

The uranium as an energetic resource and its currently mining in Colombia

Andrés Felipe Porras-Ríos & José de Jesús Díaz-Velásquez

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. afporrasr@unal.edu.co, jddiazv@unal.edu.co

Received: December 26th, 2017. Received in revised form: October 27th, 2018. Accepted: November 28th, 2018

Abstract

A study of uranium is made as an energy resource and a comparison with other fuels and biomass, the cost / benefit of nuclear energy and the accidents produced by the different types of energy are analyzed. It shows the use of different forms of use of depleted uranium (^{238}U) to increase the useful life of nuclear fuel. Finally, the company U3O8corp shows the current mining of uranium in Colombia under the only exploitation project. With this study it can be concluded that nuclear energy is considered safe with respect to accidents and fatal deaths in the conversion of the other types of energy to obtain electrical energy.

Keywords: uranium; energetic resource.

El uranio como recurso energético y su actualidad minera en Colombia

Resumen

Se realiza un estudio del uranio como recurso energético y un comparativo con otros combustibles y biomasa, se analiza el costo / beneficio de la energía nuclear y los accidentes producidos por los diferentes tipos de energía. Se muestra el aprovechamiento de las diferentes formas de uso del uranio empobrecido (^{238}U) para aumentar la vida útil del combustible nuclear; finalmente se muestra la actualidad minera del uranio en Colombia bajo el único proyecto de explotación por parte de la empresa U3O8corp. Con éste estudio se puede concluir que la energía nuclear se considera segura con respecto a los accidentes y muertes fatales en la conversión de los otros tipos de energía para la obtención de energía eléctrica.

Palabras clave: uranio; recurso energético.

1. Introducción

El uranio, en sus formas minerales más importantes como la pechblenda, uranita y cofinita [1] y las debidas transformaciones físicas como la trituración y molienda y químicas como la concentración y enriquecimiento, se convierte en mineral de interés estratégico de orden mundial a mediano y largo plazo con una creciente demanda [2].

El uranio, del latín *Uranus*, se encontró en un mineral en 1770 por el químico alemán Martin Heinrich Klaproth [3] y nombrado así por el descubrimiento del planeta Urano en 1761 por su amigo William Herschel [4]. Klaproth en su libro "Beitrag zur chemischen Kenntniss der Mineralkoper" [5] menciona:

"[Pechblenda] consiste en una sustancia peculiar, distinta, metálica. Por lo tanto, sus ex - denominaciones, brea-blenda, mineral de brea-hierro, ya no son aplicables, y debe ser cambiado por otro nombre más apropiado. He elegido el de urano, (uranio), como una especie de homenaje al descubrimiento astronómico del nuevo planeta Urano, cuyo descubrimiento sucedió en el mismo periodo del descubrimiento químico de este nuevo metal".

El uranio se encuentra en la naturaleza como óxido con números de oxidación +4, +5 y +6, siendo el +4 y el +6 los más abundantes en la naturaleza [1], pero también se le puede encontrar como hidróxidos y sales.

A pesar que el uranio es un elemento escaso, su ocurrencia en la corteza terrestre es superior a la del bismuto,

How to cite: Porras-Ríos, A.F. and Díaz-Velásquez, J.deJ., El uranio como recurso energético y su actualidad minera en Colombia. DYNA, 86(208), pp. 362-367, January - March, 2019

cadmio, mercurio y plata [6]; sin embargo, la relación entre la abundancia en la corteza terrestre y la probabilidad de descubrir yacimientos económicamente importantes para su explotación es menos ocurente por la dispersión y baja concentración en que está presente [7].

En Colombia, las investigaciones de potencial de uranio empezaron en 1914 a través de la comisión científica nacional [8] a la cual se le encomendó las labores de cartografía geológica, exploración de recursos minerales y el estudio del subsuelo en el territorio nacional, apoyado por el laboratorio nacional de análisis e investigación, responsable de los análisis de las propiedades de los recursos del subsuelo [9]. Los primeros indicios de presencia de uranio en el territorio colombiano los enuncia Ricardo Lleras Codazzi en su libro *Minerales de Colombia de 1927* [10]. A partir de ese año, las investigaciones se efectuaron apoyados por empresas extranjeras como Anaconda Cooper, que en 1945 realizó proyectos exploratorios de uranio para la industria militar y nuclear en el municipio de California en Santander [11-12].

Este artículo muestra la importancia y las ventajas de la energía nuclear y los avances tecnológicos en su manipulación para la conversión en energía eléctrica y se realiza un análisis frente a otros tipos de combustibles en cuanto a riesgo de muerte en su producción y análisis de emisiones de CO₂.

2. El uranio como recurso energético

El interés del hombre por la adquisición de formas de energía y su transformación, desde que se inventó la primera máquina que convertía la energía térmica en mecánica por James Watt [13], ha llevado al desarrollo industrial; razón por la cual todas las fuentes que puedan producir dicho tipo de energía es una parte muy importante de diversas ramas de la ciencia y la ingeniería. Una de las formas de producción de energía con marcado uso actual es la de tipo nuclear donde alrededor del 11 % del consumo mundial de energía proviene de centrales nucleares [14]. Asimismo, las exigencias energéticas de los países desarrollados y en vías del desarrollo han hecho que la energía nuclear se convierta, cada vez más, en una solución a dichas demandas [15].

El desarrollo de la humanidad cada día requiere mayores esfuerzos para aprovechar de una forma sostenible las diferentes fuentes de energía para su uso industrial que suplan la proveniente de los combustibles fósiles. La Tabla 1 muestra valores de energía liberados en varios combustibles, en los cuales se observa que la energía proveniente de la fisión inducida del uranio (energía nuclear) oscila entre los 500 y los 28000 GJ / kg de material [16].

En la Tabla 1 se puede apreciar que la energía de tipo nuclear, con respecto a los hidrocarburos es limpia debido a que no emite CO₂ y la energía producida por kilogramo de sustancia es aproximadamente de 2 a 5 órdenes de magnitud mayor que la producida por combustibles de origen fósil. Además, en relación con el hidrógeno, que también es una energía limpia, se observa que su valor energético está muy por debajo; razón por la cual, con la tecnología actual, la energía nuclear es y será una protagonista en el mercado energético mundial [17]. Sin embargo, esta energía nuclear, como todos los demás tipos de energía, tiene algunas desventajas entre las cuales se cuentan:

Tabla 1. Contenidos calóricos de varios combustibles.

Combustible	Valor energético	% carbono	CO ₂
Hidrógeno	121 MJ / kg	0	0
Petróleo	43 MJ / kg	89	72 g / MJ
GLP	49 MJ / kg	81	59 g / MJ
Metanol	20 MJ / kg	37	--
Gas Natural	38,5 MJ / m ³	76	51 g / MJ
Carbón Antracítico	> 23,9 MJ / kg	--	--
Carbón Sub-bituminoso	20,6 MJ / kg	--	--
Carbón Lignítico	< 14 MJ / kg	--	--
Madera Seca	16 MJ / kg	42	94 g / MJ
Reactor Nuclear de Agua en Ebullición	500 GJ / kg	0	0
Reactor Nuclear de Neutrones Rápidos	28000 GJ / kg	0	0

Fuente: Adaptado de [16].

1. El costo de producción de una barra de combustible para una central nuclear es de 1600 USD y produce aproximadamente 360000 kW / h y para obtener 1 kg de uranio enriquecido se necesitan 8 kg de material de la mina procesado, conocido como torta amarilla [18].
2. El costo de la infraestructura para el enriquecimiento del ²³⁵U oscila entre 1500 y 4100 millones de dólares [19].
3. El personal de operación de dichas centrales y los mecanismos de protección radiológica asociada con los altos niveles de radiación ionizante por ésta manipulación requieren nivel de conocimiento y tecnología superior.
4. Las experiencias de las bombas atómicas en 1945, Chernobyl en 1986 y el accidente de Fukushima en Japón han demostrado el alto riesgo de las exposiciones de altas dosis de materiales radiactivos en el ser humano bajo un accidente en las centrales nucleares [20].

No obstante, se encuentra que los accidentes y el número de muertos asociados con los diferentes tipos de energía es menor al 0,05 % en 40 años contando el accidente de Chernobyl en 1986 [21] como se muestra en la Tabla 2. De hecho, las 31 muertes reales en total son las producidas en éste accidente nuclear indicando que las muertes reales producto de accidentes nucleares son muy bajas con respecto a los hidrocarburos e hidráulica y que, algunas veces, por desconocimiento, se tiende a estigmatizar éste tipo de energía como mala y peligrosa para el ser humano.

Tabla 2. Accidentes humanos severos (> 5 muertes) de los diferentes tipos de energía entre 1969 - 2000 para países miembros y no miembros de la OECD.

Tipo de energía	OECD		No OECD	
	Accidentes	Muertes Fatales	Accidentes	Muertes Fatales
Carbón	75	2259	1044	18017
Petróleo	165	3713	232	16505
Gas Natural	90	1043	45	1000
GLP	59	1905	46	2016
Hídrica	1	14	10	29924
Nuclear	0	0	1	31*
Total	390	8934	1480	72324

Fuente: Adaptado de [21] * Se consideran como muertes inmediatas.

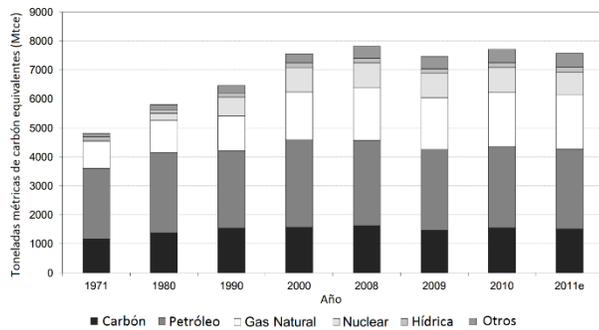


Figura 1. Discriminación de los tipos de consumo de energía por décadas y años.
Fuente: Modificada por el autor de [22].

A lo largo de los años, desde la década de los setenta, la energía nuclear tomó un papel importante en el consumo de energía del planeta y es clave en la toma de decisiones políticas y geopolíticas sobre la construcción o desmantelamiento de una central nuclear. La Fig. 1 muestra la evolución del consumo (en toneladas métricas de carbón equivalente) con respecto al tiempo desde 1970 hasta 2012 [22], en la cual se observan varios comportamientos. El primero de ellos es que, innegablemente el consumo de energía a nivel mundial está en aumento y la dependencia de los combustibles convencionales es muy alta; y como cada año las reservas de éste tipo de materiales disminuyen, el porcentaje de las formas de energía como la nuclear, hídrica y otros debe aumentar para satisfacer las crecientes necesidades energéticas globales.

La Fig. 2 muestra el comportamiento del precio del petróleo desde finales de los años cuarenta hasta el 2015 [23]. Puede apreciarse la dependencia del precio del crudo con respecto a varios acontecimientos de orden mundial como la guerra Irán / Iraq a finales de los setenta y la guerra del golfo a principios de la década de los noventa. En el pico de principio de los años setenta se observa un notable aumento en el precio debido a la guerra del Yom Kippur, de Israel contra Egipto y Siria [24], razón por la cual se aumenta el interés por la extracción de los minerales radiactivos para producción de energía nucleoelectrica y se tienen grandes avances en la física e ingeniería asociadas con los reactores nucleares y las diferentes formas de energía para suplir el embargo de crudo producto de ésta guerra.

La Fig. 3 muestra los precios de uranio en toda su historia [25,26] desde 1950 hasta noviembre de 2015. Se observa un primer aumento, a casi 30 USD por libra, en los años sesenta debido a la aparición de la energía nuclear como forma de energía capaz de ser controlada por el hombre a nivel industrial. Al comienzo del siglo XXI, la preocupación por el calentamiento global aumenta y se plantea que la energía nuclear puede ser una alternativa de energía limpia para los retos del nuevo siglo y por esta razón en el 2004 se observa el aumento del valor de este mineral en el mundo que, sumado a la inundación de la mina Cigar Lake en Saskatchewan al oeste de Canadá [27] (la mayor fuente de uranio explotable del mundo), y el aumento en recursos de los programas nucleares de china e india, crea consecuentemente una inestabilidad mundial por el suministro de este mineral, incrementando

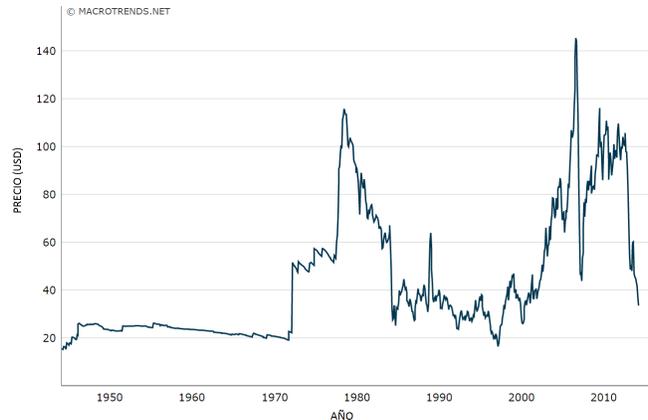


Figura 2. Variación de los precios del petróleo desde los años 50 hasta 2015
Fuente: Tomado de [23].

su precio hasta alcanzar un máximo en junio de 2007 con un valor histórico de 133.22 USD [25] con lo cual se crean nuevas empresas y se aumenta la explotación en las regiones ya evaluadas [28]. Ésta nueva sobreproducción trae como consecuencia la caída rápida hasta un valor de 40 USD con algunos altibajos hasta 2015 dado que la industria nuclear tarda mucho tiempo en establecer una nueva instalación; además, muchas de las centrales nucleares disponen de contratos de suministro a largo plazo cubriendo sus necesidades. Éste comportamiento económico se llamó “la burbuja de uranio del 2007” y es una de las burbujas más recordadas por su repentino auge y rápida caída [29].

3. El uranio como combustible nuclear

La energía nuclear es un componente esencial para cualquier estrategia de la humanidad en el orden de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles [30]. Si bien es cierto, el ^{235}U es un recurso limitado debido a que por su relación isotópica en la naturaleza hace necesario realizar un enriquecimiento (aumento en la relación isotópica) con respecto al isótopo ^{238}U , previo de la concentración de los óxidos de uranio de un mineral extraído, existen tecnologías modernas de mejoramiento y aprovechamiento energético para la conversión de ^{238}U que no es el combustible nuclear convencional, como las siguientes:

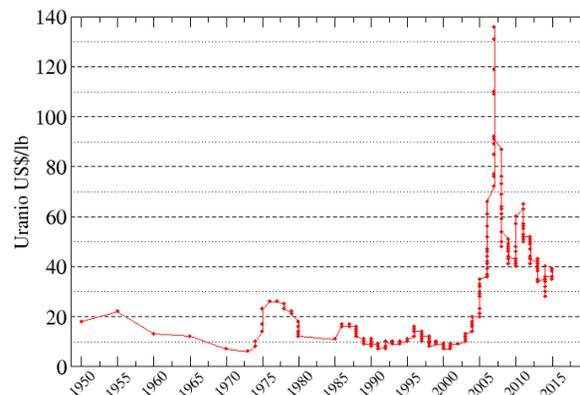


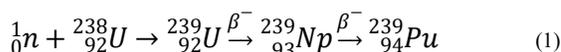
Figura 3. Precio internacional de uranio desde la década de los 50
Fuente: Datos tomados de [25,26].

Tabla 3.
Reactores nucleares en operación Vs. Reactores en construcción.

Reactores nucleares en operación	Centrales nucleares en construcción
442	66

Fuente: autores

1. Producción de ²³⁹Pu: El ²³⁸U es el isótopo del uranio más abundante que se encuentra en la naturaleza², no es fisil (material que puede ser fisionado por neutrones de cualquier energía), ni tampoco fisionable. Sin embargo, es un elemento fértil que lo convierte en un elemento que después de absorber neutrones puede producir un material fisil como se puede observar a continuación [6]:



Donde el ²³⁹Pu es un material fisil utilizado en muchas centrales nucleares.

2. Producción de energía en reactores tipo CANDU: Los reactores tipo CANDU (CANada Deuterium Uranium) utilizan como combustible el uranio natural y son reactores denominados de agua pesada presurizada los cuales usan D2O a altas presiones como refrigerante del sistema que actúa también como moderador (baja la energía cinética) de los neutrones. La carga y descarga del combustible se realiza durante la operación de la central y los valores de potencia nominal neta promedio son de 600 megavatios [31].

La Tabla 3 muestra el número de centrales nucleares en operación y las próximas a construirse (con corte a 29 de marzo de 2017). Se nota que las centrales en construcción corresponden a un 15 % de las centrales en operación indicando que la tendencia es hacia la energía nuclear; razón por la cual el interés por la adquisición de minerales con contenidos altos de uranio, forma de extracción y evaluación exacta de sus contenidos en lugares de fácil acceso es prioritario para las naciones que buscan disminuir la dependencia de combustibles fósiles [32].

Las tecnologías de última generación para la conversión del ²³⁸U a ²³⁹Pu y del ²³²Th a ²³³U extienden el uso de la energía nuclear varios siglos más [33], que unido al mejoramiento de los sistemas de gestión de desechos del combustible gastado hacen de ésta energía la mejor alternativa ante las crisis económicas y ambientales generadas por el uso y comercialización de petróleo, gas y carbón [33].

4. Distribución y extracción de uranio en el mundo

Las asociaciones minerales de uranio son muy variadas, tanto en composición principal (alto porcentaje) como a nivel de traza; razón por la cual existe gran variedad de minerales como se muestra en la Tabla 4 que son de interés industrial para la obtención de éste elemento, notándose que los minerales primarios son los de mayor interés debido al alto porcentaje de metal en la matriz geológica.

Tabla 4.
Principales minerales de uranio de uso industrial.

Minerales	Descripción
Uraninita	Es el más importante mineral de uranio. Se encuentra parcialmente oxidado y su composición real está entre UO ₂ y U ₃ O ₈ , posee impurezas de Th, Ra, Ce, Y, N, He, Ar
Pechblenda	Variación de uraninita con una estructura maciza y botroidal, grisácea o negro aterciopelado, opaca con raya gris-negra y casi tan dura como un feldeespato.
Cofinita	U(SiO ₄) _{1-x} (OH) _{4x} . Se encuentra en casi todos los tipos de yacimientos de uranio, forma complejos organometálicos con materia orgánica en el mineral.
Carnotita	K ₂ (UO ₂) ₂ (VO ₄) ₂ *3H ₂ O. Se caracteriza por su color amarillo, mate o terroso, estructura monoclinica, no fluoresce con la luz ultravioleta.
Autunita	Ca(UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂ *10-12 H ₂ O. Estructura tetragonal, brillo vítreo perlado, varía de amarillo limón a verde pálido. Se encuentra principalmente en la zona de oxidación y meteorización de la uraninita u otros minerales de uranio.
Torbernita y meta - torbernita	Cu(UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂ *8-12(H ₂ O). Se forma como producto de la alteración de la uraninita así como de otros minerales, es de color verde manzana a esmeralda

Fuente: Información tomada de [34,35]

Los métodos de extracción y concentración de los minerales de uranio en una mina dependen de su pureza y facilidad de acceso y se mencionan a continuación:

1. Minería a cielo abierto: La minería a cielo abierto es una explotación que se realiza en superficie en la cual los equipos de explotación convencionales deben modificarse en su blindaje debido a que se está extrayendo mineral radiactivo. Para minerales con contenido mayor a 1 % de U3O8 debe tenerse mayor precaución por las altas dosis de radiación γ asociadas [36]. Durante el almacenamiento y conservación del producto extraído deben monitorearse las áreas mediante mediciones de radiación gamma y contenidos de radón.
2. Minería subterránea: En éste tipo de minería deben realizarse los controles ocupacionales de ingesta de uranio a través de determinaciones de uranio en la sangre, orina y cabello de los Trabajadores Ocupacionalmente Expuestos (TOE) \cite{orina}. Para evitar éstos problemas existen métodos modernos robóticos de minería subterránea que evitan la entrada de los trabajadores [37].
3. ISL: La Lixiviación In - Situ consiste en la extracción del uranio (soluto) sobre un disolvente líquido formando una solución de lixiviación [37] en el depósito. Para éste caso la permeabilidad del solvente en el medio debe ser alta, limitando la metodología a areniscas y limos. Se requiere alrededor del perímetro, por encima y por debajo del depósito, una extensa gama de pozos de monitoreo para identificar cualquier desviación de la solución de lixiviación.
4. Lixiviación en pilas: La lixiviación en pilas o montones o de intercambio iónico es un nuevo proceso de extracción

² De hecho, el ²³⁸U es el isótopo más pesado de la corteza terrestre.

del mineral implementado en Estados Unidos [38] y utilizado para extraer uranio a partir de mineral proveniente de la minería a cielo abierto o subterránea en los molinos convencionales [38].

La Fig. 4 indica los países con mayor porcentaje de extracción de uranio, mostrando que el principal productor es Australia con el 31 % de la producción mundial que corresponde a 1673 mil toneladas de U_3O_8 , seguido de Kazajistán, Canadá, Federación Rusa y Nigeria. Cabe resaltar que Australia, concordante con la mayor producción, posee la mayor cantidad de reservas de uranio debido a que, en el período proterozoico, cuando se estaban formando los continentes, en ésta área se concentró la mayor parte de los minerales de uranio y que por diferentes procesos se redistribuyó por el mundo [39]. También puede notarse que Europa, con un gran número de centrales nucleares, no tiene producción significativa de uranio salvo Ucrania con el 2 %. En el lejano oriente, Corea y Japón, con buen uso de la energía nuclear, no cuenta con producción de uranio al igual que la India. África y América produce cada uno el 18 % del uranio mundial y en Colombia se cuenta con unas reservas interesantes de alrededor de 217 mil toneladas de U, asociados principalmente con roca fosfórica (Caldas, Santander, Norte de Santander y Cundinamarca) y 7655 toneladas de U en minerales que contienen un 0,11% de U_3O_8 (0,09% U) del Proyecto Berlín, el cual se explicará en el numeral 5 [40].

5. Actualidad de la minería de uranio en Colombia

La única explotación comercial de uranio en Colombia corresponde al proyecto Berlín ubicado en el municipio de Samaná (Caldas), explorado previamente por la compañía francesa Minatome entre 1978 y 1981 (hoy Areva). Este proyecto está actualmente gerenciado por Gaia Energy Ltd subsidiaria de U3O8 Corp que es una compañía de exploración con sede en Ontario (Canadá) con intereses en recursos de uranio y productos asociados en Sudamérica entre ellos, la estratégica región del Roraima entre Venezuela y Brasil con derechos exclusivos en un área de aproximadamente 1,3 millones de hectáreas.

Los reportes de concentración radiométrica, metalúrgica y química sobre muestras del proyecto Berlín e incluso datos de duplicados enviados a la Organización Australiana de Ciencia



Figura 4. Países con mayor porcentaje de extracción de uranio. Fuente: Tomado de [39].

Tabla 5.

Valores de las zanjas de la parte norte del proyecto Berlín.

Ancho de Zanja (m)	U_3O_8	V_2O_5	P_2O_5	Mo	Ag	Y_2O_3
	Lbs / ton	%	%	mg / kg	mg / kg	mg / kg
0,9	156	0,63	10,1	102	1,1	448
1,4	179	0,54	5,6	58	5,0	436
2,5	408	0,74	18,1	35	1,1	1110
1,2	425	0,67	2,1	92	3,7	904
2,1	450	1,12	11,2	317	0,6	2317

Fuente: Tomada de [42] y adaptada por el autor.

y Tecnología Nuclear (ANSTO) para verificación imparcial de la información indican que el proyecto Berlín [41] ofrece una mezcla de productos de alto valor agregado principalmente uranio, vanadio y fosfatos pero también están presentes otros metales como itrio, molibdeno y plata como se muestra en la Tabla 5 en varias zonas de la parte norte de la anomalía, razón por la cual se considera que las posibilidades de éxito de este proyecto son muy altas dado que la comercialización de los minerales asociados al uranio deja a éste como ganancia neta.

Actualmente en éste proyecto existen 5 títulos vigentes de exploración, explotación de minerales y concentrados de uranio y torio, todos de la empresa Gaia Energy Ltd sobre un área de 12665 hectáreas y con unos recursos inferidos de 8100 ton e indicados de 600 ton con una concentración de 0,11 % de U_3O_8 [41]. El valor de las regalías por ésta explotación son 350.000 USD al año aproximadamente que solo equivale a la explotación de uranio dejando fuera los otros metales.

6. Conclusiones

Los avances tecnológicos permiten el aprovechamiento de todo el uranio proveniente de ámbitos geológicos que poseen ésta ocurrencia incrementando la generación de energía por varios siglos más que si sólo se usara el combustible convencional.

El riesgo de incidente o accidente para el ser humano o el medio ambiente ha disminuido considerablemente a tal punto de que debe considerarse a la energía nuclear como segura y confiable para abastecer las necesidades energéticas del presente siglo y venideros por lo aprendido de los accidentes nucleares pasados pasando de la fobia nuclear a la nucleofilia.

Referencias

- [1] Álvarez Álvarez, M.C., Yacimientos y obtención de uranio. España: Universidad de Oviedo, 1995.
- [2] Barquín, J. Energía: técnica, economía y sociedad. España: Univ Pontificia Comillas, 2004.
- [3] Biography of German Chemist Martin Heinrich Klaproth [date of reference November 17th of 2017]. Available at: <https://global.britannica.com/biography/Martin-Heinrich-Klaproth>.
- [4] Biography of William Herschel [date of reference November 17th of 2017]. Available at: <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/h/herschel.htm>.
- [5] Beitrage zur chemischen Kenntnis der Mineralkoper [date of reference November 17th of 2017]. Available at: <http://www.goodreads.com/quotes/tag/sir-william-herschel>.

- [6] Tanarro, S. A., Tanarro, S. O., Diccionario Inglés – Español sobre tecnología nuclear. España. Tecnatom, 2008.
- [7] Ahumada, J., Informe de labores IAN 1989, Colombia, Instituto de Asuntos Nucleares, Colombia, 1989, 48 P.
- [8] Historia del Servicio Geológico Colombiano [date of reference November 17th of 2017]. Available at: <http://www.sgc.gov.co/Nosotros/Historia.aspx>.
- [9] Minería en Colombia [date of reference May 5th of 2014]. Available at: <http://www.minminas.gov.co/minminasindex.jsp=cargaHome=3idcategoría=43idsubcategoría=174>.
- [10] Biography of Ricardo Lleras Codazzi [date of reference June 24th of 2014]. Available at: <http://enciclopediauniversal.esacademic.com/24547/Ricardo-Lleras-Codazzi#sel=>
- [11] Municipio de California Santander [date of reference June 8th of 2017]. Available at: <http://www.california-santander.gov.co/territorios.shtml?apc=bbxx-1-\&x=2091458>.
- [12] Minería de la antigua empresa Anaconda Cooper [date of reference June 24th of 2017]. Available at: <http://socialarchive.iath.virginia.edu/xtf/view?docId=anaconda-copper-mining-company-cr.xml>.
- [13] Sears, F. W., Zemansky, M. W., Física. Estados Unidos. Aguilar S.A. de Ediciones. 1966
- [14] Nuclear Basics in world nuclear web page [date of reference November 17th of 2017]. Available at: <http://www.world-nuclear.org/Nuclear Basics/>
- [15] Facts about nuclear chemistry web page [date of reference November 15th of 2017]. Available at: <https://www.dosomething.org/facts/11-facts-about-nuclear-energy>
- [16] Various fuels in world nuclear web page [date of reference November 17th of 2016]. Available at: <http://www.world-nuclear.org/info/Facts & various-fuels/>
- [17] Renewable energy world web page [date of reference September 4th of 2016]. Available at: <http://www.renewableenergyworld.com/hydrogen/tech.html>
- [18] Overview in nuclear fuel cycle in world nuclear web page [date of reference November 17th of 2016]. Available at: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear Fuel-Cycle/Introduction/Nuclear-Fuel-Cycle-Overview/>
- [19] Rothwell, G. Market Power in Uranium Enrichment. Science & Global Security, 17, pp. 132-154, 2009. DOI: 10.1080/08929880903423586
- [20] Organización Mundial de la Salud, Radiaciones Ionizantes: efectos en la salud y medidas de Protección, Nota descriptiva No. 371, 2012.
- [21] Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD. Comparing Nuclear Accident Risks with Those from Other Energy Sources. ISBN 978-92-64-99122-4. Belgium, 2010.
- [22] International Energy Agency, IEA statistics, coal information with 2011 data. 2012.
- [23] Crude Oil Price history chart [date of reference January 20th of 2016]. Available at: <http://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart>
- [24] Herzog, C. La Guerra del Yom Kippur. Historia inédita. ISBN: 9788496364073. 2004
- [25] Mercadería de uranio [date of reference January 5th of 2016]. Available at: <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=uranio&meses=360>
- [26] Neff T., The International Uranium Market, MIT Energy Laboratory Report, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1980.
- [27] Complete draining of Cigar Lake [date of reference July 6th of 2017]. Available at: <http://www.world-nuclear-news.org/ENF-Cameco\ completes\ draining\ of\ Cigar\ Lake-1202104.html>
- [28] Las 10 burbujas económicas más extrañas [date of reference January 29th of 2017]. Available at: <http://www.muypymes.com/2011/03/24/las-10-burbujas-economicas-mas-extranas>
- [29] Kennard, F. and Hanne, A., Boom & Bust: A Look at Economic Bubbles, USA, Ilustrada, 2015. ISBN: 9781329231689
- [30] The Nuclear Energy by Walt Patterson, in Walt Patterson web page [date of reference December 21th of 2017]. Available at: <http://www.waltpatterson.org/npspanish.pdf>
- [31] CANDU reactor type web page [date of reference March 8th of 2016]. Available at: <http://www.na-sa.com.ar/centrales/embalse>
- [32] Plans for new reactors world wide [date of reference January 9th of 2017]. Available at: <http://www.world-nuclear.org/info/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide/>
- [33] News report of march 2004 Chemical and Engineering News, USA, 2004, 4 P.
- [34] Gacetilla del área de minas, Universidad Nacional del Jujuy, Serie D: Mineralogía descriptiva, España, 4 - 5 P.
- [35] Klein, C., Hurlbut, C., Manual de Mineralogía. España: Reverté S.A., 2003.
- [36] Secretaría de energía y economía, Guía de procedimientos mineros. México, 2013.
- [37] International Atomic Energy Agency. IAEA, Methods of exploration of different types of uranium deposits. IAEA-TECDOC-1174, Viena, 2000.
- [38] Heap Leach ion exchange [date of reference October 30th of 2017]. Available at: <http://www.nrc.gov/materials/uranium-recovery/extraction-methods/heap-leach-ion-exchange.html>
- [39] Cuney, M., Kyser, K. Recent and no-so-recent developments in uranium deposits and implications for Exploration. Economic Geology, 104 (4), pp. 271, 2005. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.104.4.600>
- [40] International Atomic Energy Agency. IAEA. Uranium: Resources, Production and Demand (The Red Book), NEA No. 7301, Austria, 2016, 546 P.
- [41] de Klerk, L., Niemann, P., Miller, P., Véliz, P., Corley, D., Preliminary economic assessment on the berlin deposit - Colombia, Australia, Tenova Mining & Minerals (Australia) Pty Ltd. 2013, 408 P.
- [42] Valores elementales proyecto Berlin [date of reference February 10th of 2017]. Available at: <http://www.u3o8corp.com/main1.aspx?id=111>

A.F. Porras-Ríos, es Químico de la Universidad Nacional de Colombia en 2013, MSc. en Ciencias - Química en 2017, trabaja en el Laboratorio de Investigación en Combustible y Energía – LICE del Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia desde 2012. También trabaja en el Grupo de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares y Geocronológicas de la Dirección de Asuntos Nucleares del Servicio Geológico Colombiano desde 2013 y vinculado al grupo de investigación “Asuntos Nucleares”, avalado y clasificado por COLCIENCIAS. Experiencia profesional relacionada con técnicas y tecnologías nucleares e isotópicas para caracterización de materiales de origen geológico y determinación de isótopos estables en agua líquida. ORCID: 0000-0001-8251-2787

J.J. Díaz-Velásquez, es Ingeniero Químico de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá en 1981, MSc. en Ingeniería Química en 1990 y Dr. en Ingeniería en el 2004. Experiencia profesional relacionada con la Empresa de Energía de Bogotá en la cual laboró como ingeniero en la División de Proyectos Termoelectrónicos, luego como profesional especializado de la División de Suministros y profesional especializado de la Unidad de Expansión y Desarrollo y la Dirección de Planeación desde mayo de 1982 hasta diciembre de 1993. Premio Nacional de Ingeniería Química de Colombia-1991 otorgado por el Consejo Profesional de Ingeniería Química de Colombia y primer puesto en el "Premio Mariano Ospina Pérez 2007-2008, Biocombustibles un tema de interés mundial". Ingresó a la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, como profesor asistente de medio tiempo, en el Departamento de Química en 1994 y actualmente profesor titular en dedicación exclusiva y con tenencia de cargo. ORCID: 0000-0003-0134-0608