

Extracción de uranio de sus menas

por D.C. Seidel*

El desarrollo de la industria minera del uranio y del tratamiento de sus minerales es un caso singularísimo. En espacio de poco menos de 10 años creció de ser apenas nada a una importante industria hidrometalúrgica; ninguna otra operación de tratamiento de minerales se ha desarrollado tan rápidamente. No solo creció con rapidez, sino que esa industria llegó a ocupar el primer lugar en el perfeccionamiento de tratamientos hidrometalúrgicos tales como la lixiviación, la separación sólido-líquido, el intercambio de iones y la extracción por disolventes.

Hasta principios del decenio de 1940, el uranio se obtenía como subproducto de las industrias del vanadio y del radio, y el consumo total mundial era de unas cuantas toneladas anuales. A principios de los años 50 de producción mundial se había elevado a más de 800 toneladas anuales, y ha continuado en aumento desde entonces. En 1979 se encontraban en funcionamiento más de 50 plantas de tratamiento de uranio y se producían aproximadamente 38 000 toneladas de uranio. Para ello se trataron más de 65 000 000 de toneladas de materias primas: aproximadamente la mitad era mineral de nueva extracción y el resto residuos procedentes de operaciones tales como la extracción de mineral de oro en Sudáfrica.

Hasta los primeros años del decenio de 1950 el mineral de uranio se extraía casi totalmente de minas subterráneas. En años posteriores ha aumentado constantemente la cantidad producida en minas a cielo abierto, y actualmente se extrae más *mineral* de las minas de este tipo que de las subterráneas. Sin embargo, todavía las minas subterráneas producen más *uranio* ya que la ley de los minerales de ellas extraídos es superior a la de las menas a flor de tierra.

La decisión sobre el mejor sistema de extracción minera en un determinado yacimiento puede presentar problemas difíciles. Es necesario considerar numerosos factores tales como la profundidad del yacimiento, la importancia del depósito, la ley del mineral, las condiciones del suelo, la topografía de la superficie, etc. Se debe considerar individualmente cada depósito antes de preparar la planificación de la mina. Ciertas minas subterráneas se encuentran a menos de 30 metros de profundidad, en tanto que algunas excavaciones a cielo abierto alcanzan profundidades de cerca de 150 metros. Actualmente se trabaja en una mina subterránea en Mr. Taylor (Estados Unidos) a una profundidad de 1000m, y las minas de oro de Sudáfrica que producen uranio como subproducto son todavía más profundas.

La importancia de las minas de uranio también varía considerablemente. Algunas minas pequeñas, de

propiedad privada, producen menos de 50 toneladas de mineral por día, en tanto que la mina a cielo abierto de Rossing, en Namibia, produce 40 000 toneladas diarias.

El uranio se presenta en una gran variedad de ambientes geológicos y para su extracción se han utilizado casi todos los tipos de técnicas de minería. Se han desarrollado igualmente nuevas tecnologías para responder a necesidades especiales. La diversidad de los depósitos de minerales de uranio se refleja también en la tecnología del tratamiento que sigue a su extracción.

El rápido crecimiento de la industria del tratamiento de uranio ha subrayado la particular importancia de los intercambios de información sobre los métodos de tratamiento. Tanto el Organismo como las Naciones Unidas han desempeñado un importante papel en este canje de información. Las conferencias internacionales patrocinadas por las Naciones Unidas sobre la utilización pacífica de la energía atómica, celebradas en Ginebra (Suiza) en 1955 y 1958, dieron lugar a las primeras publicaciones importantes sobre el tratamiento de minerales de uranio. Con anterioridad a esas conferencias, la información sobre el tratamiento de este mineral se consideraba confidencial y secreta. El OIEA ha seguido compilando y publicando información técnica sobre la evolución mundial del tratamiento de uranio y de la industria de su refinado. Las publicaciones de que dispone actualmente figuran en el Cuadro siguiente.

Operaciones en planta de tratamiento

Una vez arrancado de la mina el mineral de uranio, la etapa siguiente del ciclo del combustible nuclear consiste en extraer por medios químicos el uranio de ese mineral para obtener un producto parcialmente refinado con un contenido de uranio del 65% por lo menos. Este material se llama corrientemente *torta amarilla*. El tratamiento de uranio se basa principalmente en operaciones hidrometalúrgicas tales como la

Publicaciones del OIEA sobre tratamiento de uranio

- 1980 Production of yellow cake and uranium fluorides (Actas de una reunión del Grupo Asesor — París, 5–8 de junio de 1979).
- 1980 Significance of mineralogy in the development of flowsheets for processing uranium ores (Serie de Informes técnicos N° 196).
- 1976 Uranium ore processing (Actas de la reunión del Grupo Asesor — Washington, D.C., 24–26 de noviembre de 1975).
- 1970 The recovery of uranium (Actas de un Simposio — São Paulo 17–21 de agosto de 1970).
- 1967 Processing of low-grade uranium ores (Actas de un Grupo técnico — Viena, 27 de junio–1 de julio de 1966).

* Miembro de la Sección de Materiales Nucleares y Ciclo del Combustible, de la División del Ciclo del Combustible Nuclear del OIEA.

lixiviación, la extracción con disolventes y la precipitación. Los métodos de separación basados en las propiedades físicas, tales como el peso específico o la susceptibilidad magnética son de aplicación poco práctica para casi todos los minerales de uranio. La torta amarilla se envía a las plantas de refino para purificar el producto hasta obtener los compuestos de uranio de calidad nuclear.

Lixiviación ácida: Los minerales de uranio varían considerablemente de un yacimiento a otro y cada planta de tratamiento se debe diseñar de manera que se adapte a las características específicas de los minerales que vaya a recibir. El procedimiento general es similar al que se aplica a numerosos minerales. En el diagrama del proceso de lixiviación que aparece en el Figura 1 se indican variantes de este procedimiento utilizadas en más de 20 plantas. Las etapas básicas en este diagrama del proceso son:

- Trituración y molido;
- Lixiviación;
- Separación de sólidos y líquido y lavado;
- Extracción por disolventes o intercambio iónico;
- Precipitación y secado de la torta amarilla.

Las menas extraídas de la mina, que en algunos casos pueden incluir fragmentos de 25 cm o más de diámetro, se trituran y se muelen hasta lograr la granulación de arena fina. Como la mayoría de los minerales que se someten actualmente a tratamiento contienen de 0,02 a 0,2% de uranio extraíble, es necesario tratar de 500 a 5000 kg de minerales por cada kilogramo de uranio extraído. En consecuencia para producir una misma cantidad de uranio, la capacidad de la planta de tratamiento podrá variar en un factor de 10.

En la mayoría de las plantas de tratamiento se utiliza la molienda húmeda, y se conducen los lodos resultantes al circuito de lixiviación, donde se añade ácido sulfúrico. El consumo de ácido no depende del tenor de uranio del mineral, sino de los elementos que constituyen la ganga. Los carbonatos presentes son frecuentemente los principales consumidores de ácido. El total del consumo de ácido sulfúrico puede variar entre 10 y 100 kilogramos por tonelada de mena. El tiempo de lixiviación puede variar entre un reducido número de horas a todo un día. En el caso de ciertos minerales se puede reducir notablemente el tiempo de lixiviación calentando el mineral molido mezclado con el ácido: en varias plantas de tratamiento se utilizan temperaturas entre 40 y 60°C. Numerosos minerales requieren que se agregue un oxidante tal como el bióxido de manganeso o el clorato de sodio para lograr una extracción satisfactoria del uranio. El oxidante es necesario porque la mayoría de los minerales contienen uranio en la forma reducida o tetravalente. El uranio reducido es solo ligeramente soluble en los licores de lixiviación ácidos; el oxidante aporta los elementos necesarios para convertir el uranio al estado hexavalente que es fácilmente soluble. La recuperación de las soluciones de lixiviación varían normalmente entre el 85 y 95%, y los licores de lixiviación resultantes son soluciones relativamente diluidas, aunque complejas, de sulfatos ácidos que contienen una gran variedad de iones. Los iones metálicos presentes corrientemente comprenden: uranio, hierro, aluminio, magnesio, vanadio, calcio, molibdeno, cobre y, algunas veces, selenio. La concentración común del

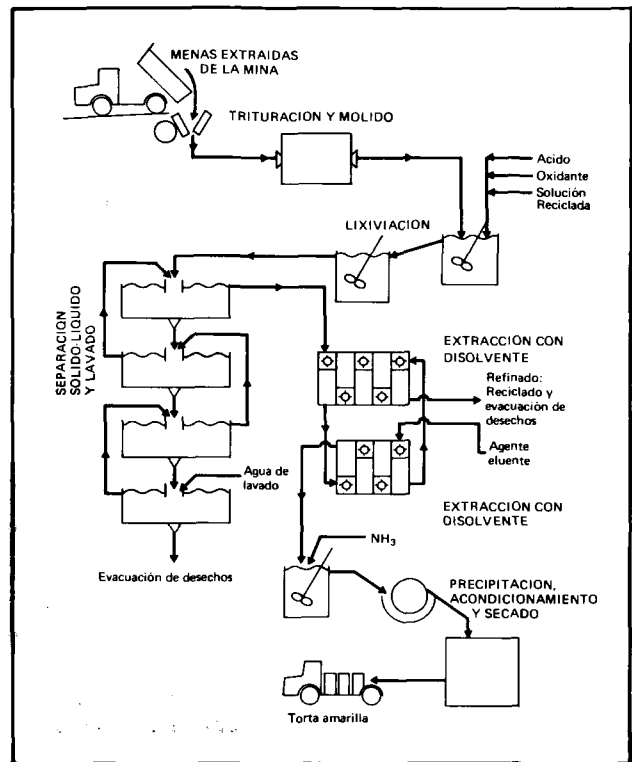


Figura 1. Diagrama del proceso de tratamiento de mineral de uranio.

uranio es 1 a 2 g/litro; las concentraciones de los demás iones pueden variar notablemente según la composición del mineral específico que se haya tratado.

Después de la lixiviación, se separan del líquido los sólidos, que se lavan para recuperar los restos de licor de lixiviación adherido. En la mayoría de las plantas de tratamiento, la operación de lavado se efectúa en circuitos de espesadores en contracorriente. Tanto las técnicas de espesadores y de floculación desarrolladas para su utilización en las plantas de tratamiento de uranio se emplean ahora generalmente en otras industrias hidrometalúrgicas. Los floculantes son agentes químicos que pueden capturar partículas en suspensión para formar corpúsculos que se depositan mucho más rápidamente que las partículas aisladas. Por consiguiente, el empleo de floculantes reduce el tamaño de los coagulantes necesarios para los circuitos de lavado. Los floculantes ayudan igualmente a mantener limpios los licores de lixiviación excedentes.

El uranio se separa de la solución de lixiviación mediante su extracción con un disolvente o por intercambio iónico. La industria del uranio ha sido la primera industria hidrometalúrgica que ha recurrido extensamente a la utilización de estas dos operaciones. El agente activo del proceso de extracción por disolución consiste generalmente en una sal aminoinorgánica diluida en querosén, que puede extraer selectivamente los iones de uranio para formar un complejo orgánico insoluble en agua. La fase orgánica se separa de la fase acuosa mediante técnicas de deposición y decantación continuas. El uranio es eluido del complejo orgánico lavándolo con una solución de sal inorgánica, tal como el fluoruro de sodio o el sulfato de amonio. La torta amarilla se

Ciclo del combustible nuclear

precipita de la solución eluente, se seca y el sólido resultante se acondiciona para su envío a la planta de refinación.

Se han empleado diversas modificaciones de este modelo general de diagrama del proceso; los procedimientos específicos escogidos dependen de una combinación de factores tales como las características de las menas, razones de economía y consideraciones de carácter ambiental.

Lixiviación alcalina: Un cierto número de plantas de tratamiento de uranio utilizan circuitos de lixiviación alcalina. Se utiliza este proceso cuando el mineral tiene un elevado tenor de cal y, por consiguiente, la lixiviación ácida no resulta económica. La lixiviación alcalina de minerales de uranio es posible porque en condiciones de oxidación se pueden formar complejos solubles de carbonato de uranio aniónico. Las soluciones más corrientes para la lixiviación alcalina son una mezcla de carbonato de sodio y bicarbonato de sodio. Para lograr rendimientos razonables de esta lixiviación se necesitan altas temperaturas, por lo que casi todas las plantas de lixiviación alcalina utilizan sistemas de lixiviación a presión que permiten obtener temperaturas superiores a 100°C. El uranio se extrae de los licores de lixiviación añadiendo hidróxido de sodio para elevar el pH. Con ello se destruye el complejo aniónico y el uranio se precipita en forma de una torta amarilla de diurinato de sodio, que se lava, se seca y se acondiciona para el transporte.

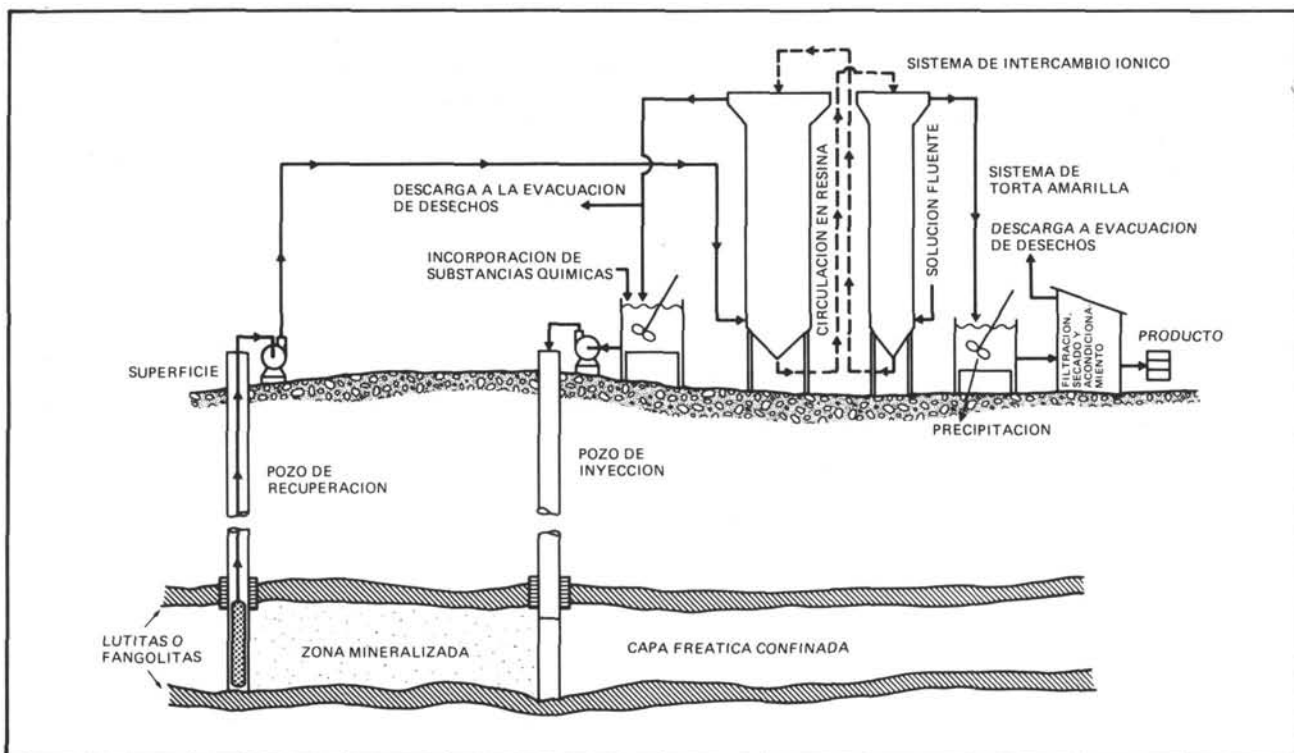
Lixiviación *in situ*: Esta es una de las tecnologías de extracción de uranio más recientes. El desarrollo a escala industrial ha tenido lugar principalmente en los últimos cinco años en la región al sur de Texas (Estados Unidos). Tal como se practica allí, el procedimiento consiste en

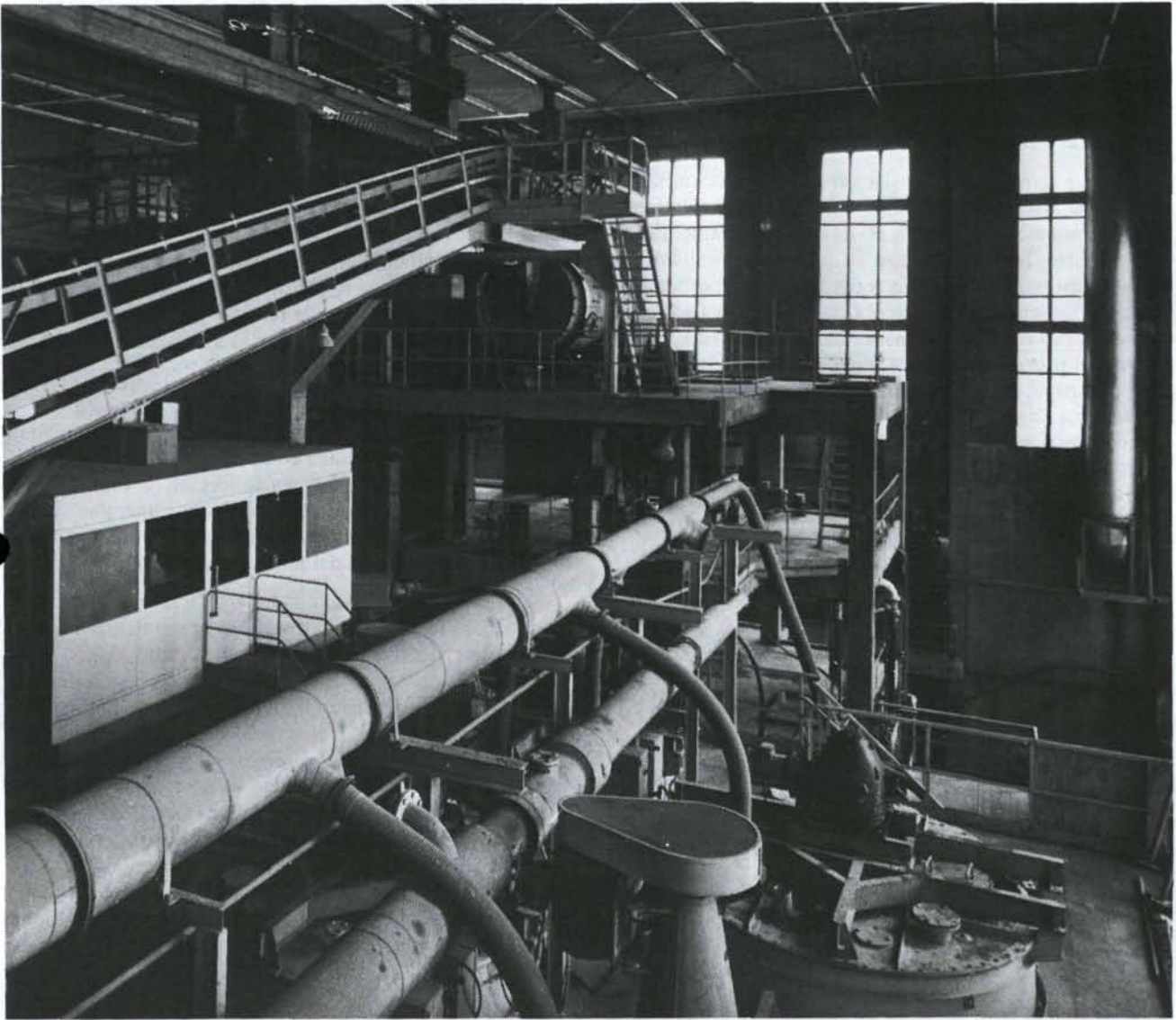
inyectar una solución adecuada de lixiviación en una zona mineralizada que se encuentra debajo de la capa freática. La solución contiene un oxidante junto con elementos químicos que pueden formar compuestos con el uranio. Por bombeo se elevan a la superficie los licores de lixiviación, de los que se extrae el uranio mediante intercambio iónico. La Figura 2 ofrece una ilustración general del procedimiento.

Casi todas las operaciones de lixiviación *in situ* se han realizado con depósitos en acuíferos de arenisca poco profundos (a menos de 200 metros) confinados por estratos poco permeables de lutitas o de fangolitas. Frecuentemente la relación entre la importancia, la ley y la profundidad de un yacimiento eran tales que no resultaba económico aplicar las tecnologías de minas subterráneas o a cielo abierto.

Se han empleado soluciones de lixiviación tanto alcalinas como ácidas. La elección de la solución de lixiviación depende tanto de las características químicas como físicas del horizonte de mineral. Por ejemplo, aunque un determinado agente de lixiviación puede liberar adecuadamente el uranio, se puede utilizar debido a que puede causar efectos perjudiciales en la permeabilidad del horizonte mineralizado. Los sistemas que emplean lixiviación ácida utilizan soluciones diluidas de ácido sulfúrico, en tanto que la mayor parte de los sistemas alcalinos emplean soluciones diluidas (1 a 3 g/litro) de bicarbonato de amonio, de sodio o de potasio. El componente de cationes es importante porque puede afectar seriamente a la permeabilidad de la capa de mineral. En algunos depósitos que contienen arcillas montmoriloníticas, la presencia de iones de sodio han provocado la hinchazón excesiva de la arcilla y reducido la permeabilidad a un valor casi nulo.

Figura 2. Esquema general de la lixiviación *in situ*.





Interior de la planta de tratamiento de mineral de l'Ecarpière, en la región de la Vandée (Francia).

En casi todas las operaciones de lixiviación sobre el terreno es preciso añadir oxidantes para liberar el uranio. El óxido de hidrógeno y el peróxido de oxígeno son los más abundantemente empleados porque ninguno de los dos introduce contaminantes persistentes en el sistema de lixiviación.

Los licores de lixiviación se introducen mediante una serie de inyecciones y se recobran en pozos de recuperación. Para obtener un buen rendimiento se debe distribuir y circular la solución de manera uniforme en todo el yacimiento. El diseño de cada conjunto de pozos de explotación debe tener en cuenta numerosos factores específicos del yacimiento, tales como las características hidrológicas de la formación madre, la importancia y la forma del depósito de minerales, el régimen de producción deseado, etc. El espaciamiento empleado corrientemente entre los pozos es de 5 a 15 m, y un conjunto de producción puede englobar más de 100 pozos. En la mayoría de las operaciones el gasto de líquido de cada pozo de inyección está controlado y se utilizan bombas

sumergibles para retirar de los pozos de recuperación el licor fecundo.

Todas las operaciones de lixiviación *in situ* realizadas actualmente emplean el intercambio iónico para extraer el uranio de las soluciones de lixiviación fecundas. Se utilizan tanto los sistemas de lecho fijo como de intercambio iónico continuo especialmente desarrollados para las operaciones de extracción de uranio. En muchas operaciones se obtiene la elución de resina cargada poniéndola en contacto con una solución ácida de cloruro de sodio y la torta amarilla se precipita del eluido resultante. Para filtrar, secar y acondicionar la torta amarilla se utilizan los procedimientos corrientes.

Las principales consideraciones de carácter ambiental relacionadas con la lixiviación *in situ* son:

La prevención y control de las desviaciones de la solución de lixiviación durante las operaciones;

Restitución de las características del agua subterránea local después de haber concluido las operaciones de extracción.

En general, se han encontrado métodos satisfactorios para controlar y reducir al mínimo las desviaciones de la solución. Cuando dichas soluciones de lixiviación se desvían de los canales previstos es posible rectificar su curso modificando los procedimientos de inyección y de bombeo de recuperación.

Una vez terminada la lixiviación es preciso restaurar la calidad del agua dentro de la capa freática para ajustarla a las normas establecidas por el organismo reglamentario competente. Teniendo en cuenta que tanto la calidad del agua antes de iniciarse las actividades mineras como la composición mineralógica en el seno de la capa freática pueden variar considerablemente de un yacimiento a otro, los procedimientos de restauración se adaptarán a los requisitos específicos para cada emplazamiento. En ciertos yacimientos, puede ser suficiente una operación relativamente sencilla de lavado, en tanto que en otros se requieren combinaciones notablemente más complicadas de lavado y tratamiento químico.

Investigación y desarrollo

Al ir evolucionando la industria del uranio, se ha concedido mayor importancia a las investigaciones sobre la optimización de las técnicas de explotación y los procedimientos más favorables para el medio ambiente. En años recientes, otras investigaciones se han encaminado a la obtención del uranio a base de nuevos materiales. Estos estudios han comprendido trabajos sobre la extracción de uranio del ácido fosfórico, de licores de lixiviación del cobre, de minerales de baja ley, de menas complejas de ley elevada y del agua del mar. Entre los métodos de reciente aplicación industrial, además de los ya mencionados, se encuentran los siguientes:

- Intercambio iónico continuo – se hallan actualmente en funcionamiento en varias partes del mundo diversos sistemas de intercambio iónico continuo. La mayoría de los sistemas se basan, en general, en la circulación a contracorriente de la solución de alimentación y de resina en un sistema fluidizado. Estos sistemas funcionan con cantidades relativamente pequeñas de resina y pueden tratar licores de lixiviación no clarificados.
- Trituración semiautógena – en este sistema las menas constituyen su propio medio de pulverización. El mineral, tal como se ha extraído de la mina, se mezcla directamente

con agua en el molino de trituración semiautógeno y el lodo producido se transporta por bombeo a la operación de lixiviación. Ese sistema puede minimizar notablemente los problemas de manipulación de materiales.

- Clasificación de mineral – aunque la mayoría de los minerales de uranio no se presta al beneficio físico, se han empleado con éxito equipos para la clasificación radio-métrica del mineral que rechaza la roca estéril en varias operaciones. Se hace pasar por el equipo el mineral en trozos relativamente gruesos, según se ha retirado de la mina, y los trozos no radiactivos se dirigen a una tolva de desechos. La técnica puede resultar particularmente conveniente en los casos en que es apreciable la distancia entre la mina y la planta de tratamiento.
- Filtrado en cinta transportadora – en un cierto número de plantas de tratamiento se han usado con buenos resultados filtros en banda continua para lavar y escurrir los residuos de lixiviación. La aplicación de esta tecnología depende de las características de los minerales. En general los filtros en banda son más recomendables cuando el contenido de arcilla del mineral es relativamente bajo.

La industria del uranio ha desarrollado esta gran variedad de técnicas de extracción y tratamiento a causa de la gran diversidad de los minerales de uranio. Las operaciones de tratamiento se diseñan de manera que se adapten a la composición mineralógica específica y a las características del mineral tratado. Se da el caso de que minerales procedentes de diferentes lugares dentro de una misma mina presenten grandes diferencias desde el punto de vista de su elaboración. Los estudios destinados a mejorar los procesos de tratamiento para una operación determinada deben encaminarse al conocimiento y cuantificación de estas irregularidades y la selección en consecuencia de una combinación de diversas operaciones que permitan adaptarse económicamente a tal diversidad.

Los problemas que quedan por resolver incluyen la extracción de uranio de fuentes más complejas, que pueden ser los minerales de ley inferior o procedentes de yacimientos más profundos que los que se explotan actualmente. En escala global, las investigaciones se orientan hacia el desarrollo de tecnologías de tratamiento que sean a un mismo tiempo económicas y aceptables desde un punto de vista ecológico.