



Autunita  
Servicio Geológico Colombiano  
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

# Uranio

Noel A. Téllez Irreño, Seiry Soleny Vargas y Adrián Pérez Ávila

**Citación:** Téllez, N., Vargas, S. y Pérez, A. (2019). Uranio. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

El químico alemán Martín Heinrich Klaproth descubrió el uranio como óxido en 1789 y le dio este nombre en honor al planeta Urano, que se había descubierto en 1781. Más tarde, en 1842, Eugène-Melchior Péligot fue el primero en aislarlo en estado metálico, mediante la reducción, con potasio, del cloruro anhidro de uranio. En 1896, el físico francés Antoine-Henri Becquerel puso de manifiesto sus propiedades radiactivas mediante la producción de una imagen sobre una placa fotográfica que había cubierto con una sustancia absorbente de la luz, utilizando una sal fluorescente de sulfato de potasio y uranio.

Investigaciones posteriores de la radiactividad llevaron a que Mary y Pierre Curie descubrieran el radio en 1898, y a conceptos nuevos sobre la organización interna de la materia (Paone, 1960).

El uranio es el único combustible nuclear utilizado para generar energía. Una tonelada de uranio equivale a 8000 toneladas de petróleo y a 12 000 de carbón. Además, tiene una ventaja notable sobre otros combustibles: no produce anhídrido carbónico y, por tanto, no contribuye al efecto invernadero.

Tres elementos (uranio, torio y potasio, y sus productos de desintegración radiactiva) se encuentran en todos los tipos de rocas. La desintegración radiactiva de estos elementos produce la emisión de una partícula alfa o beta de su núcleo y de energía electromagnética en forma de rayos gamma. Esta energía gamma es la propiedad que se utiliza para la prospección del uranio; casi todos los equipos de prospección se han diseñado con base en dicha propiedad.

## 1. Usos

El uranio se usa principalmente como combustible en los reactores nucleares. Para producirlo, el uranio natural se separa en dos porciones. La porción combustible tiene más contenido de  $^{235}\text{U}$  que la normal, y se denomina *uranio enriquecido*; la porción sobrante, con menor proporción de

$^{235}\text{U}$ , se denomina *uranio empobrecido*. El uranio natural, el enriquecido y el empobrecido son químicamente idénticos, pero el uranio empobrecido es menos radiactivo, y el enriquecido es de mayor radiactividad

Además de este uso, el uranio, tanto enriquecido como empobrecido, se utiliza, entre otras, en las siguientes actividades:

- Como protección contra la radiación por el alto peso atómico del  $\text{U}^{238}$ .
- En estado metálico, para blancos de rayos X y para hacer rayos X de alta energía.
- Como compuestos, en la fabricación de vidrios especiales ( $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) y catálisis (el carburo de uranio se utiliza en la producción de amoníaco).
- Algunos accesorios luminosos utilizan el uranio en fotografía (nitrato de uranio).
- Como trazador, mediante la utilización de isótopos radiactivos, en la investigación de aguas subterráneas.
- En la fabricación de misiles, proyectiles y tanques, entre otros, debido a la alta densidad y punto de fusión.
- En el blindaje de tanques.
- En munición antiblindaje.

## 2. Ambiente geológico

En este capítulo se describen las características generales del uranio, tales como la mineralogía y composición, tipos de depósitos a nivel mundial, así como los métodos de prospección, sistemas de explotación y procesamiento de minerales. Además, se hace un análisis de los recursos, reservas y comercio de este mineral a escala mundial.

### 2.1. Características

A continuación se relacionan las principales características del uranio.

## 2.1. Geoquímica

El uranio es un elemento químico de número atómico 92 (92 protones en el núcleo). Su peso atómico es 238.07 (es el elemento químico más pesado de origen natural), es más abundante que otros elementos, como el mercurio, la plata y el cadmio. Su concentración media en la corteza terrestre es de 2 ppm y ocupa el puesto 48 en la clasificación de elementos muy abundantes.

Está constituido por tres isótopos naturales:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{234}\text{U}$ . Sus abundancias relativas son  $99.2739 \pm 0.0007$ ,  $0.7204 \pm 0.0007$  y  $0.0057 \pm 0.0007$  %, respectivamente.

Se piensa que el uranio presenta todos los valores de oxidación entre +2 y +6. No obstante, en minerales solo existen los valores +4, +5, +6; el +4 y el +6 son los más importantes desde el punto de vista geoquímico.

El uranio es un elemento muy extendido; geoquímicamente es muy persistente debido a tres factores (Álvarez, 2005):

1. Su isomorfismo como  $\text{U}^{4+}$  con el torio, tierras raras y calcio
2. La baja solubilidad del ion  $\text{U}^{4+}$
3. La posibilidad de oxidación del  $\text{U}^{4+}$  al  $\text{U}^{6+}$  para formar el ion  $\text{UO}_2^+$ , que se lixivia con facilidad.

En la naturaleza no existe como elemento nativo: aparece en óxidos, hidróxidos y oxisales. Se encuentra en minerales como la pechblenda, la carnotita, la uraninita o el lignito, y forma parte de las rocas, el aire y el agua. El uranio puro contiene más de un 99 % del isótopo  $^{238}\text{U}$ , menos de un 1 % del isótopo fisible  $^{235}\text{U}$  y cantidades menores de  $^{239}\text{U}$ , formado por la desintegración radiactiva de  $^{238}\text{U}$ . Entre los isótopos del uranio producidos artificialmente están el  $^{237}\text{U}$  y el  $^{239}\text{U}$ .

Las principales propiedades del uranio son las siguientes:

- Es un metal radiactivo de color blanco plateado, duro, ligeramente paramagnético, denso, fuertemente electropositivo, reactivo, dúctil y maleable, pero mal conductor de electricidad. Adopta tres formas cristalinas: alfa (688 °C), beta (776 °C) y gamma. La forma beta es maleable y dúctil. Su punto de fusión es 1132 °C, su punto de ebullición, 4134 °C, y su densidad es de 18.95 g/cm<sup>3</sup>.
- El uranio no se altera por los álcalis, pero desplaza al hidrógeno de los ácidos y de las soluciones de sales de otros metales, como la plata, el cobre, mercurio, platino y oro.
- El uranio reacciona con casi todos los elementos no metálicos. Es soluble en ácido clorhídrico y nítrico, pero muy lentamente en los ácidos no oxidantes (sulfúrico, fosfórico o fluorhídrico). Al combinarlo con el nitrógeno a 1000 se forma un nitruro amarillo. Se combina igualmente con el cloro, el azufre y el carbono para formar, con este último, el carburo de uranio  $\text{UC}_2$ , que se descompone con el agua para producir  $\text{H}_2$  y algunos hidrocarburos.
- El uranio forma sales de uranilo, como el cloruro de uranilo ( $\text{UO}_2\text{Cl}_2$ ), que puede descomponerse en presencia de la luz fuerte, y el nitrato de uranio, cuyos cristales tienen la propiedad de ser triboluminiscentes. Los compuestos trivalentes son muy inestables y pasan a ser hexavalentes por exposición continua al aire. El isótopo  $\text{U}^{238}$  tiene una vida media de unos 4500 millones de años.
- El uranio reacciona reversiblemente con el hidrógeno para formar  $\text{UH}_3$  a 250°C; los isótopos de hidrógeno forman deuterio de uranio ( $\text{UD}_3$ ) y tritio de uranio ( $\text{UT}_3$ ). El sistema uranio-oxígeno es extremadamente complejo. El monóxido de uranio (UO) es una especie gaseosa que no es estable por debajo de 1800 °C. En el intervalo de  $\text{UO}_2$  a  $\text{UO}_3$  existe gran número de fases. Los halogenuros de uranio constituyen un importante grupo de compuestos. El tetrafluoruro de uranio es un intermediario en la preparación del metal y del hexafluoruro. El hexafluoruro de uranio, el compuesto de uranio más volátil, se emplea en la separación de isótopos de  $\text{U}^{235}$  y  $\text{U}^{238}$ . Los halogenuros reaccionan con oxígeno a temperaturas elevadas para formar uranilos y  $\text{U}_3\text{O}_8$ .
- Tanto desde el punto de vista radiológico como químico, el uranio es muy tóxico. En el aire, la concentración máxima permisible de compuestos solubles de uranio es 0.2 mg/m<sup>3</sup> desde el punto de vista químico, mientras que en lo que respecta a la radiactividad, la radiación total máxima permisible para el organismo es 0.2 microcuries. En la tabla 1 se indican algunos valores de las propiedades básicas.
- El uranio se encuentra en el suelo en concentraciones de unas pocas partes por millón (ppm). Algunas rocas contienen concentraciones de uranio suficientemente altas para ser explotadas. Generalmente, la roca explotada se lleva a una planta donde se separa el uranio para convertirlo en productos químicos o en metal. Los residuos de esta operación se denominan *relave de molino* y suelen contener grandes cantidades de productos químicos y sustancias radiactivas como el radio y el torio, que no son separados en el proceso.

**Tabla 1.** Valores de las principales propiedades del uranio

Propiedades	Unidades
Masa atómica	238.0289 uma
Punto de fusión	1405.5 K
Punto de ebullición	4200 K
Densidad	18 950 kg/m <sup>3</sup>
Potencial normal de reducción	-1.38 V U <sup>4+</sup>   U
Conductividad térmica	27.50 J/m s °C
Conductividad eléctrica	33.3 (mOhm.cm)-1
Calor específico	117.04 J/kg °K
Calor de fusión	12.6 kJ/mol
Calor de vaporización	417.0 kJ/mol
Calor de atomización	490.0 kJ/mol de átomos
Estados de oxidación	+3, +4, +5, +6
Primera energía de ionización	584 kJ/mol
Afinidad electrónica	Sin datos
Radio atómico	1.56 Å
Radio covalente	1.42 Å
Radio iónico	U <sup>+3</sup> = 1.11 Å
	U <sup>+4</sup> = 0.93 Å
Volumen atómico	12.59 cm <sup>3</sup> /mol
Polarizabilidad	27.4 Å <sup>3</sup>
Electronegatividad (Pauling)	1.38

Fuente: Educaplus (2016)

Una de las más destacadas propiedades del uranio es el periodo de desintegración (tiempo de vida media), definido como el tiempo que tarda la mitad del isótopo en emitir radiación y transformarse en otra sustancia. Los periodos de semidesintegración se muestran en la tabla 2, y son muy largos.

**Tabla 2.** Isótopos del uranio

Nombre del núclido	Vida media	Abundancia %	Masa atómica (u)
Uranio-230	20.8 días	0	230
Uranio-231	4.2 días	0	231
Uranio-232	70 años	0	232.0371
Uranio-233	159 000 años	0	233.0396
Uranio-234	247 000 años	0.01	234.0409
Uranio-235	704 millones de años	0.72	235.0439
Uranio-236	23.4 millones de años	0	236.0456
Uranio-237	6.75 días	0	237
Uranio-238	4470 millones de años	99.27	238.0508
Uranio-239	23.5 minutos	0	239
Uranio-240	14.1 horas	0	240

Fuente: Educaplus (2016)

El <sup>235</sup>U tiene la propiedad de ser el único isótopo fisiónable. El núcleo del átomo del <sup>235</sup>U es capaz de dividirse en dos partes cuando es golpeado por un neutrón. Cuando el átomo se divide, una gran cantidad de energía es liberada y se emiten nuevos neutrones. Este proceso es denominado *fisión nuclear*. Los neutrones emitidos en el proceso de división del núcleo pueden causar la división de otro átomo de <sup>235</sup>U; de esta manera se origina una reacción en cadena si la masa del material fisiónable excede cierta cantidad mínima, conocida como *masa crítica*. El proceso de fisión es muy importante, ya que es utilizado en el proceso de generación de energía nuclear.

### 2.1.2. Mineralogía

El uranio no se encuentra en forma pura en la naturaleza, sino combinado con otras sustancias para formar un mineral. En algunos de estos el uranio es el principal componente, mientras que en otros solo forma una pequeña parte.

Los minerales de uranio se pueden dividir en dos clases: primarios y secundarios. La mayoría de los primarios se han formado por soluciones calientes que suben desde las grandes profundidades del interior de la Tierra. Los secundarios se han formado a partir de cambios en los minerales primarios, debidos a la acción de las aguas subterráneas, a intemperismo o a otros procesos naturales.

Entre los minerales primarios más importantes se encuentran los siguientes:

#### 2.1.2.1. Pechblenda

La pechblenda, el más importante de los minerales de uranio, es un óxido de uranio. Es el componente principal en casi todas las menas de ley elevada. Ha sido la fuente de mayor producción en el Congo Belga, Canadá y la República Checa. Se halla en vetas, a menudo asociada a sulfuros de minerales de metales como la plata, el cobalto, níquel, hierro, plomo, zinc, bismuto y cobre. La pechblenda es un óxido mixto de composición entre UO<sub>2</sub> y U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. En los textos de mineralogía (Berry y Mason, 1959; Hurlbut y Klein, 1984), este mineral se denomina *pechblenda* si su hábito es masivo; pero si su hábito de cristalización es cúbico u octaédrico, se denomina *uraninita*. El mineral es de color negro a negro marrón, tiene una dureza de entre 5 y 6 en la escala de Mohs, peso específico de entre 6.5 y 10, y está siempre parcialmente oxidado (figura 1).



**Figura 1.** Pechblenda

Fuente: Servivio Geológico Colombiano. Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

#### 2.1.2.2. Uraninita

Este mineral es del mismo color y tiene casi todas las propiedades y las características de la pechblenda. Se presenta en forma de pequeños cristales cúbicos; a veces se encuentra asociada a pechblenda (figura 2).

#### 2.1.2.3. Otros

Los más comunes son los óxidos uraníferos de columbio, tántalo y titanio, como la betafita, euxenita y samarsquita. En general, no se hallan en concentraciones suficientemente grandes como para ser considerados fuentes importantes de uranio. La mayor parte de los colombatos y tantalatos son minerales refractarios, y aunque han sido explotados en menor escala en alguna parte del mundo, por su contenido de uranio, el proceso de beneficio resulta costoso. Estos minerales, que comúnmente se hallan en masas irregulares de cristales bien formados, presentan colores que varían desde rojo pardusco oscuro hasta negro. En astillas delgadas o en polvo, tienen un color decididamente rojizo pardo rojizo, lo cual los distingue de la pechblenda en polvo. Su aspecto es menos parecido al betún

que la pechblenda; en su mayor parte se encuentran en pegmatitas.



**Figura 2.** Gumita con Uraninita

Fuente: Servivio Geológico Colombiano.  
Fotografía: Jair Ramírez, SGC

Los minerales secundarios de uranio se caracterizan por su color amarillo, anaranjado y verde brillantes. Se hallan en masas terrosas o en polvo, como grupos de cristales muy pequeños, o como placas aplanadas. Se presentan en casi todos los tipos de rocas y pueden o no hallarse asociados a los minerales primarios. A continuación se exponen los principales minerales secundarios, que sin excepción contienen porcentajes de uranio más bajos que la pechblenda:

- **Carnotita.** Presenta color amarillo brillante a amarillo verdusco. Tiene una dureza de 2, y una densidad de 4.20 g/cm<sup>3</sup>. Durante muchos años, este mineral ha tenido importancia comercial en Estados Unidos como fuente de vanadio, radio y uranio. Se ha hallado principalmente en la planicie del Colorado, donde forma masas blandas terrosas, o en polvo.
- **Tiuyamunita.** Este mineral tiene gran relación con la carnotita y se halla asociado a esta; y posee casi sus mismas características y propiedades.
- **Autunita.** Mineral de color amarillo limón brillante, blando. Tiene un hábito tabular y se presenta en cristales aislados o agrupados. Presenta exfoliación perfecta, micácea, dureza de 2 a 2.5, densidad de 3.1 a 3.2. Es fluorescente cuando se lo expone a la luz ultravioleta; toma entonces un color amarillo brillante o verde manzana.
- **Metatorbernitita y torbernitita.** Tienen un color verde brillante y se presentan en cristales transparentes cuadrados. La exfoliación es perfecta, micácea. No son fluorescentes, su dureza está entre 2 y 2.5, y su densidad es de 3. Estos minerales solo pueden distinguirse entre sí por ensayos de laboratorio.

Existen otros minerales secundarios, pero no son muy comunes; generalmente, se encuentran asociados a los anteriormente expuestos.

## 2.2. Tipo de depósito

Se describe aquí muy brevemente la presencia del uranio en las diferentes etapas de la diferenciación magmática,

que explican la formación de los diferentes depósitos de uranio.

En la clasificación de los depósitos se sigue la descripción de algunos modelos de depósitos presentados en BC Mineral Deposit Profiles (Cox y Singer, 2002).

La concentración media del uranio en la corteza terrestre es 2 ppm, que aumenta a 4 ppm en las rocas graníticas, y disminuye a 0.5 ppm en rocas basálticas. La razón de estas concentraciones estriba en que el uranio, que es un elemento litófilo, se origina en magmas en los que es esencialmente tetravalente. Debido a su gran radio iónico ( $U^{+4} = 0.93 \text{ \AA}$ ), difícilmente forma minerales independientes al iniciarse la diferenciación magmática, ya que el tamaño grande de los iones no permite que estos entren en la red cristalina de los principales minerales de la roca y solo se acomodan en oclusiones menores o forman películas sobre los minerales, o entran en la red de minerales accesorios.

Al avanzar la diferenciación magmática, los iones de uranio se concentran y forman diferenciados magmáticos tardíos, a partir de lo cual forman sus propios minerales que se depositan en pegmatitas y venas en donde se asocia comúnmente al hierro y, en algunos lugares, al cobre, plomo, zinc, molibdeno y cobalto (Angulo, 1978). El contenido de uranio en las rocas ígneas se explica por el proceso anterior. La tabla 3 muestra dicho contenido en ppm en diferentes rocas.

**Tabla 3.** Contenido de uranio en rocas ígneas

Tipo de roca	ppm	Rango (ppm)
Dunitas	0.02	0.003-0.05
Eclogitas	0.2	0.013-0.80
Piroxenitas	0.7	—
Gabro	0.9	0.2-3.4
Diorita	2	0.5-11.5
Granito	4	2.2-21
Intrusitos alcalinos	—	0.04-140

Fuente: De Voto (1978)

En la tabla 4 se relacionan las características de los principales depósitos de uranio a nivel mundial.

**Tabla 4.** Principales depósitos "tipo" de uranio y sus elementos asociados

Tipo de roca y depósito	Roca huésped- edad	Mineralogía - % U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Elemento asociado	Forma	Ejemplos relevantes
Conglomerado	Conglomerados, gravas cuarcíticas- Arqueozoico	Uraninita, uranotorita, branerita, Pirita, monazita (0.01-0.2)	Th, Ti, Au, tierras raras, Zr, C, platinoides	Tabular	Witwatersrand (Sudáfrica)
	Proterozoico Temprano a tardío				Jacobina (Brasil) Blind River + Elliot Lake (Canadá)
Arenisca	Arenisca fluvial, cuarzosa y arcósica (Paleozoico Superior a Terciario)	Pechblenda, coffinita, carnosita, pirita, marcasita (0.1 a 0.4)	Cu, V, Se, Mo, C,	Tabular, "roll"	Colorado Plateau (EE. UU.) Arlit (Nigeria)
Disconformidad	Basamento y metasedimentos (Proterozoico)	Pechblenda, coffinita, pirita, calcopirita, Ni-Co arseniuros, hematita, clorita (0.4 a > 2.0)	Ni, Co, Ag, Mo, Cu, Pb, Zn, Bi, Se, As, Au	Filoniano	Athabasca (Canadá), Alligator River (Australia)
Filoniano (Clásico)	Granitos, <i>gneis</i> , piroclastos consolidados,	Pechblenda, coffinita, sulfuros y arseniuros, hematita, carbonatos (0.1 a 1.0)	Cu, Co, Ni, Bi, As, Ag,	Filoniano	Jáchimov (R. Checa), Marysvale (EE.UU.), Massif Central (Francia)
	Metasedimentos (Proterozoico a Terciario)		Au, Se, Mo		
Ultrametamórfico	Alaskita, pegmatita, apilita, metasedimentos (Proterozoico)	Uraninita, uranotorita, molibdenita, circón (< 0.1)	Th, Mo, Nb, Ti, tierras raras	Filoniano, diseminado	Rössing (Namibia), Bancroft (Canadá)
Plutones Alcalinos	Plutones y <i>stocks</i> alcalinos, carbonatitas (Proterozoico a Cretáceo)	Uraninita, uranotorita, pirocloro, apatita, circón (0.01 a 0.2)	Th, Nb, tierras raras, Zr, Be, Ti, P	Filoniano, diseminado	Ilimaussaq (Groenlandia), Pozos de Caldas (Brasil)
Contacto	<i>Skarns</i> -N. D.	Pechblenda, coffinita, pirita, marcasita (0.1-0.2)	Th, tierras raras, B, P	Diseminadore- reticulado	Midnite (EE. UU.), Mary Kathleen (Australia)
Vulcanogénico	Complejos hipoabisales, volcánicos y volcanoclásticos (N. D.)	Uraninita, pechblenda, uranotorita, pirita, sulfuros metálicos, fluorita, celestita	Th, Cu, Tierras Raras, Mo, F, Sr	Diseminado filoniano	Rexspar (Canadá), McDermitt (EE. UU.)
Calcreta	Calcreta no pedogénico en drenajes terciarios	Carnotita, yeso (0.3)	V	Tabular	Yeelirrie (Australia), Langer (Namibia)
Fosforita	Fosforita marina y cantos retrabajados	Apatita y carbonatos uraníferos (0.01 a 0.02)	—	Estratificado	Boone Valley (Florida, EE. UU.)
Shales negros	<i>Shale</i> marino (Proterozoico)	< (0.01 a 0.02)	V, Cu, Co, Mo, Ni, Zn	Diseminado Estratificado	Chattanooga Shale (EE. UU.)

Fuente: Misra (2000)

Los minerales accesorios de las rocas ígneas, que contienen uranio, pueden resistir los procesos de oxidación, y por resquebrajamiento de la roca se concentran para formar depósitos detríticos de placeres, que pueden constituir depósitos de uranio.

El uranio que en los inicios del proceso de diferenciación magmática forma películas sobre los minerales de las rocas, y que se concentra en pegmatitas y venas en los procesos tardíos de la diferenciación, es fácilmente oxidado y pasa a ser uranio hexavalente, que es soluble en agua. De esta forma es llevado a las aguas superficiales y subterráneas, de donde puede ser absorbido por minerales arcillosos y por materia orgánica, y en parte precipitado químicamente o por evaporación. De esta forma se pueden formar los depósitos de uranio en rocas clásticas (arenisca). Si las

aguas con uranio disuelto llegan al mar, puede precipitarse con sedimentos fosfáticos o ser captado por organismos o absorbido por material carbonoso.

Los procesos así esquematizados dan origen a los diferentes tipos de depósitos de uranio, que pueden clasificarse en dos tipos principales:

- Depósitos en rocas sedimentarias
- Depósitos magmáticos

#### 2.2.1. Yacimientos en rocas sedimentarias

Los depósitos en rocas sedimentarias se suelen dividir en depósitos peneconcordantes en areniscas, depósitos en conglomerados de cuarzo, depósitos en rocas fosfáticas y depósitos en *shales* negros marinos. A continuación se

describen algunos modelos de depósitos a partir de la clasificación *BC Mineral Deposit Profiles* (Cox y Singer, 2002).

#### 2.2.1.1. Depósitos en conglomerados cuarzosos (paleoplaceres)

Ambiente de depositación: los conglomerados huéspedes se forman en condiciones de deficiencia de oxígeno en sistemas de canales mayores, generalmente de edad Proterozoico Temprano, en zonas de distensión de la corteza (*rifting*).

- Roca huésped: conglomerados cuarzosos y cuarzoarenitas.
- Edad principal de la roca huésped: Proterozoico Temprano.
- Edad de la mineralización: concentración en placeres, 2250 Ma; modificaciones diagenéticas, 1850 Ma.
- Mineralogía de la mena: placer (uraninita, monadita, zircón autógeno, brannerita, coffinita).
- Elementos asociados: torio, itrio.
- Alteración: concentraciones posplaceres de minerales de bajo grado de metamorfismo, con cuarzo, clorita, moscovita y piritita.
- Probable fuente del uranio: granitos.
- Soluciones mineralizantes: aguas termales que arrastran minerales detríticos productivos de uranio bajo condiciones deficientes de oxígeno.
- Relaciones tectónicas: la roca huésped se desarrolla en cuencas intracratónicas.

#### 2.2.1.2. Depósitos en rocas fosfóricas

Ambiente tectónico-estratigráfico: en plataformas relativamente estables, los depósitos de fosfatos se depositan en cuencas adyacentes a zonas levantadas que causan flujos turbulentos de aguas mezcladas frescas, ricas en nutrientes. Posteriormente el fosfato y el uranio precipitados del agua de mar son removidos, enriquecidos y concentrados.

Roca huésped: peles fosfáticos en dolomitas, arcillas y sedimentos siliclásticos.

Edad de las rocas huéspedes: Mioceno, algunos fosfatos retrabajados en sedimentos del Plioceno y Pleistoceno.

Edad de la mineralización: Mioceno, retrabajados y alterados en el Plioceno, Pleistoceno y Holoceno. Movilización de fosfatos y uranio hacia la base de las zonas alteradas, lo que ocasiona enriquecimiento al 40 % de  $P_2O_5$  y 0.05 % de  $U_3O_8$ .

Mineralogía de la mena: francolita (carbonato fluorapatito), grandalita, milisita, wavelita y livianita en zonas de alteración.

Elemento asociado: fósforo.

Probable origen del uranio: agua de mar.

Soluciones mineralizantes: agua de mar, enriquecimiento supergénico tardío por aguas subterráneas ácidas.

Relaciones tectónicas: llanuras costeras levantadas en el Oligoceno Tardío que continuaron hasta el Plioceno; varias transgresiones y regresiones conexas con la plataforma marginal pasiva, relativamente estable durante el tiempo de depósito.

#### 2.2.2. Yacimientos en rocas ígneas o depósitos magmáticos

A continuación se describen los más importantes, siguiendo la clasificación de *BC Mineral Deposit Profiles* (Cox y Singer, 2002)

##### 2.2.2.1. Venas clásicas de uranio (Mc Millan, 1996)

Sinónimos: venas de pechblenda, venas de uranio, venas intragraníticas, venas perigraníticas.

Productos (biproducidos): U (Bi, Co, Ni, As, Ag, Cu, Mo).

Ejemplos: en Columbia Británica (Canadá), en el área de Atlin, en venas de presión de scheelita con control estructural en ocurrencias de Purple Rose, Fisher, Dixie e IRA:

- En Canada/Internacional: Ace Fay-Verna and Gunnar, Beaverlodge area (Saskatchewan, Canadá)
- Christopher Island-Kazan-Angikuni district Baker Lake area (Northwest Territories, Canadá)
- Millet Brook (Nova Scotia, Canadá)
- Schwartzwald (Colorado, EE. UU.)
- Xiazhuang district (China)
- La Crouzille area, Massif Central and Vendee district, Armorican Massif (Francia)
- Jachymov and Příbram districts (República Checa)
- Shinkolobwe (Shaba province, Zaire)

Descripción: pechblenda (Th-uraninita pobre), brannerita con cantidades menores de minerales metálicos asociados a un carbonato y cuarzo en venas como ganga. Estos depósitos muestran afinidad con los depósitos de “cinco elementos en venas” (Cox y Singer, 2002), que tienen contenidos significativos de plata nativa, arseniuros de Co-Ni, y Bi u otros minerales metálicos.

Ambiente tectónico: ambiente continental posorogénico, generalmente asociado a rocas plutónicas y volcánicas, calcoalcalinas félsicas. Capas rojas (*red beds*) y sedimentos de cuencas de extensión son comunes como rocas de caja. Los depósitos económicos aparecen confinados en áreas subyacentes por rocas de basamento del Proterozoico.

Ambiente de depositación: los minerales se depositan en espacios abiertos en zonas fracturadas, brechas y *stoc-kworks*, comúnmente asociados a sistemas de fallas principales o secundarias de alto ángulo.

Edad de las mineralizaciones: Proterozoico a Terciario.

Roca huésped/tipo de rocas asociadas: una amplia variedad de rocas de caja, incluidos granitos, comúnmente granitos peraluminosos con dos micas y sienitas; rocas volcánicas félsicas, rocas sedimentarias antiguas y rocas metamórficas. Las venas ricas en uranio tienden a tener gran afinidad con las rocas ígneas félsicas. Algunas venas están cerradamente asociadas a diabasas, con diques y silos de lamprófidos.

Formas del depósito: los cuerpos mineralizados pueden ser tabulares o prismáticos, con espesores variables entre centímetros y unos pocos metros (raramente alcanzan 15 m). Muchos depósitos tienen un límite potencial de profundidad de unos pocos cientos de metros; sin embargo, muchos depósitos se extienden desde 0.7 a 2 km de profundidad. En algunos depósitos se pueden encontrar mineralizaciones diseminadas en zonas de alteración.

Textura/estructura: formas como drusas, costras con formas de cintas, texturas coloidales, botroidales y dendríticas son comunes en los depósitos que no han sufrido deformaciones y altas tensiones. Las venas rellenan en general zonas de fracturas secundarias asociadas a fallas mayores y zonas de compresión. En la minas de Ace-Fay-Verna se encuentran asociadas a la falla de San Luis (Canadá), donde son muy comunes las milonitas.

Mineralogía de la mena: principales y subordinados, como principales pechblenda (th-uraninita pobre) y coffinita; como subordinados: urofane, tucolita, brannerita, sulfuros de hierro, plata nativa, arseniuros y sulfoarseniuros de Co-Ni, seleniuros, telúricos, vanadatos, jordesita, calcopirita, galena, esfalerita, oro nativo y elementos del grupo del platino. Algunos depósitos tienen una mineralogía "simple", con pechblenda y coffinita solamente. Estas venas de mineralogía simple se han interpretado como minerales formados con otros minerales en estados tardíos o tempranos.

Minerales de ganga: carbonatos (calcita, dolomita), cuarzo (a menudo calcedonia) y hematita como principales, y feldespatos potásico, albita, moscovita, fluorita y barita como subordinados.

Alteración: cloritización, hematización y feldespatización. Unos pocos depósitos con rocas intrusivas como huéspedes están rodeados por rocas desilicatadas, porosas con feldespatos y mica, denominadas *episienitas* en el área de La Crouzille, en Francia, y *roca esponja* en la mina de

Gumar, en Saskatchewan (Canadá). En la mayoría de los casos, la hematización se debe a la oxidación de minerales ferrosos sometidos a presión en las paredes de las venas durante las etapas de mineralización. La hematina de color ladrillo adyacente a algunos minerales de uranio de alto grado es probablemente debida a la pérdida de electrones durante la desintegración radiactiva del uranio, y es derivada de este proceso.

Meteorización: el uranio, en el estado de valencia +6, es muy soluble por encima del nivel freático. Puede reprecipitarse como uraninita y coffinita, por debajo del nivel freático en el estado de valencia +4, en presencia de agentes reductores, como material húmico o restos carbonosos. Algunos fosfatos, vanadatos, sulfatos, silicatos y arsenatos de uranio son semiestables en condiciones de oxidación; en consecuencia, autunita, torbernita, carnosita, zipeita, urofano, uranospinita y otros minerales secundarios pueden encontrarse en la zona de oxidación, sobre todo en ambientes áridos.

Controles del mineral: en las áreas de sistemas de fallas mayores y zonas de compresión, las zonas de distensión constituyen un importante control de las mineralizaciones.

Una zona de óxido-reducción, debida a la pérdida de electrones, asociada a la alteración de la hematita y precipitación de uranio, es evidentemente un control del mineral, pero no se ha comprendido completamente.

Muchos depósitos están asociados a zonas de discordancias continentales y tienen afinidad con los depósitos de *unconformity-associated U deposit, I16* (Cox y Singer, 2002).

Modelos genéticos: las venas de uranio se encuentran en áreas de depósitos de uranio asociados a alta fracturación. Generalmente, existe otro tipo de depósito de uranio en las vecindades. Las venas pueden ser consideradas poligenéticas. El uranio aparece como derivado de una diferenciación magmática tardía de granitos y rocas alcalinas con altos contenidos de potasio o sodio. El uranio puede ser entonces separado de la roca madre por soluciones acuosas que pueden tener cualquier origen, como aguas hidrotermales de baja temperatura, aguas connotas o meteóricas. Las opiniones, en cuanto al origen de los fluidos, están muy divididas; algunos autores prefieren modelos que incorporen mezclas de fluidos.

Estudios de isótopos de carbono y de oxígeno indican que las soluciones mineralizantes en muchos casos son fluidos hidrotermales que se han mezclado con aguas meteóricas. En algunos casos se han alcanzado temperaturas que exceden los 400 °C durante la mineralización. Los minerales de uranio son precipitados dentro de fallas

a alguna distancia de la fuente de los fluidos. Las paredes de las rocas de caja contienen material carbonáceo, sulfuros y minerales ferromagnesianos que son sitios favorables para la precipitación del mineral. Dataciones radiométricas indican que la mineralización es significativamente más joven que las rocas ígneas félsicas asociadas, y comúnmente asociadas a la edad de los diques de diabasa y de lamprófidos.

Depósitos asociados: yacimientos de uranio en estratos confinados, en diseminaciones y en pegmatitas se encuentran comúnmente en rocas metamórficas antiguas. Depósitos de U en arenas-huéspedes (Cox y Singer, 2002) se encuentran generalmente asociadas con estratos de “capas rojas” subcorticales y depósitos superficiales (Cox y Singer, 2002), en ambientes áridos o semiáridos.

Geoquímica: el uranio, y algunas veces uno o todos de los siguientes elementos, Ni, Co, Cu, Mo, Bi, As, y Ag, son buenos indicadores que pueden utilizarse en la prospección con base en muestras de sedimentos activos, sedimentos lacustres y suelos. Muestras de aguas de corrientes y fondos de lagos se pueden analizar para U y Ra. Los gases inertes como He y Rn a menudo pueden ser detectados relacionados con fuentes ricas de uranio en la prospección de suelos, así como en aguas subterráneas y corrientes.

Geofísica: técnicas comunes de prospección usando rayos gamma, escintilómetros y espectrómetros para detectar mineralizaciones *in situ* o en depósitos glaciares, taludes y otros depósitos detríticos son métodos muy efectivos en la prospección. Dado que la mayoría de los depósitos no contiene más que un mínimo porcentaje de minerales metálicos, la prospección con electromagnetismo y polarización inducida no es muy indicada como método de prospección. En la exploración de venas pueden ser utilizados métodos magnéticos para detectar áreas en donde la magnetita ha sido alterada a hematita en las paredes de las rocas de caja.

Otras guías exploratorias: los minerales secundarios de uranio son típicamente amarillos y se utilizan como indicadores de superficie.

Concentraciones y tonelaje: los depósitos individuales son generalmente pequeños (< 100 000 t), con concentraciones de 0.15 a 0.25 % de U. Sin embargo, distritos que presentan varios depósitos pueden agregar considerable tonelaje. El gran sistema Ace-Fay-Verna (Canadá) produce 9 Mt/año de mineral con un porcentaje de 0.21 % de U en numerosos cuerpos mineralizados a lo largo de 4.5 km y a profundidades de 1500 m. Gunnar (Canadá) produce 5 Mt/año de mineral, con porcentajes de 0.15 % de U en un simple cuerpo mineralizado.

Limitaciones económicas: el descubrimiento, a finales de la década de los sesenta, de depósitos de alto grado del tipo discordante hizo que los depósitos de venas con espesores reducidos y concentraciones entre 0.15 y 0.25 % de U resultaran antieconómicos.

Importancia: este tipo de depósito constituyó la principal fuente de uranio hasta 1950. Para 1988, la producción significativa en depósitos de venas se restringió a Francia, con una producción de 3372 toneladas de uranio o el 9.2 % de la producción mundial de ese año.

#### 2.2.2.2. Discordancias asociadas a uranio

(Mc Millan, 1996)

Sinónimos: venas discordantes, uranio tipo discordancia, discordancia U.

Producto (biproducción): U (Au, Ni).

Ejemplos:

- En el distrito de uranio de Atabasca (Saskatchewan, Canadá): Rabbit Lake, Key Lake, Cluj Lake, Midwest Lake, McArthurRiver, Cigar Lake y Maurice Bay.
- En el distrito de Thelon Basin (territorios del noroeste, Canadá): Lone Gull (Kiggavik) y Boomerang Lake.
- En el distrito de Alligator River (territorio norteño de Australia): Jabiluka, Pager, Koongarra y Nabarlek.

Descripción: los minerales de uranio, generalmente pechblenda y coffinita, aparecen rellenando fracturas y brechas, y diseminados en zonas de formas elongadas, prismáticas o tabulares, alojadas en rocas sedimentarias o metasedimentarias asociadas a una gran discordancia continental.

Ambiente tectónico: cuencas sedimentarias intracraónicas.

Localización geológica/ambiente de depósito: estructuralmente, zonas propicias y porosas con condiciones químicas de reducción favorables o cualquier otro estrato reactivo.

Edad de la mineralización: Proterozoico Medio; sin embargo, hay posibilidad de depósitos más jóvenes.

Huésped/tipo de roca asociada: rocas de facies metasedimentarias (anfíbolita o granulita) de edad Paleozoico Temprano (rocas gráficas o metapelitas ricas en sulfuros, rocas calcisilicatadas y metasamitas), regolitos y areniscas superpuestas continentales del Proterozoico Medio. Las rocas de caja o huéspedes del Proterozoico Temprano en muchos casos son de metamorfismo retrógrado de facies anfíbolitas, localizadas en los flancos de domos néisicos arqueanos. Las areniscas superpuestas continentales son

samitas fluviales bien calibradas, ricas en cuarzo, generalmente con una matriz arcillosa o silícea y de color rojo o rojo pálido. Diques y láminas, comúnmente diabasas y lamprófidos, aparecen en ciertos distritos.

Formas del depósito: los cuerpos mineralizados pueden tener formas tabulares, de lápices o irregulares con longitudes de hasta unos pocos kilómetros. Muchos depósitos tienen un límite potencial en profundidad por debajo de la discordancia, o más o menos 100 metros; sin embargo, los depósitos de Jabiluka y Eagle Point (Australia) son concordantes dentro de las rocas del Proterozoico Inferior y se extienden por varios cientos de metros debajo de la discordancia.

Textura/estructura: la mayoría de los depósitos llenan espacios porosos o vacíos en brechas y venas de *stockworks*. Algunos depósitos de Saskatchewan (Canadá) son excepcionalmente ricos, con áreas masivas de pechblenda/coffinita. Características tales como texturas en drusas, bandas de crustificación, estructuras coloidales, botroidales y texturas detríticas se presentan en varios depósitos.

Mineralogía de la mena: pechblenda (Th-uraninita pobre), coffinita, uranofana, tucolita, brannerita y sulfuros de hierro como minerales principales, y entre los subordinados, oro nativo, arseniuros y sulfoarseniuros de Co-Ni, seleniuros, teleniuros, jodesita (molibdenita amorfa), vanadatos, calcopirita, galena, esfalerita y plata nativa. Algunos depósitos son “simples”, pues solo contienen pechblenda y coffinita, mientras que otros son “complejos” y contienen arseniuros de Co-Ni y otros minerales metálicos.

Minerales de ganga: carbonatos (calcita, dolomita, magnesita y siderita), calcedonia, cuarzo, sericita (illita), clorita y dravita (turmalina).

Alteración: cloritización, hematización, caolinización, ilitización y silificación. En la mayoría de los casos, la hematización se debe a la oxidación de minerales ferrosos de compresión en las paredes de las rocas, causadas por oxidación de los fluidos mineralizados; sin embargo, la hematita de color rojo ladrillo adyacente a algunas menas de alto grado de uranio se debe probablemente a la pérdida de electrones durante la desintegración radiactiva del U y es un producto derivado de este proceso. Un aspecto interesante de la zona de alteración de arcillas es la presencia de minerales pseudomorfo de alto grado de metamorfismo, como cordierita y granate en las paredes de las rocas del basamento.

Meteorización: el uranio en el estado de valencia +6 es muy soluble por encima del nivel freático. Puede reprecipitarse como uraninita y coffinita, por debajo del nivel freático en el estado de valencia +4, en presencia de agen-

tes reductores, como material húmico o restos carbonosos. Algunos fosfatos, vanadatos, sulfatos, silicatos y arsenatos de uranio son semiestables en condiciones de oxidación; en consecuencia, autunita, torbernita, carnosita, zipeita, urofano, uranospinita y muchos otros minerales secundarios pueden encontrarse en la zona de oxidación cerca de superficie en ambientes áridos.

Control de la mena: hay un control importante relacionado con la discordancia del Proterozoico Medio y un control relacionado con un horizonte estratigráfico favorable en el Proterozoico Bajo de la roca de caja. Este estrato es generalmente grafitico. Zonas de falla locales y regionales que cortan la discordancia pueden ser características importantes.

Modelo genético: el excepcional grado de riqueza que caracteriza este tipo de depósito apunta hacia un origen complejo y probablemente poligenético.

- Algunas formas de concentración muy tardía de uranio en las rocas del basamento arqueano parecen tener gran importancia.
- Las rocas huéspedes o de caja son generalmente del Proterozoico Inferior y corresponden a rocas metamórficas derivadas de sedimentos de cuencas marginales y de facies cercanas a la playa, que han podido concentrar U por procesos singenéticos y diagenéticos
- A pesar de que el comportamiento del U en condiciones de metamorfismo y ultrametamorfismo se conoce poco, es posible que el uranio haya sido movilizado de los domos néisicos y granitos anatéticos próximos del arqueano y precipitados en pegmatitas en depósitos estrato-confinados, como uraninita soluble no refractaria.
- Un enriquecimiento supergénico en paleoregolitos, que están por debajo de la discordancia, puede haber contribuido también en los procesos de concentración del uranio.
- Las areniscas fluviales ricas en cuarzo superpuestas descritas en las rocas de caja han sufrido pequeñas deformaciones, pero han sido afectadas por fallas normales e inversas que probablemente han reactivado las fallas del basamento. En Saskatchewan (Canadá), estas fallas contienen el mineral en varios depósitos, y en otras parecen haber facilitado el transporte de uranio hacia las arenas superpuestas o de recubrimiento.
- Concentraciones hidrotermales diagenéticas de uranio, por mezcla de fluidos oxidantes de la cuenca y reductores del basamento, parecen dar como resultado excepcionales concentraciones de uranio y níquel. Es

posible que el calor radiogénico desarrollado en depósitos excepcionalmente ricos haya sido el causante de la formación de los fluidos calientes y de la removilización de los metales hacia la parte superior del depósito.

- Diques de diabasa aparecen asociados a fallas cerca de varios depósitos; investigaciones recientes sugieren que estos diques pueden haber proporcionado la energía térmica para removilizar y llevar hacia arriba concentraciones de alto grado de uranio. Datos recientes de los diques de Mackenzie en el distrito de Atabasca (Canadá) apoyan esta interpretación.

Tipos de depósitos asociados: depósitos tipo areniscas-huéspedes de U (*Sandstone-hosted U deposit*) (Cox y Singer, 2002) se han encontrado en asociación con arenitas supracorticales ricas en cuarzo. Depósitos diseminados estratoconfinados o *skarn*, como los de Duddridge Lake y Burbidge Lake (Saskatchewan), y en pegmatitas se presentan comúnmente en las rocas metamórficas del basamento. En ambientes áridos o semiáridos, los depósitos superficiales pueden estar presentes en estratos superiores o de sobrecarga. Los depósitos tienen afinidad con los depósitos clásicos de venas de U de (Cox y Singer, 2002).

Geoquímica: uranio, níquel, coalto, arsénico, plomo y cobre U, Ni, Co, As, Pb y Cu son buenos elementos trazas que pueden ser utilizados en la prospección con base en muestras de sedimentos activos, sedimentos de fondo en lagos y suelos. Muestras de aguas de corrientes y de lagos se pueden analizar para uranio y radio. En gases inertes de helio y radio pueden ser detectados sobre fuentes ricas en uranio en exploración de suelos y gases en el suelo, como también en aguas subterráneas y corrientes. En Saskatchewan se han probado técnicas litogeoquímicas en las cuarcas-arenitas del grupo Athabasca por varios cientos de metros directamente sobre el depósito, y en depósitos de cantos glaciares dispersos, localizados bajo el hielo. La técnica incluye boro (dravita) y anomalías bajas de uranio, así como de potasio y magnesio en minerales arcillosos de alteración (illita y clorita).

Geofísica: durante las primeras fases de exploración de la cuenca de Atabasca, exploraciones radiométricas aerotransportadas y terrestres detectaron cerca de la superficie depósitos de uranio y su dispersión por glaciares. Actualmente, la prospección magnética de penetración profunda, terrestre y aerotransportada, se ha utilizado para la elaboración de mapas de arcillolitas grafitosas asociadas a la mayoría de los depósitos. El espectro completo de técnicas modernas (gravimetría, magnetismo, magneto-telúrico, electromagne-

tismo, polarización inducida, resistividad) pueden utilizarse para cartografiar varios aspectos de estructuras, así como rocas huéspedes o de caja y conjuntos de minerales de alteración en la búsqueda de indicios profundos.

Otras guías de exploración: técnicas comunes de prospección usando rayos gamma o escintilómetros para detectar mineralizaciones directamente en las rocas o en sedimentos de corrientes, en depósitos glaciares, taludes y otros depósitos detríticos provenientes de mineralizaciones de uranio, siguen siendo los métodos más efectivos en la prospección.

Concentraciones y tonelaje: los depósitos individuales son generalmente pequeños, pero pueden exceder, en yacimientos de alto grado, varias veces los porcentajes de uranio normales. El tamaño medio para los depósitos de Saskatchewan y Australia es 260 000 t, con concentraciones de 0.42 % de U. Algunos depósitos tienen grados excepcionalmente altos, tales como el de Key Lake Gaertner-Deilmann (2.5 mt y 2.3 % de U), Cigar Lake (900 000 t y 12.2 % de U) y Mc Arthur River (1.4 mt y 12.7 % de U).

Limitaciones económicas: hasta la última parte de la década de los años ochenta, el promedio de concentración en los minerales se elevaba o excedía el 0.25 % de U. Problemas relacionados con la penetración de las rocas arcillosas alteradas de las paredes y presencia de gas radón y otros elementos peligrosos asociados con algunos depósitos de alto grado de uranio de Saskatchewan han hecho excepcionalmente altos los costos de extracción en algunos casos.

### 2.3. Métodos de prospección

Los trabajos deben realizarse siguiendo estas etapas: reconocimiento, prospección, exploración general y exploración detallada (UN, 2001).

En la etapa de reconocimiento, las áreas con potencial de mineralización se identifican con base en los resultados de los estudios geológicos regionales, la inspección preliminar de campo y otros trabajos regionales, como, por ejemplo, estudios aerogeofísicos, en especial mediante el empleo de métodos gamma-espectrométricos.

La prospección se realiza con el propósito de identificar el depósito que será el posible blanco para la exploración, mediante trabajos de cartografía geológica, muestreo geoquímico y trabajos geofísicos por medio de métodos radiométricos y magnéticos, preferentemente.

La exploración general permite la delineación inicial de los depósitos. Los métodos utilizados incluyen trabajos de cartografía geológica detallada, estudios estratigráficos, muestreo superficial, trabajos geofísicos complementarios

que pueden incluir métodos radiométricos, magnéticos y geoelectrónicos, así como la realización de apiques y algunas perforaciones que permitan delimitar más exactamente el área de interés.

La exploración detallada permite la delineación tridimensional minuciosa de los depósitos mediante el muestreo de afloramientos, apiques, túneles y núcleos de perforaciones.

En general, la prospección del uranio es poco diferente a la de otros minerales, si se exceptúa la utilización de algunos instrumentos especializados en la detección de especies radiactivas. Los siguientes son algunos de los equipos especiales utilizados:

**Contador Geiger.** Es el instrumento más práctico inventado hasta la fecha para descubrir materiales radiactivos

en el campo. Es generalmente llamado *contador de centelleo*. Estos instrumentos registran pulsaciones aun cuando no estén cerca de minerales uraníferos u otros materiales radiactivos. A estas pulsaciones se les designa *cuenta de fondo*. Son producidas por rayos cósmicos y, parcialmente, por pequeñas cantidades de elementos radiactivos presentes en casi todo cuanto existe sobre la Tierra. La cuenta de fondo varía de acuerdo con la sensibilidad del contador, así como con la topografía y geología de la región: es más elevada sobre algunas rocas (como granito) que en otras (como basalto y caliza).

El primer contador portátil, el Geiger-Muller, con un peso de 25 kg, fue construido en la Universidad de Columbia Británica en 1932. En 1934 se construyó uno más práctico. Modelos posteriores se utilizaron durante varios años, hasta que fueron reemplazados por centillómetros (figura 3).



**Figura 3.** Centillómetro, spp2 2-NF (izquierda). Gamma espectrómetro GS-512 canales (derecha)

Fotografía: Servicio Geológico Colombiano

**Espectrómetro de rayos gamma.** El primer detector aerotransportado de minerales radiactivos fue propuesto por el geofísico Ridland en 1943. En 1947 se hicieron los primeros ensayos de registros aerotransportados con cámaras de ionización y contadores Geiger. La primera patente para un espectrómetro de rayos gamma portátil fue registrada bajo la firma de Roulston & Brownell de la Universidad de Manitoba en 1949.

El espectrómetro de rayos gamma es actualmente la primera técnica de prospección de uranio aplicada mun-

dialmente para el levantamiento de mapas geológicos, exploración mineral y monitoreo ambiental.

La gamma-espectrometría permite establecer la fuente de radiactividad de uranio (U), torio (Th) y potasio (K), así como el conteo total de radiaciones por unidad de tiempo presentes tanto en la atmósfera como en las rocas.

Según el tipo de depósito, se emplean las siguientes técnicas de exploración:

**Geoquímica.** Uranio, níquel, cobalto, cobre, molibdeno, bismuto, arsénico y plata son buenos indicadores que se pueden utilizar en la prospección con base en muestras de sedimentos activos, sedimentos lacustres y suelos. Muestras de aguas de corrientes y fondos de lagos se pueden analizar para uranio y radio. Gases inertes como helio y radio pueden ser detectados en relación con fuentes ricas de uranio en la prospección de suelos y gases en suelos, así como en aguas subterráneas y corrientes.

Bolívar (1980), en su informe del Programa Nacional de Evaluación de Recursos Uraníferos de Estados Unidos, describe como principales elementos guías (*pathfinder*) en el reconocimiento geoquímico del uranio el molibdeno, azufre, plomo, arsénico, vanadio, zinc, cobre, níquel, cobalto y torio. Además, propone la utilización de otros elementos, como oro, estaño y tungsteno. Respecto a los elementos de las tierras raras, estos proveen una base conceptual sólida en las investigaciones sobre movilización y génesis de las mineralizaciones asociadas (tabla 5).

**Tabla 5.** Elementos indicadores y exploradores de algunos tipos de depósitos minerales

Asociación de menas	Elemento indicador	Elemento explorador
Uranio en areniscas	U	Se, Mo, V, Rn, He, Cu, Pb
Uranio en vetas	U	Cu, Bi, As, Co, Mo, Ni, Pb, F

Fuente: Griem (2016)

**Geofísica.** Agrupa técnicas comunes de prospección usando rayos gamma, escintilómetros y espectrómetros para detectar mineralizaciones *in situ* o en depósitos glaciares, taludes y otros depósitos detríticos. Métodos magnéticos pueden ser usados para detectar áreas en donde a magnetita ha sido alterada a hematina en las paredes de las rocas de caja en exploración de venas.

## 2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

A continuación se realiza la descripción de los sistemas de explotación y procesamiento del uranio.

### 2.4.1. Sistemas de explotación

Como en otros tipos de minería de rocas duras, en las minas de uranio se utilizan varios métodos, de los cuales los más comunes son los de cielo abierto y la explotación subterránea.

La explotación a cielo abierto se practica en depósitos superficiales donde la cubierta estéril que se superpone al

mineral que se va a explotar (*overburden*) es relativamente delgada o tiene condiciones no favorables para practicar túneles. Es el caso de arenas, cenizas y gravas. La profundidad de la explotación típica es de 120 m. En este tipo de mina, el material estéril superpuesto a la mena se remueve con barrenos o taladros y con explosivos, cuando es necesario, y se retira en volquetas o cualquier otro medio, hasta dejar la mena al descubierto. En general, en el proceso de arranque se utiliza agua para controlar el polvo.

Cuando el mineral no está cerca de superficie, se recurre a la explotación subterránea por medio de túneles y pozos utilizados para accesos y para remover el material. El material de ganga es naturalmente menor que el que se remueve en explotaciones a cielo abierto. La explotación subterránea de minerales de uranio presenta problemas, como la presencia de radón, altamente tóxico.

La explotación subterránea, en principio, no es diferente de la explotación de cualquier otro mineral en rocas duras. Cuando el cuerpo mineralizado se ha identificado, se excava un pozo en las vecindades y luego se practican guías y sobreguías horizontales siguiendo el cuerpo mineralizado. La separación entre las guías varía de 100 a 150 m. Luego se utilizan galerías ascendentes o descendentes (tambores) que unen las guías y sobreguías de forma que el cuerpo mineralizado queda cortado en polígonos llamados *pilares*, limitados por tambores y guías o sobreguías, espacios vacíos denominados *cámaras*. Este proceso se denomina *preparación de la explotación*. Los tambores generalmente siguen la inclinación de la mena o vena mineralizada; en consecuencia, pueden ser verticales o tener otra inclinación.

Luego se utilizan varios métodos para la explotación propiamente dicha, de los cuales el más conocido es el de cámaras y pilares, en el que se va extrayendo el mineral sacando un pilar limitado por dos sobreguías y dos tambores, y dejando el siguiente pilar como soporte del techo de la mina. Este sistema ofrece múltiples alternativas que dependen de la resistencia del techo, medios de los que se dispone, costos de operación, etc. Las diferentes alternativas buscan la mejor y mayor recuperación del mineral de mena. El mineral es arrancado por diferentes métodos (martillos picadores, voladuras, arranque mecánico, etc.), dependiendo de su dureza, ancho de la mena, resistencia de las paredes, etc. El material se transporta en vagonetes manuales o mecanizadas sobre rieles; si hay necesidad, se iza a superficie por medio de *winches*.

Para las minas de uranio, y algunos otros minerales, se utiliza otro método de explotación conocido como *lixiviación de pilas o rimeros*. Residuos de roca estéril generalmente se

producen al levantar las rocas que recubren una mena superficial (*overburden*) o, en la explotación subterránea, al excavar túneles de acceso en roca no mineralizada. Igualmente, se pueden presentar estériles cuando el mineral o mena no tiene la suficiente concentración para su proceso normal o cuando se extrae material de transición entre una vena mineralizada y la pared o roca de caja. Montones o pilas de estos estériles o colas pueden contener elevadas concentraciones de radioisótopos, comparados con una roca normal. Estas pilas de estériles, después del abandono de la explotación, atentan contra la salud de la gente y contra el medio ambiente debido a la liberación de gas radón y la infiltración de aguas que pueden contener materiales radiactivos y tóxicos.

En muchos de estos casos se utiliza la lixiviación de pilas para remover el uranio de muy bajo grado. El líquido para la lixiviación (a menudo ácido sulfúrico) se introduce en el techo de la pila y se percola a lo largo de esta hasta que alcance la base del depósito, donde es recogido y bombeado a una planta de procesamiento. Debido al potencial y al extremo daño causado al medio ambiente con este proceso, su práctica ha desaparecido casi totalmente.

La lixiviación *in situ* (ISL), algunas veces denominada recuperación *in situ* (ISR), se realiza bombeando un líquido (ácido o alcalino de baja concentración, dependiendo de la concentración de calcio en la mena) a través de un pozo de inyección localizado en un extremo del depósito de uranio, el cual es recuperado por otro pozo localizado en el extremo opuesto del depósito. El método ISL se usa igualmente en otros tipos de depósito, como en los de cobre. Este método es rentable debido a que se evitan excavaciones costosas y a que puede implementarse más rápidamente que los métodos tradicionales. Sin embargo, no es deseable para todos los depósitos de uranio, por ejemplo, cuando la roca huésped o de caja es permeable (como es a menudo el caso de las areniscas).

Estudios de impacto ambiental deben llevarse a cabo cuando se va a utilizar el método ISL, debido a que las aguas subterráneas pueden resultar afectadas. La lixiviación *in situ* es el único tipo de minería de uranio que se realizan en los Estados Unidos.

Recuperación de uranio del agua de mar: la concentración de uranio en el agua de mar es baja, aproximadamente de 3.3 mg/m<sup>3</sup> de agua (3.3 ppb). Pero las cantidades de este recurso son gigantescas (4.5 billones de toneladas), y algunos científicos sostienen que este recurso es prácticamente ilimitado con respecto a la demanda mundial. A pesar de que desde la década de los sesenta, en el Reino Unido, Francia, Alemania y Japón se han realizado investigaciones y desarrollado técnicas para recuperar tan bajas concen-

traciones de uranio por medio de absorbentes inorgánicos, como los compuestos de óxido de titanio, esta investigación prácticamente se ha detenido debido a la baja eficiencia del recobro.

En el Takazaki Radiation Chemistry Research Establishment del Japan Energy Research Institute (Jaeri), las investigaciones y desarrollos han culminado en la producción de absorbentes por irradiación de fibras de polímeros. Los absorbentes se han sintetizado para obtener un grupo funcional (*amidoxime group*) que absorbe selectivamente metales pesados. Su desempeño ha sido mejorado. La capacidad de absorción del uranio de las fibras de polímeros absorbentes es alta, aproximadamente diez veces mayor en comparación con el absorbente de óxido de titanio. Para un futuro próximo se planean realizar instalaciones comerciales.

#### 2.4.2. Procesamiento de minerales

El procesamiento de mineral de uranio depende del uso que vaya a dársele. De acuerdo con esta premisa, se considera que el uranio tiene dos usos principales: combustible para reactores nucleares que se utilizan en usos pacíficos y utilización en la industria militar.

##### 2.4.2.1. Procesamiento para usos pacíficos. El ciclo de combustible nuclear

El uranio para usos pacíficos tiene dos propósitos principales: como combustible en reactores nucleares, para producir electricidad y como medio de producir isótopos radiactivos para usos médicos y otras aplicaciones.

El ciclo del combustible nuclear consiste en la secuencia de procesos desde la minería hasta la disposición final de materiales de desecho, generalmente asociados a la producción de electricidad por medio de reactores nucleares. Las etapas o ciclos del proceso son los siguientes:

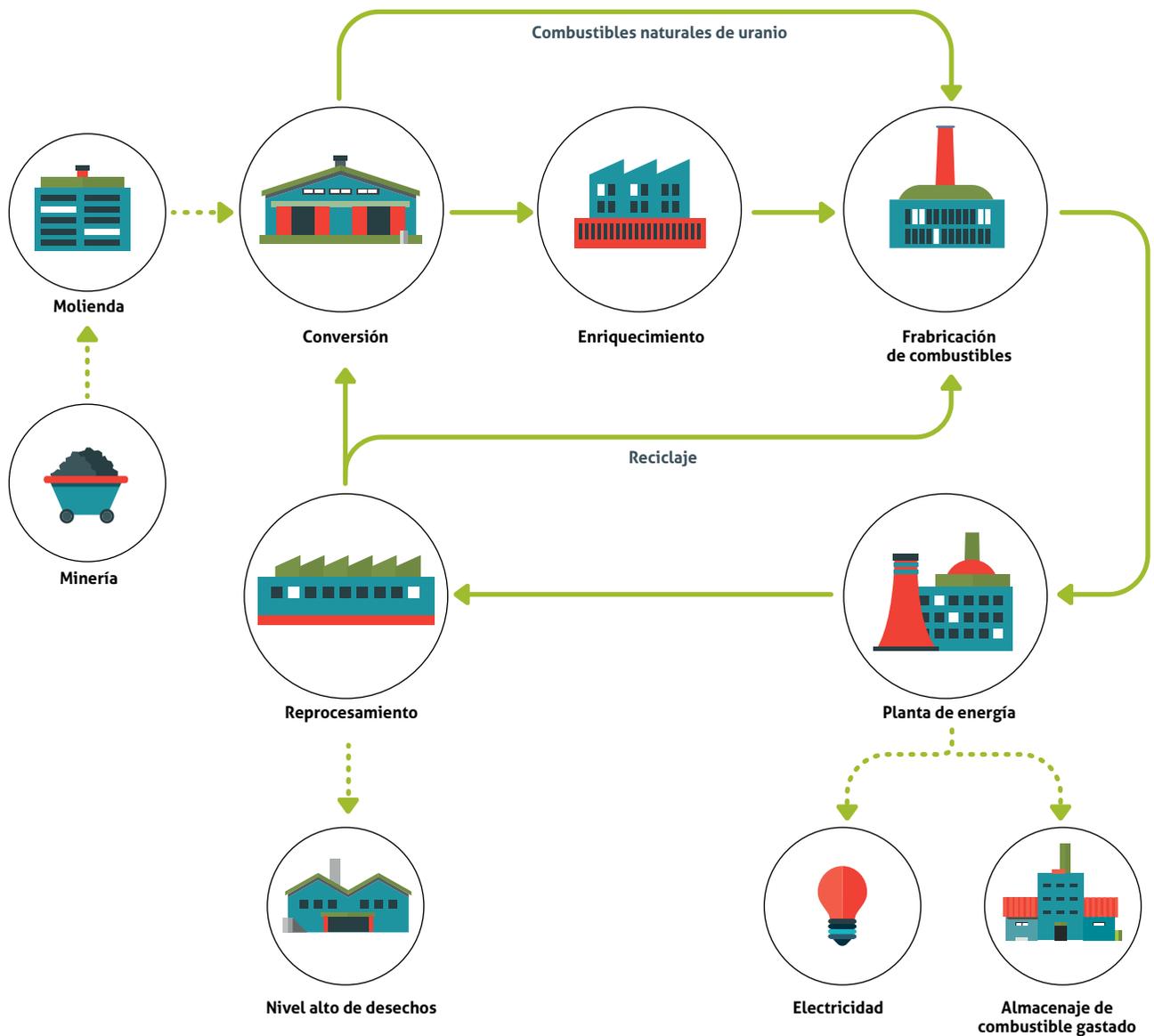
- Minería y molienda de la mena de uranio
- Conversión y enriquecimiento del uranio
- Fabricación del combustible de acuerdo con los requerimientos de los reactores
- Fisión en un reactor para generar energía, o producir radioisótopos para usos médicos, industriales o investigaciones
- Reprocesamiento de los elementos de combustibles usados
- Disposición y almacenaje de residuos

Minería y molienda de la mena de uranio: la minería del uranio se expuso en el aparte anterior (3.4.1 Sistemas

de explotación), en el que se trataron además otros métodos de obtención del uranio. El mineral extraído de la mina es molido para extraer el uranio. Si el mineral es pechblenda, el procedimiento clásico para extraer el uranio consiste en triturar y enriquecer el mineral por flotación. Luego se mezcla con ácidos sulfúrico y nítrico, con lo cual el uranio se disuelve para formar sulfato de uranio ( $UO_2SO_4$ ). El radio y los otros metales se precipitan como sulfatos. Mediante la adición posterior de hidróxido de sodio, el uranio se precipita como diuranato de sodio ( $Na_2U_2O_7 \cdot 6H_2O$ ), conocido como *óxido amarillo de uranio*,

un polvo amarillo brillante que también suele llamarse *torta amarilla*. Esta torta se seca y calienta para obtener un polvo fino blanco que contiene más del 98 % de  $U_3O_8$ , que es empacado en barriles de 205 litros.

Cuando el mineral es la carnosita, se tritura finamente y se trata con una solución caliente de sosa cáustica y potasa para disolver el uranio, el radio y el vanadio, que luego se separan. El uranio extraído se purifica por diversos métodos, principalmente por formación de haluros u óxidos que se reducen con magnesio, calcio, aluminio o carbón a altas temperaturas (figura 4).

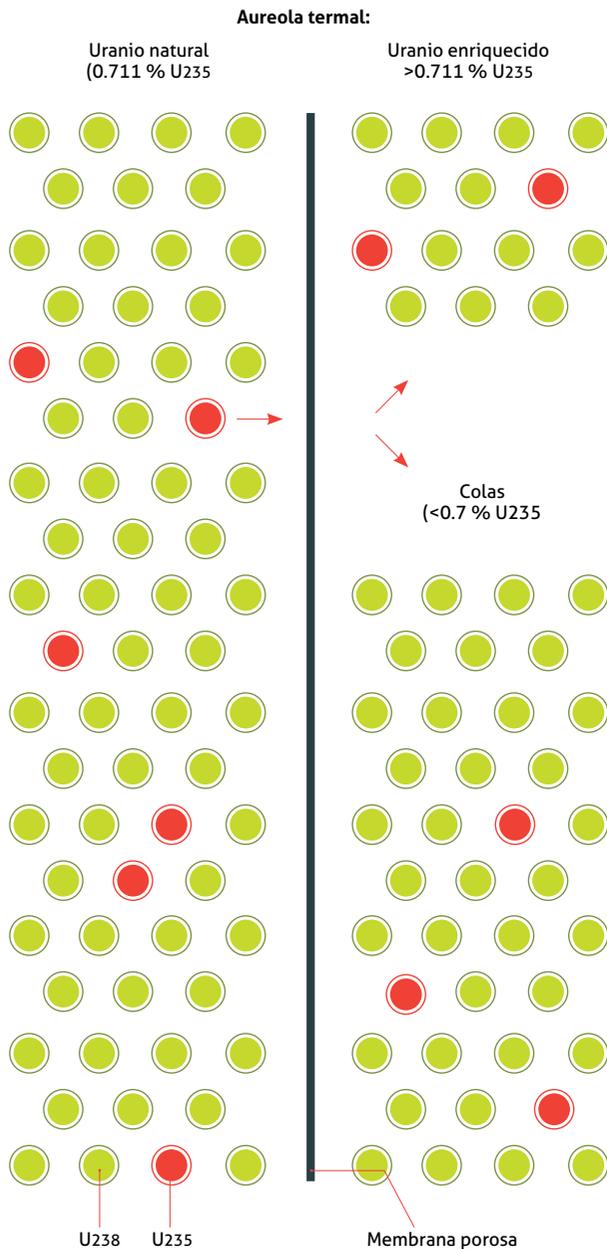


**Figura 4.** Esquema del ciclo del combustible nuclear.

Fuente: Department of the Prime Minister and Cabinet, Uranium Mining (2006)

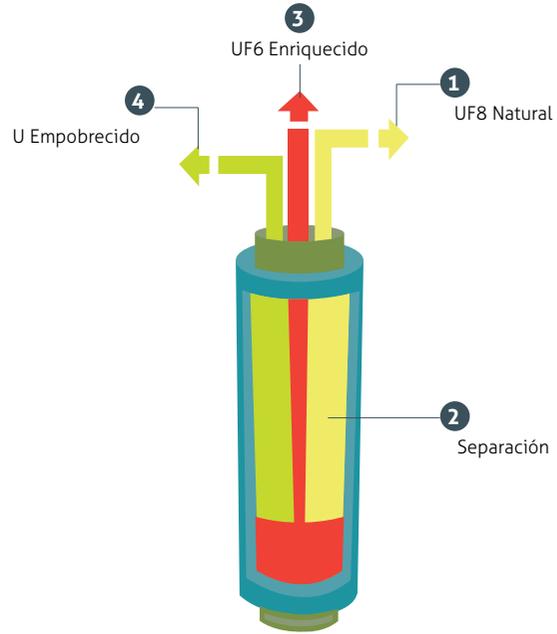
El metal también puede ser producido por electrólisis de  $KUF_5$  o  $UF_4$ , disuelto en mezcla fundida de  $CaCl_2$  y  $NaCl$ .

Estos métodos clásicos de extraer el uranio desde sus minerales han sido reemplazados en la práctica actual por procedimientos como la difusión gaseosa (figura 5), utilizada actualmente en los Estados Unidos; la centrifugación (figura 6), en la cual el hexafluoruro de uranio gaseoso se separa en centrifugas en cascada; el proceso de difusión térmica líquida; la boquilla de separación; la excitación láser; extracción solvente; cambio iónico y métodos de volatilidad selectiva.



**Figura 5.** Proceso de extracción por difusión gaseosa.

Fuente: Calderón (2006)



**Figura 6.** Proceso de extracción por centrifugación

Fuente: Calderón (2006)

La preparación del uranio de alta pureza se realiza mediante la descomposición térmica de sus haluros sobre un filamento incandescente.

El uranio obtenido por cualquiera de los procesos expuestos se funde para comercializarlo en lingotes de metal puro o aleado según el uso que vaya a dársele.

El sobrante del mineral tratado se almacena en instalaciones cerca de la mina. Estos depósitos contienen materiales radiactivos de larga vida en concentraciones bajas, y materiales tóxicos, como minerales pesados. Sin embargo, el total de los elementos radiactivos es menor que el contenido en el mineral original y su radiactividad colectiva puede ser de vida más corta. Este material es aislado del medio ambiente por un periodo suficiente para permitir bajar la radiactividad a niveles normales.

Cuando la minería y la molienda se han completado, las colas o material sobrante de los procesos se cubren con arcilla y material de suelo para permitir que crezca la vegetación y la radiactividad se reduzca a los niveles existentes cerca del cuerpo mineralizado. Las colas también pueden ser filtradas y llevadas a un estado seco. Estos sólidos son dispuestos en depósitos subterráneos.

**Conversión y enriquecimiento del uranio.** El producto obtenido por los métodos descritos no se utiliza como combustible en los reactores nucleares. En la mayoría de los reactores se necesitan procesos adicionales denominados *de enriquecimiento*. El proceso requiere uranio en forma

gaseosa, y esto se alcanza por conversión del producto UOC en hexafluoruro de uranio ( $UF_6$ ), un gas a temperatura relativamente baja. Para esta conversión se refina el uranio y se lleva a dióxido de uranio ( $UO_2$ ), el cual puede usarse como combustible en algunos tipos de reactores que no requieren el uranio enriquecido. La mayor parte del uranio es convertido en  $UF_6$ , listo para las plantas de enriquecimiento.

El uranio natural está formado por tres isótopos. Solamente el 0.715 % del uranio natural es fisible o capaz de someterse a fisión. El isótopo fisible es el uranio  $^{235}U$ , mientras que la mayor parte del sobrante es uranio  $^{238}U$ .

La mayoría de los tipos comunes de reactores requieren uranio 235 de alta concentración. El proceso de enriquecimiento produce una alta concentración de  $^{235}U$  en porcentajes comprendidos entre 3.5 y 5 % de este isótopo, remueve más del 85 % del  $^{238}U$ . Esto se logra por la separación de hexafluoruro de uranio ( $UF_6$ ) en dos porciones: la que tiene más  $^{235}U$  que lo normal, conocida como *uranio enriquecido*, y la que tiene menos  $^{235}U$  que lo normal, denominada *cola* o *uranio empobrecido*. Como es natural, el uranio natural enriquecido es el más radiactivo.

**Fabricación del combustible de acuerdo con los requerimientos de los reactores.** El combustible de los reactores se presenta generalmente en forma de pelotillas (*pellets*). Estas se forman sometiendo a presión el  $UO_2$ , que es sinterizado (cocción) a alta temperatura, sobre los 1400 °C. Los *pellets* se encajan en tubos de metal con forma de barras de combustible, los cuales se colocan dentro de un armazón de combustible listo para introducirlo al reactor. Las dimensiones de los *pellets* y del armazón se controlan con precisión para garantizar la consistencia del combustible empacado.

**Generación de energía.** En el interior del reactor el núcleo del átomo de  $^{235}U$  se rompe (fisión) y libera energía. Esta se utiliza para calentar agua y convertirla en vapor. El vapor mueve una turbina conectada a un generador que produce electricidad. Alguna parte del  $^{238}U$  se transforma en plutonio en el centro del reactor (plutonio -239, que se forma cuando el isótopo  $^{238}U$  absorbe un neutrón) y produce cerca de una tercera parte de la energía en un reactor nuclear típico. La fisión del uranio se utiliza como fuente de calor en una estación de energía nuclear de la misma manera que cuando se quema carbón, gas o aceite en una planta de combustibles fósiles.

Con el tiempo, la concentración de fragmentos de la fisión (tales como bromo, yodino y cesio, entre otros, que se producen al partirse el átomo de  $^{235}U$ ) y elementos pesados forman, así como el plutonio, un “paquete de

combustible” que se incrementa hasta el punto de que no es práctico el uso del combustible. Después de dieciocho a veinticuatro meses, el “combustible gastado” se remueve del reactor. La cantidad de energía que se produce con un paquete de combustible varía con el tipo de reactor y la política del operador del reactor.

**Almacenaje del combustible usado.** Cuando se remueve del reactor un paquete de combustible, puede emitir radiaciones, principalmente fragmentos de fisión y calor. El combustible usado es descargado inmediatamente en un estanque de almacenaje, adyacente al reactor, para permitir que los niveles de radiación decrezcan. En el estanque, el agua protege la radiación y absorbe el calor. El combustible usado se retiene en estos charcos por meses o por años.

Dependiendo de las políticas particulares de los países, algunos combustibles usados pueden ir a instalaciones centrales de almacenamiento. Finalmente, estos combustibles usados pueden ser reprocesados o preparados para llevarlos a un depósito permanente.

**Reprocesamiento.** En las instalaciones de reprocesamiento, el combustible usado se separa en tres componentes: uranio, plutonio y residuos (que contienen productos de fisión). El reprocesamiento permite el reciclaje de uranio y plutonio en un combustible nuevo; con esto se consigue una reducción significativa de residuos.

El combustible usado tiene cerca de 95 % de  $^{238}U$ , pero solo contiene 1 % de  $^{235}U$ , que no se fisiona, cerca de 1 % de plutonio y 3 % de productos altamente radiactivos que se fisian con otros elementos transuránicos formados en el reactor.

**Reciclaje de uranio y plutonio.** El uranio para reprocesamiento, que contiene concentraciones un poco más altas que el  $^{235}U$  tal como aparece en la naturaleza, puede volver a usarse como combustible, si es necesario, después de someterlo a conversión y enriquecimiento. El plutonio puede ser directamente producido dentro de una mezcla de combustible oxidado (MOX), en el cual los óxidos de uranio y plutonio están combinados. En reactores que usan combustible MOX, el  $^{239}U$  sustituido por  $^{235}U$  en un combustible normal oxidado de uranio.

**Disposición de combustibles usados.** El combustible usado largamente se almacena. Este es el manejo más fácil, debido a la disminución progresiva de la radiactividad. Después de cuarenta a cincuenta años de almacenamiento, el nivel de radiactividad del combustible desciende al 0.1 % del nivel

original. Este descenso, y el hecho de que los volúmenes de desechos no son relativamente grandes, han permitido que las instalaciones de depósitos finales (como oposición a las instalaciones para almacenamiento) no hayan operado hasta que los programas de energía nuclear civil fueran creados. Hay, además, poca disposición al almacenamiento de combustibles usados, ya que estos representan un recurso significativo de energía que puede ser reprocesado más tarde por reciclaje del uranio y el plutonio.

Se han desarrollado técnicas relacionadas con problemas de disposición, y varios países han determinado sus propias técnicas optimizadas para la disposición de residuos que van a reprocesarse. El más común y favorable método de disposición es el emplazamiento en depósitos geológicos profundos. Varios países construyen actualmente depósitos nacionales para los residuos de combustibles usados.

#### 2.4.2.2. Ciclo de combustible militares

El ciclo de combustibles militares que involucra la producción de grados especiales de material nuclear es sustancialmente diferente del seguido en los programas civiles, principalmente en lo relacionado con el plutonio y el grado de uranio para armamento. Mientras que los reactores nucleares requieren uranio enriquecido no mayor del 5 %, el armamento nuclear necesita  $^{235}\text{U}$  enriquecido aproximadamente al 90 %. El grado de plutonio para armamento se produce en reactores específicos —generalmente combustible natural de uranio—, en los que el combustible irradiado puede ser removido después de un corto tiempo de irradiación.

## 2.5. Recursos, reservas y comercio

Datos tomados de la Organization for Economic Cooperation and Development (OECD, 2016), indican que los recursos adicionales estimados en 2015 eran de 7.7 millones de toneladas de uranio en la categoría que corresponde a <USD 260/kgU, y 5.7 millones de toneladas de uranio <USD 130/kgU.

### 2.5.1. Recursos y reservas

Esta misma fuente indica que esas cifras registran un incremento de 0.1 % y un decrecimiento del 3.1 %, respectivamente, entre 2013 y 2015, debido a la revaluación de los recursos identificados. La tabla 6 muestra el total de los recursos identificados en 2013 y 2015.

La convención internacional para el reporte de reservas divide las estimadas en dos categorías, basadas en el nivel de confiabilidad y en las cantidades reportadas: recursos razonables asegurados, que pueden recuperarse con costos razonables de producción, y recursos inferidos, uranio que se cree existe, con base en evidencias geológicas directas. Estos recursos se clasifican también en categorías basadas en los costos de producción de  $\text{U}_3\text{O}_8$ :

- < USD 40/kgU (aproximadamente USD 15/lb  $\text{U}_3\text{O}_8$ )
- < USD 80/kgU (aproximadamente USD 30/lb  $\text{U}_3\text{O}_8$ )
- < USD 130/kgU (aproximadamente USD 50/lb  $\text{U}_3\text{O}_8$ )
- < USD 260/kgU (aproximadamente USD 100/lb  $\text{U}_3\text{O}_8$ )

**Tabla 6.** Recursos de uranio identificados en el mundo (2013 y 2015)

Total de recurso de uranio identificado (miles toneladas $\text{U}_3\text{O}_8$ ) <sup>1,2</sup>					
	< USD 40/kg	< USD 80/kg	< USD 130/kg	< USD 260/kg	Año
Recursos mundiales	682.9	1956.7	5902.9	7635.2	2013
	646.9	2124.7	5718.4	7641.6	2015

<sup>1</sup> Los recursos hacen referencia a datos de enero del 2013 y enero del 2015; los recursos estimados se expresan en términos de toneladas de  $\text{U}_3\text{O}_8$  recuperables del mineral de mina (los recursos estimados incluyen descuentos por las pérdidas por dilución de la mena, minería, y molienda).

<sup>2</sup> Total de recursos identificados = recursos razonablemente asegurados + recursos inferidos.

Fuente: OECD (2016)

Según la OECD (2016), las principales reservas de uranio se encuentran distribuidas así: Australia con 29 %, Kazajistán con 13 %, Canadá y Rusia con 9 %, y Suráfrica con 65 %. En Latinoamérica, las principales reservas las tiene Brasil, con un 5 % de las reservas globales de uranio

### 2.5.2. Comercio

**Producción.** La producción de uranio primario se inició hacia 1945, principalmente por necesidades militares. Esta satisfizo las necesidades o el consumo mundial hasta 1989, aproximadamente, y dejó excedentes que se constituyeron

en reservas estratégicas. Después de 1989, la producción mundial de uranio descendió debido a la declinación de los precios, y ya no satisfizo el consumo. En 1995 la producción de uranio primario solo alcanzó el 50 % de consumo; el resto se suplió de la producción secundaria.

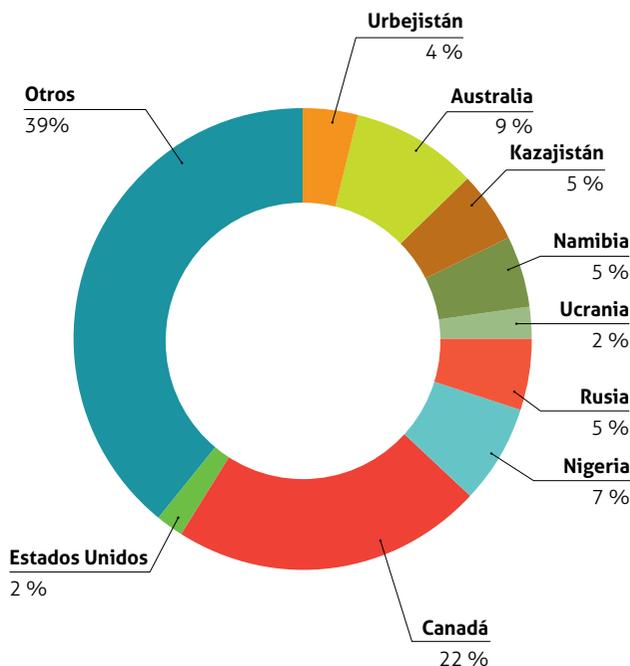
En 2015 la producción de uranio fue 60 500 t; Kazajistán fue el mayor productor mundial, con 23 800 t, seguido por Canadá con 13 200 t y Australia con 5600 t. En la tabla 8 se muestra la producción mundial de uranio por países en el periodo 2011-2015 (tabla 7).

**Tabla 7.** Producción mundial de minas de uranio y principales países productores de uranio, período 2011-2015 (toneladas de uranio contenido)

País	2011	2012	2013	2014	2015
Rusia	2933	2862	3135	2990	3055
Ucrania	890	960	922	926	1200
Namibia	3262	4500	4328	3311	2950
Nigeria	4159	4821	4277	4156	4116
Canadá	9145	8998	9331	9101	13 324
Estados Unidos	1537	1596	1794	1884	1287
Kazajistán	19 451	21 317	22 567	23 127	23 800
Uzbekistán	3000	3000	2400	2400	2385
Australia	5961	7022	6370	5634	5655
Otros	3362	4124	4176	3371	2728
Total mundial	53 700	59 200	59 300	56 900	60 500

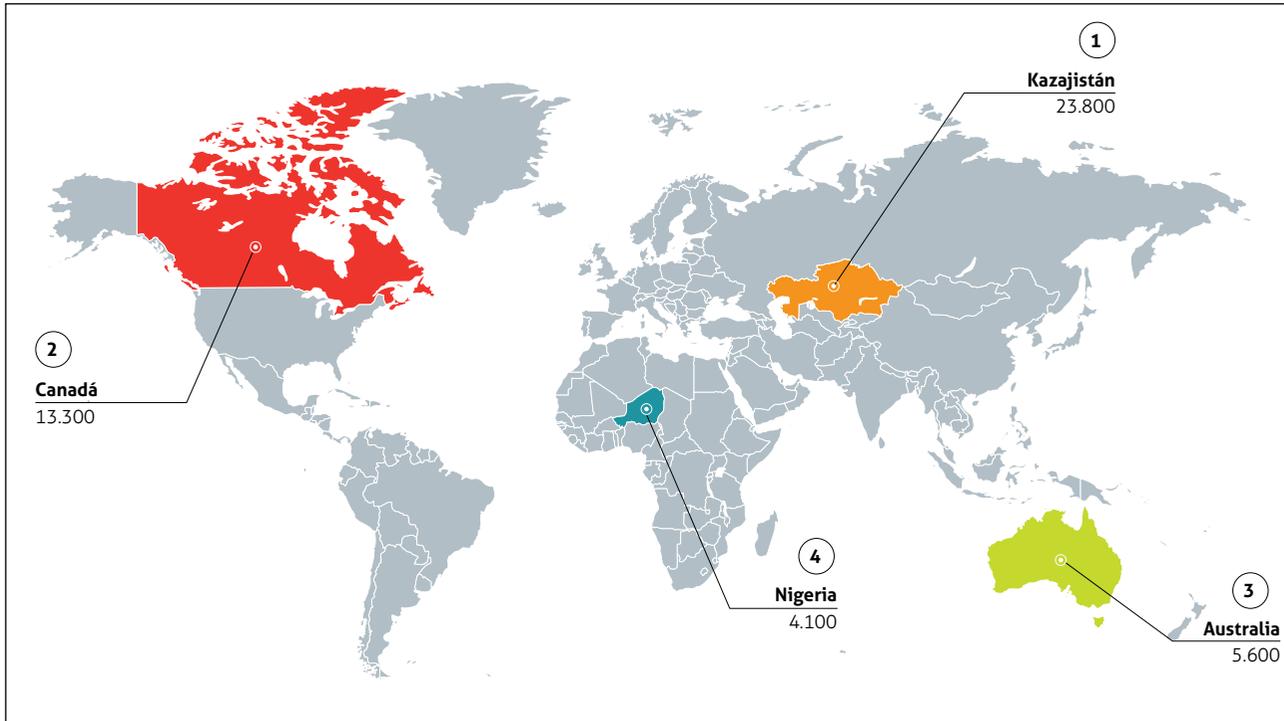
Fuente: Brown, Raycraft, Deady y Hobbs (2017)

Como se puede observar en la figura 7, la producción en 2015 la encabezaba Kazajistán con una participación del 39%; le seguía Canadá, en un su segundo lugar, a lo largo del período, con un 22 %, y en tercer lugar, Australia, con un 9 %. En la figura 7, se muestra la participación de países en la producción mundial de uranio porcentual en 2015, y en la figura 8 se observa la producción de los cuatro principales países productores del mundo en el mismo periodo.



**Figura 7.** Participación de producción mundial de uranio en 2015

Fuente: Brown, Raycraft, Deady y Hobbs (2017)



**Figura 8.** Principales países productores de uranio en 2015

Fuente: Brown, Raycraft, Deady y Hobbs (2017)

**Precios del uranio.** La relativa disponibilidad de suministro de uranio primario y secundario, conjuntamente con el nivel de demanda de este elemento para usos civiles y militares, ha determinado el precio del uranio desde la década de los cuarenta del siglo pasado. Se citan recursos que identifican tres periodos en la historia del precio del uranio:

- Una era de adquisición para armamento (1940-1969)
- Una era de inventarios de acumulación (1970-1984) y
- Un periodo de liquidación de inventarios (1985-2004)

Durante los dos primeros periodos el uranio fue suministrado casi en su totalidad por la producción de las minas; el precio promedio del uranio fue USD \$54.18/lb de  $U_3O_8$ , con un pico de USD \$110/lb en 1976. Durante el periodo de liquidación de inventarios, el precio de entrega inmediata cayó a un promedio de USD \$14.57/lb de  $U_3O_8$ , debido a la disponibilidad en el mercado de uranio secundario. Los expertos creen que el efecto de la liquidación de inventarios fue una depresión artificial del precio en un periodo en el que el suministro de las minas declinó y la demanda se incrementó.

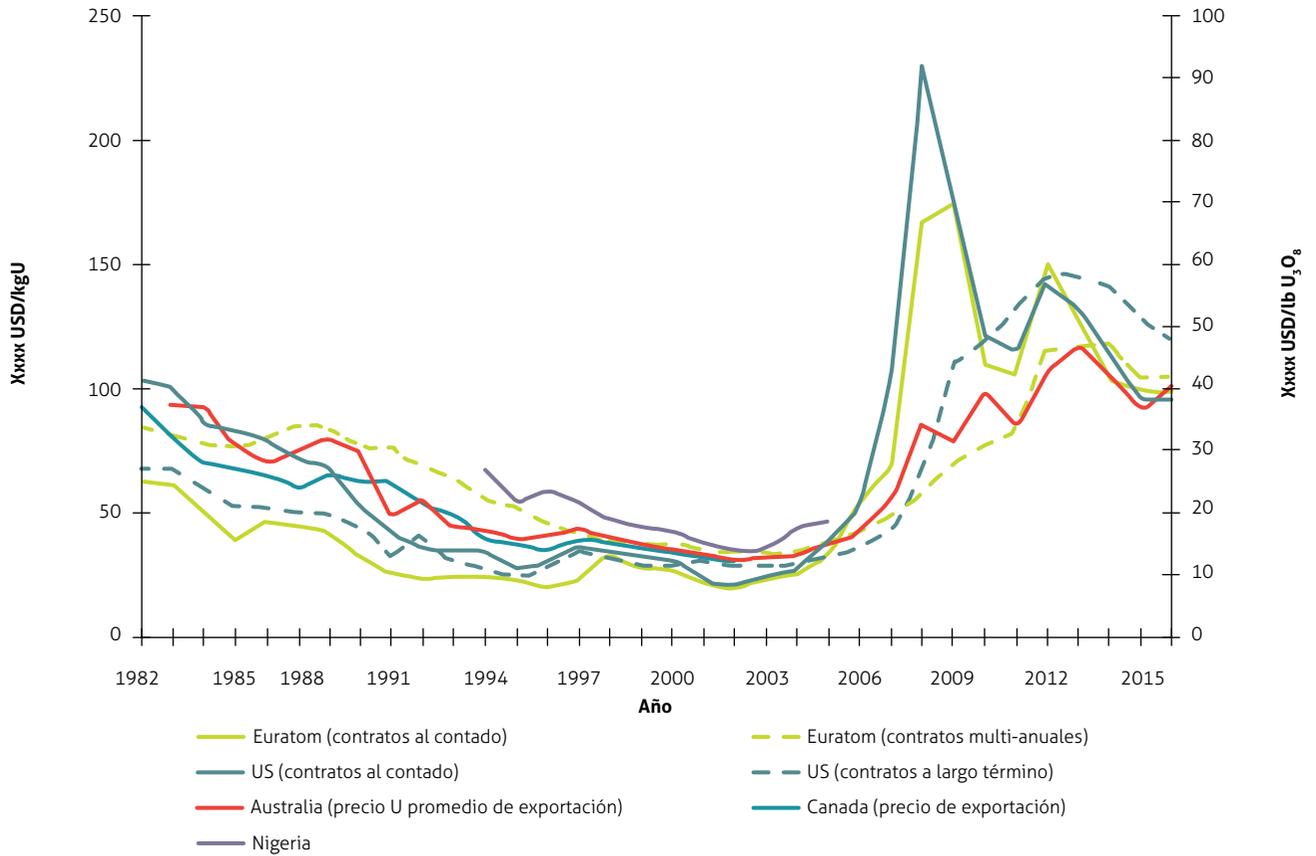
El análisis del mercado indica que la disminución del suministro de uranio secundario tiene ahora una influencia significativa en el precio del mismo. Esta disminución

ejerce una fuerte presión en el alza del uranio de entrega inmediata, y dobló el precio en el periodo comprendido entre finales de 2002 y finales de 2004. Según la consultora estadounidense UX, el precio se incrementó en un 109 % desde octubre de 2006 hasta mediados de abril de 2007, pues pasó de costar 55 dólares a 115 dólares. Según el portal de información de la OECD (2016), en 2015 el precio de la libra del uranio fue de aproximadamente USD \$40. Este descenso se debió al accidente nuclear ocurrido en la planta de Fujishima en el año 2011.

El comportamiento histórico de los precios reales y nominales del uranio en el periodo 1982-2015 se muestra en la figura 9.

## 2.6. Perspectivas

Según la OECD (2016), en el periodo comprendido entre el 2013 y el 2015, la demanda de uranio disminuyó considerablemente y fue igualada por la producción, debido al accidente de la planta de Fujishima en Japón, ante el cual muchos de los reactores del mundo iniciaron procesos de mantenimiento para evitar este tipo de impases. En la figura 10 se observa la relación de producción versus la demanda en el periodo 1949-2015; se espera que en los próximos años la demanda vuelva a incrementarse, debido a la entrada en operación de nuevos reactores nucleares.



**Figura 9.** Comportamiento de los precios del uranio entre 2005 y 2007

Fuente: OECD (2016)

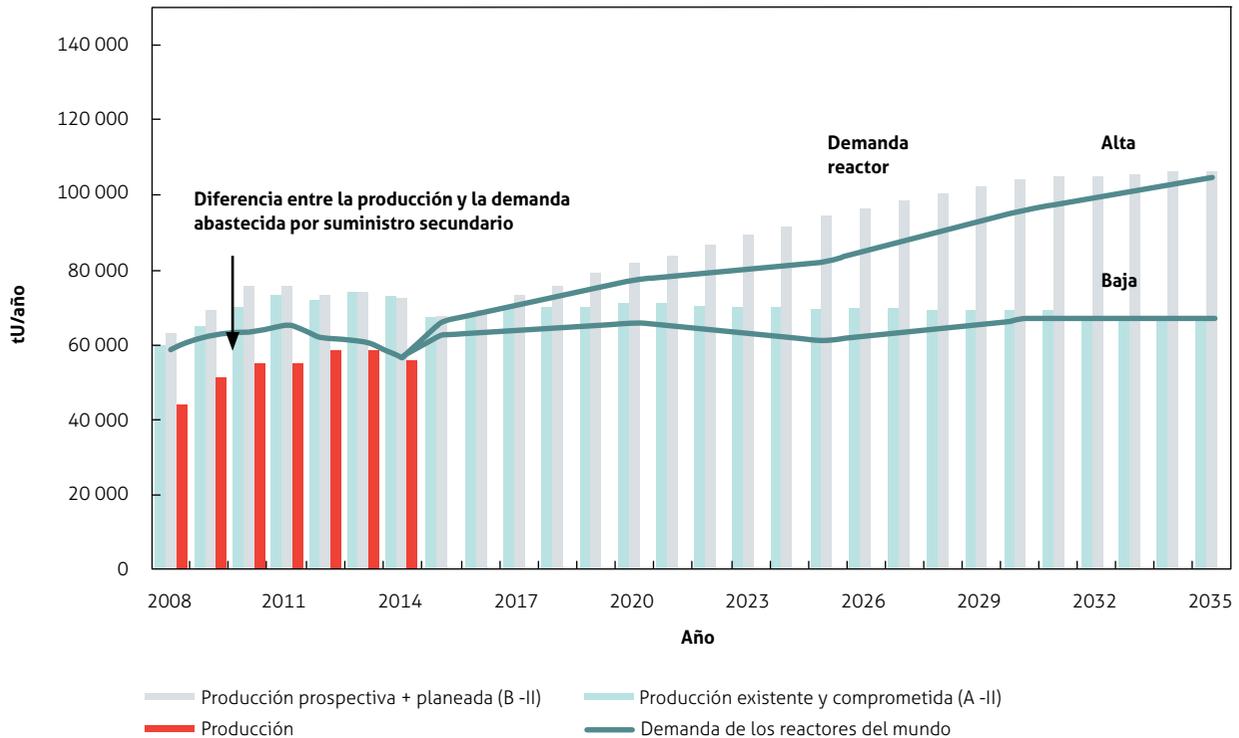


**Figura 10.** Relación de producción vs. demanda de uranio en el periodo 1949-2015.

Fuente: OECD (2016)

En cuanto al uranio que, según estimaciones, los reactores nucleares podrían demandar de aquí al año 2035 (figura 11), se tiene que con los niveles actuales de producción en un escenario bajo, la oferta sería suficiente; sin embargo, en un escenario de alto consumo habría un

déficit en la producción, que sería necesario suplirlo con el reciclaje de los combustibles de las plantas nucleares. En lo que respecta al tema de reservas, para el año 2035 solo se afectaría un 30 % de las estimadas en 2015.



**Figura 11.** Proyección de la producción mundial de uranio y demanda de reactores nucleares hasta el año 2035

Fuente: OECD (2016)

### 3. Uranio en Colombia

En este capítulo se describirá el estado actual de la geología y minería del uranio en Colombia.

#### 3.1. Geología regional

La geología colombiana es compleja, pues cuenta con unidades geológicas que tienen posibilidades de presentar altos contenidos de radiactividad que representen mineralizaciones uraníferas, principalmente en rocas de la cordillera Oriental datadas entre el Precámbrico y el Cretáceo, con menos frecuencia en la cordillera Central y en algunos macizos que representen zonas de escudo, ambientes geológicos similares a los que se encuentran en otras partes del mundo.

#### 3.2. Geología local

Las investigaciones específicas sobre uranio en Colombia las adelantó el Instituto de Asuntos Nucleares (IAN), que coordinó el trabajo de varias compañías, como AGIP, Enusa, Total, Minatome, Cogema e Iaeay Colurano.

Algunos autores, como Cortés y Pfeiffer, Ortega (1983) y Pacheco (1983) describen los ambientes geológicos uraníferos colombianos, que cubren aproximadamente un 90 % (1 024 312 km<sup>2</sup>) del territorio nacional.

Resumiendo estos trabajos Premoli y Lozano (1984) señalan los siguientes tipos de mineralizaciones, según la roca huésped:

##### 3.2.1. Pegmatitas

Aparentemente relacionadas con eventos metamórficos ocurridos durante el emplazamiento del macizo de San-

tander, se encuentran en localidades de los departamentos de Santander, Huila, Tolima, Antioquia y Caquetá. La anomalía más importante se localizó en Santa Elena (Norte de Santander), donde se reconoció uraninita localmente alterada a autunita. La manifestación se encuentra dentro de rocas metamórficas, facies esquistos verdes-anfibolitas de edad Ordovícico-Silúrico, según el *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006).

### 3.2.2. Rocas piroclásticas

Se conocen algunas manifestaciones de niveles uraníferos en rocas terciarias de la localidad de Paipa, departamento de Boyacá. Según estudios de Enusa, las mineralizaciones de uranio están en desequilibrio geoquímico y se relacionan con las rocas efusivas de eventos del Mioceno-Plioceno. Las manifestaciones se encuentran en la roca vulcanoclástica continental de edad Mioceno- Plioceno del *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006).

En el año 2008, Ingeominas realizó una exploración en la zona de Paipa, Iza, Pesca y Chivatá con el fin de determinar las anomalías de uranio asociadas a eventos magmáticos que afectaron las rocas sedimentarias circundantes. El trabajo concluyó que hay un enriquecimiento en uranio y torio asociado a los fluidos hidrotermales de la cámara magmática, que se impregnaron en las rocas fosfáticas o asociado al material fósil de las formaciones sedimentarias presentes en la zona (Oviedo, Vásquez, Muñoz, Gómez, Parrado y Vargas, 2008).

### 3.2.3. Sedimentos marinos (shales y fosfatos)

La más importante mineralización de uranio en estas rocas está localizada en la población de Berlín, departamento de Caldas, y está relacionada con rocas fosfáticas dentro de *shales* negros epicontinentales del Cretáceo Inferior. El uranio se concentra en las areniscas fosfáticas con tenores promedio de 500 ppm, en espesores que varían de 1 a 3 m. La mineralización está dentro de la unidad rocas sedimentarias de ambiente transicional marino, de edad Cretáceo Inferior, en el *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006).

A todo lo largo de la cordillera Oriental, desde el departamento del Huila hasta Norte de Santander, y en el periodo Maastrichtiano, se encuentran manifestaciones de uranio relacionadas con niveles fosfáticos. La concentración de uranio en estos fosfatos es aproximadamente de 3 ppm de uranio por 1 % de  $P_2O_5$ . Las mineralizaciones están dentro de la unidad rocas sedimentarias de ambiente transicional marino, de edad comprendida entre el Cretáceo Superior-Eoceno, según el *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006).

En el año 2010 Ingeominas realizó una exploración en el área occidental del macizo de Santander. En un área de 3452 km<sup>2</sup> se encontraron valores anómalos de uranio y torio sobre partes puntuales de la formación Rosa Blanca, aunque no de importancia para realizar labores de exploración a detalle (Ávila, 2010).

En ese mismo año, Ingeominas realizó otra exploración de uranio en Moniquirá (Boyacá) en un área de 580 km<sup>2</sup>, donde se encontraron dos anomalías en rocas de la formación Paja, asociadas posiblemente a la descomposición de la materia orgánica en los ambientes anóxicos hay presencia del mineral secundario de uranio como uranofana (González, Gómez, Muñoz y Vargas, 2010).

### 3.2.4. Areniscas

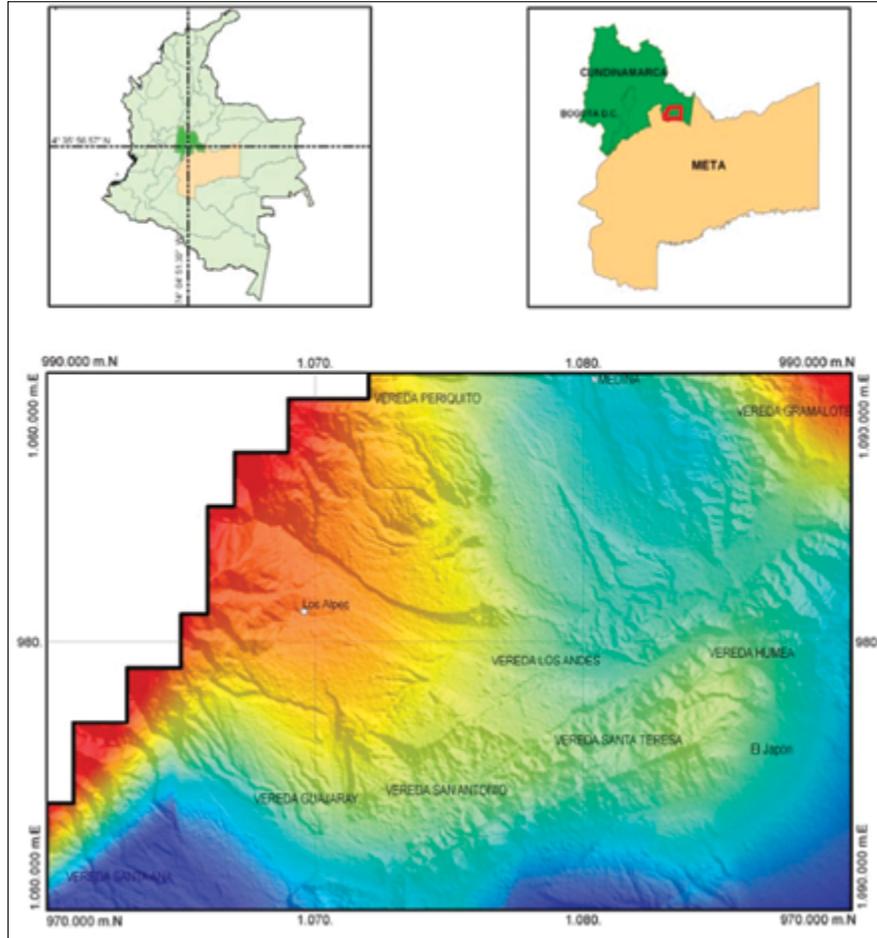
En los departamentos de Cundinamarca y Meta se han detectado ocurrencias de uranio y cobre conocidas como Quetame y Caño Negro. Se encuentran en una secuencia de arcillas, areniscas y conglomerados, posiblemente de ambiente marino deltaico, de aparente edad Carbonífera o Pérmica. Se asocian igualmente minerales como plata, zinc, cobalto y níquel. Las mineralizaciones son esencialmente lenticulares y presentan grandes variaciones laterales. Se reconocieron minerales como coffinita y pechblenda, con concentraciones del 1 % de uranio. Las mineralizaciones tienen un control estrictamente sedimentario y el depósito es típicamente singenético con control litológico. Las mineralizaciones están dentro de la unidad rocas sedimentarias de ambiente transicional marino, de edad Devónico-Carbonífero, según el *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006).

En el área de Zapatoca-Contratación y Lebrija, en el departamento de Santander, se presentan varias mineralizaciones de uranio. Estas manifestaciones están concentradas en el flanco este del anticlinal de Los Cobardes. Las mineralizaciones de uranio ocurren en areniscas del Jurásico (formación Girón) y se presentan en forma de lentes con variaciones laterales. Se identificó autunita y gummita. Se encuentran en general tres niveles con un intervalo de aproximadamente 100 m. Las mineralizaciones están dentro de la unidad rocas sedimentarias de ambiente continental, de edad Jurásico Superior Tardío, según el *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006). El control de la mineralización es sedimentario, pero se observan algunas remobilizaciones a lo largo de las fallas. Las mejores manifestaciones se encuentran en las quebradas Nogales, Santa Fe y Vitoca, localizadas entre Zapatoca y San Vicente, en el departamento de Santander.

Tamayo, Moreno y Bautista (2013), en el estudio realizado en el macizo de Quetame, encontraron una anomalía

de uranio asociada a areniscas de la formación Chipaque y la formación Capas Rojas, con valores de entre 6 y 12 ppm (con un valor anómalo de 92 ppm) de uranio y 20-32 ppm

de torio, como se observa en la figura 12; estos autores sugieren que se deben realizar muestreos más densos en el área para determinar la procedencia de esta anomalía.



**Figura 12.** Distribución de uranio y torio en las formaciones Chipaque y Capas Rojas.

Fuente: tomado de Tamayo, Moreno y Bautista (2013)

### 3.2.5. Venas

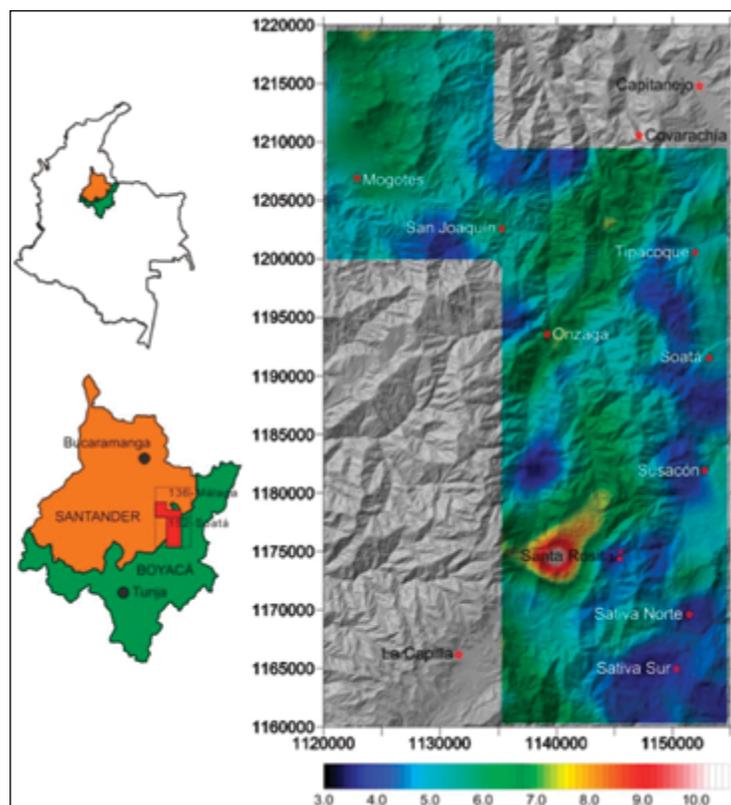
Las mineralizaciones de uranio se presentan diseminadas en venas generalmente asociadas a zinc, oro, plata, plomo y cobre. El uranio se presenta como uraninita o pechblenda con cuarzo. Las mineralizaciones más conocidas son las de San Celestino, Las Ánimas, San Antonio, La Francia, tradicionalmente explotadas para oro, en el Distrito Aurífero de California, departamento de Santander, a unos 50 km al NE de Bucaramanga.

Se considera de edad pre-Devónica la roca huésped, y varios de los intrusivos de composición intermedia son del Triásico-Jurásico, mientras que varios de los cuerpos porfiríticos indican una edad Cretáceo Superior. No se tiene una datación de las mineralizaciones, pero pueden ser del

Mesozoico. La mineralización están dentro de la unidad rocas metamórficas facies esquistos verdes-anfibolitas de edad Ordovícico-Silúrico, según el *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006).

Moreno, Díaz y Quintero (2011), en el estudio realizado en el macizo de Santander, encontraron una anomalía de uranio asociada a la cuarzomonzonita de Santa Rosita, con valores de entre 8 y 10 ppm de uranio y entre 37 y 54 ppm de torio, como se observa en la figura 13. Estos autores sugieren que se deben realizar muestreos más densos en el área para determinar la procedencia de esta anomalía.

Según Mutis (1983), existen más de treinta y cinco manifestaciones en diferentes áreas del país, que se relacionan en la tabla 8, figura 14.



**Figura 13.** Distribución de uranio y torio en la cuarzomonzonita de Santa Rosita

Fuente: tomado de Moreno, Díaz y Quintero (2011)

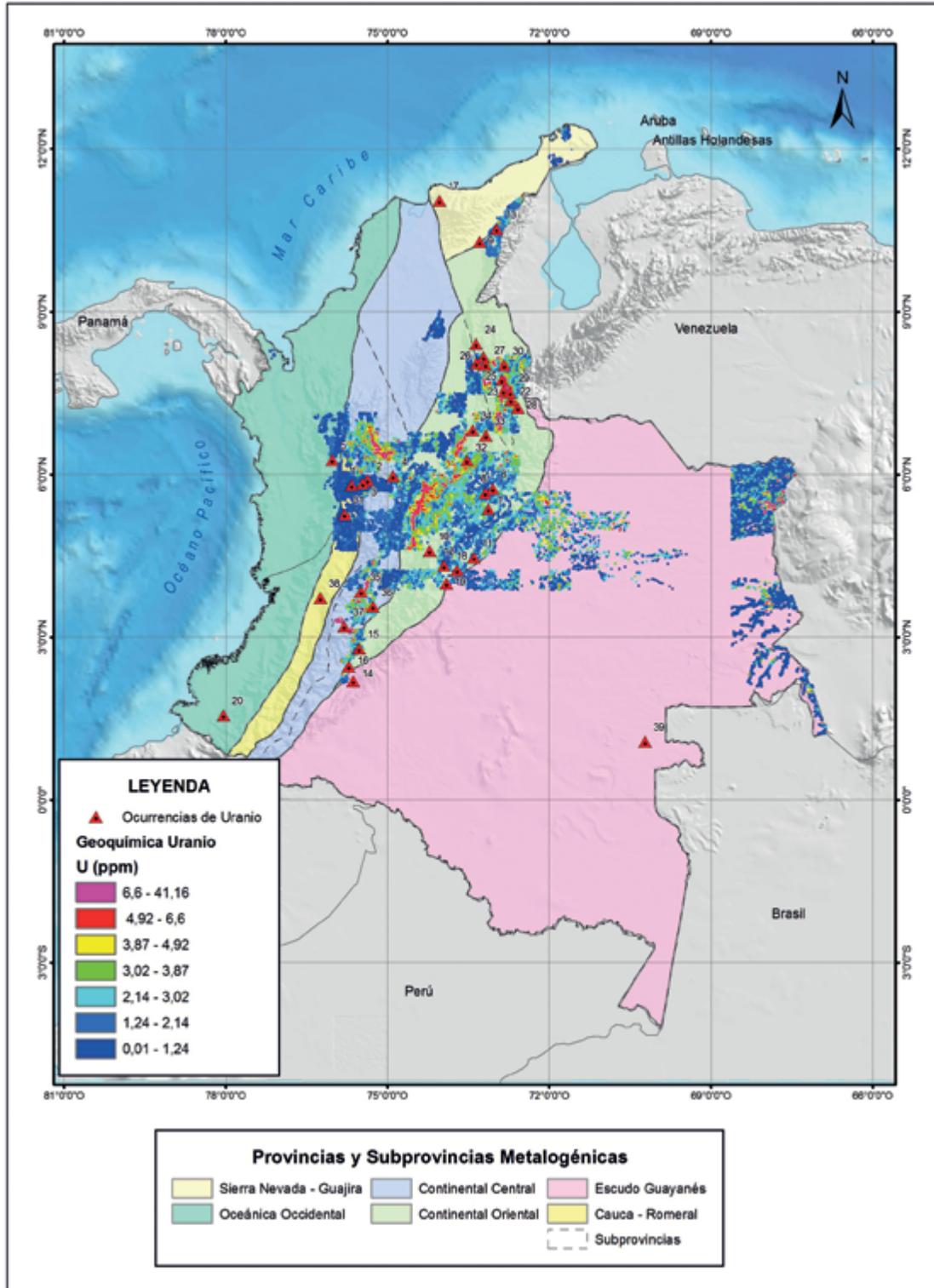
**Tabla 8.** Manifestaciones de uranio en Colombia

Departamento	Ident.	Municipio	Departamento	Ident.	Municipio
Antioquia	1	Fredonia	N. Santander	21	Ábrego
	2	La Unión		22	Arboledas
	3	Montebello		23	Bochalema
	4	San Luis		24	Convención
	5	Urrao		25	Cucutilla
Boyacá	6	Paipa		26	La Playa
	7	Pesca		27	Ocaña
	8	Tuta		28	Pamplonita
Cesar	9	Valledupar		29	Salazar
Cundinamarca	10	Área de Sumapaz		30	Sardinata
	11	Medina	Risaralda	31	Quinchía
	12	Quetame	Santander	32	Contratación
Guajira	13	Villanueva		33	San Vicente de Chucurí
Huila	14	Garzón	Tolima	34	Zapatoca
	15	Palermo		35	Chaparral
	16	Tesalia		36	Natagaima
Magdalena	17	Sierra Nevada de Santa Marta	37	Planadas	
Meta	*	El Calvario	Valle	38	Ginebra
	19	Iteviare	Vaupés	39	Mitú
Nariño	20	Barbacoas			

Fuente: Mutis (1983)

El Servicio Geológico Colombiano en el año 2016 publica el Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2016, con el cubrimiento aproximado del 35% del país; para el

uranio se basó en su concentración en sedimentos mg/kg de 25 051 registros analizados (figura 14), (SGC, 2016).



**Figura 14.** Ocurrencias y distribución geoquímica de uranio en Colombia

Fuente: Mutis (1983, tabla 8), SGC (2016), Salinas *et al.* (1999)

### 3.3. Situación actual de la minería

A continuación se realiza una breve descripción de la situación actual de la minería de uranio en Colombia.

#### 3.3.1. Potencial

Si se tiene en cuenta el tipo de depósito de la clasificación BC Mineral Deposit Profiles (Cox y Singer, 2002), se podría sostener que las mineralizaciones presentes en el país corresponden a depósito tipo venas clásicas de U I13; depósitos en areniscas DO5; paleoplacers C04, depósitos en rocas fosfáticas, y depósitos en conglomerados.

Según información de Ingeominas, hasta 1962 solo existían algunos datos aislados sobre el uranio. A partir de la creación del Instituto de Asuntos Nucleares (IAN), hoy desaparecido, se adelantaron estudios específicos de prospección del uranio que cubrieron sectores importantes del sistema cordillerano y sectores menores del Escudo de la Guayana. Estos estudios coordinados por el IAN fueron en su mayor parte adelantados por varias firmas, como AGIP, Enusa, Total, Minatone, Cogema, Iaeay Colurano, esta última una empresa estatal creada específicamente para la investigación del uranio.

El resultado de los trabajos de estas diferentes empresas se manifestó en la identificación de varias anomalías localizadas en los departamentos de Santander (Zapatoca, California y Contratación), Norte de Santander (Santa Elena) y Caldas (Berlín).

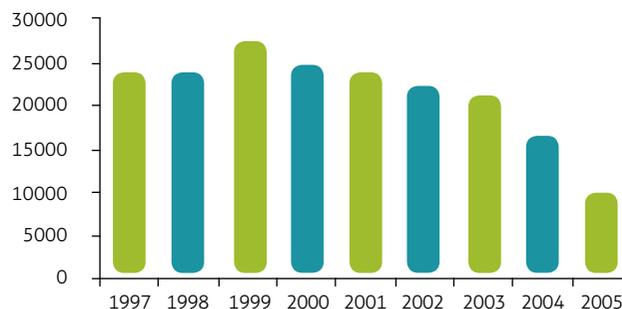
En 1981, el IAN elaboró un proyecto de evaluación de áreas con base en unas 450 anomalías uraníferas reportadas hasta esa fecha. Este programa no se llevó a cabo.

En la actualidad, según información de Catastro Minero, hay tres títulos vigentes para la exploración de uranio en Colombia.

#### 3.3.2. Comercio

**Producción.** No se conocen datos de producciones de uranio en Colombia; sin embargo, por la información compilada en el DANE (2007) de algunas exportaciones realizadas a partir de 2003, es posible estimar que se han producido aproximadamente 15 000 kg hasta el 2005, sin que se pueda precisar su origen.

**Importaciones.** Respecto a las importaciones, en los reportes del DANE (2007) solo aparece información sobre elementos e isótopos y compuestos radiactivos. La figura 15 muestra su comportamiento.



**Figura 15.** Comportamiento de las importaciones de concentrados y óxido de uranio entre 1995 y 2006 (en toneladas)

Fuente: DANE (2007)

En 2006, el origen fundamental de las importaciones de los elementos e isótopos y compuestos radiactivos fue Estados Unidos (60 %), seguido del Reino Unido (14 %) y Alemania (6 %).

#### 3.3.3. Perspectivas

Actualmente la demanda mundial de uranio experimenta un estancamiento y, según los pronósticos, continuará así por unos años, debido al accidente de la planta nuclear de Fukushima, en Japón, que puso como prioridad el tema del mantenimiento de todas las plantas nucleares, lo que implicó una disminución en el consumo de este mineral. Se prevé que en la próxima década entren en operación más reactores nucleares que posibiliten incrementos en la producción; los precios probablemente mantengan su tendencia alcista.

Teniendo en cuenta que el país cuenta con potenciales existencias de estos depósitos, y dada la importancia del uranio como mineral estratégico, resultará interesante incentivar la realización de proyectos con el propósito de lograr producciones que aseguren la demanda interna y penetrar mercados de la región. En la actualidad ya hay empresas trabajando en exploración en el territorio colombiano. El Estado, a partir de 2008, retomó las actividades exploratorias en el país.

## 4. Aspectos ambientales y sustitutos

El petróleo está ya descartado como fuente de energía principal para el futuro, y la energía nuclear de fisión basada en el uranio no tiene más de 50 años de vida. Debido a que los países emergentes van aumentando sus necesidades energéticas a un ritmo elevado y el resto de países suman sus propios niveles de consumo se puede prever

que las reservas de este elemento se agotarán en un corto lapso de tiempo, y no se encuentran yacimientos rentables para paliar la creciente demanda. Algunos expertos sostienen que la respuesta se encuentra en el torio. Sin embargo, aunque el torio puede ser el sustituto perfecto del uranio, y es muy posible que pueda ser utilizado en el futuro como combustible nuclear, esa aplicación todavía está en fase de desarrollo, y seguimos dependiendo del uranio (Nayemi, 2015).

El torio (símbolo Th y número atómico 90) es un elemento químico de la serie de los actínidos que se encuentra en estado natural en los minerales monacita, torita y torianita. Sus principales aplicaciones recurren a aleaciones con magnesio, y es utilizado en motores de avión. Existe más energía encerrada en núcleos de los átomos del torio existente en la corteza terrestre que en todo el petróleo, carbón y uranio de la Tierra.

En estado puro, es un metal blanco-plata que se oxida con mucha lentitud. Si se reduce a un polvo muy fino y se calienta, arde emitiendo una luz blanca deslumbrante. El torio pertenece a la familia de las sustancias radiactivas, lo que significa que su núcleo es inestable y que en un lapso de tiempo más o menos largo se transforma en otro elemento. Cuando un átomo de torio 232 se desintegra, emite una partícula alfa formada por dos protones y dos neutrones. La emisión de la partícula alfa reduce el número atómico del torio 232 en dos unidades, y el número másico en cuatro, así que se transforma en el isótopo 228 de otro elemento: el radio 228. Posteriores desintegraciones forman la cadena natural del torio. Este proceso continúa hasta que se transforma finalmente en un elemento no radiactivo, y por tanto estable, que es el plomo. Gracias al periodo tan grande de desintegración del torio 232, continuará produciendo elementos de su serie durante miles de millones de años.

A continuación discriminamos algunas de las ventajas que ofrecería el torio como sustituto del uranio-235:

- Las reservas de torio triplican las del uranio, a lo cual hay que agregar que el torio se encuentra repartido por todo el mundo.
- Se estima que el 100 % del torio es aprovechable para causas nucleares, mientras que solamente se utiliza el 0.7 % del uranio para el mismo fin. Esto hace que el torio sea más rentable.
- El torio ofrece más garantías de seguridad, por cuanto se descartan los estallidos que históricamente se han producido con el uranio.
- Los residuos radiactivos de este elemento tienen menos impacto en el medio ambiente y son más fáciles de limpiar.
- El mantenimiento de centrales que funcionen a base de torio serían menos costosas que las actuales centrales basadas en el uranio.
- El combustible de torio presenta mejores propiedades térmicas y físicas, así como un mejor rendimiento de la irradiación que el combustible de uranio.
- El punto de fusión del dióxido de torio es unos 500 grados centígrados más alto que el del dióxido de uranio. Esta diferencia ofrece un margen de seguridad en caso de sobrevoltaje o pérdida de refrigerante en un reactor.
- Las técnicas para la disposición a largo plazo de los desechos del ciclo de combustible del torio (que producen una menor cantidad de combustible gastado de alto nivel) pueden ser menos exigentes que las del ciclo de combustión del uranio-plutonio, tanto desde el punto de vista de la vida del repositorio como de las necesidades de espacio.

En cuanto a la parte ambiental, se sabe de los efectos nocivos que para la salud (enfermedades degenerativas, cáncer) tiene el mal uso del uranio en la industria nuclear, debido a las grandes catástrofes que ha ocasionado, como los casos de Chernóbil y, más recientemente, de Fujishima, lo que hace que en el futuro se busquen alternativas de energía limpia (olas del mar, eólica, solar).

**Bibliografía**

- Álvarez, M. (2005). *Yacimientos y obtención de uranio*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Angulo, R. (1978). Uranio. En *Recursos minerales de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- Department of the Prime Minister and Cabinet. (2006). *Processing and Nuclear Energy- Oportunities for Australia?* Report to the Primer Minister by the Uranium Mining. Barton: Department of the Prime Minister and Cabinet.
- Ávila, A. (2010). *Exploración de uranio en el sector occidental del macizo de Santander*. Bogotá: Ingeominas.
- Berry, L. y Mason, B. (1959). *Mineralogy: Concepts, descriptions, determinations*. San Francisco: Freeman and Company.
- Bolívar, S. (1980). *An overview of the National Uranium Resource Evaluation Hydrogeochemical and Stream Sediment Reconnaissance Program*. Colorado: USDO.
- Brown, T., Raycraft, E., Deady, E. y Hobbs, S. (2017). *World mineral production: 2011-2015*. Disponible en <http://www.bgs.ac.uk>.
- Calderón, G. (2006). *Seminario sobre tecnologías para el nuevo futuro de la energía nuclear*. Disponible en <http://www.fundacionenergia.es/pdfs/seminario%20nuclear%2006/ggc-sem-nucupm-24-10-06.pdf>.
- Cortés, A. y Pfeiffer, J. (s. f.). *Clasificación genética preliminar de las manifestaciones uraníferas en Colombia*. II Congreso Colombiano de Geología. Bogotá.
- Cox, D. y Singer, D. (2002). *Mineral deposit models*. USGS.
- DANE (2007). *Estadísticas sobre importaciones y exportaciones de minerales*. Bogotá.
- De Voto, R. (1978). *Uranium Geology and Exploration*. Colorado: Colorado School of Mines.
- Educaplus. (2016). *Elementos químicos*. Disponible en <http://www.educaplus.org/sp2002/index.html>. Visto el día 02 de septiembre de 2017.
- González, L., Gómez, H., Muñoz, R. y Vargas, S. (2010). *Exploración de uranio en Moniquirá, Boyacá*. Bogotá: Ingeominas.
- Griem, S. (2016). *Geoquímica en la prospección*. Disponible en <https://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/0300-geoquimica-exploracion.htm>.
- Hurlbut, C. y Klein, C. (1984). *Manual de mineralogía*. Madrid: Editorial Reverté.
- Ingeominas (2006). *Mapa geológico colombiano, escala 1:2 800 000*. Bogotá.
- McMillan, R. H. (1996). Classical U veins. En *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles*, Volume 2. British Columbia Ministry of Employment and Investment
- Misra, K. (2000). *Understanding mineral deposits*. London: Springer.
- Moreno, G., Díaz, J. y Quintero, F. (2011). *Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectrométricas para potasio, uranio y torio en el sector central del macizo de Santander, Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- Mutis, J. (1983). *Catálogo de los yacimientos, prospectos y manifestaciones minerales de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- Nayemi (2015). *Torio: sustituto para el uranio como combustible nuclear*. Disponible en <http://100ciasnaturales.blogspot.com.co/2011/01/torio-sustituto-para-el-uranio-como.html>.
- OECD. (2016). *Uranium 2016: resources, production and demand*. Disponible en [https://read.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/uranium-2016\\_uranium-2016-en#page117](https://read.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/uranium-2016_uranium-2016-en#page117).
- Ortega, C. (1983). *Ambientes geológicos uraníferos en Colombia*. Cuarto Congreso Colombiano de Geología. Cali.
- Oviedo, L., Vásquez, L., Muñoz, R., Gómez, H., Parrado, G. y Vargas, S. (2008). *Exploración de recursos energéticos: exploración de uranio en Paipa, Iza, Pesca y Chivatá (Boyacá)*. Bogotá: Ingeominas.
- Pacheco, A. (1983). *Posibilidades de explotación de los prospectos de uranio, cobre, vanadio de Caño Negro, Quetame (Cundinamarca) y Zapatocha Contratación (Santander)*. Pamer Consultores Ltda.
- Paone, J. (1960). Thorium. Mineral Facts and Problems. *Bureau of Mines Bulletin*, (585), 863-872.
- Premoli, C. y Lozano, H. (1984). *Some aspect of geology and metallogenesis of uraníferous occurrences in Colombia: regional context and correlations*. Viena: International Atomic Energy Agency.
- Salinas, R., Rodríguez, C., Lozano, H., y Solano, F. (1999). *Mapa metalogénico de Colombia*. Informe 2259. Bogotá: Ingeominas.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016). *Atlas Geoquímico de Colombia*. Versión 2016. Concentración de uranio (U). Bogotá.
- Tamayo, J., Moreno, G. y Bautista, S. (2013). *Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectrométricas para potasio, uranio y torio en el sector sur del macizo de Quetame, 2013*. Bogotá: Servicio Geologico Colombiano.
- UN (2001). *Classification for reserves/resources – solid fuels and mineral commodities of 1997*. Nueva York: International Frame work, United Nations.
- Voto, R. de (1978). *Uranium geology and exploration*. Colorado: Colorado School of Mines.