medida que su tecnología ha venido incrementándose, haciéndola mas eficiente y económica.

Los procesos de lixiviación los podemos dividir, primero por los solventes usados, después por diferentes procesos aplicados a minerales de alta y baja ley, así como el método de lixiviación "in situ".

Los procesos de precipitación también varían. Se puede hacer cemento de cobre precipitando este con fierro o puede usarse el proceso de extracción por solventes y precipitación electrolítica, método que ha venido revolucionando la industria del cobre por sus bajos costos para obtener cobre electrolítico de alta

mandan a fundición para obtener cobre metálico con un rendimiento de 30 a 80%.

calidad. También podemos hablar de los procesos de precipitación en pulpa para minerales arcillosos, donde se hace difícil la separación del cobre disuelto, de la pulpa estéril.

a) Lixiviación de minerales de cobre de alta ley:

Cuando se trata de minerales oxidados de alta ley que no contengan cantidades importantes de carbonato, el solvente es H_2SO_4 , el que se usa en concentraciones variables de 150 a 250 gm de H_2SO_4 por litro de agua. El pH de las soluciones es de 1.0 a 1.5. El mineral debe ser previamente quebrado y a veces molido. Cuando se trata de minerales que no tiene arcilla, se lixivian en tanques fijos con doble fondo o en tanques agitadores cuando se hace necesaria la molienda. Generalmente la recuperación de los valores de cobre es del orden de 90%. La separación de la pulpa de las soluciones preñadas con $CuSO_4$ puede hacerse por el sistema contracorriente. Cuando se trata de mineral grueso, simplemente se separan los sólidos que arrastran las soluciones mediante asentamiento.

Las soluciones con el sulfato de cobre pueden pasarse a precipitación con fierro o a una planta ESDE. Este proceso lo trataremos mas adelante.

La precipitación con fierro se hace en pilas con doble fondo. Encima de un falso fondo formado por tarimas de madera, se coloca la chatarra y la solución preñada circula por la pila dividida en secciones y el precipitado pasa a través del fondo de madera, constituido por "tapestles" o tarimas. El precipitado se recoge por canales en el fondo de la pila. La chatarra se lava con mangueras para desprender el cobre depositado sobre ella. La ley de estos precipitados que se mandan a fundición para obtener cobre metálico, puede variar de 30 a 80%.

El cobre obtenido por la fundición de estos precipitados no es de pureza electrolítica pero no contiene valores de Ag y Au. Este cobre tiene aplicaciones especiales como producir bronce y latón.

La recuperación en una serie de diez conos puede llegar a 80% y la ley del
conce Las soluciones con bastante ácido se les somete a aeración para cambiar el
sulfato de ferroso a férrico y se re circulan al proceso.

En algunas instalaciones de lixiviación, hay un equipo especial que consiste
en un cono invertido con cribas que sostienen la chatarra. La solución entra por la
parte inferior, cruza la chatarra y sale por la periferia del cono en forma de
vertedor y el cemento de cobre cruza la criba y sale por la parte inferior del
tanque. figura 11. Un cono de estos puede procesar 2,500 galones por minuto de
solución. Se estima que este sistema disminuye el consumo de fierro y mejora la
ley del precipitado.

ente se lixivaba en tanques agitadores de madera con flechas de
acerro inoxidable y pópelas de hule. De los agitadores, la pulpa era pasada a unos
cilindros de madera de gran diámetro donde se alimentaba chatarra de fierro en
forma de flejeso lámina delgada partida para que se aduece. El cobre en las
precipitaba como cubre metalico y quedaba en la pulpa.

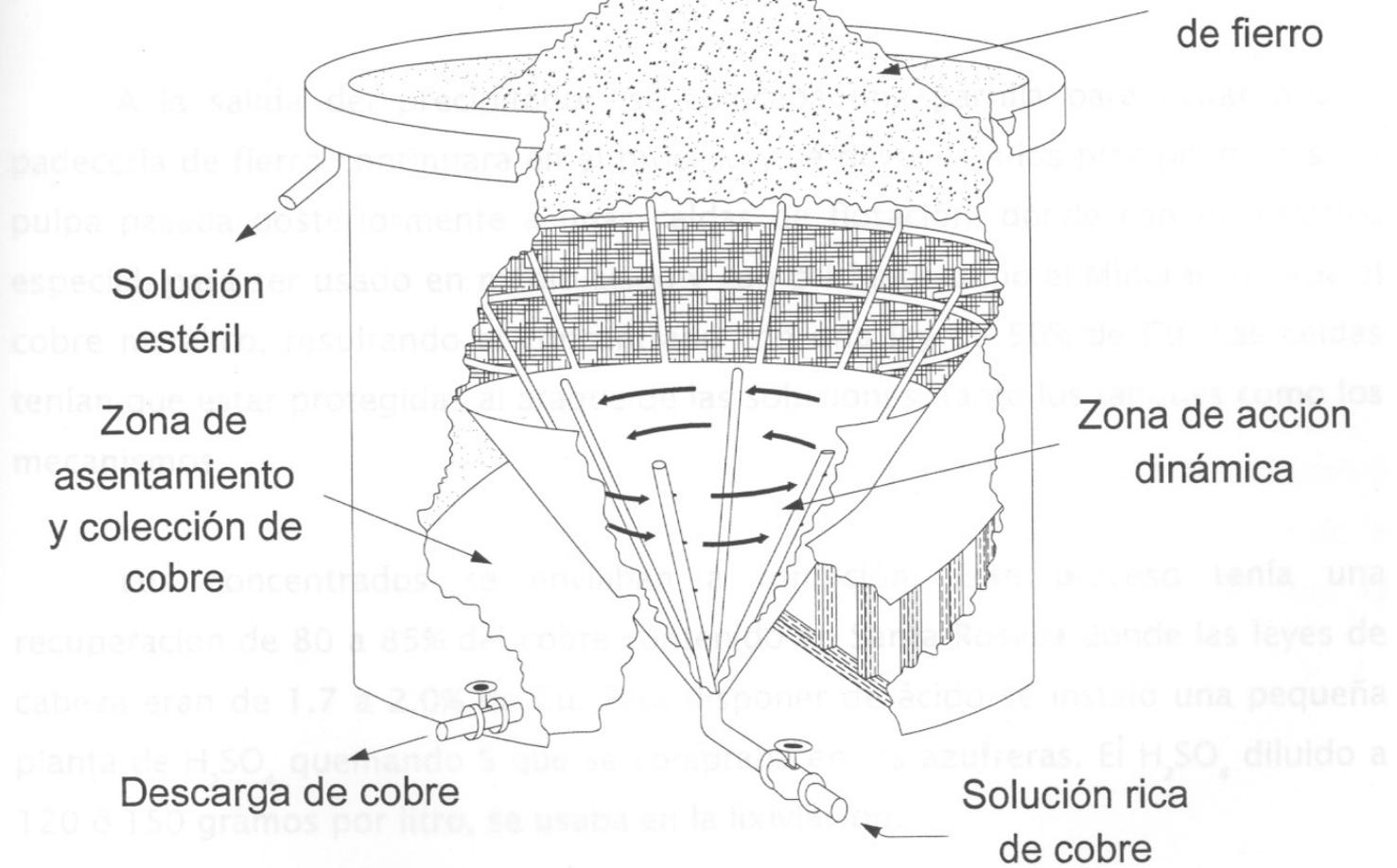


Figura 11.- Precipitador de cobre tipo cónico

La recuperación en una serie de diez conos puede llegar a 80% y la ley del concentrado promedio a 80% de Cu. La recuperación en las primeras dos celdas es del 60%. El scrap de fierro hay que agregarlo a medida que se va consumiendo. El scrap tiene que ser lavado con frecuencia con mangueras para remover el precipitado que se va pegando en la superficie de la chatarra.

Cuando se trata de minerales con mucha arcilla, como el que se localiza en el mineral de Santa Rosalía en Baja California, el proceso tiene que cambiarse. En este caso se aplica el proceso llamado L.P.F. (Lixiviación, Precipitación, Flotación). El mineral después de ser triturado, era molido a -100 mallas en un molino de barras. Posteriormente se lixiviaba en tanques agitadores de madera con flechas de acero inoxidable y pópelas de hule. De los agitadores, la pulpa era pasada a unos cilindros de madera de gran diámetro donde se alimentaba chatarra de fierro en forma de flejes o lámina delgada partida en padecería. El cobre de las soluciones se precipitaba como cobre metálico y quedaba revuelto en la pulpa.

A la salida del precipitador, se colocaba una parrilla para evitar que la padecería de fierro continuara en el proceso y se devolvía a los precipitados. La pulpa pasaba posteriormente a unas celdas de flotación, donde con un reactivo especial, para ser usado en medio ácido y con pH bajo, como el Mineral flotaba el cobre metálico, resultando el concentrado con una ley de 50% de Cu. Las celdas tenían que estar protegidas al ataque de las soluciones, tanto los tanques como los mecanismos.

Los concentrados se enviaban a fundición. Este proceso tenía una recuperación de 80 a 85% del cobre contenido en Santa Rosalía donde las leyes de cabeza eran de 1.7 a 2.0% de Cu. Para disponer de ácido se instaló una pequeña planta de H_2SO_4 quemando S que se compraba en las azufreras. El H_2SO_4 diluido a 120 ó 150 gramos por litro, se usaba en la lixiviación.

b) Mineral de baja ley:

Ha sido práctica habitual en todos los pórfidos cupríferos, aprovechar los óxidos que se encuentran en la parte superior de los cuerpos mineralizados, así como en la periferia de los mismos. El sistema básicamente ha consistido en colocar este mineral que generalmente tiene que removerse para tener acceso al cuerpo principal, en terreros especiales, los cuales son posteriormente lixiviados. Para la lixiviación se usa agua, ya sea acidulada con H_2SO_4 o simplemente ésta se acidula por la oxidación de las piritas formándose sulfato ferroso y férrico los que al reaccionar con los minerales de cobre, forman sulfato de cobre. El agua que escurre de los terreros es colectada al pie de ellos y posteriormente pasa a decantación para quitarle la arcilla en suspensión y enseguida es llevada a la precipitación.

Las reacciones de disolución del cobre las indicamos enseguida:

$CuO + H_2SO_4 =$	$CuSO_4 + H_2O$	Tenorita
$Cu + H_2SO_4 + O_2 =$	$2 CuSO_4 + 2H_2O$	Cobre nativo
$Cu_2O + H_2SO_4 + Fe_2(SO_4)_3 =$	$2 CuSO_4 + 2 FeSO_4 + H_2O$	Cuprita
$Cu_3(OH)_2(CO_3)_2 + 3H_2SO_4 =$	$3CuSO_4 + 2 CO_2 + 4H_2O$	Malaquita
$CuS + H_2SO_4 + \frac{1}{2} O_2 =$	$CuSO_4 + S + H_2O$	Corelita
$Cu_2S + H_2SO_4 + \frac{1}{2} O_2 =$	$2 CuSO_4 + H_2O$	Calcocita

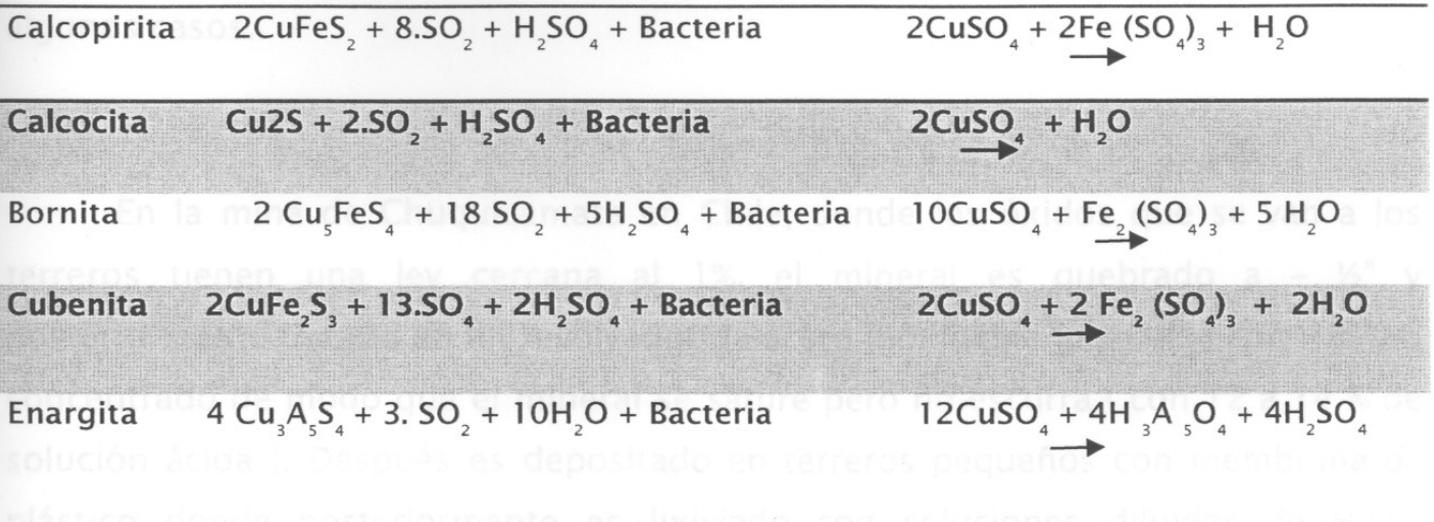
Es un hecho comprobado que existen bacterias que se alimentan de azufre contenido en los minerales. Estas bacterias destruyen la estructura molecular de la piritita y producen ácido sulfuroso, el cual acidula las soluciones y acelera la lixiviación del cobre.

Las reacciones que se producen con la intervención de bacterias son las siguientes:

La bacteria mas usada en los terreros de baja ley de cobre, es la Thiobacillus Ferrooxidans que trabaja como sigue:

Casi todas estas $MS + 2 O_2 + Bacteria \longrightarrow MSO_4$ sulfato ferroso que se M puede ser algún metal como cobre, níquel, cobalto, etc. En una sola palabra, el

consumo de fierro sería de casi un kilo de fierro por kilo de cobre recuperado, pero Por especies minerales: e 1.8 a 2.5 kilos de fierro por kilo de cobre y aún mas en



El uso de bacterias agiliza el proceso disminuyendo el tiempo y mejorando la recuperación en la lixiviación de terreros de cobre.

Actualmente se hacen estudios para usar diferentes bacterias y estudiar el método de mejorar su rápida reproducción y la influencia del clima en ésta. Es casi seguro que el empleo de bacterias en los procesos de lixiviación seguirá ampliándose en el futuro.

Durante muchos años este proceso de lixiviación en terreros funcionó precipitando el cobre con chatarra de fierro. La precipitación se lleva a cabo en pilas con doble fondo como ya dije anteriormente.

La reacción de la precipitación es: $CuSO_4 + Fe = FeSO_4 + Cu$.

Esta reacción es prácticamente irreversible, porque su constante de equilibrio tiene un alto valor a la temperatura ambiente. El H_2SO_4 libre, aumenta el consumo de fierro pero es deseable porque evita la hidrólisis del sulfato de fierro.

Casi todas estas soluciones lixiviantes contienen sulfato ferroso que se convierte en férrico aumentando el consumo de fierro. En una sola palabra, el consumo de fierro sería de casi un kilo de fierro por kilo de cobre recuperado, pero en la práctica éste es de 1.8 a 2.5 kilos de fierro por kilo de cobre y aún más en algunos casos.

En la mina de Chuquicamata en Chile, donde los óxidos que se van a los terreros tienen una ley cercana al 1%, el mineral es quebrado a $\frac{1}{2}$ " y posteriormente tratado en un revolvedor de acero inoxidable mezclado con H_2SO_4 , concentrado de modo que el mineral se sature pero no escurra (con 12 a 14 % de solución ácida). Después es depositado en terreros pequeños con membrana de plástico donde posteriormente es lixiviado con soluciones diluidas de H_2SO_4 durante una semana y en las soluciones se recupera el 80 % del cobre contenido en el mineral. Posteriormente estos pequeños terreros, de unas 30 000 toneladas cada uno, son removidos y depositados en un gran terrero donde se siguen lixiviando por meses obteniéndose una recuperación adicional de 10 %.

- 3- Que los solventes lixiviantes sean recuperados en obras mineras en forma tal que estos no vayan a contaminar el agua freática regional.

También se ha proyectado la lixiviación de depósitos de cobre en el límite del nivel freático o debajo de él (Figura 12).

9.9.1. La lixiviación "in situ":

Se ha pretendido y de hecho ya se ha lixiviado el cobre de un depósito de minerales oxidados de cobre, sin necesidad de extraer el mineral a la superficie.

Para que esto sea posible, se requieren varias condiciones, pero es indudable la ventaja económica que ellos pueden significar pues se ahorraría el costo de extracción del mineral y no habría necesidad de preparar patios para la lixiviación. Solamente se construiría la planta para recuperar las soluciones aciduladas con contenidos de cobre que podrían tratarse en una planta ESDE.

Las principales condiciones para que esto sea posible son:

- 1- Que la naturaleza y composición química de los minerales sea tal, que permita una disolución del cobre por el paso de las soluciones ácidas, superior al \$70.000 o más, de modo que resulte económico el proceso.
- 2- Que las soluciones puedan circular entre y a través de la masa rocosa que constituye el depósito mineral. Esto puede ser posible al tratarse de una formación muy quebrada y porosa o que se haya logrado a través de uso de explosivos en barrenos que crucen la zona mineralizada. Estos barrenos se van tronando de forma que el cuerpo mineral sea tratado en áreas en forma progresiva.
- 3- Que los solventes lixiviantes sean recuperados en obras mineras en forma tal que éstos no vayan a contaminar el agua freática regional.

También se ha proyectado la lixiviación de depósitos de cobre en el límite del nivel freático o debajo de él (Figura 12).

9.9. En estos casos hay que proyectar como se extraerán las soluciones lixiviantes sin contaminar al agua subterránea, lo que debe hacerse bajando el nivel freático regional por medio de bombeo, abajo del depósito por lixiviar. Además es necesaria la construcción y operación de pozos que permitan monitorear las soluciones alrededor del cuerpo mineralizado para controlar la contaminación.

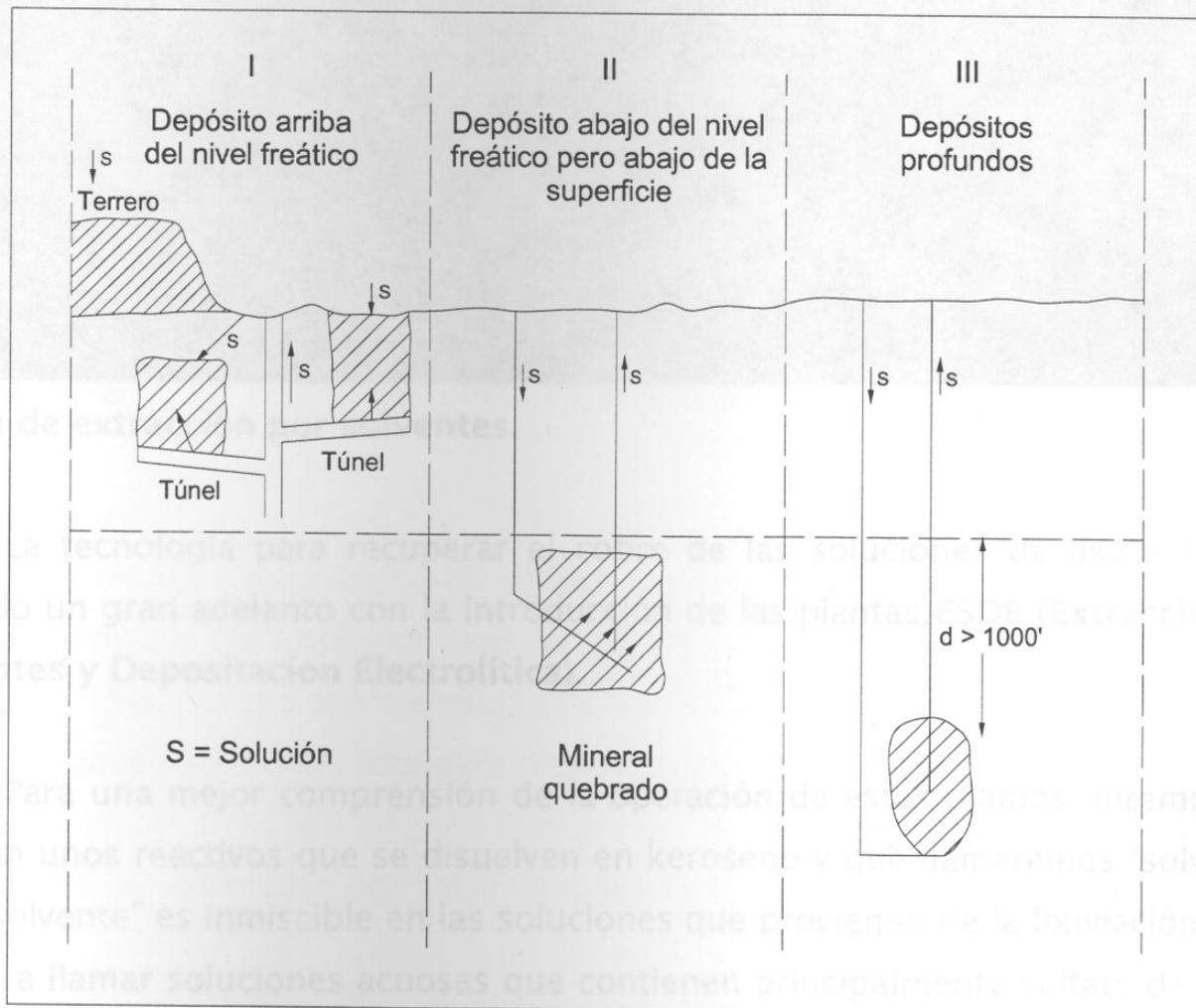
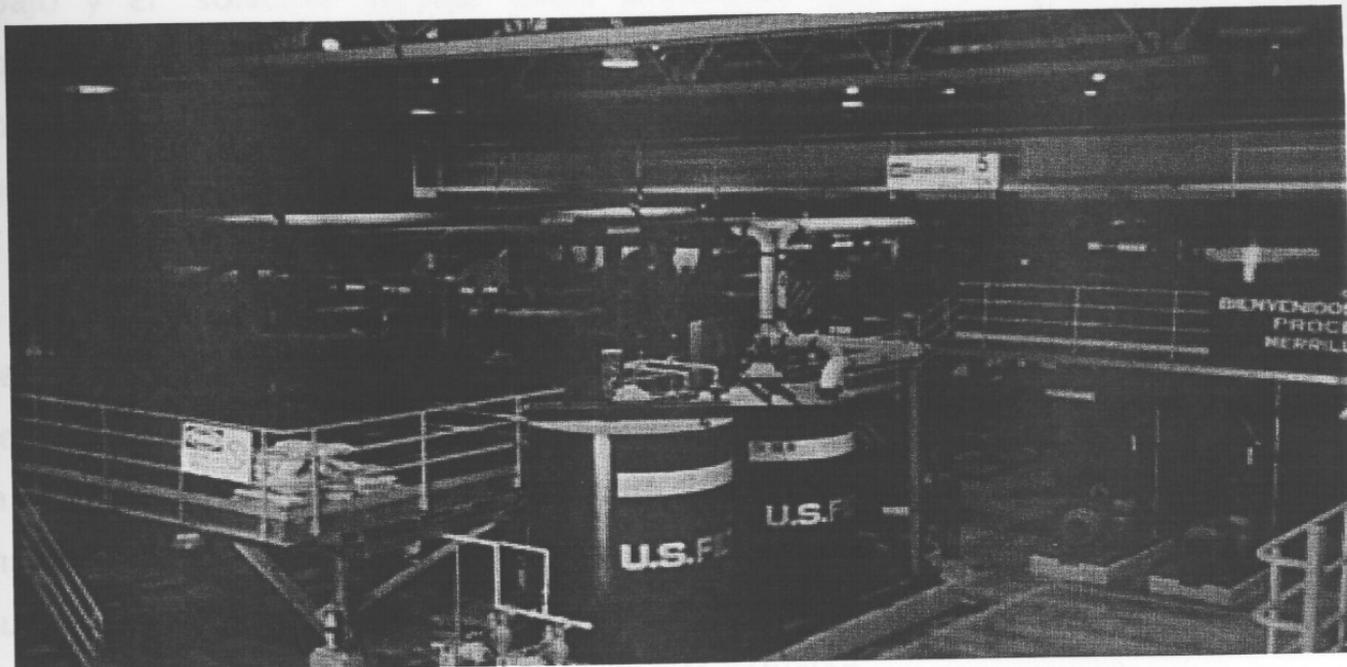


Figura. 12 Depósitos de cobre lixiviados en situ.

Esta reacción necesita un contacto directo del solvente con la solución acuosa, pero como son inmiscibles, se alimentan juntos a un a un tanque agitado que los mezcla violentamente. Durante este contacto, el solvente ha despojado a la

9.9.2. Plantas ESDE:



Planta de extracción por solventes.

La tecnología para recuperar el cobre de las soluciones de lixiviación, ha recibido un gran adelanto con la introducción de las plantas **ESDE (Extracción por Solventes y Depositación Electrolítica)**.

Para una mejor comprensión de la operación de estas plantas, diremos que se usan unos reactivos que se disuelven en keroseno y que llamaremos "solvente". Este "solvente" es inmiscible en las soluciones que provienen de la lixiviación y que vamos a llamar soluciones acuosas que contienen principalmente sulfato de cobre, pero también sulfatos de fierro, de zinc, de níquel y algunos otros elementos. El solvente contiene un reactivo que llamamos agente "chalante" el cual al contacto con una solución que contenga cobre, la despoja del cobre que lleve, pero no disuelve los otros metales que contenga esta solución.

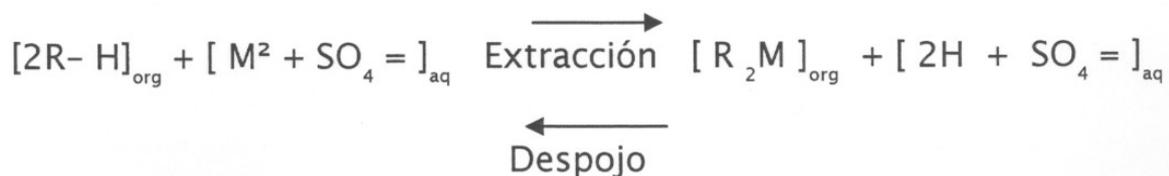
Esta reacción necesita un contacto directo del solvente con la solución acuosa, pero como son inmiscibles, se alimentan juntos a un a un tanque agitador que los mezcla violentamente. Durante este contacto, el solvente ha despojado a la

solución acuosa del cobre y enseguida ambos productos se vacían a una pila grande donde por diferencia de densidad se separan, la solución acuosa queda abajo y el "solvente" arriba. Estos productos salen de la pila por diferentes conductos lejos de la superficie de contacto de ambos para evitar que se contaminen. El solvente sale con la mayoría del cobre y la solución acuosa sale con mucho menos cobre.

La solución de cobre que viene de la lixiviación de los terreros, tiene una ley de cobre que varía de 2.5 a 4.0 gramos de cobre por litro. Esta solución, después de haber sido despojada, tiene de 0.1 a 0.3 gramos de cobre y a ésta se le agrega más ácido sulfúrico y se regresa para regar nuevamente los terreros. Hay que insistir que solo se despoja del cobre a las soluciones que vienen de la mina, las que contienen, también disueltas, sulfato de fierro y frecuentemente sulfato de níquel y de zinc, los cuales continúan en la solución.

Por otro lado, la solución de sulfato de cobre que se obtiene despojando con ácido sulfúrico al solvente, contiene de 25 a 45 gramos de cobre por litro y tiene una calidad tal, por no tener impurezas, que al pasar a precipitación electrolítica, produce cobre de 99.99%, listo para las aplicaciones industriales de este metal.

En la planta de extracción por solventes, se efectúan las siguientes reacciones:



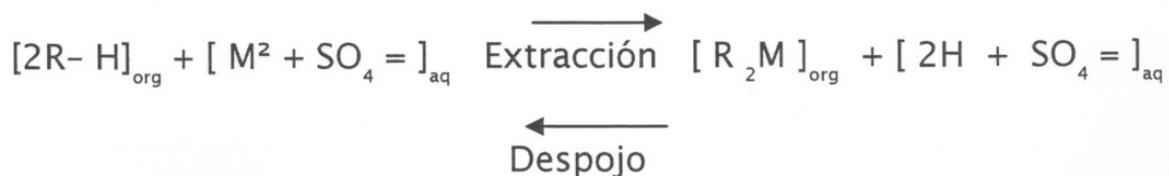
Org quiere decir orgánico y M es el metal que va a ser extraído.

solución acuosa del cobre y enseguida ambos productos se vacían a una pila grande donde por diferencia de densidad se separan, la solución acuosa queda abajo y el "solvente" arriba. Estos productos salen de la pila por diferentes conductos lejos de la superficie de contacto de ambos para evitar que se contaminen. El solvente sale con la mayoría del cobre y la solución acuosa sale con mucho menos cobre.

La solución de cobre que viene de la lixiviación de los terreros, tiene una ley de cobre que varía de 2.5 a 4.0 gramos de cobre por litro. Esta solución, después de haber sido despojada, tiene de 0.1 a 0.3 gramos de cobre y a ésta se le agrega más ácido sulfúrico y se regresa para regar nuevamente los terreros. Hay que insistir que solo se despoja del cobre a las soluciones que vienen de la mina, las que contienen, también disueltas, sulfato de fierro y frecuentemente sulfato de níquel y de zinc, los cuales continúan en la solución.

Por otro lado, la solución de sulfato de cobre que se obtiene despojando con ácido sulfúrico al solvente, contiene de 25 a 45 gramos de cobre por litro y tiene una calidad tal, por no tener impurezas, que al pasar a precipitación electrolítica, produce cobre de 99.99%, listo para las aplicaciones industriales de este metal.

En la planta de extracción por solventes, se efectúan las siguientes reacciones:

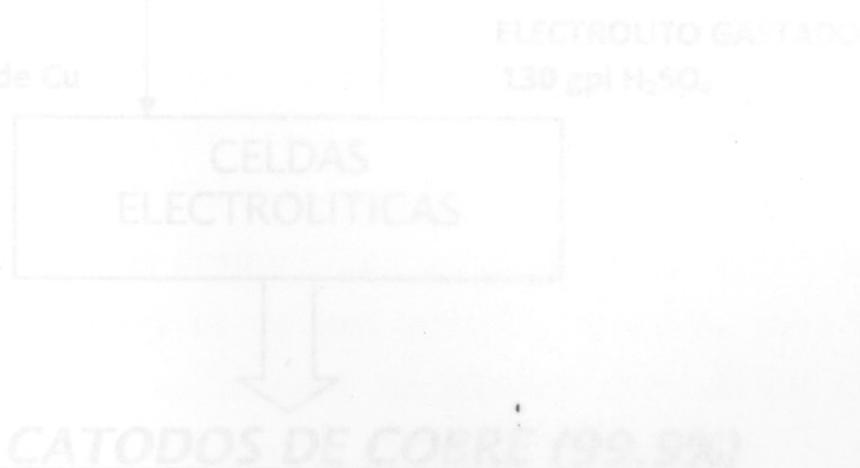


Org quiere decir orgánico y M es el metal que va a ser extraído.

En inglés, a estos reactivos se les llama “chelation agents” que no tiene traducción al español y que se les llama chelante. Significa que estos reactivos tienen una afinidad para rodear un metal como una garra y separarlo del ion con el que está asociado. Estos agentes están unidos a un ion hidrógeno que viene sustituyendo al metal para formar un ácido. Esta reacción es reversible y cuando el agente “chelation” se encuentra con un ácido concentrado, cede al ion metálico y vuelve a asociarse con el ion H. Estas reacciones tienen que hacerse con un control muy grande en el pH de la pulpa, al grado de que son selectivas únicamente entre determinados valores de pH.

Así por ejemplo, el reactivo Lix64N es muy selectivo a un pH de 2 para el cobre y solo extrae en muy pequeñas cantidades el Fe^3 , el Mo^6 y el V^5 y prácticamente su extracción es 0 para los demás metales incluyendo el Zn^2 , el Ca^+ y otros (figura 12).

El proceso de extracción por solventes se comenzó a usar en la metalurgia en la década de los 60's para extracción de Uranio con extractantes amínicos. En la de los 70's se comenzó a usar para la de los metales Cu, Ni y Co. en la actualidad, las plantas de extracción por solventes se han extendido por Canadá, Estados Unidos, África y Chile. En México hay dos plantas que trabajan exitosamente, en Cananea y Nacozari y existen programas para ampliarlas. La de Cananea ya tuvo dos ampliaciones.



En inglés, a estos reactivos se les llama “chelation agents” que no tiene traducción al español y que se les llama chelante. Significa que estos reactivos tienen una afinidad para rodear un metal como una garra y separarlo del ion con el que está asociado. Estos agentes están unidos a un ion hidrógeno que viene sustituyendo al metal para formar un ácido. Esta reacción es reversible y cuando el agente “chelation” se encuentra con un ácido concentrado, cede al ion metálico y vuelve a asociarse con el ion H. Estas reacciones tienen que hacerse con un control muy grande en el pH de la pulpa, al grado de que son selectivas únicamente entre determinados valores de pH.

Así por ejemplo, el reactivo Lix64N es muy selectivo a un pH de 2 para el cobre y solo extrae en muy pequeñas cantidades el Fe^3 , el Mo_6 y el V_5 y prácticamente su extracción es 0 para los demás metales incluyendo el Zn^2 , el Ca^+ y otros (figura 12).

El proceso de extracción por solventes se comenzó a usar en la metalurgia en la década de los 60's para extracción de Uranio con extractantes amínicos. En la de los 70's se comenzó a usar para la de los metales Cu, Ni y Co. en la actualidad, las plantas de extracción por solventes se han extendido por Canadá, Estados Unidos, África y Chile. En México hay dos plantas que trabajan exitosamente, en Cananea y Nacozari y existen programas para ampliarlas. La de Cananea ya tuvo dos ampliaciones.

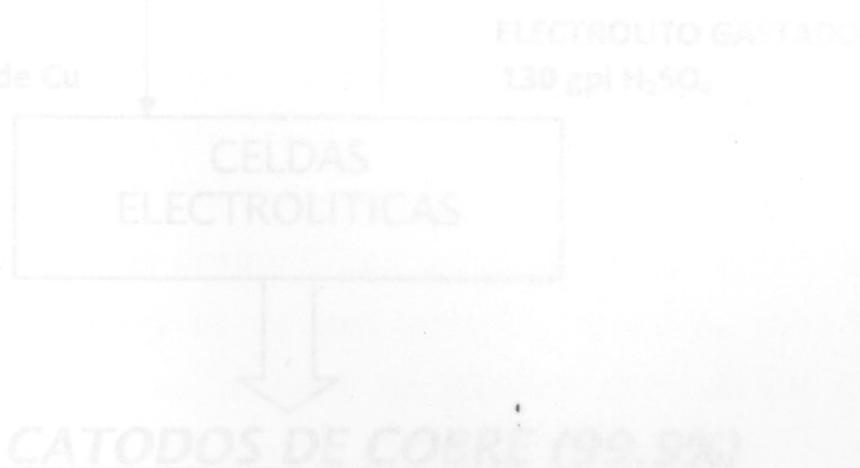
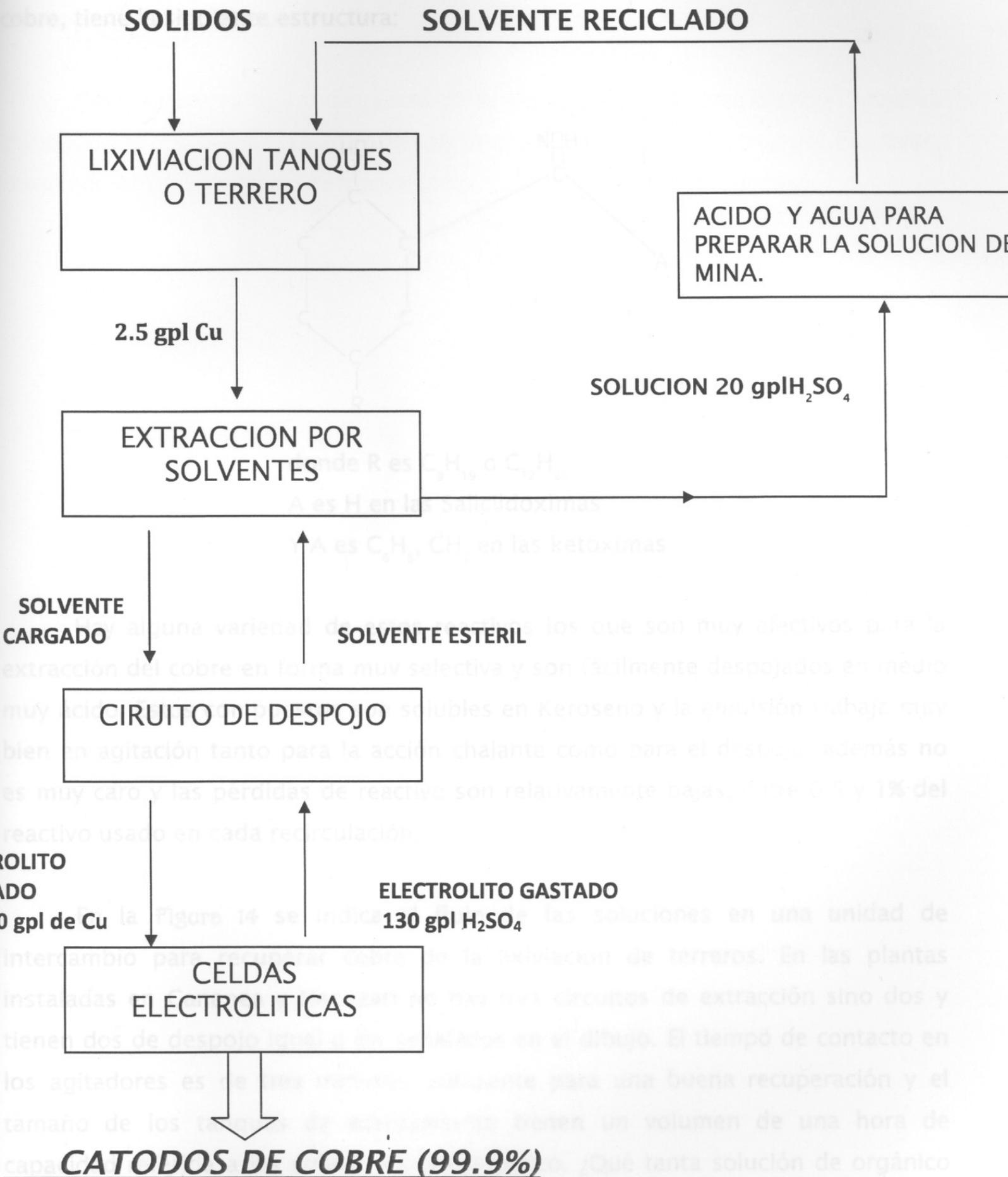
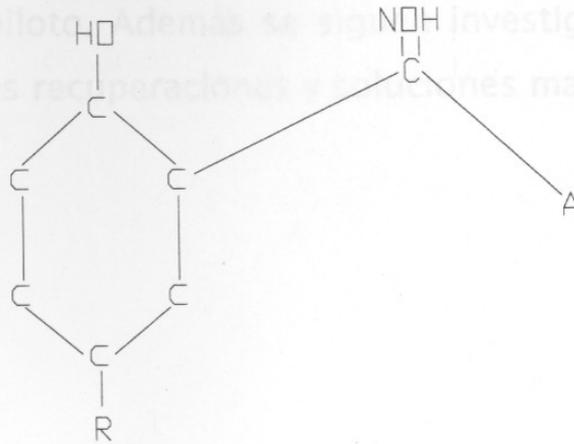


Figura 13.- Diagrama de una planta de extracción por solventes.

La estructura de las Oximas de Hidrógeno, usadas para la recuperación de cobre, tiene la siguiente estructura:



del 50 al 55. **Figura 13.-** Diagrama de una planta de extracción por solventes. **La estructura de las Oximas de Hidrógeno, usadas para la recuperación de cobre, tiene la siguiente estructura:**



donde R es C_9H_{19} o $C_{12}H_{25}$

A es H en las Salicildoximas

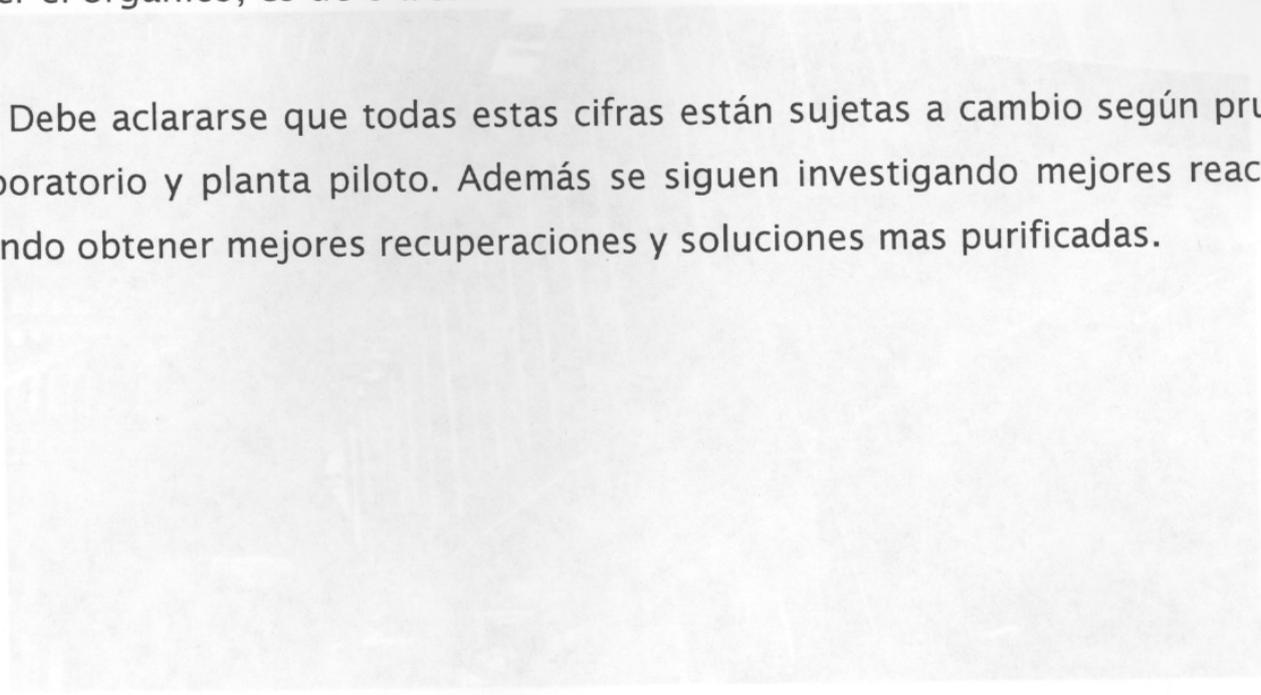
Y A es C_6H_5 , CH_3 en las ketoximas

Hay alguna variedad de estos reactivos los que son muy efectivos para la extracción del cobre en forma muy selectiva y son fácilmente despojados en medio muy ácido. Estos compuestos son solubles en Keroseno y la emulsión trabaja muy bien en agitación tanto para la acción chalante como para el despojo, además no es muy caro y las pérdidas de reactivo son relativamente bajas, entre 0.5 y 1% del reactivo usado en cada recirculación.

En la **Figura 14** se indica el flujo de las soluciones en una unidad de intercambio para recuperar cobre de la lixiviación de terreros. En las plantas instaladas en Cananea y Nacozari no hay tres circuitos de extracción sino dos y tienen dos de despojo igual a los señalados en el dibujo. El tiempo de contacto en los agitadores es de tres minutos, suficiente para una buena recuperación y el tamaño de los tanques de aseptamiento tienen un volumen de una hora de capacidad referida a las soluciones del orgánico. ¿Qué tanta solución de orgánico se necesita? Esta se recircula, pero el volumen que se mezcla por minuto puede ser

del 50 al 80% del volumen de la solución que proviene de la mina de la que se extraerá el cobre. La cantidad de reactivo que se mezcla con el Keroseno, para obtener el orgánico, es de 8 a 9%.

Debe aclararse que todas estas cifras están sujetas a cambio según pruebas de laboratorio y planta piloto. Además se siguen investigando mejores reactivos, buscando obtener mejores recuperaciones y soluciones mas purificadas.



Cobre recuperado con el 99.9% de pureza.

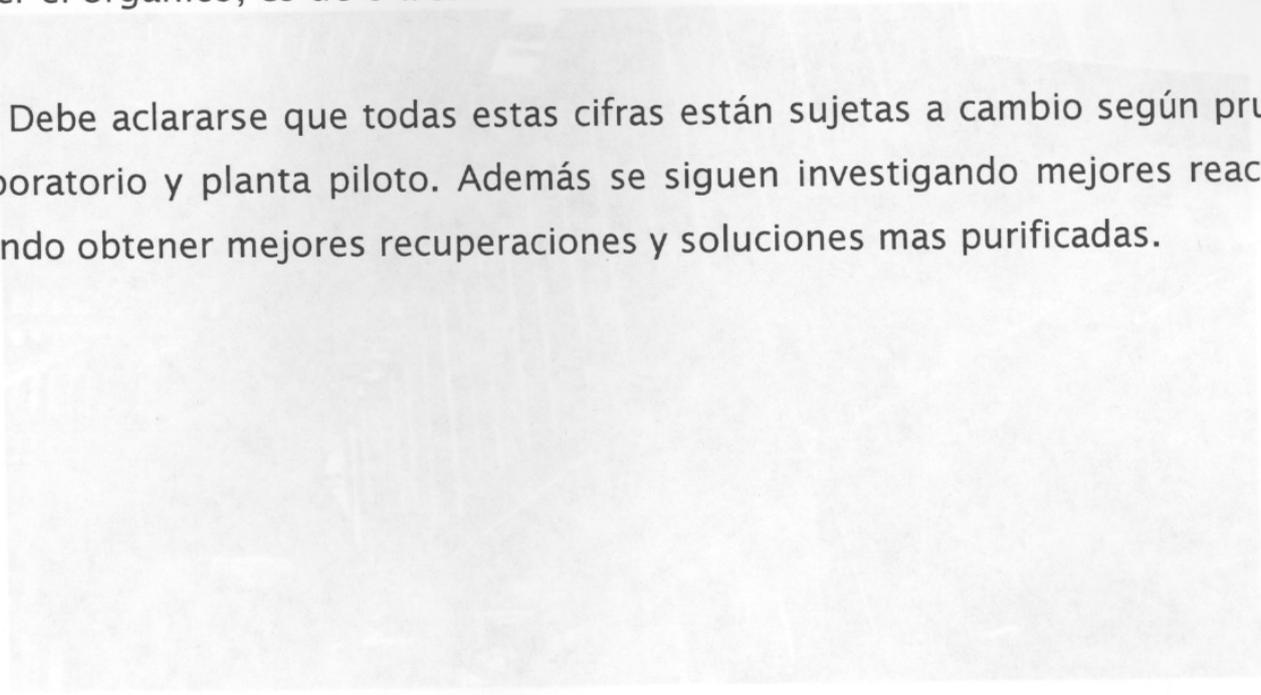
Las plantas de precipitación electrolíticas que operan junto a las plantas de intercambio iónico, se han venido perfeccionando en su funcionamiento, obteniéndose ahora placas de cobre electrolítico que tienen una ley de 99.99% de Cu y en algunos casos aún con mayor pureza.

El funcionamiento de estas plantas depende de su instalación y de la pureza del electrolito a través de las celdas electrolíticas, que usan como cátodo, una placa de acero inoxidable o de titanio, donde el cobre se adhiere en ambos lados del acero formando dos placas de cobre de $\frac{3}{4}$ " de espesor. Los ánodos son de acero inoxidable, la corriente que circula es de 250 a 300 amperes por m², el voltaje usado es de 2 volts. La cantidad de corriente necesaria es mayor de la que se necesita en el caso de refinación electrolítica.

Existen equipos especiales que separan las hojas de cobre electrolíticas formados a ambos lados de los ánodos de acero inoxidable. Estas hojas de

del 50 al 80% del volumen de la solución que proviene de la mina de la que se extraerá el cobre. La cantidad de reactivo que se mezcla con el Keroseno, para obtener el orgánico, es de 8 a 9%.

Debe aclararse que todas estas cifras están sujetas a cambio según pruebas de laboratorio y planta piloto. Además se siguen investigando mejores reactivos, buscando obtener mejores recuperaciones y soluciones mas purificadas.



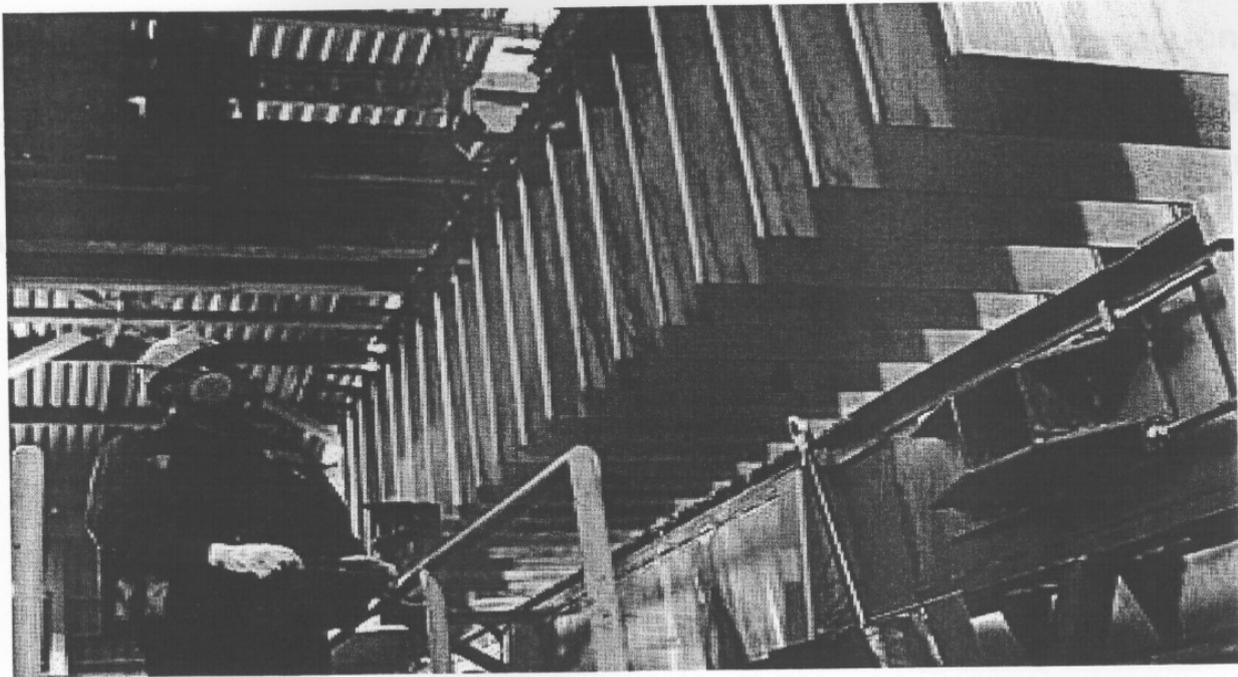
Cobre recuperado con el 99.9% de pureza.

Las plantas de precipitación electrolíticas que operan junto a las plantas de intercambio iónico, se han venido perfeccionando en su funcionamiento, obteniéndose ahora placas de cobre electrolítico que tienen una ley de 99.99% de Cu y en algunos casos aún con mayor pureza.

El funcionamiento de estas plantas depende de su instalación y de la pureza del electrolito a través de las celdas electrolíticas, que usan como cátodo, una placa de acero inoxidable o de titanio, donde el cobre se adhiere en ambos lados del acero formando dos placas de cobre de $\frac{3}{4}$ " de espesor. Los ánodos son de acero inoxidable, la corriente que circula es de 250 a 300 amperes por m², el voltaje usado es de 2 volts. La cantidad de corriente necesaria es mayor de la que se necesita en el caso de refinación electrolítica.

Existen equipos especiales que separan las hojas de cobre electrolíticas formados a ambos lados de los ánodos de acero inoxidable. Estas hojas de

9.9.3. Precipitación electrolítica



Cobre recuperado con el 99.9% de pureza.

Las plantas de precipitación electrolíticas que operan junto a las plantas de intercambio iónico, se han venido perfeccionando en su funcionamiento, obteniéndose ahora placas de cobre electrolítico que tienen una ley de 99.99% de Cu y en algunos casos aún con mayor pureza.

El funcionamiento de estas plantas depende de su instalación y de la pureza del electrolito a través de las celdas electrolíticas, que usan como cátodo, una placa de acero inoxidable o de titanio, donde el cobre se adhiere en ambos lados del acero formando dos placas de cobre de $\frac{3}{4}$ " de espesor. Los ánodos son de acero inoxidable, la corriente que circula es de 250 a 300 amperes por m², el voltaje usado es de 2 volts. La cantidad de corriente necesaria es mayor de la que se necesita en el caso de refinación electrolítica.

Existen equipos especiales que separan las hojas de cobre electrolíticos formados a ambos lados de los ánodos de acero inoxidable. Estas hojas de cobre

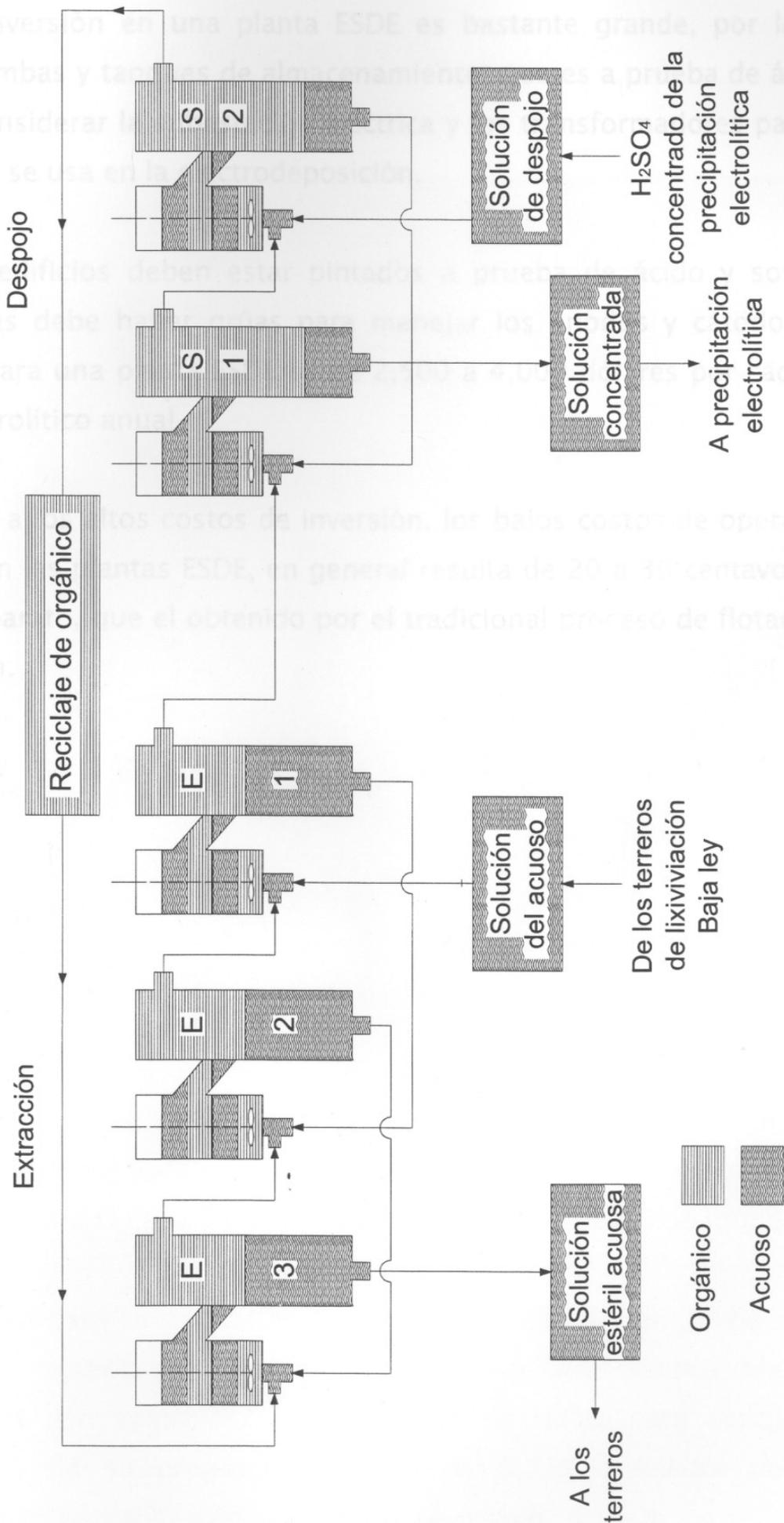


Figura 14.- Unidad de extracción por solventes

La inversión en una planta ESDE es bastante grande, por la cantidad de equipo (bombas y tanques de almacenamiento) que es a prueba de ácido. También hay que considerar la subestación eléctrica y los transformadores para la corriente directa que se usa en la electrodeposición.

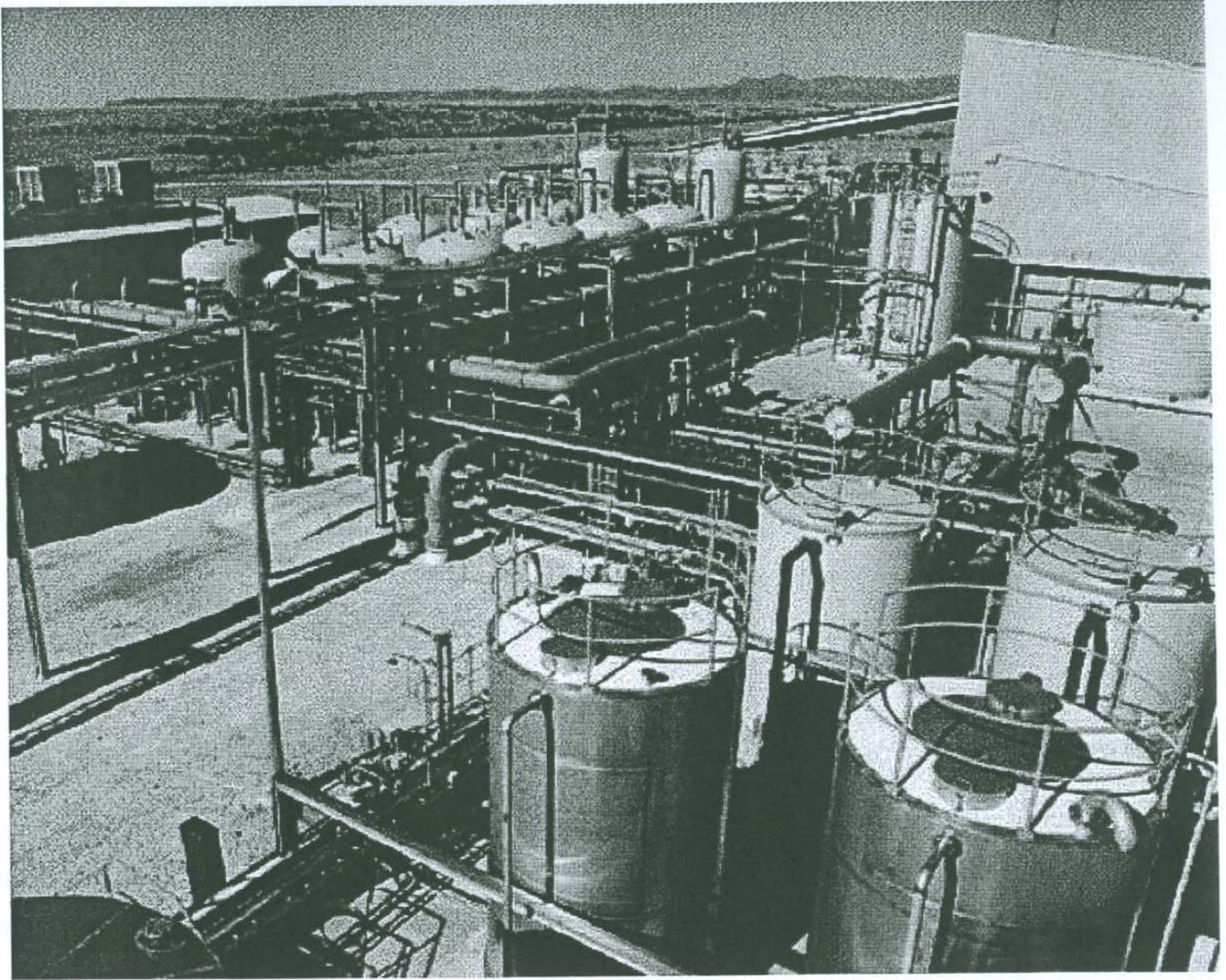
Los edificios deben estar pintados a prueba de ácido y sobre las celdas electrolíticas debe haber grúas para manejar los ánodos y cátodos. El costo de inversión para una planta ESDE es de 2,500 a 4,000 dólares por cada tonelada de cobre electrolítico anual.

Pese a los altos costos de inversión, los bajos costos de operación, el cobre obtenido en las plantas ESDE, en general resulta de 20 a 30 centavos de dólar por libra más barato, que el obtenido por el tradicional proceso de flotación, fundición y refinación.

Las plantas de tratamiento de minerales de uranio tienen por objeto producir a partir del todo-uno de mina, un concentrado de uranio normalmente con más del 90% de U_3O_8 , que es la unidad utilizada en el comercio mundial.

Aun así para su utilización como combustible nuclear, debe satisfacer unas normas más rigurosas de pureza que cualquier otro combustible. Por ello, los concentrados son sometidos a un proceso de refinación para enriquecerlos en el isótopo U^{235} , de su proporción natural de 0,71% alrededor del 3% en U^{235} . Primeramente, se transforman en óxido de uranio. A partir de él, se elaboran las

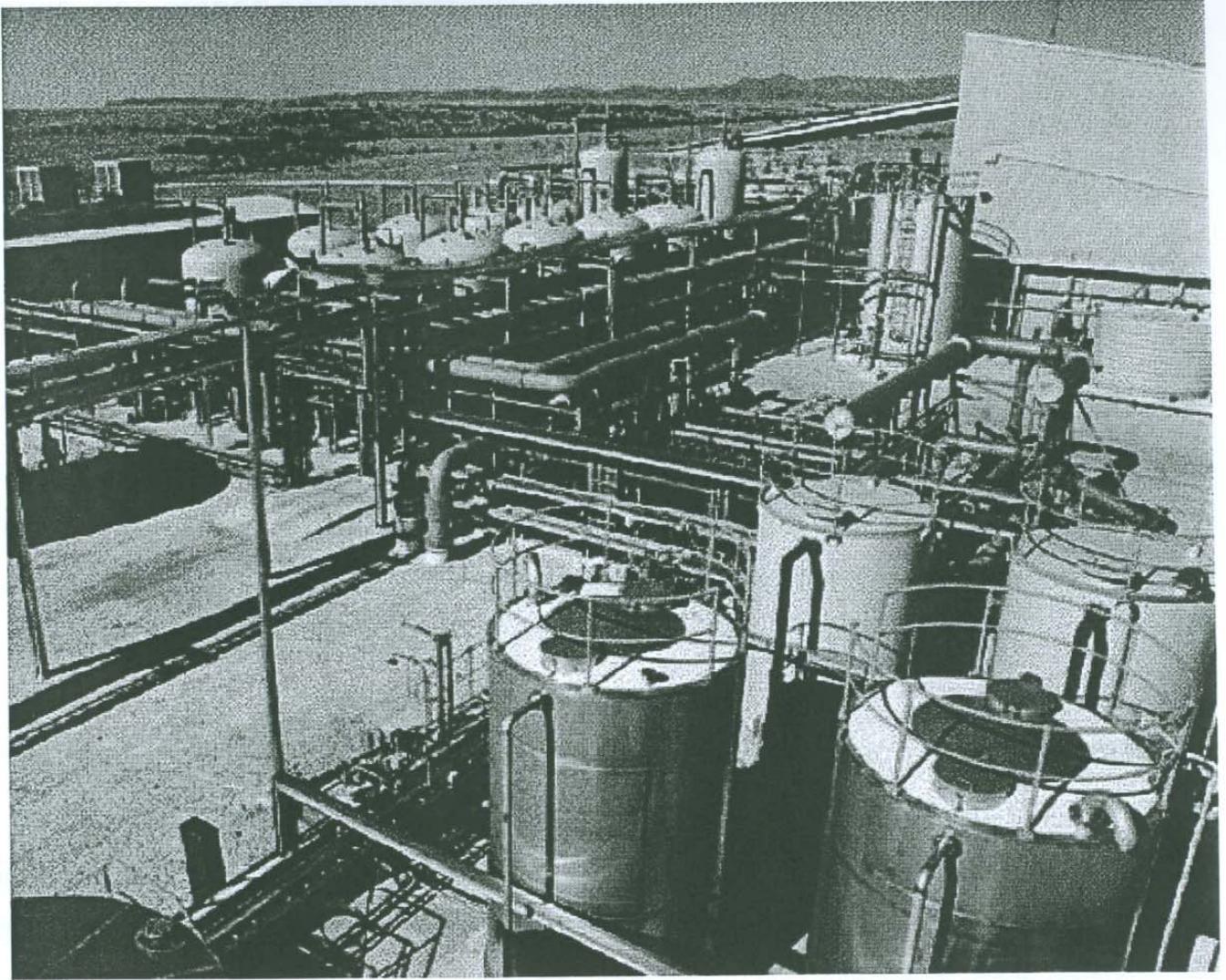
10. LIXIVIACION DE MINERALES DE URANIO



Las plantas de tratamiento de minerales de uranio tienen por objeto el producir a partir del todo-uno de mina, un concentrado de uranio normalmente con mas del 90% de U_3O_8 , que es la unidad utilizada en el comercio mundial.

Aun así para su utilización como combustible nuclear, debe satisfacer unas normas más rigurosas de pureza que cualquier otro combustible. Por ello, los concentrados son sometidos a un proceso de refinado para enriquecerlos en el isótopo U^{235} , de su proporción natural de 0,71% alrededor del 3% en U^{235} , Primeramente, se transforman en óxido de uranio. A partir de él, se elaboran las

10. LIXIVIACION DE MINERALES DE URANIO



Las plantas de tratamiento de minerales de uranio tienen por objeto el producir a partir del todo-uno de mina, un concentrado de uranio normalmente con mas del 90% de U_3O_8 , que es la unidad utilizada en el comercio mundial.

Aun así para su utilización como combustible nuclear, debe satisfacer unas normas más rigurosas de pureza que cualquier otro combustible. Por ello, los concentrados son sometidos a un proceso de refinado para enriquecerlos en el isotopo U^{235} , de su proporción natural de 0,71% alrededor del 3% en U^{235} , Primeramente, se transforman en oxido de uranio. A partir de él, se elaboran las

pastillas que se encierran en las varillas, y se insertan en el núcleo del reactor como elemento combustible de una central nuclear.

Existen pues, dos etapas en la elaboración del uranio como combustible nuclear:

1) Procesos de preparación y pre - concentración de la mena.

1. Proceso de tratamiento.

2. Proceso de refinado.

Los procesos de pre-concentración comienzan con la selectividad minera (rechazo del estéril) y son en general procesos físicos o físico-químicos.

En los costos de producción de electricidad nuclear, tan solo un 6% corresponde a la producción de uranio natural, un 12% a la fabricación del combustible y el resto alrededor del 71% son los gastos de la central. Sin embargo, el uranio es el ingrediente esencial para alimentar los reactores.

Según las características del yacimiento, se pueden emplear sistemas de lixiviación dinámica o estática.

Otro factor importante en los procesos de obtención del combustible nuclear es el largo periodo de los procesos de fabricación, desde su inicio la extracción y tratamiento en la mina, hasta su inserción como elemento combustible en el núcleo del reactor. Este periodo suele ser de dos o tres años, por lo que las compañías eléctricas deben realizar sus periodos con suficiente antelación.

Los procesos de preparación de la mena (lixiviación y molienda), hasta obtener la granulometría de liberación idónea para el proceso de concentración, solo han recibido atención desde el punto de vista de clarificación y reducción de costo energético.

El esquema de una planta moderna de tratamiento de mineral de uranio y en general de cualquier planta, consiste de una combinación de operaciones unitarias que a través del tiempo se han hecho más eficientes, para alcanzar unos costos más bajos de operación, una buena recuperación y una alta calidad de los productos.

Si en la selectividad minera se considera estéril el material de uranio con menos del 0.1% de uranio, el proceso de preparación de la mena comienza con la recepción del material desde la mina, y termina con la entrega del producto o productos al mercado para su venta.

En el esquema general se consideran modernamente dos etapas, cada una de las cuales abarca una serie de procesos:

- 1) Procesos de preparación y pre - concentración de la mena.
- 2) Proceso o procesos básicos de concentración de la mena.

Los procesos de pre-concentración comienzan con la selectividad minera (rechazo del estéril) y son en general procesos físicos o físico-químicos.

A partir del pre concentrado obtenido (o de todo - uno preparado), se efectúa la segunda etapa de la concentración, que en el caso de las menas infieras es la lixiviación ácida o alcalina, según las características específicas de los componentes mineralógicos. Según las características del yacimiento, se pueden emplear sistemas de lixiviación dinámica o estática.

10.10.1 Proceso de Preparación — Pre concentración

Los procesos de preparación del mineral, básicamente la reducción de tamaño (trituration y molienda), hasta obtener la granulometría de liberación idónea para el proceso de concentración, solo han recibido atención desde el punto de vista de clarificación y reducción de costo energético.

Sin embargo, no se ha valorado debidamente el hecho de que cualquiera de estas operaciones puede constituir por sí, una concentración previa del mineral a tratar.

Si en la selectividad minera se considera estéril un mineral de uranio con menos de 100 ppm U_3O_8 /ton, existe la posibilidad de que en cualquiera de los procesos de preparación del mineral, pueda igualmente separarse cierto porcentaje

del todo -uno, con una ley similar al del estéril de mina o residuo de planta, con pequeña pérdida del contenido total del mineral. Se elimina así un porcentaje de material, prácticamente sin valor, que de otra forma tendría que soportar los costos de las operaciones subsiguientes.

En la situación actual de altos costos operacionales y bajos precios de metales, los procesos de pre-concentración, para menas uraníferas están adquiriendo una gran importancia en paises como Canadá, África del Sur, Francia, España, etc.

Los objetivos principales de este pre concentración son:

- a) Eliminar ganga con disminución de tonelaje y aumento de ley, como consecuencia hay una reducción en la capacidad de la planta de lixiviación y
- b) en costos de inversión.
- c) Separar componentes de la mena que pueden interferir en los procesos siguientes: mejora del proceso de lixiviación.
- d) Obtener una mayor pureza en el concentrado final de U_3O_8 . Mayor valor de producto.

En general, no se puede hablar de una menor o mayor recuperación total del mineral, ya que la pequeña pérdida en pre concentración está compensada por una mayor recuperación en lixiviación al tratar cabezas más ricas y más puras.

Siguiendo la secuencia de un sistema general de tratamiento, descubriremos los principales procesos de pre concentración.

del todo -uno, con una ley similar al del estéril de mina o residuo de planta, con pequeña pérdida del contenido total del mineral. Se elimina así un porcentaje de material, prácticamente sin valor, que de otra forma tendría que soportar los costos de las operaciones subsiguientes.

En la situación actual de altos costos operacionales y bajos precios de metales, los procesos de pre-concentración, para menas uraníferas están adquiriendo una gran importancia en paises como Canadá, África del Sur, Francia, España, etc.

Los objetivos principales de este pre concentración son:

- a) Eliminar ganga con disminución de tonelaje y aumento de ley, como consecuencia hay una reducción en la capacidad de la planta de lixiviación y
- b) en costos de inversión.
- c) Separar componentes de la mena que pueden interferir en los procesos siguientes: mejora del proceso de lixiviación.
- d) Obtener una mayor pureza en el concentrado final de U_3O_8 . Mayor valor de producto.

En general, no se puede hablar de una menor o mayor recuperación total del mineral, ya que la pequeña pérdida en pre concentración está compensada por una mayor recuperación en lixiviación al tratar cabezas más ricas y más puras.

Siguiendo la secuencia de un sistema general de tratamiento, descubriremos los principales procesos de pre concentración.

10.10.2. Trituración y Clasificación Selectiva

La trituración selectiva está adquiriendo hoy en día un desarrollo y por la cual tras reducciones a diversos tamaños por ejemplo , 250,100,50,25 y 12 mm, estas fracciones son analizadas por el elemento a recuperar .Mediante pruebas en planta de desmuestra y en función de cantidades y contenidos rechazables , podría preconcentrarse el mineral en algunas de las fracciones.

El fundamento es la posible fragmentación de las rocas por las vetas o fisuras mineralizadas, y la mayor disponibilidad a triturarse el mineral que la roca estéril, en general más dura.

Este procedimiento requiere yacimientos muy uniformes lo cual no es frecuente, así como comprobaciones periódicas durante la explotación. Pueden ser ejemplos, algunos yacimientos de magnetita, casiterita, scheelita, magnesita, fluoruro, etc. en rocas duras.

En algunos casos, esta trituración y clasificación seca no es suficiente, realizándose una clasificación húmeda del material sin o con trituración. Es el clásico ejemplo de los aluviones de oro o casiterita .Normalmente los minerales valiosos se encuentran en las fracciones más finas y, por simple lavado y clasificación, se pueden rechazar los tamaños mas gruesos de la roca estéril.

Otro ejemplo actual, lo constituye el proyecto en desarrollo de ampliación de la planta de uranio en Salamanca (España) de ENUSA. Tras trituración, el mineral es clasificado por vía húmeda en un deslamador rotatorio y criba vibratoria horizontal en tres tamaños con distintos destinos:

Todo-uno.....	660g U ₃ O ₈ /t
Fracción>20mm.....	<500g U ₃ O ₈ /t(A vacié)
Fracción>1-10mm.....	525g U ₃ O ₈ /t(lixiviación en pilas)
Fracción<1 mm.....	3.900g U ₃ O ₈ /t(lixiviación dinámica)

10.10.3. Procesos de Concentración

Las características geológicas y mineralógicas de las menas de uranio, así como las características químicas del elemento uranio, determina la lixiviación acida o alcalina como el proceso más ampliamente empleado en toda la minería de uranio.

Dependiendo del tamaño del grano y granulometría de la exposición al tanque químico, la lixiviación puede ser dinámica o estática con sus correspondientes sistemas de lixiviación en tanques, pilas. Como sabemos, hay un descenso gradual en número de etapas y en general en la economía del tratamiento por lixiviación.

Una alternativa o más bien complemento de la lixiviación química es la lixiviación bacteriana, productora de iones férricos y ácido para la lixiviación estática, disminuyendo así la necesidad de oxígeno en la lixiviación estática.

Sobre la base de la documentación y experiencia del tratamiento de menas similares, será necesario realizar una investigación programada en laboratorio y/o planta piloto para estudiar la química del proceso y sus parámetros fundamentales, que determinaran el proceso y sistema más viable de lixiviación. Es obvio indicar que los malos resultados en laboratorio por lixiviación dinámica, descartarán la lixiviación estática, así como que la presencia de carbonatos en la mena eliminan la lixiviación ácida. Por el contrario, la presencia de sulfuros y algunos sulfatos son contraindicados para una lixiviación alcalina.

La lixiviación de las menas de uranio da como producto una solución madre o fértil con elementos valiosos y no valiosos disueltos, que son recuperados en la planta de extracción de características similares y a veces común para la lixiviación estática y dinámica. Es de gran importancia obtener una solución madre lo más pura y concentrada posible, por la gran influencia que tiene en la capacidad de la planta de extracción y a veces en la economía del proyecto.

Sin embargo, en general, son los costos de explotación y concentración de las menas en soluciones con el uranio disuelto, o que por término medio representan un 75% del costo total de la operación hasta obtener el concentrado amarillo de U_3O_8 . De ahí la importancia de un proceso de lixiviación lo más económico posible.

Lixiviación Dinámica

La lixiviación dinámica se efectúa en tanques con agitación y la operación, por problemas de sedimentación, está condicionada a un tamaño máximo de 1-2 mm.

Por otro lado la molienda al tamaño deseado debe proporcionar una pulpa con viscosidad aceptable y alta densidad (50-60% sólidos), para disminuir el tamaño de los equipos y el consumo de reactivos. En la mayoría de los casos se necesita un espesado previo.

La operación unitaria de agitación, que a mediados del siglo se consideraba simple y fácil, se ha desarrollado en los aspectos de mayor eficiencia de mezclado, menor corrosión y abrasión de los elementos de los equipos (materiales especiales o forrados) y sobre todo en su menor consumo energético.

La agitación puede efectuarse:

- a) **Mecánicamente.** Se emplean los agitadores mecánicos del tipo impulsor o de una turbina. Recientemente, se construyen grandes agitadores con impulsores de flujo axial, y reducido consumo de energía.
- b) **Por aire.** Son los famosos Pachucas, extendidos por todo el mundo y muy empleados en la lixiviación de menas de uranio y oro en Sudafrica, Canadá y otros países. La gran ventaja de la lixiviación en Pachucas es que el agente mezclador, es al mismo tiempo suministrador de oxígeno, como reactivo

fundamental a la lixiviación. Este tipo de agitación proporciona una suave mezcla y con tamaños gruesos (1-2mm) puede ocasionar sedimentación. Por ello, a veces se complementa con una agitación mecánica que, aparte de la mayor intensidad de mezclado, da lugar a una mayor atracción entre partículas, limpieza de superficies y por consiguiente eficiencia en la lixiviación. Es el caso de lixiviación dinámica de gossan en Rio tinto (España).

- c) **Otras técnicas.** Como equipos agitadores se han empleado a veces los tambores rotatorios, principalmente con pulpas de granos relativamente gruesos y cuando se requiere una alta concentración de reactivos o intensa atrición. Es el caso de la planta de Arlit (Nigeria), que emplea una alta concentración de ácido sulfúrico con pequeña cantidad de agua para efectuar un lixiviación por curado de sus menas refractarias uraníferas.

Para altas temperaturas y presiones se emplean las autoclaves, en los que los problemas normales de abrasión y corrosión adquieren relevante importancia.

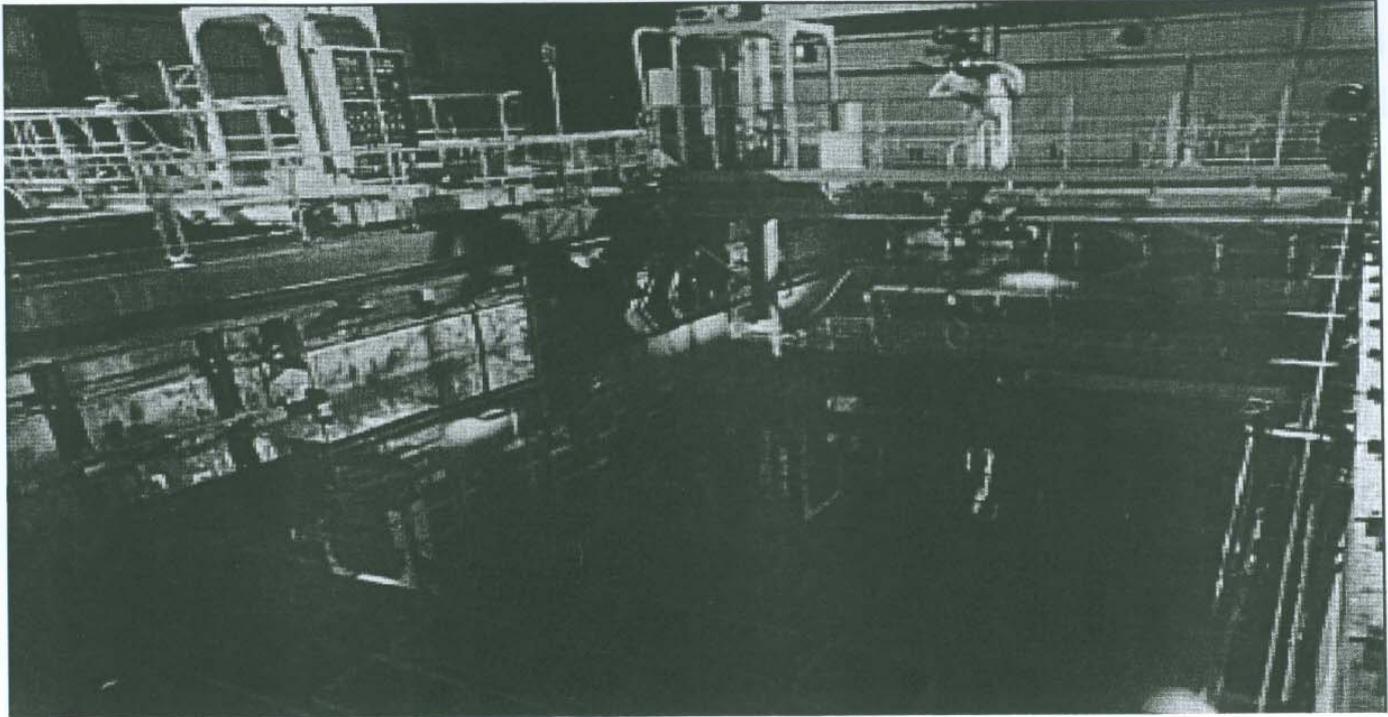
Lixiviación Estática

La lixiviación estática de menas uraníferas ha experimentado un gran desarrollo en la última década, por las causas ya conocidas de yacimientos de baja ley y precios bajos del uranio, que no pueden soportar los costos de una lixiviación dinámica. Estados Unidos con las mayores reservas de uranio en el mundo occidental, pero con leyes bajas, es el país que mas investigación ha realizado en el campo de la lixiviación estática.

Dentro de la secuencia de mayor a menor número de etapas , menor a mayor tamaño de granos, y en general de mayor a menores costos , tenemos los sistemas definidos de lixiviación estática en tanques , en pilas, en vacíos y en sitio .

10.10.4. Procesos de Extracción

Tanto en la lixiviación dinámica como en la lixiviación estática de menas de uranio, se obtiene como producto la solución madre o fértil de uranio.



En la lixiviación estática, al percollar la solución lixivante a través de la masa de material en reposo, sufre al mismo tiempo un proceso de filtración, obteniéndose una solución limpia que se almacena en depósitos en superficie, donde puede verificarse una posterior clarificación por sedimentación. Es otra de las ventajas de la lixiviación estática.

En una lixiviación dinámica, la pulpa tiene que sufrir un proceso de separación sólido - líquido, con posterior lavado de sólido para agotarlo del líquido fértil. En este proceso, el número de estado de lavados es importante, para evitar pérdidas de uranio disuelto sobre las superficies de los granos sólidos.

Las principales técnicas empleadas en esta separación, dependiente de las características físicas de los sólidos (peso específico, granulometría, viscosidad de sedimentación), son los siguientes:

- a) **Filtros**: para pulpas no muy finas, con buena velocidad de sedimentación, se emplean los filtros con dos o tres estados de lavado de la torta. A los tradicionales filtros de discos y tambor, han seguido hoy en día los filtros horizontales de cinta muy empleados en plantas de lixiviación.
- b) **Espesadores**: el empleo de varios es pesadores en serie de un circuito de contra-corriente y decantación (CCD), constituye uno de los métodos mas empleados para la separación solido-liquido y lavado en plantas de lixiviación dinámica de menas de uranio.

La pulpa espesada procedente de el proceso de lixiviación, es lavada en el 1^{er} CCD con el derrame del 2^o CCD y el espesado de este en el derrame del 3^{er} CCD, y así sucesivamente, obteniéndose una solución fértil en el 1^{er} CCD (rebose) y una pulpa residual en el ultimo (espesado).

- c) **Otros equipos**: Para la separación solido-liquido se emplean también otros equipos, como clasificadores de espiral y ciclones solos y combinados, Así, por ejemplo, en algunas plantas la fricción mas gruesa (arenas) se lavan en clasificadores y la fina (lamas) en espesadores.

Tras el proceso de separación sólido-líquido, junto con el lavado se obtiene una pulpa residual que se envía a la presa de residuos y una solución madre o fértil con los valores de uranio disueltos.

En plantas con sistemas de lixiviación estática y dinámica, las soluciones madres se unen para constituir la alimentación de las plantas de extracción.

Tratamiento de menas de uranio hasta la obtención del concentrado final de U_3O_8 estos procesos son:

- 1) **Clarificación de la solución madre:** La clarificación de la solución es necesaria para reducir al mínimo (menos de 10 ppm) los sólidos en suspensión, que pueden interferir en los subsiguientes procesos de extracción. Normalmente se emplean filtros de arena, filtros-prensa, filtros de vacío, etc., Sin embargo, los de mayor eficacia son los filtros de presión de bujías (meta filtros) con paños de lona y pre capa de tierra de diatomeas. Hoy en día están teniendo una gran aceptación las tolvas o conos clarificadores, con el empleo de floculantes y aglomerantes, por sus bajos costos de inversión y operación.
- 2) **Concentración de la solución:** En un principio, la obtención de concentrados de uranio se realizaba por precipitación química de sus soluciones. Pero a partir de mediados de siglo, tiene lugar el desarrollo de las técnicas de obtención de uranio, primero por cambio iónico en resinas (IX) y posteriormente por extracción con disolventes (SX). La introducción de estas tecnologías contribuyeron de forma radical a la obtención de concentrados de uranio más puros, con un menor costo de operación. Fue un gran avance técnico, no solo para la industria del uranio sino para la hidrometalurgia en general. Desde entonces, ambos procesos han sufrido una serie de avances e innovaciones que han mejorado tanto su operatividad como su economía.

En la actualidad, el 50% de las plantas de extracción de uranio emplean el proceso de SX.

La elección del sistema IX o SX para una determinada planta de uranio depende de muchos factores, aunque existen ciertos condicionantes a tener

en cuenta. Así, el cambio-iónico no requiere clarificación y puede tratar grandes volúmenes de solución poco concentradas, por debajo de 0,35 g U_3O_8 /l. En cambio, la extracción por disolvente es más apta para soluciones clarificadas y con concentraciones por encima de 0,90 g U_3O_8 /l. En estas condiciones, el sistema SX es más flexible y selectivo que el IX, pudiéndose obtener concentrados finales más puros.

3. **Precipitación y obtención del producto final:** La solución concentrada de uranio puede ser impurificada por algunos de los componentes iniciales de la mena (molibdeno, vanadio, hierro, etc.), o por algún componente como los iones Na introducidos durante el proceso de extracción.

Las especificaciones de los concentrados de uranio son cada vez más restrictivas y , por dicha causa , los procesos de purificación y precipitación han cambiado y se han hecho más complejos para obtener un concentrado final lo más puro posible.

El proceso más empleado comprende dos etapas : la primera emplea cal para separar el hierro, aluminio ,titanio , torio, etc, así como los sulfatos solubles en dos o tres tanques dispuestos en serie ; la segunda emplea amoniaco para precipitar el uranio en forma de diuranato amónico (ADU), efectuada igualmente en varios tanques dispuestos en serie.

Otros procesos de precipitación, a veces empleados, son la precipitación con MgO, Na (OH) y H₂O. Este ultimo procedimiento es más costoso , pero produce concentrados muy puros con muy bajos contenidos de molibdeno y vanadio y una riqueza mayor del 98% de U_3O_8 .

El concentrado precipitado es después espesado y secado a 400-500 °C , para obtener finalmente el concentrado de uranio que se envasa para el mercado.

Plan Por último, una planta de tratamiento de uranio debe de cumplir una serie de regulaciones medioambientales respecto a la radioactividad durante los procesos, así como en los estériles y residuos depositados en el área.



Figura 15- Planta de extracción de uranio.

Planta De Lixiviación De Uranio.

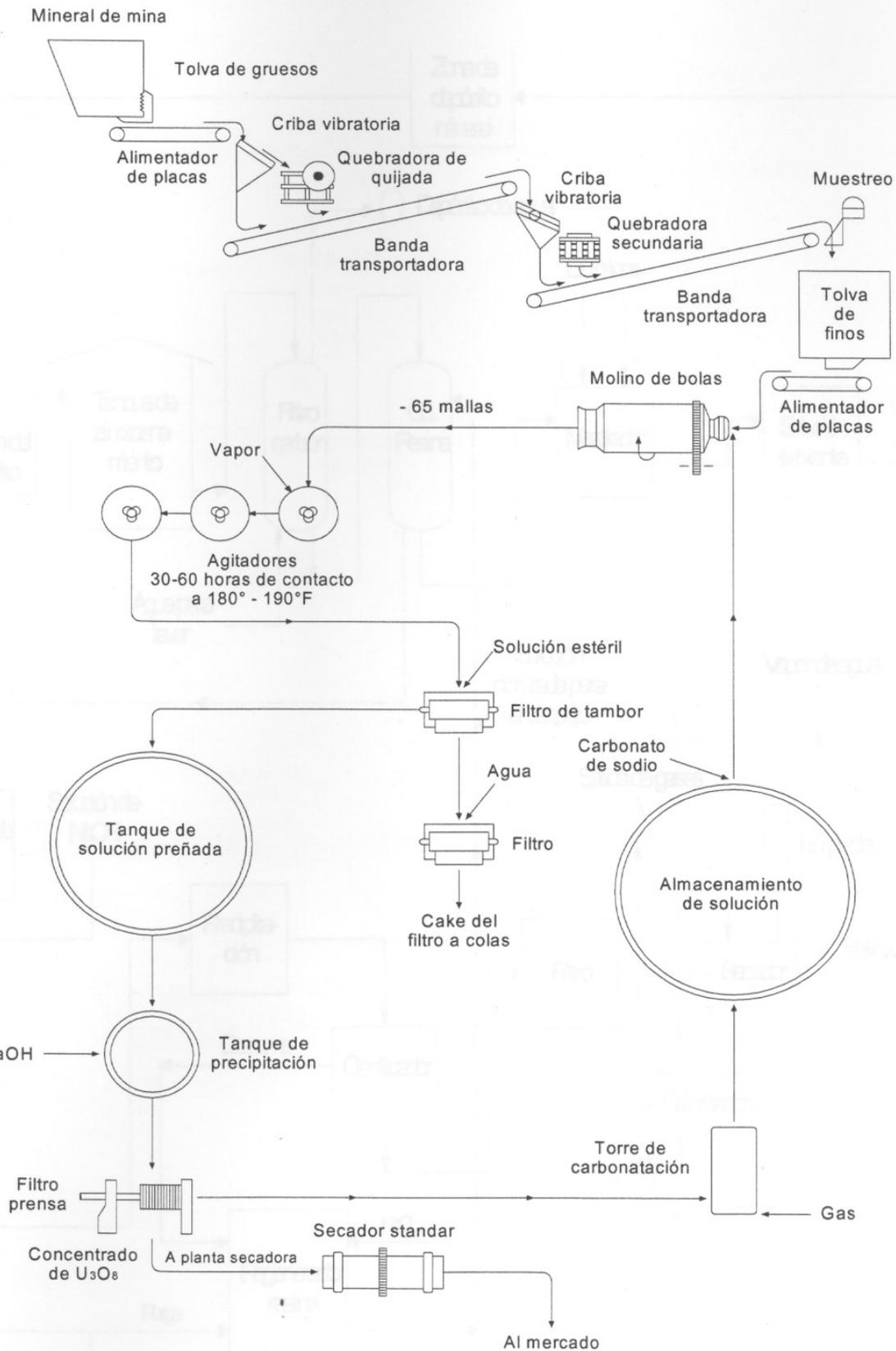


Figura 15- Planta de extracción de uranio.

Figura 16- planta de extracción de uranio

Planta De Lixiviación De Uranio

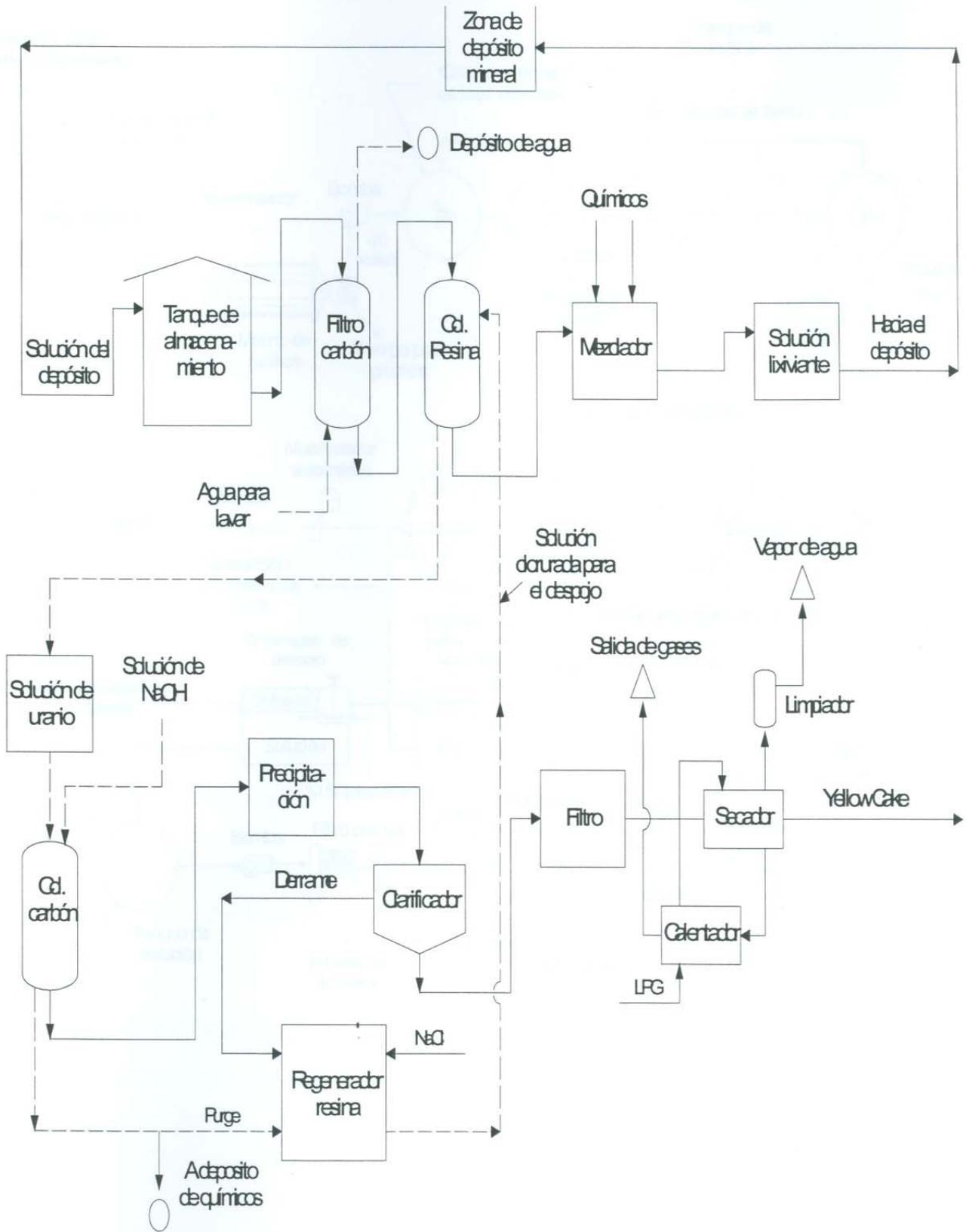


Figura 16-planta de extracción de uranio

Planta de Lixiviación Ácida En Minerales De Uranio

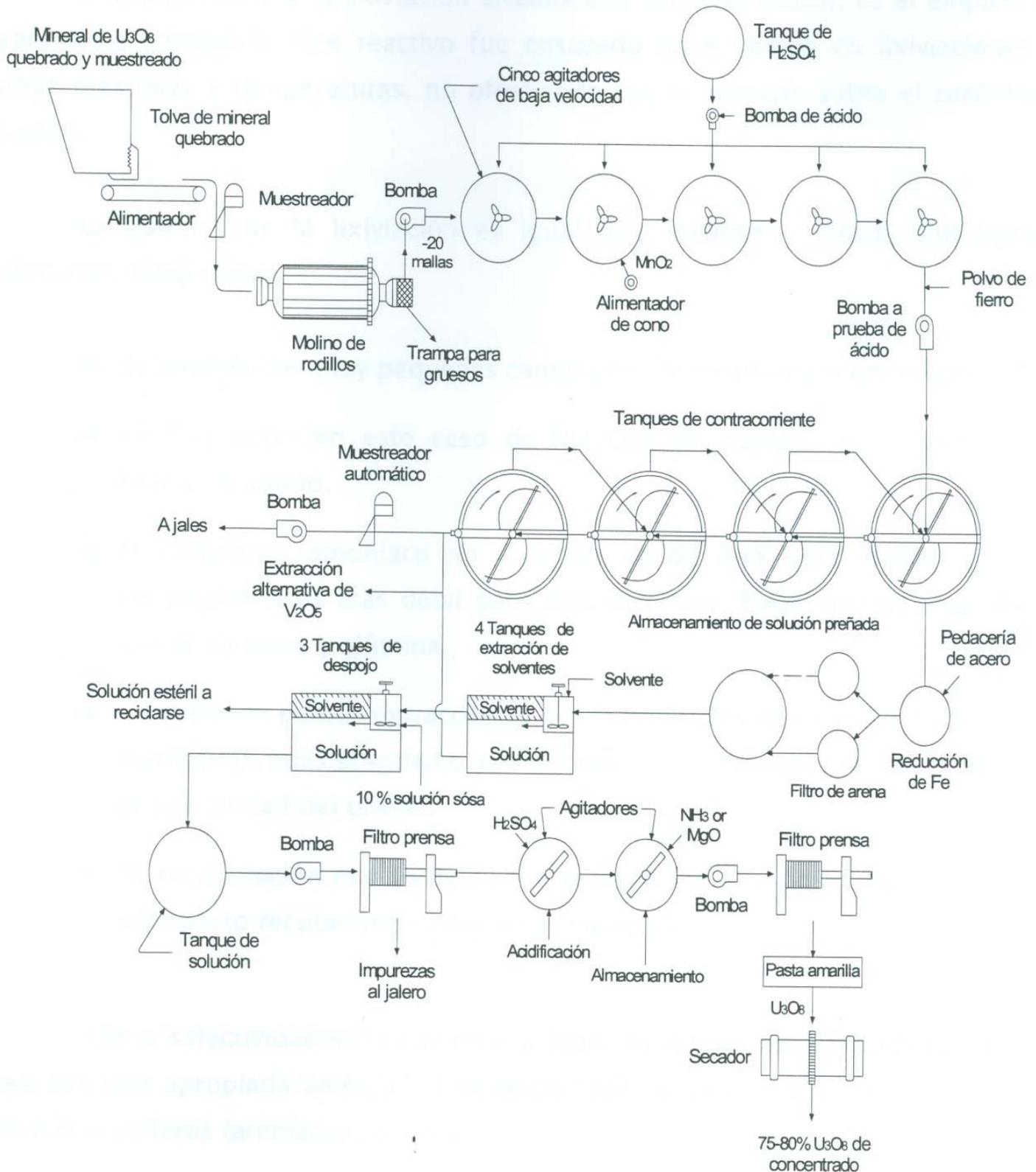


Figura 17 -Croquis de lixiviación ácida en minerales de uranio.

Planta de Lixiviación Acida En Minerales De Uranio

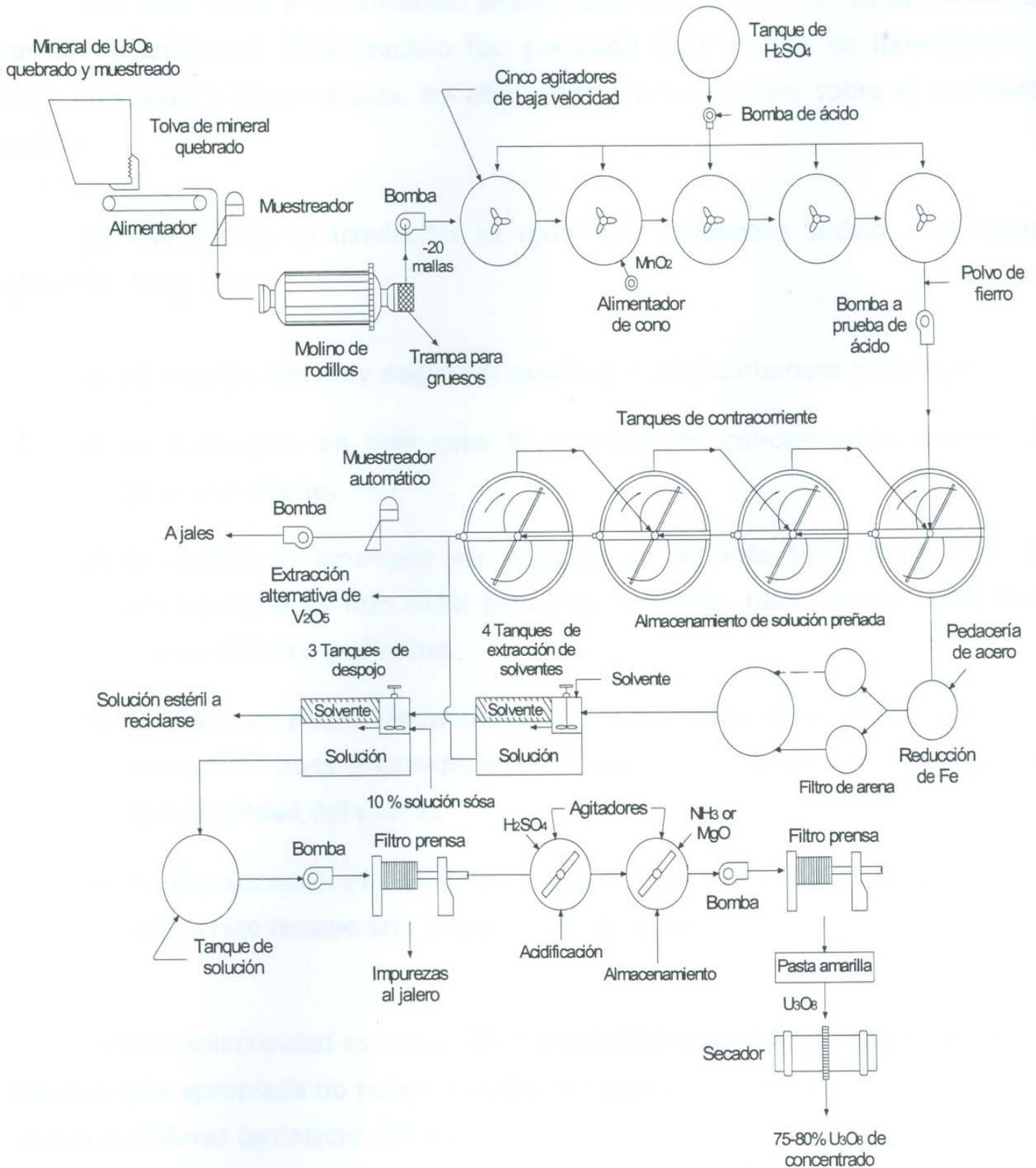


Figura 17 -Croquis de lixiviación acida en minerales de uranio.

10.10.5. Alternativas de la Lixiviación de Uranio

Una alternativa a la lixiviación alcalina con carbono sódico, es el empleo de carbonato amoníaco. Este reactivo fue ensayado hace tiempo en lixiviaciones a altas presiones y temperaturas, no ofreciendo claras ventajas sobre el carbonato sódico.

La química de la lixiviación es igual que carbonato sódico, con ligeras variantes, tales como:

- ✚ Se emplea con muy pequeñas cantidades de bicarbonato amoníaco
- ✚ La formación en este caso de $\text{NH}_4(\text{OH})$ en concentración normal, no precipita uranio.
- ✚ El carbonato amoníaco en solución es de más baja alcalinidad. Por consiguiente es más débil pero más selectivo; tiene menos tendencia a atacar silicatos y alúmina.
- ✚ Se obtienen peores extracciones de los minerales de uranio-vanadio (carnotita), pues el vanadio en soluciones de carbonato amoníaco decrece la solubilidad del uranio.
- ✚ Su recuperación es más difícil que la de carbonato sódico. Se ha propuesto recuperarlo como sulfato amoníaco.

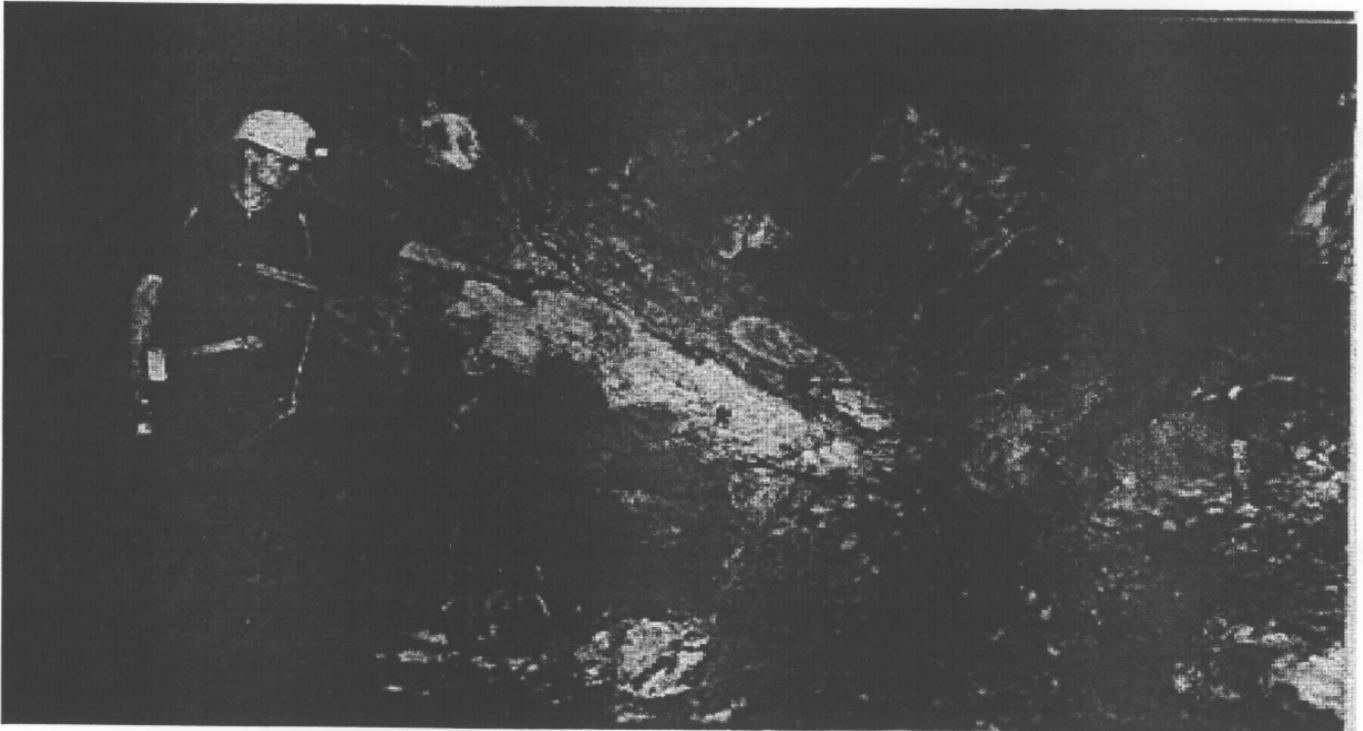
Mayor selectividad es lo que en la actualidad le ha considerado como el reactivo más apropiado para la lixiviación estática (en sitio y en pilas) de ciertas menas uraníferas (areniscas calcáreas).

Como resumen final, puede decirse que existen actualmente tres sistemas operativos para la lixiviación de menas uraníferas:

1. Lixiviación ácido sulfúrico-sulfato férrico, para la lixiviación general de minerales de uranio por lixiviación dinámica y estática.
2. Lixiviación carbonato-bicarbonato sódico, para minerales refractarios de uranio con ganga caliza, a temperaturas y presiones por encima de las normales.
3. Lixiviación carbonato-bicarbonato amónico, para la lixiviación en sitio de areniscas calcáreas.

YACIMIENTOS DE URANIO

Geología



El uranio no es de los elementos menos frecuentes en la corteza terrestre (contenido medio 2g/t) superando en abundancia a otros metales como el wolframio, antimonio, bismuto, plata, oro, etc.

La polivalencia y solubilidad de la mayoría de sus minerales, indican que los actuales yacimientos no son los originales, sino que pueden haber sufrido una serie de procesos geoquímicos de metamorfismo, sedimentación, oxidación-reducción, absorción, precipitación, evaporación, etc, dando lugar a distintos tipos de depósitos de difícil clasificación.

Los tipos de yacimiento más generalizados y frecuentes son los siguientes:

- a) **Yacimientos sedimentarios**, formados por la erosión de rocas graníticas y volcánicas, acidas, oxidación y solubilización, transporte y recepción en una roca matriz sedimentaria en condiciones reductoras. Son los yacimientos de areniscas de Colorado (EE.UU.) y Nigeria.
- b) **Yacimientos hidrotermales**. Son generalmente del tipo filoniano, aunque a veces pueden encontrarse en concentraciones de minerales en masa. Son ejemplos típicos los del macizo de Athabasca (Canadá) y los yacimientos de Mary Kathleen (Australia).
- c) **Yacimientos en conglomerados**. Son gran parte de los yacimientos de Canadá y África del Sur. Estos últimos son auríferos y como tal son explotados, siendo el uranio en la actualidad un subproducto.
- d) **Yacimientos en pizarras**. Ejemplos típicos de las pizarras negras de Ranstad (Suecia), con valores económicos de uranio por la lenta depositación de los sedimentos que permitió retener el uranio contenido en las aguas de mar.
- e) **Otros tipos de yacimientos:**

-**Yacimientos de pegmatitas**. Son yacimientos irregulares y en general con bajos contenidos de uranio. Es de destacar la Mina Rossing de Namibia (África Occidental), con leyes de 400 ppm, y que por sus grandes reservas ha permitido realizar económicamente una minería moderna a cielo abierto de grandes tonelajes, unas 40.000 ton/día y con recuperaciones superiores al 80%.

-**yacimientos en carbonitas** y complejos alcalinos que suelen contener uranio y torio.

Mine Todos estos últimos yacimientos son de bajo contenido en uranio (menos de 200ppm) y en la actualidad no son económicamente rentables.

El uranio se encuentra en sus depósitos formando especies mineralógicas de distintos valores, asociado con minerales raras en la roca matriz. La distribución de los yacimientos de uranio en orden de importancia según la internacional Atomic Energy Agency (IAEA), centralizada en Viena (Australia), es la siguiente, excluyendo la URSS y a los países del Este de Europa.

Tipo de yacimiento	% total aprox.
a) Sedimentos (areniscas)	44
b) Hidrotermales (filones)	22
c) Conglomerados	19
d) Pizarras	8
e) Otros	7

La presencia en campo se detecta fácilmente con los contadores "Geiger". Los minerales de uranio se encuentran muy repartidos por los cinco continentes, pero existen áreas con reservas económicamente explotables que en orden de abundancia son: Estados Unidos, África del Sur y Central, Canadá, Australia y Francia. Son países con reservas estimables Brasil y Argentina y en menor cantidad los depósitos europeos de Italia, Portugal y España.

Mineralogía. La identificación de las especies mineralógicas con contenidos medibles de uranio. Quizás la lista más completa sea la publicada en 1967 por el "Geological Survey Bulletin" con cerca de 500 tipos de minerales, aunque en algunos pueden ser sinónimos y de hecho otros de escaso interés. De interés Industrial solo existen unas 20-25 especies.

La identificación de estas especies mineralógicas de uranio se realizan por métodos de fluorescencia de rayos X, por difracción de rayos X (Morton) y por técnicas de microsonda o microscopio electrónico (Gasparini), dependiendo de los tipos, frecuencias, tamaños de granos. En algunos casos, la microsonda es el único instrumento de detección.

El uranio se encuentra en sus depósitos formando especies mineralógicas de distinta valencia, asociado con minerales ganga en la roca matriz.

Existe una secuencia en la investigación mineralógica de un depósito que comprende:

- Presencia, abundancia y distribución de uranio. Esta investigación preliminar es fácil de realizar teniendo en cuenta el carácter radioactivo del elemento.

La presencia en campo se detecta fácilmente con los contadores "Geiger" confirmándose los resultados por análisis químicos.

La distribución se puede determinar por autorradiografías, obtenidas exponiendo una superficie pulida de la muestra a película fotográfica durante un periodo de tiempo que varía según la intensidad de la radioactividad, medida previamente con el Geiger. Se pueden emplear películas fotográficas ordinarias, de polaroid o de rayos x, dando en algunos casos imágenes diferentes. Es una herramienta de gran valor para los mineralogistas, ya que se puede detectar la presencia de pequeñas cantidades de uranio en minerales no comunes.

- Mineralogía: La identificación de las especies mineralógicas con contenidos medibles de uranio. Quizás la lista más completa sea la publicada en 1967 por el "Geological Survey Bulletin" con cerca de 500 tipos de minerales, aunque en algunos pueden ser sinónimos y de hecho otros de escaso interés. De interés industrial solo existen unas 20-25 especies.

La identificación de estas especies mineralógicas de uranio se realizan por métodos de fluorescencia de rayos X, por difracción de rayos X (Morton) y por técnicas de microsonda o microscopio electrónico (Gasparini), dependiendo de los tipos, frecuencias, tamaños de granos. En algunos casos, la microsonda es el único instrumento de detección.

Recientemente Richard D.Hagni, del departamento de Geología y Geofísica de la Universidad de Missouri, ha descrito un nuevo método de identificación de minerales de uranio, basado en propiedades físicas y ópticas, mediante una combinación de técnicas cualitativas y cuantitativas.

Estas técnicas incluyen:

- 1) Medida cuantitativa por microscopia de la reflectancia del mineral a diversas longitudes de onda, normalmente cada 20 nm (un nanómetro es igual a 10^{-9} m).
- 2) A partir de las curvas de reflectancia espectral se puede determinar unas coordenadas de color que dan un punto gráfico para cada especie mineral. Así la conchita, uno de los minerales de uranio más difíciles de identificar, tiene unas coordenadas de color suficientemente distantes para distinguirla de la branerita, uraninita y da vidita y su cercanía al punto de color cero indica la falta de coloración del mineral.
- 3) Otra propiedad identificada de los minerales de uranio es la dureza. Las medidas de estos valores pueden ayudar a distinguir distintas especies. Así tenemos que para la conchita este valor es de 230-302 kg/mm², mientras que la branerita, uraninita y da vidita los valores son de 690.792-813 y 809-907 respectivamente.
- 4) Las medidas de dureza se obtienen con un equipo Vickers con aguja de diamante y cargas de 25 o 100 gramos.

Son todas técnicas modernas, que pueden ayudar, en ciertos casos difíciles a la identificación de los minerales de uranio

Clasificación de los Minerales de Uranio

La clasificación de los minerales de uranio puede realizarse en función de algunas de sus características fundamentales.

A) Según composición química:

- i. OXIDOS SIMPLES
- ii. SILICATOS SIMPLES
- iii. OXIDOS MULTIPLES
- iv. OXIDOS HIDRATADOS
- v. SALES DE URANIO HIDRATADAS
- vi. ASOCIACIONES VARIAS

B) Según formación geológica:

Minerales de uranio primarios (con uranio tetravalente) Comprende los grupos I, II y III.

Minerales de uranio secundarios (con uranio hexavalente) Comprende los grupos IV y V.

C) Según aptitud al tratamiento siderometalúrgico:

1. Minerales con uranio tetravalente. Comprende los grupos I y II.
2. Minerales con uranio hexavalente. Comprende los grupos IV y V.
3. Minerales de uranio refractarios .Comprende los grupos III.
4. Asociaciones varias.

Indudablemente no son clasificaciones rígidas, y la mayoría de los yacimientos contienen varios tipos de mineralizaciones. Así, por ejemplo, es normal que un depósito de minerales primarios contenga una capa superior alterada con mineralizaciones secundarias, o que ciertos depósitos de óxidos simples contengan también silicatos u óxidos múltiples.

Principio básico y fundamental es que los minerales primarios (uranio tetravalente) necesitan una oxidación previa a uranio hexavalente o catión uranio $(\text{UO}_2)^{2+}$, para su tratamiento siderometalúrgico por lixiviación ácida o alcalina, mientras que los secundarios pueden ser refractarios (óxidos múltiples), necesitan normalmente fuertes condiciones oxidantes y/o tratamientos previos específicos.

BIBLIOGRAFIA

Millar. Ch. (1997) "Lixiviación en montones: Manual Práctico" Edición Personal, Sonora México.

Llorente. E. *etal* (1991) "Minería Química" Instituto Geológico Minero de España, Madrid España.

Fernández. R. (2002) "Hidrometalurgia" notas de clase Universidad de Sonora.

Saucedo. Ma. (19887) "Manual de productos químicos para minería" Cyanamid, México.

López. C. (1996) "Recursos Minerales" Editorial Arias Montaña. Madrid España.