

EL URANIO

EL RECORRIDO DE LOS MINERALES





Comunidad de Madrid

Dirección General de Industria,
Energía y Minas
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA
E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

Comunidad de Madrid

contenido

¿QUÉ ES EL URANIO?

- Definición
- Propiedades y características
- Clasificación

EL RECORRIDO DEL URANIO

- Un poco de historia: El uranio y la energía nuclear
- Obtención
- Procesos de transformación y reciclado
- Maquinaria y Tecnologías

APLICACIONES Y USOS DEL URANIO

- Productos y materiales
- Aplicaciones: Generación de Electricidad

EL URANIO EN LA COMUNIDAD DE MADRID, EN ESPAÑA Y EN EL MUNDO

- Producción y consumo
- Industrias

DIRECCIÓN: Carlos López Jimeno
Director General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid

COORDINACIÓN TÉCNICA: Emilio Llorente Gómez
Jorge Vega Calle

EQUIPO DE TRABAJO: Juan I. Artieda

© Comunidad de Madrid
Consejería de Economía e Innovación Tecnológica
Dirección General de Industria, Energía y Minas

© DE LA EDICIÓN: Domènech e-learning multimedia, S.A. 

PRIMERA EDICIÓN: 2005

TIRADA: 1.000

DISEÑO Y MAQUETACIÓN: Enrique Domínguez

IMPRESIÓN:

DEPÓSITO LEGAL:



1. ¿QUÉ ES EL URANIO?

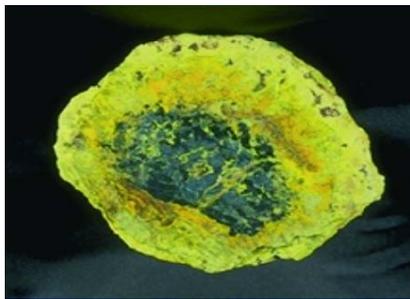
Muchos lectores pueden tener la percepción de que el uranio no es natural, sino el fruto de investigaciones belicistas; pero el uranio es un metal que se encuentra en la naturaleza en forma de distintos minerales y del que a lo largo de esta unidad se expondrán sus características, usos y peculiaridades.

1.1. DEFINICIÓN

El uranio es un elemento descubierto en 1789 por el químico alemán Martin Klaproth, mientras analizaba muestras de mineral de plata provenientes de las minas checas de Joachimstal. Recibe ese nombre en honor al planeta URANO, descubierto 8 años antes. Se localiza por primera vez en un mineral llamado pechblenda, y hasta muchos años después, no se le encuentra otra utilidad que la de dotar de color amarillo al cristal o a la cerámica.

En estado puro, es un metal de color plateado blanquecino, aunque pocas veces se usa bajo esta forma, al menos para usos civiles.

Lo más corriente es trabajar con sus óxidos. El más estable es el U_3O_8 , aunque en la naturaleza la composición de sus minerales es muy variada, dando lugar a vistosos ejemplares de colores llamativos, principalmente verdes y amarillos. Sin embargo, la principal mena (así llaman los técnicos mineros a los minerales de los que se extrae una sustancia aprovechable económicamente) de uranio es la pechblenda o lo que se denominan óxidos negros.



Plechblenda, Torbenita, Monacita y Sabugalita son algunas de las formas en las que aparece el uranio en la naturaleza..



2. EL RECORRIDO DEL URANIO

2.1. UN POCO DE HISTORIA: EL URANIO Y LA ENERGÍA NUCLEAR

Los elementos químicos se ordenan y clasifican atendiendo a su número atómico, formando lo que llamamos la Tabla Periódica de los elementos. El átomo más sencillo es el hidrógeno, que sólo consta de un protón y un electrón, y el más complejo, de los que se encuentran en la naturaleza, es el uranio con sus 92 protones, pues otros más complejos sólo han sido obtenidos artificialmente.

LA ESTABILIDAD EN LOS ÁTOMOS DE URANIO

Los núcleos de los átomos son más inestables cuanto más grandes son, proceso algo similar a lo que ocurre con una burbuja de jabón. Las burbujas más pequeñas son perfectamente esféricas y muy estables, además de flotar en el aire durante un tiempo prolongado. Sin embargo, si se hace una gran burbuja, podrá apreciarse que difícilmente toma la forma esférica que representa el equilibrio de sus fuerzas internas, y que se deforma en todos los sentidos para, finalmente, terminar rompiéndose.

Es sabido, asimismo, que ya en épocas remotas los alquimistas habían intentado convertir las sustancias en oro, y que en la época moderna, los científicos se percataron de la posibilidad de convertir unas sustancias en otras, en el caso de que logran romper los átomos o unirlos.

Con buen criterio, estos científicos llegaron a la conclusión de que siempre sería más fácil romper un átomo con un núcleo grande, debido a su inestabilidad, que con un núcleo pequeño y se fijaron en el núcleo más grande de que disponían: el uranio.

No obstante, ¿Cómo romperlo? Pues recurriendo a algo que impactase contra el núcleo con la energía suficiente. Se les ocurrió que podía ser un neutrón, pues al no poseer carga eléctrica no sería repelido y tendría más facilidad para introducirse dentro del átomo e impactar contra su núcleo (cabe pensar que fuera cual fuera la carga de la partícula, primero debería atravesar la barrera de los electrones, carga negativa, y después del mismo núcleo, carga positiva).

Pero curiosamente, tras diversos experimentos observaron que si daban demasiada velocidad (o energía) al neutrón, éste atravesaba limpiamente el átomo sin crearle mayores efectos pero que, en cambio, si utilizaban neutrones lentos, estos quedaban atrapados dentro del mismo núcleo, lo que les permitiría disponer de una especie de sonda para estudiar el núcleo del átomo. El autor de este descubrimiento fue el italiano Enrico Fermi, en 1934.

Más adelante, la científica Lise Meitner y su sobrino, Robert Frisch, razonando sobre el porqué de ciertos comportamientos en los experimentos que realizaba el científico alemán, Otto Hahn, descubren que lo que sucede realmente al impactar un átomo de uranio con un neutrón: se dividía en dos partes, llegando así a la conclusión de que la rotura no se producía por la energía del impacto, sino porque el neutrón en el interior del núcleo le hacía a éste más voluminoso y, por lo tanto, más inestable y, al igual que en el símil de la burbuja, en la que si se introdujera más aire se rompería, así el átomo se dividía en dos partes, se emitían nuevos neutrones y se producía gran cantidad de energía.

Poco tiempo atrás, Albert Einstein había llegado, de una manera teórica, a la conclusión de que la masa y la energía eran lo mismo.

En realidad, la masa no era más que energía condensada, muy condensada, pues la fórmula que ligaba una con otra era la extensamente conocida, aunque no por ello entendida, $E = mc^2$, donde E = energía, m = masa y c = velocidad de la luz, siendo el valor de esta de 300.000.000 m/s es decir, que una unidad de masa se podría convertir en 90.000.000.000.000.000 unidades de energía.

Pero nadie sabía qué había que hacer para convertir la masa en energía o viceversa.

Pues bien, cuando los científicos (Lise Meitner) comprobaron que la suma de la masa de los átomos, producidos tras la rotura del átomo de uranio, era menor que la que tenía el átomo de éste, se dieron cuenta que la energía correspondía, de acuerdo con la teoría de Einstein, con la masa perdida.

¡Habían encontrado su aplicación práctica!, aunque ya lo sospechaban, pues los experimentos, hacia el 1898, de Mme. Curie llevaron al descubrimiento de una extraña energía, que emanaba de ciertos elementos como el radio, sin que la masa de este disminuyese aparentemente.

Habían encontrado la forma de convertir masa en energía y una pequeñísima cantidad de masa era capaz de producir inconmensurable energía. Se había descubierto la energía nuclear y se empezó a entender cuál era el origen tanto de la energía que mantenía caliente el núcleo terrestre como de la proveniente del Sol, que había originado la vida en nuestro planeta.

Ahora todo lo que faltaba era controlar ese tipo de reacciones y extraer la energía requerida en cada momento.

Se comenzaba así un periodo que llevó a la creación de los primeros modelos de reactores nucleares, donde el uranio era el protagonista principal.

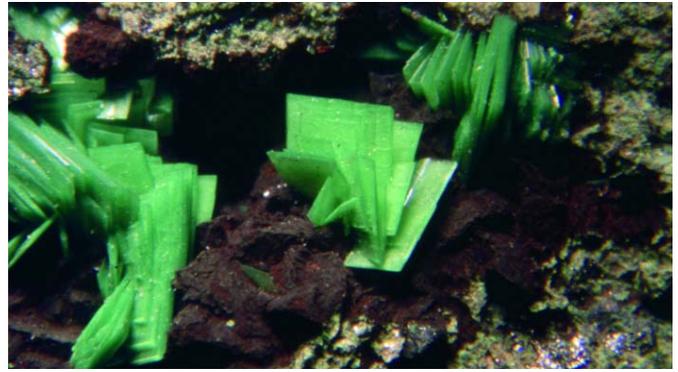
2.2. OBTENCIÓN

A pesar de la tardanza en encontrarlo, la realidad radica en que el uranio es considerablemente abundante en la naturaleza, pues existe tanto como el estaño o como el wolframio. Sin embargo, se encuentra en proporciones muy pequeñas (2 a 4 partes por millón) en las rocas de la corteza terrestre, entre las que podemos decir también, que está el agua. Pero no siempre es así, y en algunas ocasiones, por razones de las que ya hablaremos, se producen concentraciones mayores en algunos lugares que dan lugar a posibles minas.

2.2.1 Exploración e Investigación Geológica

Los yacimientos de uranio pueden ser clasificados en varios tipos. De ellos los 5 que han dado lugar a las mayores minas son:

- Yacimientos o acumulaciones en contactos o discordancias entre un **basamento*** o roca cristalina y un **sedimento clástico***. Los yacimientos más importantes de este tipo son los encontrados en el Athabasca Basin en Canadá, que ha dado lugar a las minas más ricas del mundo (contenidos superiores al 10%), como las de Cigar Lake, Rabbit Lake, etc., o a los yacimientos Australianos de Jabiluka y Ranger, que sin ser los más ricos, sí poseen un volumen de reservas muy importante. En España, podemos asociar a este tipo los yacimientos de La Haba (Badajoz), que dieron lugar a unas pequeñas minas que recibieron los nombres de Mina Lobo, Pedregal y María Lozano.
- Yacimientos en **Areniscas de granulometría*** media y grosera de origen continental fluvial o marino marginal, que hayan dado lugar a una roca con características reductoras. Yacimientos de estas características son los encontrados en las antiguas repúblicas de la Unión Soviética de Kazakhsan y Uzbekistán así como los de la República del Níger de Akota, Arlit e Imauren, en los que participa España a través de la empresa ENUSA. Los yacimientos, investigados pero nunca puestos en explotación, de la zona de Molina de Aragón y Mazarete (Guadalajara) también pertenecen a este tipo.
- Yacimientos en brechas ricas en Hematítes que contienen uranio, a parte de otros metales como cobre, oro, etc. El yacimiento más importante de este tipo es el que ha dado lugar a la Mina de Olympic Dam (Australia), donde el uranio es un subproducto, pues produce cobre como elemento principal y también oro.
- Conglomerados de Cantos de Cuarzo sedimentados en ambientes fluviales o lacustres de edad superior a los 2,3 a 2,4 millones de años. Como en el caso anterior, el uranio se presenta en compañía de otros metales como el oro. Un caso típico es el de los yacimientos de Witwatersrand en Sudáfrica, donde el uranio es un subproducto del oro.



En la naturaleza, las concentraciones de mineral de uranio son muy irregulares y sus características físicas también.

- Filones o brechas mineralizadas donde el uranio se presenta en compañía de otros materiales como los carbonatos, pudiendo coincidir venas o filones de diferente espesor y longitudes, así como de variable riqueza. Pertenecen a este tipo los yacimientos de la provincia de Salamanca, que dieron lugar a la Mina Fe, y que hasta el año 2000, en que se paralizó su actividad, ha sido la más importante de España.

Además de estos, existen otros tipos de yacimientos, que aunque en algunos casos han dado lugar a minas de importancia, no son frecuentes o las reservas encontradas en ellos no han sido elevadas.

Ya hemos hablado de los tipos de yacimientos y de sus características, que permiten buscar en los lugares del mundo donde pueden encontrarse situaciones geológicas similares. A esta etapa se la denomina exploración geológica..

En esta etapa, después del estudio de la **cartografía geológica*** existente y de la selección de grandes áreas, se recurre al aprovechamiento de las características radiactivas del uranio, o mejor dicho de sus descendientes en la cadena de desintegración.



Sondeo Wago drill

El uranio emite básicamente partículas alfa (átomo de Helio) que son grandes y lentas y sólo viajan en el aire pocos centímetros, con lo cual se desplazarían todavía menos en un suelo; dado que su detección no sería fácil, se suele usar la radiación gamma que emite el radio, mucho más fácil de detectar, ya que al igual que los rayos X es una **radiación electromagnética*** que puede atravesar fácilmente sustancias sólidas. Como estas zonas pueden ser muy extensas, se suelen realizar estas mediciones desde avionetas o helicópteros.

Una vez localizadas las zonas que presentan anomalías radiométricas, nombre que reciben aquellas áreas con mayor radiactividad de la habitual en las áreas circundantes de la misma naturaleza, se pasa a su investigación más detallada, fase que llamaremos investigación de yacimientos, en la que se usan técnicas más sofisticadas y costosas, que abarcan desde la Geofísica a la perforación de sondeos para la toma directa de muestras.

Esto permitirá conocer la realidad del yacimiento y sus características para finalmente poder evaluarlo o, lo que es lo mismo, calcular la calidad de sus minerales y la cantidad de los mismos.

Debido a que, normalmente, los costes de estos trabajos son elevados, no es posible usarlos con mucha profusión. Los Ingenieros deben ser muy precisos en la definición de los mismos y usar técnicas sofisticadas, la mayoría de ellas estadísticas, que les permitan extrapolar una serie de datos obtenidos de unas pocas muestras a la totalidad del yacimiento.



2.2.2. Explotación Minera.

Una vez localizado el yacimiento, es necesario valorarlo y estudiar si es posible explotarlo en condiciones económicas rentables.

Lo primero que deberá estudiarse es el método de explotación.

Existen yacimientos en los que es posible extraer el uranio sin necesidad de mover tierras, aprovechando la facilidad de solubilidad del uranio. Esto es viable si se dan ciertas condiciones, como tener confinado el yacimiento entre capas impermeables, mientras que la roca que contiene el uranio es, por el contrario, permeable y los minerales de uranio presentes son fácilmente solubles.

Entonces, se puede recurrir a lo que se denomina lixiviación "in situ". Lixiviación es sinónimo de disolución, e "in situ" es un término latino cuyo significado es "en el mismo lugar".

La lixiviación in situ suele ser barata, pero deben tenerse en cuenta importantes sus connotaciones medio ambientales.

Si el yacimiento no cumple las condiciones adecuadas, o la legislación vigente, por el motivo que sea, impide la realización de una Lixiviación "in situ", debemos decidir si se puede explotar a cielo abierto, es decir al aire libre, o si por el contrario, la profundidad a la que se encuentra el mineral obliga a hacerlo mediante galerías y pozos, es decir mediante el método denominado minería subterránea.

Las razones para la elección de uno de los dos métodos serán principalmente económicas y en esta decisión han de tenerse en cuenta todo tipo de consideraciones. La minería subterránea suele ser mucho más cara y con mayores riesgos que la minería a cielo abierto, aunque por el contrario esta última presenta un mayor deterioro paisajístico y puede tener más detractores sociales.



En las explotaciones de uranio como en el resto de la minería, se utiliza maquinaria muy pesada y de grandes dimensiones como las perforadoras, las palas y los camiones.

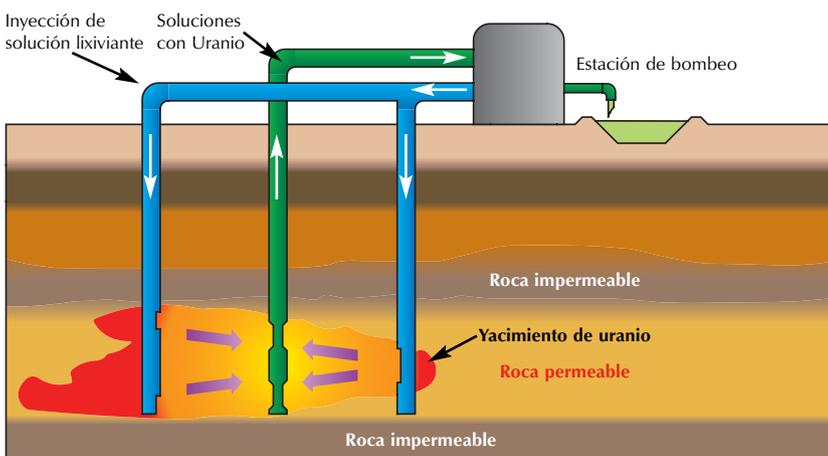
2.3. PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN Y RECICLADO

A lo largo del texto, en diversas ocasiones se ha mencionado cuáles son los contenidos de uranio en los minerales, que en el mejor de los casos no llega al 25% y en la mayoría de las minas está muy por debajo de estas cifras. Por tanto, es necesario extraer el uranio de la roca que lo soporta y obtenerlo en una forma adecuada para procesos posteriores que son necesarios hasta que sea utilizable para obtener energía. Esto se hace en fábricas o plantas químicas. Existen diversas formas físicas y químicas de realizar la extracción, y ello dependerá de las características de los minerales.

Si explicamos de una manera abreviada cómo procesar un mineral para obtener un concentrado de uranio, se puede decir que todos los métodos contienen las siguientes etapas:

1. Disolución, o lixiviación, de los minerales de uranio, (y de otros minerales).
2. Clarificación de las soluciones.
3. Refinación y purificación de las soluciones, a fin de separar el uranio del resto de las sustancias que se disolvieron con él.
4. Precipitación de las sales de uranio
5. Secado del concentrado de uranio.

LIXIVIACIÓN IN-SITU



Lixiviación

En el apartado de la minería, ya se ha comentado una forma de realizar la lixiviación; de hecho, la lixiviación "In situ" es en parte minería y en parte la primera fase del tratamiento de extracción, aunque existen otros dos grandes métodos físicos para realizar la lixiviación, ya en una planta de proceso: la lixiviación dinámica y la lixiviación estática, cuyos nombres dan una idea de en qué pueden consistir.

Lixiviación dinámica.- En ella, el mineral triturado hasta un tamaño manejable se mezcla con los líquidos lixiviantes (son disoluciones acuosas cuya naturaleza dependerá de las características de los minerales) y se agita mediante cualquier método, al igual que hacemos para disolver azúcar en un café. Es una forma cara de disolver, pues triturar la roca consume mucha energía al igual que agitar, pero en cambio se obtienen altos rendimientos en la disolución, por lo que se suele reservar a minerales ricos.

Lixiviación estática.- En este caso, el mineral se dispone en pilas o montones, que se suelen denominar "eras", realizadas sobre una base impermeabilizada; éstas son regadas con las soluciones lixiviantes, de naturaleza similar a las de la lixiviación dinámica, que se filtran a través de los montones disolviendo a su paso el mineral de uranio.

Al llegar a la superficie impermeabilizada, se recogen y se envían para su procesamiento posterior. En este caso, aunque se puede comprender que el rendimiento de la disolución no será tan bueno como en la lixiviación dinámica, no tiene grandes consumos de energía y es un procedimiento económico que no requiere que el mineral sea molido muy fino. Es un método reservado para minerales pobres o para las partes más marginales de los yacimientos.

Desde el punto de vista químico, existen dos tipos de lixiviación: ácida y alcalina, siendo la primera la más usada. La segunda únicamente se usa en el caso de que los minerales tuvieran muchos carbonatos que llevaran a grandes consumos de ácido.

Eras Elefante y Eras Quercus, plantas de la Mina Fe en Salamanca.



Clarificación

Los procesos posteriores requieren líquidos claros, sin presencia de sólidos en suspensión; por ello es necesario que los líquidos provenientes de la lixiviación sufran un proceso de clarificación. Ahora bien, no todos los procesos de lixiviación producen líquidos de igual calidad; así, la lixiviación "in situ" y la lixiviación estática producen líquidos claros que no requieren grandes procesos en este sentido, quizás una filtración. Sin embargo, la lixiviación dinámica requiere sofisticados sistemas de separación sólido-líquido, como decantadores, filtros de banda, etc. Refinación y Purificación.

Al disolver el uranio, se han disuelto otras sustancias que deben separarse necesariamente como, por ejemplo, el hierro. Para ello se recurrirá al intercambio iónico, que puede hacerse con **resinas***, como las usadas para el tratamiento del agua, o con lo que se denomina extracción con disolventes orgánicos, que es el método más habitual. Consiste en la mezcla, en unos agitadores, de la disolución acuosa que contiene el uranio con una fase compuesta de **queroseno*** y una **amina terciaria***, que es afín por el uranio y no por otros elementos, produciéndose el intercambio de iones y pasando el uranio, en solitario, hacia la fase orgánica.

Separando ambas fases, que no son **miscibles*** (como el aceite y el agua), lo que se hace fácilmente dejándolas sedimentar, nos permite separar el uranio del resto de los elementos acompañantes.

Pero con el uranio en la fase orgánica no se puede hacer gran cosa y además interesa regenerarla para que se pueda volver a usar en un circuito cerrado, pues es cara. Por lo tanto, debe reextraerse el uranio, o eluirlo que también se llama así esta operación. Para ello se vuelve a poner en contacto la fase orgánica con una disolución acuosa limpia, bien de sal común o bien de sulfato amónico, en unas concentraciones y acidez determinadas y de una manera similar a la etapa anterior, el uranio vuelve a pasar a esta fase acuosa, pero ya en solitario; además, al haber usado un volumen de líquido mucho menor, el uranio se encuentra en éste en un mayor concentración considerable.

Precipitación

Una vez tengamos el uranio en una disolución acuosa limpia, sólo queda precipitarlo, es decir, pasarlo a una sal insoluble para que se decante y podamos separar el sólido, una sal con alto contenido en uranio, del líquido, que en muchos casos puede ser recirculado. Esto se efectúa dando lugar a que el uranio pase a su forma tetravalente, en la que no es soluble, lo cual se realiza ajustando el pH a unos valores determinados, próximos al valor 7, mediante amoníaco, dando lugar al diuranato amónico que es una sal de un vivo color amarillo, muy llamativo. Se puede hacer la precipitación con agua oxigenada obteniendo peróxidos de uranio, que también tienen color amarillo, aunque más suave. En ambos casos, el sólido se suele separar finalmente mediante filtros de vacío, que producen una especie de torta que recibe el nombre de Yellow Cake.



Espesador de lavado en contracorriente en la planta Quercus.



Baterías de los sedimentadores de extracción con disolventes orgánicos en primer plano.

El Yellow Cake o pastel amarillo es una materia sólida que contiene un 80% de uranio y que se obtiene a partir del triturado del mineral y su posterior extracción líquida.



Secado y envasado

La torta así obtenida aún tiene una humedad importante, por lo que habrá de ser secada. En el caso de los peróxidos de uranio, se suele llegar a la calcinación para descomponerlos y evitar problemas posteriores durante el almacenado.

El polvo obtenido del secado está formado en un 80% de U_3O_8 equivalente, que es como se suele medir el contenido en uranio de los concentrados, aunque algunas empresas usan el contenido en U directamente.

El concentrado suele ser envasado en bidones de chapa metálica de 250 l, que son los usados para su venta o envío a posteriores procesos.



Parque de concentrados

Aunque estas son las etapas principales de una planta o fábrica de concentrados de uranio, suelen haber muchas más, pues es necesario tratar los lodos estériles, es decir, aquellos que quedan tras haber sido lixiviado el uranio, que suelen ir acompañados de líquidos ácidos o alcalinos y, por lo tanto, deben ser neutralizados y enviados a algún lugar para su almacenamiento definitivo y seguro; estos lugares suelen ser los llamados diques de estériles o presas de residuos, que han de ser construidas con todas las garantías de calidad para que, aún en el caso de terremoto, no sufran ninguna rotura y den lugar a que los lodos accedan a zonas en las que no deberían estar.

Por otra parte, durante el proceso, continuamente se incorporan aguas que deben pasar un acondicionamiento previo si no poseen las características adecuadas; por otro lado, otras son eliminadas como residuales. El tratamiento de ambas es muy importante, y estas plantas cuentan con instalaciones para ello. No nos adentramos más en estos detalles, pues son comunes a muchas instalaciones.

Vista general de la Planta Quercus



Residuos y clausura

Referente a los residuos de minería, suelen ser considerados de baja actividad específica, y suelen permanecer en el propio emplazamiento minero, ya que no difieren sustancialmente, en su naturaleza, de los materiales naturales.

Sin embargo, la actividad minera sí ha afectado a su forma física (disgregación de la roca) por lo que son más accesibles a la **meteorización*** y se hace necesario protegerlos de ésta, con el fin de evitar que sean dispersados, ellos o las sustancias en ellos contenidos.

Podemos distinguir 4 tipos principales de residuos mineros y de tratamiento:

- Estéril de mina.
- Mineral agotado de lixiviación estática
- Mineral agotado de lixiviación dinámica
- Lodos de neutralización de efluentes líquidos

El tratamiento que se les da depende considerablemente del tipo de mina y de la reglamentación medio ambiental de los distintos países, pero suele haber cierta tendencia a que su emplazamiento definitivo sean los huecos de las antiguas minas.

Sin embargo, no siempre es posible hacerlo, por lo que el estéril de mina se sitúa en escombreras exteriores, cuyo emplazamiento se debe elegir teniendo en cuenta todo tipo de factores medio ambientales y de seguridad. En el caso de los lodos de lixiviación y de neutralización, una solución habitual es enviarlos a grandes presas de residuos construidas con materiales sueltos, es decir construidas como **presas de escollera***, pero con unas especificaciones de diseño muy rigurosas, ya que deben ser seguras aún en presencia de seísmos y totalmente impermeables, tanto en su dique como en su vaso. Asimismo, deben estar preparadas para acoger, sin riesgo alguno, la máxima precipitación (máxima lluvia) previsible en la zona, etc.

Los minerales agotados, cuyo uranio ha sido extraído por lixiviación estática, forman montones sobre zonas impermeabilizadas con láminas plásticas, por lo que en muchas ocasiones éste será su emplazamiento definitivo y serán clausuradas "in situ"; para ello, sus **taludes*** serán suavizados hasta alcanzar las pendientes suficientes como para que sean estables a muy largo plazo, aún en las peores condiciones climatológicas o sísmicas. Por otra parte, debe asegurarse su confinamiento, evitando la entrada de agua y la salida de radón, para lo cual se impermeabilizan con materiales naturales como las arcillas, ya que con ello se obtiene la estabilidad a muy largo plazo, miles de años, cosa que en el caso de materiales artificiales, no puede asegurarse razonablemente, por el hecho de no disponer de la suficiente experiencia en los mismos.

2.4. MAQUINARIA Y TECNOLOGÍAS

La maquinaria utilizada en la recuperación del uranio no difiere sustancialmente de la empleada en la minería de cualquier otro metal. Se ha hablado del uso de grandes palas cargadoras y de grandes camiones usados en la explotación minera y de perforadoras para lograr los huecos en la ubicación del explosivo dentro de la roca, o de grandes tractores de orugas, si el terreno puede ser movido sin la necesidad de explosivos.

En el campo del beneficio de los minerales, las plantas de tratamiento también usan equipos similares a otros minerales que utilicen la **hidrometalurgia*** como método extractivo. Es normal ver en estas plantas grandes tanques espesadores, similares a los usados en el tratamiento de aguas residuales de cualquier ciudad moderna, así como filtros de vacío, principalmente horizontales.

En el enriquecimiento del uranio, como se explicará más adelante, las **ultracentrifugadoras*** son máquinas muy específicas de la industria del uranio.



Maquinaria necesaria para la explotación de una mina.



Voladura controlada para la explotación de una mina.



Explotación minera a cielo abierto. Mina Fe en Salamanca

3. APLICACIONES Y USOS DEL URANIO

Hemos comentado anteriormente, que al descubrir el uranio no se le encuentra mayor utilidad que como pigmento en la industria del cristal y de la cerámica, así como en la de las pinturas, por su intenso color amarillo. En la actualidad, todos estos usos han sido abandonados quedando únicamente su utilidad como fuente de energía.

En ocasiones, su alta densidad ha hecho que lo que se denominan "colas de enriquecimiento", que no es otra cosa que el uranio natural al que se le ha empobrecido en el Isótopo U_{235} , hayan sido usadas para la fabricación de lastres de aeronaves o barcos y en la industria militar como blindajes de carros de combate o incluso para la fabricación de cabezas de proyectiles por su mayor capacidad de penetración, aunque todos estos usos pueden ser calificados como anecdóticos por su escasa entidad.

Sin embargo, el uranio tal y como se obtiene en las fábricas hidrometalúrgicas no puede utilizarse directamente en las centrales nucleares, por lo que debe ser sometido a una serie de transformaciones que describiremos a continuación.

3.1. PRODUCTOS Y MATERIALES

Se ha comentado que en el uranio no se encuentra más uso que la generación de calor para producir energía eléctrica. Por esta razón, los productos y materiales del uranio se reducen a los combustibles nucleares, cuyas tecnologías y fabricación se describen a continuación.

3.1.1. 1ª Conversión

Existen diversas formas o tecnologías de reactores nucleares, aunque la mayor parte de los reactores usan como combustible UO_2 , enriquecido en el isótopo 235 hasta el 4 ó 5%. Para conseguir esto, debe partirse del uranio natural, que sólo tiene el 0,7% de dicho isótopo, e ir quitándole parte de su contenido en el isótopo 238.

Para que ello sea posible es necesario que el uranio se encuentre en una forma química de fácil gasificación. Esa forma química es el hexafluoruro de uranio o UF_6 , que tiene la peculiaridad de que en condiciones normales es un sólido, pero que a determinada temperatura, baja, se sublima. Esto nos ahorrará mucha energía.

Pues bien, pasar los concentrados de uranio, sean diuranato amónico o peróxido de uranio, a UF_6 es lo que se denomina 1ª Conversión. En el mundo encontramos plantas de este tipo en Francia y Estados Unidos.



La producción de energía eléctrica es la principal aplicación del uranio. Central Nuclear de Trillo en Guadalajara.

3.1.2. Enriquecimiento

Aunque no todos los tipos de reactores requieren uranio enriquecido para su funcionamiento, la mayor parte sí lo necesitan.

Un átomo de uranio 235 no difiere demasiado de otro de uranio 238. Sus propiedades químicas son idénticas, luego no las podemos usar para separarlos; pero un átomo de U_{238} es algo más grande que un átomo de U_{235} y ligeramente más pesado. Usando esta pequeñísima diferencia, mediante sofisticadas técnicas se pueden separar los átomos de uno u otro isótopo. Actualmente las técnicas conocidas son tres:

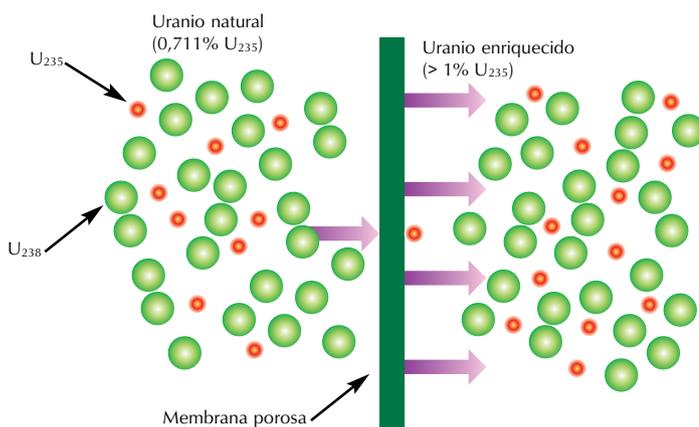
Difusión Gaseosa

Es un método usado durante muchos años, aunque próximamente desaparecerá por tratarse de una tecnología que requiere mucha energía. La difusión gaseosa, simplificando considerablemente, puede ser similar a un cribado a tamaño atómico.

Para que los átomos de uranio estén disgregados, deben estar en estado gaseoso, lo que en el caso del uranio en estado puro requeriría altas temperaturas. Por ello se recurre al artificio de combinarlo con flúor; luego lo que realmente tenemos que cribar son moléculas de uranio con seis átomos de flúor, lo que permite que la diferencia de tamaño entre una molécula de UF_6 con U_{235} y una con U_{238} sea mínima, pero sí cabe la posibilidad de usar materiales con una porosidad adecuada para el tamaño de estas moléculas, donde la probabilidad de que pase una molécula con U_{235} es mayor que con U_{238} . Esto quiere decir que en cada cribado se produce un pequeñísimo enriquecimiento y que a base de etapas (miles) es posible llegar a los enriquecimientos necesarios para usos civiles que están entorno al 4% (para usos militares se llegan a enriquecimientos del 90%), habiéndose partido de contenidos en U_{235} del 0,7%.

Para que el gas pase de un lado a otro de la membrana de material poroso, es necesario que existan diferencias de presión importantes entre un lado y otro de la misma.

COMPOSICIÓN DE UN ELEMENTO COMBUSTIBLE

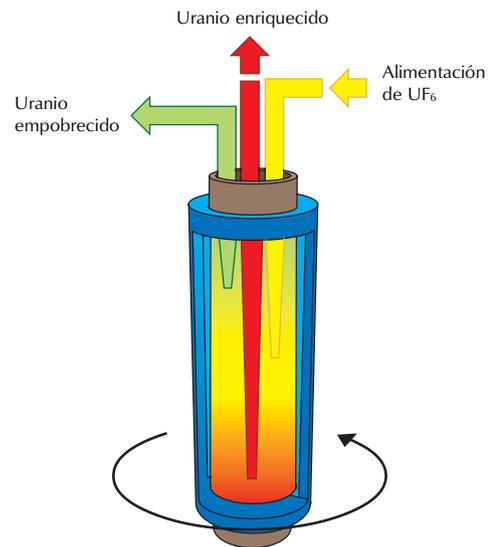


Centrifugación

En la actualidad, la tecnología anterior ha quedado obsoleta y las plantas más modernas aplican una tecnología de ultra centrifugación, donde unos átomos son separados de los otros por peso, aplicándose elevadas fuerzas centrífugas que hacen que las moléculas se vean sometidas muchas veces a la fuerza de la gravedad, y sean mandadas las de más masa hacia la periferia y la más ligeras hacia el centro de la centrifuga.

El hecho de que las masas de los isótopos de uranio difieran en tres unidades, contribuye a que la centrifugación sea un método muy efectivo.

ESQUEMA DEL PROCESO DE CENTRIFUGACIÓN



El consumo de energía de este método es muy inferior (de 100 a 400kWh/UTS frente a los 2.400kWh/UTS que consume la difusión gaseosa) por lo que es el método de más éxito actualmente.

Separación con Rayo Láser

Es una tecnología que aún no está disponible a nivel industrial y no parece que lo vaya a estar a corto plazo. Sin embargo, parece prometedora por su alta eficacia y bajísimo consumo eléctrico.

El rayo láser es capaz de diferenciar entre un isótopo y otro como consecuencia de las pequeñísimas diferencias de configuración electrónica de los mismos. Estas diferencias afectan en la longitud de onda absorbida por la sustancia, de manera que cada isótopo absorbe luz de diferente energía.

De esta forma, los átomos que se quieren separar se marcan, por decirlo de alguna manera, quedando excitados, mientras el resto permanece intacto.

Así, en el caso del uranio se excitan los átomos de U_{235} , mientras los de U_{238} se quedan como están, pudiendo ser separados haciéndolos circular a través de un potente campo electro-magnético. El consumo energético de este proceso es 1.000 veces inferior a la difusión gaseosa.

3.1.3. 2ª Conversión

Después del enriquecimiento, nos encontramos con hexafluoruro de uranio UF_6 , enriquecido en el isótopo 235. Sin embargo, la forma en la que se usa el uranio en el reactor es en forma de UO_2 , por lo que será necesario convertirlo a esta sustancia. Esto se hace en unas instalaciones diferentes, en muchos casos en las proximidades de las fábricas de elementos combustibles, aunque este no es el caso de España.

3.1.4. Fabricación de los elementos combustibles.

La fabricación de los elementos combustibles, nombre que reciben las estructuras en las que se introduce el uranio dentro del reactor, es un proceso complejo que puede ser dividido en diversas fases por lo que sería largo de explicar en una publicación como la presente. Por esta razón, únicamente podremos dar los detalles principales de la misma.

La forma y diseño de los elementos de combustible depende de las tecnologías usadas en cada uno de ellos. Por lo tanto, existen multitud de diseños, aunque todos ellos no pretenden otra cosa que distribuir adecuadamente el uranio en el reactor, de manera que la reacción sea eficaz y al mismo tiempo controlable, pero que también permita un fácil intercambio de calor con el medio refrigerante.

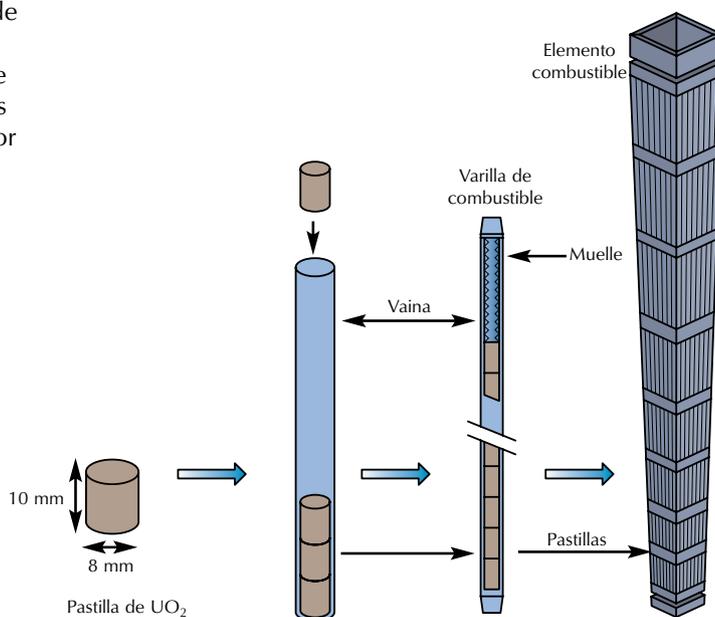
En los reactores nucleares, para usos civiles, los elementos combustibles son haces de barras, en cuyo interior se dispone el uranio en forma de pastillas del diámetro de una aspirina.

Una vez disponibles las pastillas, se introducen dentro de barras de una aleación especial, con un alto contenido de circonio y se sellan soldándoles en sus extremos los correspondientes tapones. Posteriormente, esas barras se unen en haces, cuadrados o hexagonales, mediante unas estructuras o esqueletos y se les unen un cabezal inferior y otro superior, que sirven para su manipulación e introducción en el reactor.



Las pastillas, elementos combustibles de los reactores nucleares, se fabrican mediante la sinterización del polvo de UO_2 .

COMPOSICIÓN DE UN ELEMENTO COMBUSTIBLE



3.2. APLICACIONES: GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

En la actualidad, las centrales nucleares modernas sólo necesitan ser recargadas cada 18 a 24 meses con aproximadamente 25t de UO₂. Lo cual, teniendo en cuenta su alta densidad, ocupa muy poco espacio. De esta manera, le permitiría un país disponer de reservas estratégicas con facilidad.

Por lo que respecta a las centrales eléctricas, son muy semejantes a las centrales térmicas convencionales, ya sean de gas, de carbón, o de fuel, puesto que lo único en que difieren las unas de las otras es en la caldera y en algunos sistemas auxiliares. En el caso nuclear, la caldera es el reactor donde se genera el calor, pero como no existe combustión no hay gases de combustión y, por lo tanto, no necesitará chimeneas ni sistemas sofisticados de alimentación de combustible. Por otra parte, dada la naturaleza radiactiva se requieren estructuras de seguridad y de protección y lo que se suele llamar redundancia de equipos, es decir equipos duplicados de manera que ante el fallo de uno entre el otro inmediatamente en funcionamiento.

Como ya hemos mencionado a lo largo del texto, existen diferentes tecnologías, o modelos de reactores, dependiendo de la combinación de las diferentes opciones posibles de combustible, moderador y refrigerante.

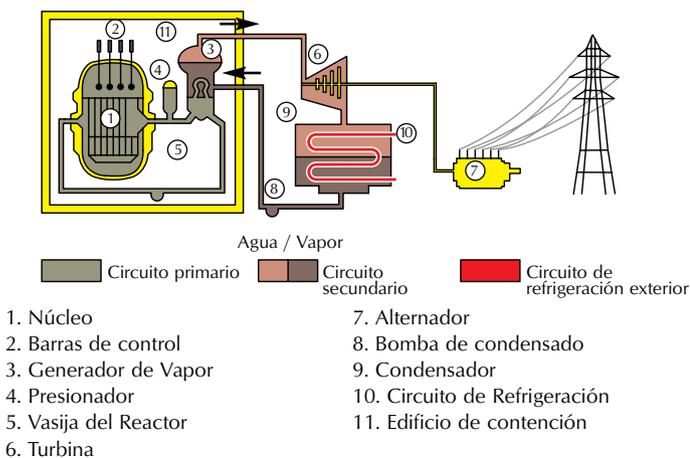
Se puede decir que en un solo camión de los que se ven normalmente por la carretera cabría todo el uranio necesario para el funcionamiento de una central nuclear durante dos años. Pero esto no es del todo cierto a efectos en la práctica, pues al estar dispuesto en las barras que se encuentran dentro de contenedores de transporte especiales ocupan algo más, aunque en cualquier caso muy poco comparado con otros combustibles.

El combustible puede ser uranio natural o enriquecido. El Moderador es la materia que permite que los neutrones vayan perdiendo energía hasta hacerse lo suficientemente lentos, o térmicos que es como se les llama, como para que al chocar con un átomo de uranio éste se desestabilice y fisione. Puede ser agua ligera, agua pesada, grafito, etc. El refrigerante puede ser Na, agua, gas, etc.

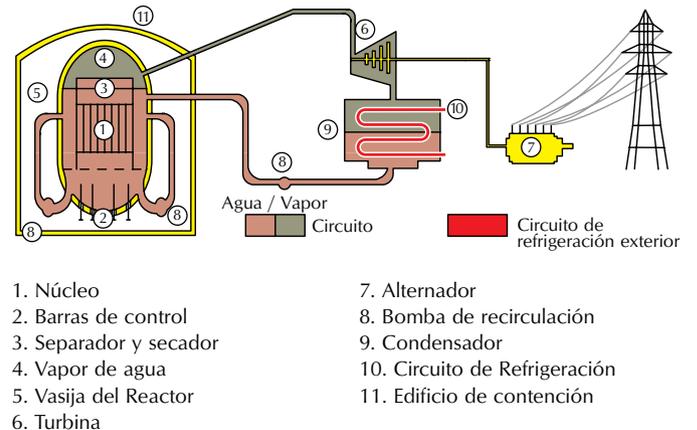
De todas las posibilidades anteriores las que más éxito han tenido para usos civiles, por seguridad y por operación, son las que usan uranio enriquecido como combustible, y agua como refrigerador y moderador.

La forma en la que está el agua da lugar a dos tipos de reactores: los que usan agua en ebullición, o los que usan agua a presión. En los primeros, el agua al circular por el núcleo del reactor hierve y pasa a estado de vapor, que después de secado, va directamente a la turbina. En los segundos, la presión existente en el núcleo del reactor es lo suficientemente alta como para que el agua, a pesar de haber alcanzado una temperatura elevada, no hierva y forme vapor. En este caso, el agua que circula por el núcleo calienta en un intercambiador de calor, llamado generador de vapor, el agua de otro circuito independiente, llamado secundario, vaporizándola, siendo este el vapor que mueve la turbina.

ESQUEMA DE UN REACTOR DE AGUA A PRESIÓN



ESQUEMA DE UN REACTOR DE AGUA EN EBULLICIÓN



Como hemos hablado al principio, la capacidad energética de la fisión del uranio es notable en comparación con otras fuentes químicas de energía. Por esa razón, con una pequeña producción de concentrados de uranio es posible abastecer a muchas centrales nucleares. A fin de obtener una idea de esta capacidad energética podemos observar la tabla siguiente:

CONVERSIÓN ENERGÉTICA: CALORES TÍPICOS DE VARIOS COMBUSTIBLES	
Madera	16 MJ/kg
Lignito pardo	9 MJ/kg
Lignito negro	13-20 MJ/kg
Hulla	24-30 MJ/kg
Gas natural	39 MJ/m ³
Crudo de petróleo	45-46 MJ/kg
Uranio natural - (en reactor de agua ligera)	500.000 MJ/kg

(MJ = Megajulios)

1kg de U puede producir, teóricamente, tanta energía como 20 toneladas de hulla, luego 1 kg de concentrado de uranio (Yellow Cake) puede llegar a producir la misma energía que 15 t de carbón.

Si hablamos en términos de pastillas de UO₂, una pastilla de 5 gramos sería capaz de suministrar toda la energía que consume una casa unifamiliar durante 2 meses, es decir que con 6 pastillas tendríamos todo un año. Imagínense que, si esto fuera posible, bastaría con ponerle algo así como una pila de linterna a nuestra casa para que funcionasen todos los electrodomésticos, tuviéramos agua caliente y calefacción durante un año.

3.3. RECICLADO-RESIDUOS

El combustible consumido de las Centrales Nucleares es considerado, en la mayoría de los casos, como un residuo. Sin embargo, llamar residuo a algo de lo que se puede sacar mucha energía todavía es un poco arriesgado. Es cierto que tal y como está en el momento que se extrae de la central no puede seguir produciendo energía, pero si se reprocessa sí, pues se puede obtener más uranio nuevo así como plutonio. Esta tarea no es fácil, pues debido a su radiactividad debe realizarse en espacios protegidos (cámaras calientes) y mediante elementos robotizados o telecomandados. Con los materiales reprocessados, se puede conseguir nuevo combustible, denominado REPU, en el caso de que esté compuesto de uranio reprocessado o MOX (óxidos mixtos) o en el caso de que esté compuesto de uranio y plutonio en forma de óxidos. De momento, ambas modalidades han tenido poco éxito en el mercado internacional y sólo unos pocos reactores lo están usando.

En España, no se prevé su uso a corto plazo, por lo que todo el combustible quemado no será reprocessado y se almacenará, temporalmente en un almacenamiento de superficie que ha recibido el nombre de ATC, y para el que se está buscando emplazamiento actualmente. No obstante en la Central de Trillo, al haberse agotado la capacidad de la piscina en la cual permanece el combustible a la salida del reactor, hasta que decaiga su actividad, ya está funcionando un almacenamiento de estas características, donde los elementos combustibles son introducidos en unos contenedores especiales, permaneciendo en ellos hasta que se decida su destino final.

			
Pastilla de UO ₂ para PWR (4,8 gU al 3,6% en U ₂₃₅)	360 kg de fuel-oil	600 kg de carbón	
Consumo de combustible de una central eléctrica de 1.000 MW de potencia instalada Producción 7.080 GWh/año			
Tipo de central Parámetros	Nuclear	Fuel-Oil	Carbón
Consumo medio por kWh	0,00260 g de U al 3,6%	195 g de fuel - oil	325 g de carbón
Consumo anual	20.00 kg U al 3,6%	1.530.000 t de fuel-oil	2.550.000 t de carbón
Transportes anuales necesarios	4 o 5 camiones	5 petroleros de 300.000 t	75.000 vagones de 100t

4. EL URANIO EN LA COMUNIDAD DE MADRID, EN ESPAÑA Y EN EL MUNDO

No hay constancia de la existencia de minas de uranio en la Comunidad de Madrid, aunque una roca muy conocida por todos y que suele tener concentraciones de uranio es el granito.

Sin embargo, el uranio se encuentra aún muy disperso en esta roca (4 ppm o 0,0004%) y no se producen concentraciones necesarias para que se pueda extraer en unas condiciones económicas adecuadas.

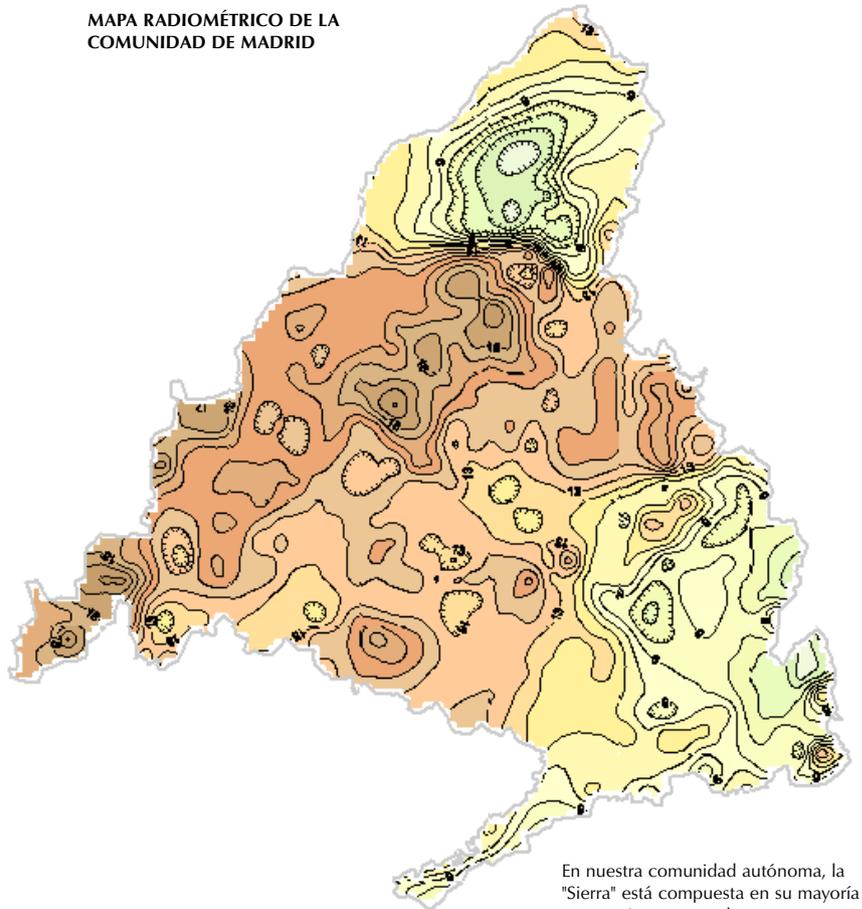
En España, ha habido diversas minas de uranio, como las del Coto Carbonell (hoy El Cabril) en Córdoba, en Cáceres (Los Ratones y otras), Badajoz (La Haba) y en Jaén (Santa María de la Cabeza) que explotaron uranio en los albores de la energía nuclear, y que sirvió principalmente para las investigaciones que en aquellos momentos se llevaban a cabo.

Sin embargo, los yacimientos más importantes han sido los de la provincia de Salamanca, donde la mina Fe ha sido explotada hasta el año 2000, dando las producciones que se reflejan en el siguiente capítulo.

Los minerales de la mina Fe fueron tratados en la planta Elefante, primero, y posteriormente en la Quercus, capaz de producir hasta 950 t de U_3O_8 .

En el mundo, los principales yacimientos se encuentran en los países que aparecen en el cuadro adjunto, estando clasificados por orden de abundancia de las reservas de Uranio, si bien las minas más ricas son las de Canadá.

MAPA RADIOMÉTRICO DE LA COMUNIDAD DE MADRID



En nuestra comunidad autónoma, la "Sierra" está compuesta en su mayoría por granito y se puede ver, en un mapa radiológico de nuestra comunidad, cómo la parte ocupada por ésta cuenta con unos mayores niveles de radiactividad natural.

RESERVAS RECUPERABLES CONOCIDAS DE URANIO	toneladas U_3O_8	% mundial
Australia	1.074.000	30%
Kazajstán	622.000	17%
Canadá	439.000	12%
Sudáfrica	298.000	8%
Namibia	213.000	6%
Fed. Rusa	158.000	4%
Brasil	143.000	4%
EE.UU.	102.000	3%
Uzbekistán	93.000	3%
Total	3.622.000	

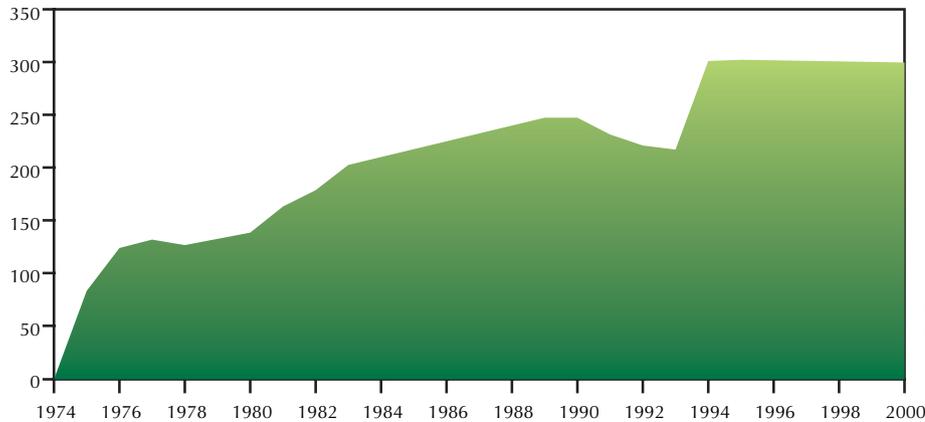
Reservas razonablemente aseguradas más reservas inferidas, 80 Dólares por kg U.

Fuente: 1/1/03, de OECD NEA & IAEA, Uranium 2003: Resources, Production and Demand, actualizado 2005.

4.1. PRODUCCIÓN Y CONSUMO

En el gráfico, se muestra cuáles han sido las producciones anuales del principal yacimiento español (mina Fe).

PRODUCCIÓN DE U₃O₈ EN SALAMANCA (TONELADAS)



La producción de uranio de la mina Fe desde el inicio de su explotación hasta el año 2000 es de 6.776 t.

PRODUCCIÓN DE URANIO (1995-2003)

País o área	Production (tU)									% cambio 2002-03
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
Argentina	65	28	35	7	4	0	0	0	0	0
Armenia	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Australia	3.712	4.974	5.520	4.885	5.979	7.609	7.756	6.854	7.596	10
Bélgica	23	28	27	15	0	0	0	0	0	0
Brasil	125	0	0	0	0	50	58	270	310	15
Bulgaria	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Canada	10.515	11.788	12.029	10.924	8.214	10.590	12.520	11.604	10.457	-10
China [^]	500	500	500	500	500	500	655	730	750	3
Rep. Checa	600	598	590	610	612	507	456	465	345	-26
Finlandia	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Francia	980	940	748	508	439	320	195	20*	0	0
Gabón	630	560	472	731	294	0	0	0	0	0
Alemania	40*	40*	40*	40*	33*	28*	27*	212*	150*	-29
Ungría	205	200	200	10*	10*	10*	0	0	0	0
India [^]	200	200	200	200	200	200	230	230	230	0
Japón	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Kazajstán	1.630	1.320	1.000	1.074	1.367	1.740	2.050	2.800	3.300	18
Corea del Sur	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Lituania	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
México	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Namibia	2.007	2.452	2.905	2.762	2.689	2.714	2.239	2.333	2.036	-13
Noruega	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Nigeria	2.970	3.160	3.497	3.731	2.918	2.900	2.920	3.075	3.143	2
Pakistán [^]	23	23	23	23	23	23	46	38	45	18
Portugal	18	15	17	19	10	10	3	2	0	0
Rumania [^]	100	100	100	100	100	50	85	90	90	0
Rusia [^]	2.250	2.000	2.000	2.000	2.000	2.500	2.500	2.900	3.150	9
Eslovaquia	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Eslovenia	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Sur África	1.424	1.436	1.100	962	981	878	873	824	758	-8
España	255	255	255	255	255	251	30*	37*	30	-19
Suecia	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Suiza	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Reino Unido	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Ucrania [^]	500	500	500	500	500	500	750	800	800	0
EE.UU.	2.324	2.420	2.170	1.872	1.807	1.456	1.011	919	857	-7
Uzbekistán	1.800	1.459	1.764	2.000	2.130	2.350	1.962	1.860	1.770	-5
Total	32.916	34.996	35.692	33.728	31.065	35.186	36.366	36.063	35.837	-1

na: no aplicable *: decomisionado ^: UI/WNA estimado Fuente: World Nuclear Association

4.2. INDUSTRIAS

En España, salvo la Junta de Energía Nuclear en los albores de la energía nuclear, la única empresa que ha explotado ha sido ENUSA Industrias Avanzadas, que a parte de explotar las minas de Badajoz y Salamanca dispone de una importante fábrica de elementos combustibles en Juzbado (Salamanca), desde la que se abastecen la totalidad de las centrales nucleares españolas, a excepción de Trillo y exportando a Europa la mitad de su producción. ENUSA participa asimismo en la Planta de enriquecimiento de Tricastin (Francia) y en las minas de COMINAK en el Níger.

En el resto del Mundo, se explotan importantes minas entre las cuales destacan las relacionadas en los cuadros adjuntos.

Enriquecimiento

En la actualidad, muy pocas empresas en el mundo ofrecen servicios de enriquecimiento, pues es un proceso caro, en el que se requiere una escala de producción determinada para alcanzar la rentabilidad.

Estas empresas son:

- USEC (USA);
- EURODIF (Francia);
- URENCO (Inglaterra);
- TECHNABEXPORT (Rusia);
- PNC (Japón).

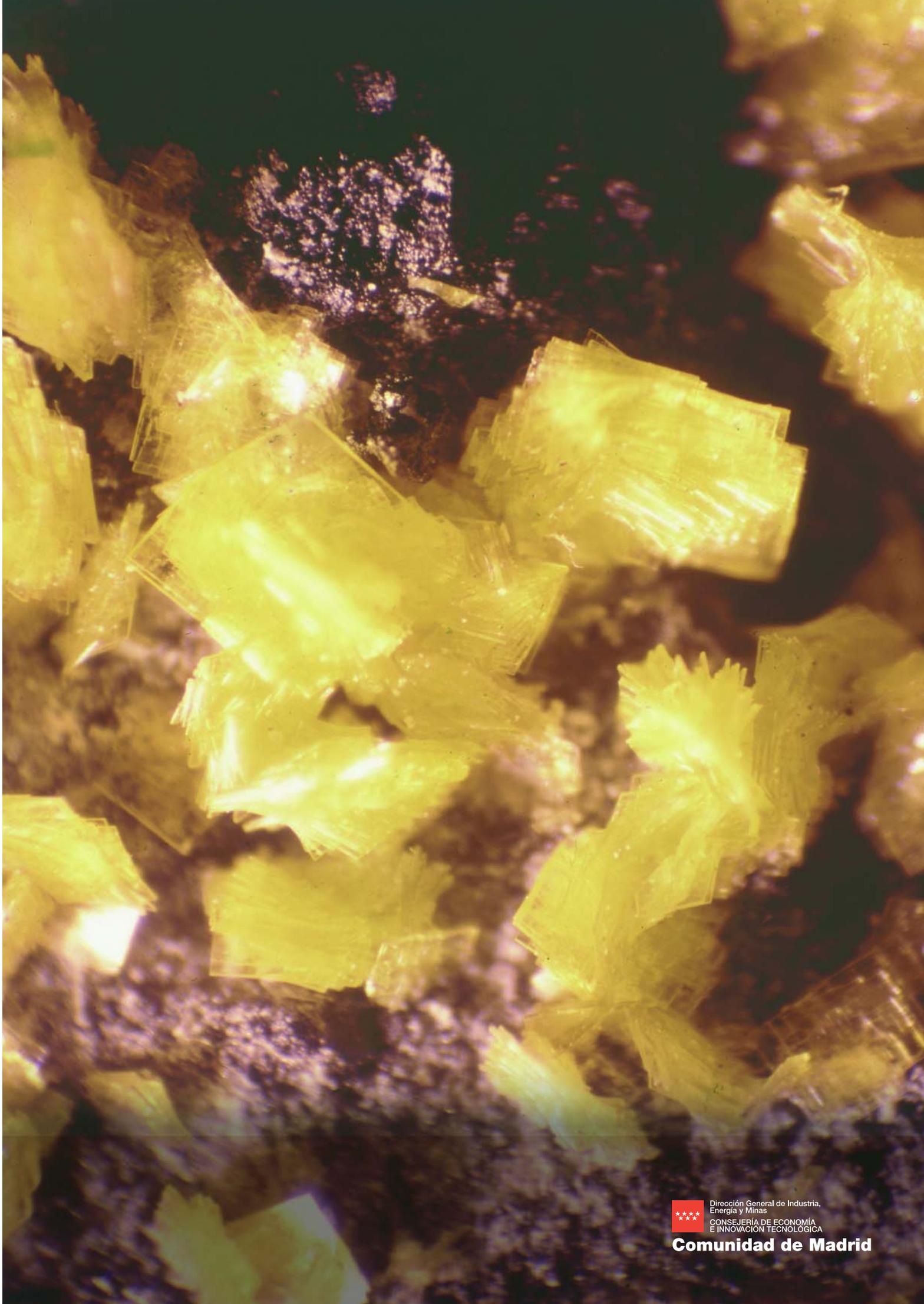
RECURSOS CANADIENSES DE URANIO

Yacimiento	Operador	Toneladas U ₃ O ₈	Grado promedio de mineral	Categoría
Key Lake	Cameco	300	0,52%	reservas probadas
Rabbit Lake	Cameco	6.500	1,25%	reservas probadas y probables
Cluff Lake	Cogema	2.130	2,5%	"reservas"
McClellan Lake	Cogema	22.500	1,9%	"reservas"
McArthur River	Cameco	152.000	26,56%	reservas probadas
		39.000	19,06%	reservas probadas
		56.000	9,5%	recursos
Cigar Lake	Cameco	103.000	20,67%	reservas probadas
		2.400	4,41%	reservas probables
		53.600	16,92%	recursos inferidos
Midwest	Cogema	18.900	5,47%	reservas probadas y probables
Dawn Lake	Cameco	5.800	1,69%	recursos indicados

Información obtenida de la web de la World Nuclear Association.

MINAS DE URANIO EN AUSTRALIA

Yacimiento	Ley U ₃ O ₈	U ₃ O ₈ contenido	Categoría de las reservas
Olympic Dam, SA	0,05%	392.000 t	reservas probadas y probables
	0,04%	1,5 Mt	reservas totales
Ranger, NT	0,24%	43.900 t	reservas probadas y probables
Jabiluka, NT	0,51%	71.000 t	reservas probadas y probables
Beverley, SA	0,18%	21.000 t	recursos
Koongarra, NT	0,8%	14.540 t	reservas probadas y probables
Kintyre, WA	0,2-0,4%	35.000 t	reservas y recurso
Valhalla, Qld	0,144%	41.000 t	recursos
Yeelirrie, WA	0,15%	52.000 t	recursos indicados



Dirección General de Industria,
Energía y Minas
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA
E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

Comunidad de Madrid