

Disponibilidad y retos actuales de los recursos minerales para la sociedad

J. G. Price⁽¹⁾ y J. A. Espí⁽²⁾

(1) State Geologist Emeritus Nevada Bureau of Mines and Geology University of Nevada, Reno, NV 89557-0178 United States of America.
jprice@unr.edu

(2) Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Ingenieros de Minas y Energía. Ríos Rosas 21, 28003 Madrid
joseantonio.espi@upm.es

RESUMEN

La evolución de la producción mundial de minerales y el uso creciente de estos recursos predicen un brillante futuro para todas las actividades ligadas a su exploración, extracción y transformación, aunque ello también signifique contar con la aparición de importantes retos. A corto y medio plazo, la demanda de los recursos minerales es probable que siga siendo alta e incluso crezca, con el fin de satisfacer el aumento de la población mundial y de los niveles de vida de la población que se incorpora. Los desafíos más significativos incluyen el satisfacer la demanda futura con nuevos descubrimientos y el desarrollo de los recursos ya descubiertos, pero todo ello dentro de una visión ambiental, social y económicamente sostenible. En una perspectiva histórica de los últimos 50 años, dentro de la búsqueda de nuevos distritos mineros, el descubrimiento de nuevos tipos de yacimientos minerales y el uso de las nuevas tecnologías en la exploración, sugiere que el mundo no se quedará sin recursos minerales. Es probable que la sustitución y reciclado jueguen cada vez más importantes funciones con destino a satisfacer la demanda mundial de minerales. Las nuevas tecnologías aplicadas a la minería marina ayudarán a añadir estos nuevos recursos a la producción básica. También, las perspectivas históricas sugieren que continuarán los desarreglos en la minería y que los aspectos ambientales, de salud y de seguridad serán factores importantes en la decisión de dónde se encontrarán las minas del futuro y de cómo van a ser operadas.

Palabras clave: demanda mineral, materias primas minerales, producción mineral, suministro mineral, uso mineral.

Availability of mineral resources for society

ABSTRACT

Trends in global mineral production and expanding uses of mineral resources foretell a bright future, although with significant challenges, for exploration and development. Demand for mineral resources is likely to remain high and grow to meet increases in world population and standards of living. Significant challenges include meeting future demand with new discoveries and developing the resources in environmentally, socially, and economically sustainable ways. A historical perspective from the last 50 years on finding new mineral districts, discovering new types of ore deposits, and using new technologies in exploration suggests that the world will not run out of mineral resources. It is likely that substitution and recycling will play increasingly major roles in meeting global mineral demand. New technologies for ocean mining will help add to the resource base. Historical perspectives also suggest that mining scams will continue, and environmental, health, and safety concerns will be major factors in deciding where future mines will be located and how they will be operated.

Key words: mineral demand, mineral production, mineral resources, mineral supplies, mineral use.

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Trends in global mineral production and expanding uses of mineral resources foretell a bright future, although with significant challenges, for exploration and development. This paper is an expansion and update of the topic by Price (2013). In the short and medium term, demand for mineral resources is likely to remain high and grow to meet increases in world population and standards of living. Significant challenges include meeting

future demand with new discoveries and developing the resources in environmentally, socially, and economically sustainable ways. A historical perspective from the last 50 years on finding new mineral districts, discovering new types of ore deposits, and using new technologies in exploration suggests that the world will not run out of mineral resources. It is likely that substitution and recycling will play increasingly major roles in meeting global mineral demand. New technologies for ocean mining will help add to the resource base. Environmental, health, and safety concerns will be major factors in deciding where future mines will be located and how they will be operated.

Historical production of iron, copper, and gold illustrate that global demand for mineral resources is at an all-time high. The rate of production of iron ore has outpaced population growth (Fig. 1). Much of the recent rise in iron ore production has been fueled by extraordinary economic growth in China. Not only is China now mining more iron ore than any other country (Fig. 2), it is importing much of the ore produced in Australia and Brazil.

If mineral resources were more or less evenly distributed geographically, China would be expected to produce 19% of the world's mineral resources in line with its 19% of world population. However, mineral resources are not distributed geographically evenly. For example, China holds approximately 50% of the world's reserves of rare earth elements (lanthanides). Whilst China is a dominant producer of many commodities (Fig.3), it is not necessarily because it is better endowed in mineral resources than other countries. China is producing its domestic resources rapidly, and it must import much of the chromium, cobalt, copper, nickel, and platinum-group elements that it needs. The uneven distribution of mineral resources places other countries at the forefront for these elements.

Global annual copper production reached an all-time high of 17.0 million tonnes in 2012 (Figure 4). To put this amount into perspective, it is about the same as the total production from the Bingham Canyon copper mine (Fig. 5), 17.2 million tonnes throughout its history from 1906 to 2011, to date the world's largest copper mine. Similar to iron, global copper production increased 18-fold from 1911 to 2011 (Fig. 4). Per capita consumption increased by a factor of 4.6 during this period, another indication of the improving average standard of living, as more people throughout the world have electricity, refrigerators, cars, and other conveniences that need copper.

Chile has been the leading copper-producing country since 1982 (Fig. 6). Its production supplies much of the global demand, including imports to China. Although China's production has risen dramatically in recent years, it currently produces only 7% of the world's total. As a result, Chinese companies are aggressively making deals in other parts of the world to secure copper resources for the future.

Global gold production also reached an all-time high in 2012 (Fig. 7). Although gold has many industrial uses (e.g., in electrical wiring in computers and cell phones, as a heat reflector and in dentistry), its major use is as a substitute for money, either as bullion or, in much of the world, jewellery. From 1910 to 2012, per capita production has oscillated somewhat (by a maximum factor of 2.4) with the global economy and world events; global production of gold has more or less followed the rise in world population.

The remarkable change in global gold production is the recent dominance of China as the world's leading producer (Fig. 8). For over 100 years, South Africa's Witwatersrand gold deposits dominated global production, but China captured the lead in 2007 and has steadily increased its production since then.

A clear challenge for the future is to meet global demand for mineral resources such as iron, copper, and gold. Exploration geologists, geochemists, and geophysicists (collectively, "geos") need to find, and engineers need to develop and mine, huge resources to meet current demand. Clearly "geos," with their knowledge of ore systems, tectonic environments, regional geology, and potential environmental consequences will be the leaders in discovering new deposits.

Whereas nearly every naturally occurring element has several significant uses today, 80 years ago far fewer elements were widely used (Fig. 9). As uses and demand for various mineral commodities have changed, so too have prices. Other factors affecting prices include availability (measured crudely by crustal abundance), geological rarity, costs of processing, and by-product potential. In a broad sense, as one would expect, there is a negative correlation between the price of commodities and crustal abundance (Fig. 10). More abundant elements are generally less expensive.

Are there signs of future shortages in mineral resources? In recent years global copper reserves have remained constant, despite record production. According to Rio Tinto (2010), the 16 largest copper mines account for approximately 44% of world production, and the major copper deposits contain 77% of the known resources (1 950 million tonnes). Ore grades generally decline over time, forcing the producing companies to mine larger volumes of ore to maintain metal production targets. The declining copper grade is reflected in geographic changes in production. During the 19th and well into the 20th century, high-grade massive-sulphide, vein, and sediment-hosted copper deposits in Spain and other parts of Western Europe, Africa, and eastern Canada accounted for much of the production, whereas near the end of the 1900s and today, porphyry copper deposits, particularly those in the Andes, with their large volumes and lower grades, dominate global production.

Mineral resources have generally not experienced production peaks followed by a long-term decline, as illustrated by global copper and gold (Figs. 4 and 7) or domestic U.S. copper (Fig. 11) and gold (Fig. 12) production. When technology changes, however, mineral production peaks do occur, as illustrated by flint production (Fig. 13).

Global mineral exploration decreased in the late 1990s and early 2000s because of low metal prices. Because there can be up to 10 years needed to bring a newly discovered deposit into production, there may be short-term supply shortages for some metals.

Discoveries of ore deposits in new areas (such as the Ekati diamond deposit in Canada, Fig. 14), the recognition of new types of deposits (Table 1; Figs. 15 and 16), and new ideas and tools for exploration have helped increase the ore reserves needed to meet global demand.

Environmental, health, and safety concerns are integral to modern mining. Although there have been modern instances of environmental and safety mistakes by the mining industry, the industry and governments continue to make efforts to minimize damage, injuries, and loss of life. Most environmental problems associated with mining can be addressed successfully if the deposit is economically robust enough to allow for proper mitigation. Governments provide the regulations for worker safety and environmental protection, and major companies are committed to safety and environmental protection.

Industry and governmental groups have developed principles of sustainable development that are specific to mining (Table 2). Considerable progress has been made worldwide in sustainable development, although conflicts between industry and opposition groups do arise. For the most part, governments, industry groups, individual companies, and non-governmental organizations representing local populations have been able to agree on the environmental and economic aspects of a sustainable development, but some of the social and cultural concerns have been more difficult to address. Success has been achieved through increasing the level of active participation with local stakeholders in the development of mining operations.

Historical perspectives suggest that mining scams will continue, as they have in the past (Fig. 17). In addition, the lure of gold and diamonds has kept artisanal mining alive for centuries. Although contributing a small amount to global production, sometimes the consequences of this activity are unacceptable in modern society (Figs. 18 and 19).

The recognition of the importance of raw materials by the European Commission has resulted in a renewed focus on mineral resources in Europe. Key components of the raw material strategy are ensuring access from international markets, fostering sustainable supplies of raw materials from European sources, and promoting resource efficiency through recycling.

Tendencias en la producción de minerales

Con una población mundial en constante aumento y con cada vez mejores estándares de vida, la demanda de productos minerales y de energía resulta la más alta de todos los tiempos pasados e incluso se espera que aumente a corto plazo. Tres productos básicos ilustran este punto: el hierro (utilizado principalmente para la producción de acero en la construc-

ción de edificios, en la realización de infraestructuras, en los vehículos y en la fabricación de maquinaria), el cobre (utilizado fundamentalmente para conducir la electricidad) y el oro (de uso principal como un sustituto del dinero).

La producción de mineral de hierro ha estado creciendo de manera más o menos constante, mientras la población mundial se ha multiplicado, sobre todo en el último siglo (Fig. 1). Sin embargo, la tasa de

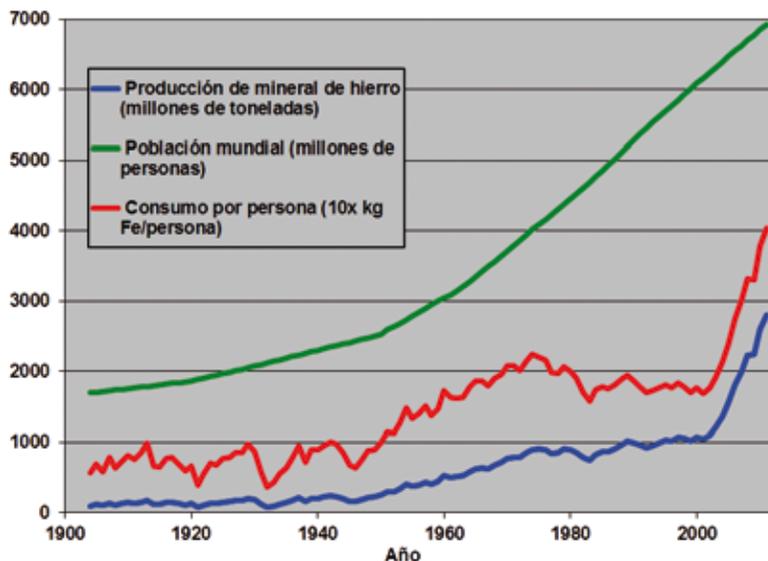


Figura 1. Producción mundial de mineral de hierro, 1904-2012 (datos de producción tomados del U.S. Geological Survey y del U.S. Bureau of Mines; los datos de población pertenecen a la U.S. Central Intelligence Agency). **Figure 1.** Annual global iron production, 1904-2011 (production data from U.S. Geological Survey and U.S. Bureau of Mines; population data from CIA).

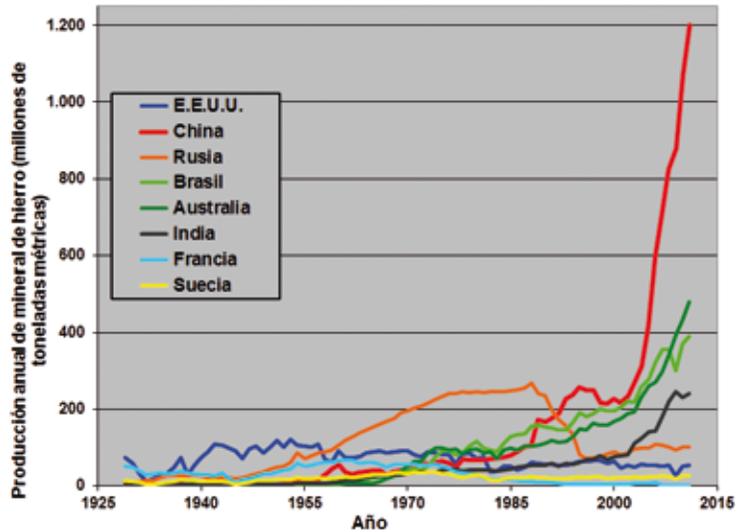


Figura 2. Producción anual de mineral de hierro presentada por países, 1929-2012 (datos del U.S. Geological Survey y del U.S. Bureau of Mines).

Figure 2. Annual iron production by major producing countries, 1929–2011 (data from U.S. Geological Survey and U.S. Bureau of Mines)

producción ha superado el crecimiento de la población. De 1911 a 2011, la población mundial aumentó en un factor de 3.9, mientras que la producción se incrementó en un factor de 21. El consumo per cápita, que se define como la producción global dividida por la población mundial, se ha incrementado en ese mismo periodo de 100 años en un factor de 5.4.

Gran parte del reciente aumento de la producción de mineral de hierro ha sido impulsado por el extraordinario crecimiento económico en China.

Ahora no sólo es China el principal país productor de mineral de hierro, sino que es el mayor importador de este mineral, que procede (Fig. 2) en su mayoría de Australia y Brasil, dos países que han experimentado recientes aumentos en la producción de este mineral. India también ha visto como la producción de mineral

de hierro aumentaba drásticamente a la par que su crecimiento económico.

La producción histórica de mineral de hierro por país (Fig. 2) también ilustra los acontecimientos más importantes acaecidos en el mundo. La producción de hierro de EE.UU. se ha reducido significativamente desde 1930 hasta cerca del comienzo de la Segunda Guerra Mundial. Después, los EE.UU. dominaron la producción mundial en la inmediata posguerra, pero fueron alcanzados por la Unión Soviética (Rusia en la Fig. 2), en 1958. El auge económico de China se inició a mediados de 1980 y aumentó drásticamente alrededor de 2002, como lo demuestra la producción de mineral de hierro chino.

Si los recursos minerales estuviesen más o menos uniformemente distribuidos por la geografía de

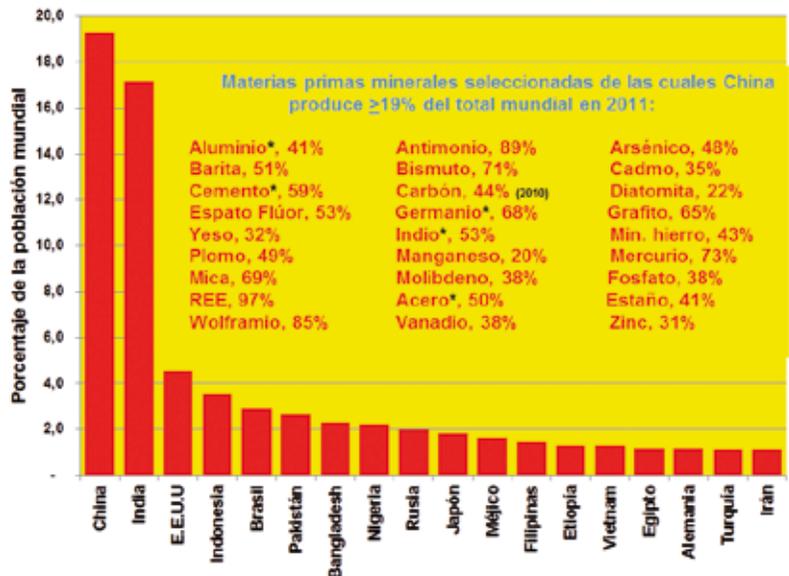


Figura 3. Porcentajes de la producción mundial de metales seleccionados, según los países más habitados y China (datos del U.S. Geological Survey, U.S. Department of Energy, y de la U.S. Central Intelligence Agency).

Figure 3. Most populous countries and China's percentage of global production for selected commodities (data from U.S. Geological Survey, U.S. Department of Energy, and U.S. Central Intelligence Agency).

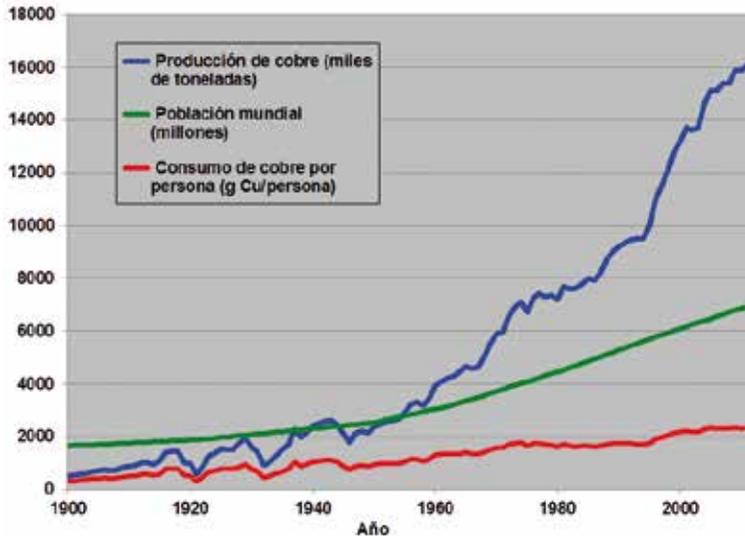


Figura 4. Producción mundial de cobre, 1900-2012 (datos de producción tomados del U.S. Geological Survey y del U.S. Bureau of Mines; datos de población tomados de la U.S. Central Intelligence Agency).

Figure 4. Annual global copper production, 1900–2011 (production data from U.S. Geological Survey and U.S. Bureau of Mines; population data from U.S. Central Intelligence Agency).

todo el mundo, se podría esperar que China produjese aproximadamente el 19% de los recursos totales, de acuerdo con su 19% de la población mundial. Sin embargo, los recursos minerales no se distribuyen geográficamente de manera uniforme. Por ejemplo, en los últimos años, China ha producido el 97% de los elementos de tierras raras (lantánidos) y posee aproximadamente el 50% de las reservas mundiales de estos escasos metales (EE.UU., Departamento de Interior, 2012). Si bien China es un productor dominante de muchos productos básicos (Fig. 3), no lo es necesariamente porque se encuentre mejor dotada en recursos minerales que otros países. China está desarrollando sus recursos internos con rapidez, pero debe importar gran parte del cromo, cobalto, cobre, níquel y platínidos que necesita para su economía en crecimiento.

La desigual distribución de los recursos minerales pone en primera fila a otros países (Kazajistán y Sudáfrica para el cromo, la República Democrática del Congo para el cobalto y cobre; cobre para Chile; Rusia; Indonesia; Filipinas; Canadá y Australia para el níquel, África del Sur y Rusia para el platino y el paladio).

La producción mundial anual de cobre alcanzó un máximo histórico de 17 millones de toneladas en 2012 (Fig. 4).

Para poner esta cifra en perspectiva, esta cantidad es semejante a la producción total de la mina de cobre Bingham Canyon (Fig. 5), es decir, 17.2 millones de toneladas en toda su historia, desde 1906 hasta 2011 (Rio Tinto, 2012a). Es hasta la fecha la mina de cobre más grande del mundo.

Al igual que el hierro, la producción mundial de cobre aumentó 18 veces desde 1911 hasta 2011 (Fig. 4). El

consumo per cápita se incrementó en un factor de 4,6 durante este período. Esto es otro indicio de la mejora del nivel de vida promedio, a medida que más personas en todo el mundo cuentan con electricidad, refrigeradores, automóviles y otras comodidades que necesitan cobre.

Chile ha sido el principal país productor de cobre desde 1982 (Fig. 6). Su producción se alimenta en



Figura 5. Fotografía aérea de la mina Bingham Canyon, Utah (U.S. Geological Survey, 2012). La corta posee aproximadamente 4.4 km de ancho y 1.2 km de profundidad (Rio Tinto, 2009).

Figure 5. Aerial photograph of the footprint of the Bingham Canyon mine, Utah (source: U.S. Geological Survey, 2012). The mine is currently ~4.4 km wide and 1.2 km deep (Rio Tinto, 2009).

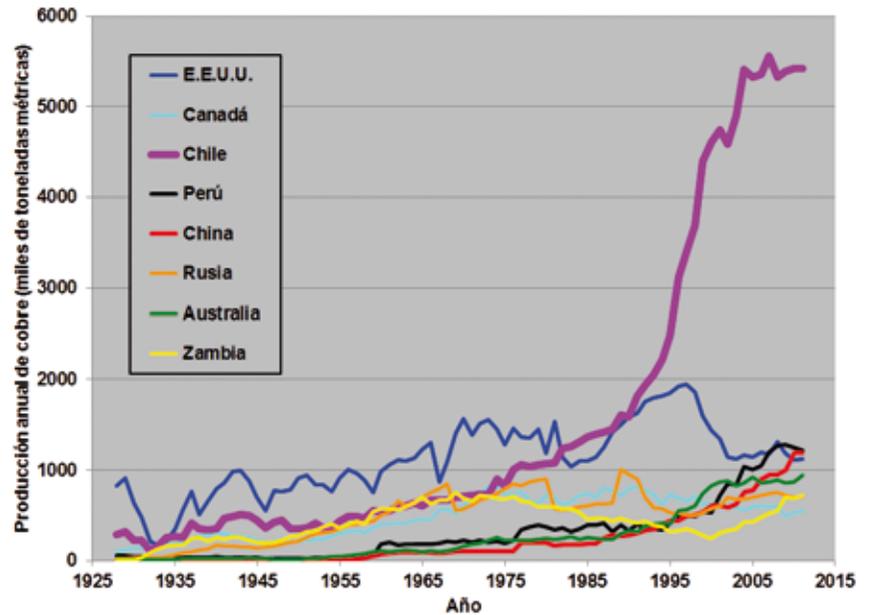


Figura 6. Producción anual de cobre de los principales países productores, 1928-2012 (datos del U.S. Geological Survey y del U.S. Bureau of Mines).

Figure 6. Annual copper production by major producing countries, 1928–2011 (data from U.S. Geological Survey and U.S. Bureau of Mines).

gran parte de la demanda mundial, incluidas las importaciones de China.

Aunque la producción de China se ha incrementado sustancialmente en los últimos años, produce en la actualidad tan sólo el 7% del total mundial. Como resultado, las empresas chinas están haciendo ofertas agresivas en otras partes del mundo para asegurar sus recursos.

La producción mundial de oro también alcanzó un máximo histórico en 2012 (Fig. 7). Aunque el oro posee muchos usos industriales (por ejemplo, en el cableado eléctrico en ordenadores y teléfonos móviles, como un

reflector de calor, y en odontología), su uso principal se refiere a que actúa como un sustituto del dinero, ya sea como lingotes o, en gran parte del mundo, como joyas.

De 1910 a 2011, la producción per cápita ha oscilado un poco (en un factor máximo de 2.4) con la economía global y los acontecimientos mundiales. Así, la producción mundial de oro ha seguido más o menos el aumento de la población mundial. El cambio notable en la producción mundial de oro se ha producido con el dominio reciente de China como principal productor (Fig. 8). Desde hace más de 100 años, los yacimientos de oro de Witwatersrand de Sudáfrica

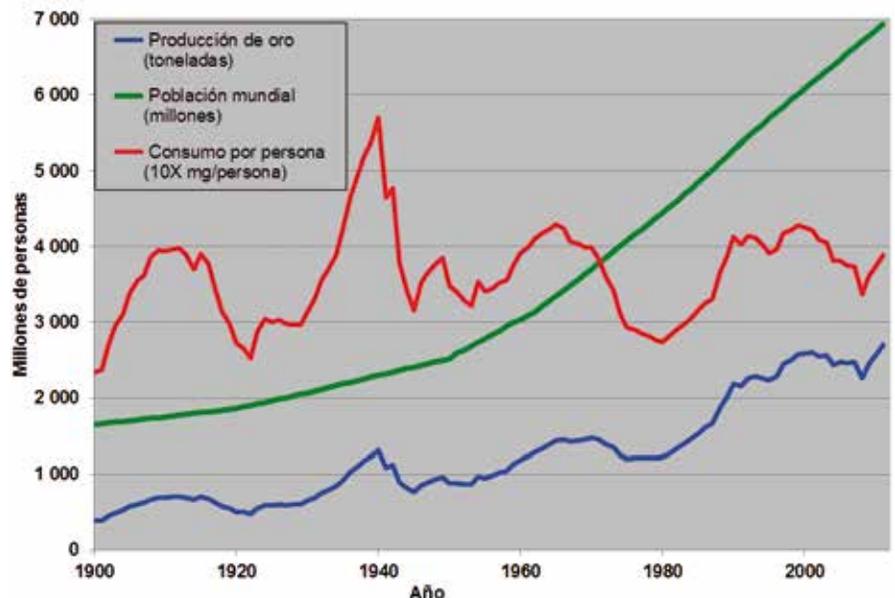


Figura 7. Producción mundial de oro, 1900-2012 (los datos de producción son del U.S. Geological Survey y del U.S. Bureau of Mines; los datos de población proceden de la CIA).

Figure 7. Annual global gold production, 1900–2011 (production data from U.S. Geological Survey and U.S. Bureau of Mines; population data from the U.S. Central Intelligence Agency).

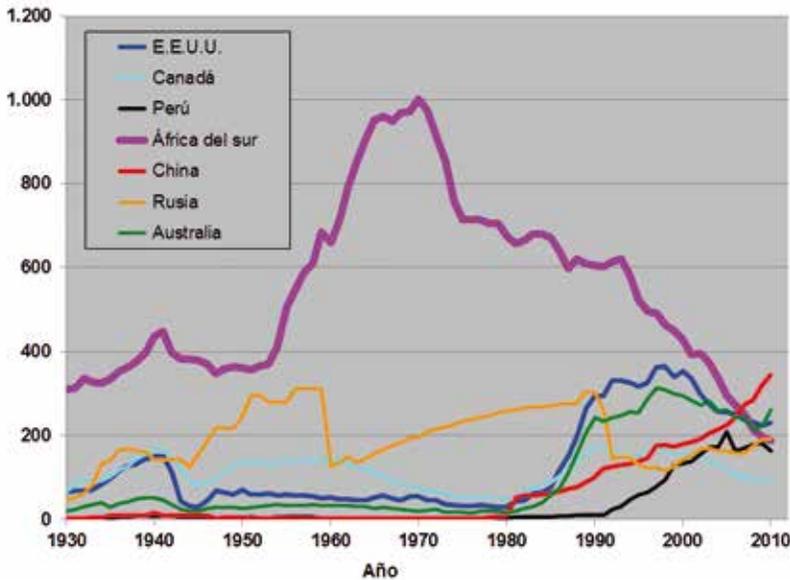


Figura 8. Producción anual de oro por países, 1930-2012 (datos del U.S. Geological Survey y del U.S. Bureau of Mines).

Figure 8. Annual gold production by major producing countries, 1930–2011 (data from U.S. Geological Survey and U.S. Bureau of Mines).

dominaban la producción mundial, pero China alcanzó el liderazgo en 2007 y ha aumentado su producción desde entonces.

Un claro desafío para el futuro es como satisfacer la demanda mundial de recursos minerales tales como el hierro, cobre y oro. Geólogos de exploración, geoquímicos y geofísicos (colectivamente, “geos”) tienen que encontrar nuevos recursos, y los ingenieros deben desarrollarlos, de tal forma que satisfagan la demanda actual (por ejemplo, el equivalente a un depósito de cobre del tamaño de Bingham Canyon cada año). Claramente, los “geos”, con su conocimiento de los sistemas de mineralizaciones, los ambientes tectónicos, la geología regional y las posibles consecuencias ambientales, serán los líderes en el descubrimiento de nuevos yacimientos.

Expansión del empleo de los recursos minerales

Considerando que casi todos los elementos de origen natural hoy en día tienen varios usos importantes, sin embargo, hace 80 años se utilizaban muchos menos elementos (Fig. 9).

En 1932, durante la Gran Depresión, la producción de minerales y la actividad industrial en los Estados Unidos había caído en picado, con relación al auge de los años posteriores a la Primera Guerra Mundial. En ese momento, el uranio y las tierras raras tenían usos de menor importancia, y el U.S. Bureau of Mines no realizaba el seguimiento de la producción o el uso de elementos tales como el litio, galio, germanio, renio, u otros varios. El aumento de actividad se incrementó hacia el año 1952, en los años de auge económico

después de la Segunda Guerra Mundial y durante la Guerra de Corea.

Las nuevas tecnologías, incluidas diversas aplicaciones de las tierras raras, el litio y el galio, se encontraban creando una demanda de más elementos. En 2012, prácticamente todos los elementos presentes en la naturaleza estaban siendo utilizados, aunque las aplicaciones primarias han cambiado con el tiempo. Por ejemplo, a finales de 1920 y principios de 1930, el mercurio se utilizaba ampliamente en farmacia y en la industria química, en la fabricación de detonadores y municiones, termómetros, aparatos electrónicos, la producción de tejidos (aunque la mercuriosis ya fuera reconocida en ese momento) y, en cantidades limitadas, se utilizaba en calderas para generación de electricidad. En 1952, el mercurio se usaba en electrónica, incluidos los termómetros, los pesticidas, la producción industrial de cloro y sosa cáustica, los medicamentos y la amalgama dental. Hoy día, debido al reconocimiento de los peligros de la inhalación del mercurio, su uso en los Estados Unidos y Europa se ha reducido considerablemente, con aplicaciones primarias en la iluminación y la producción de cloro y sosa cáustica. También continúa utilizándose por los mineros de oro artesanales en muchos países no desarrollados.

De la misma manera que los usos y la demanda de diversos productos minerales han cambiado, también lo han hecho los precios. Otros factores que afectan los precios incluyen su disponibilidad (mide a grandes rasgos por la abundancia de la corteza), la rareza geológica, los costos de procesamiento y su potencial como subproducto. En un sentido amplio, como era de esperar, existe una correlación negativa entre

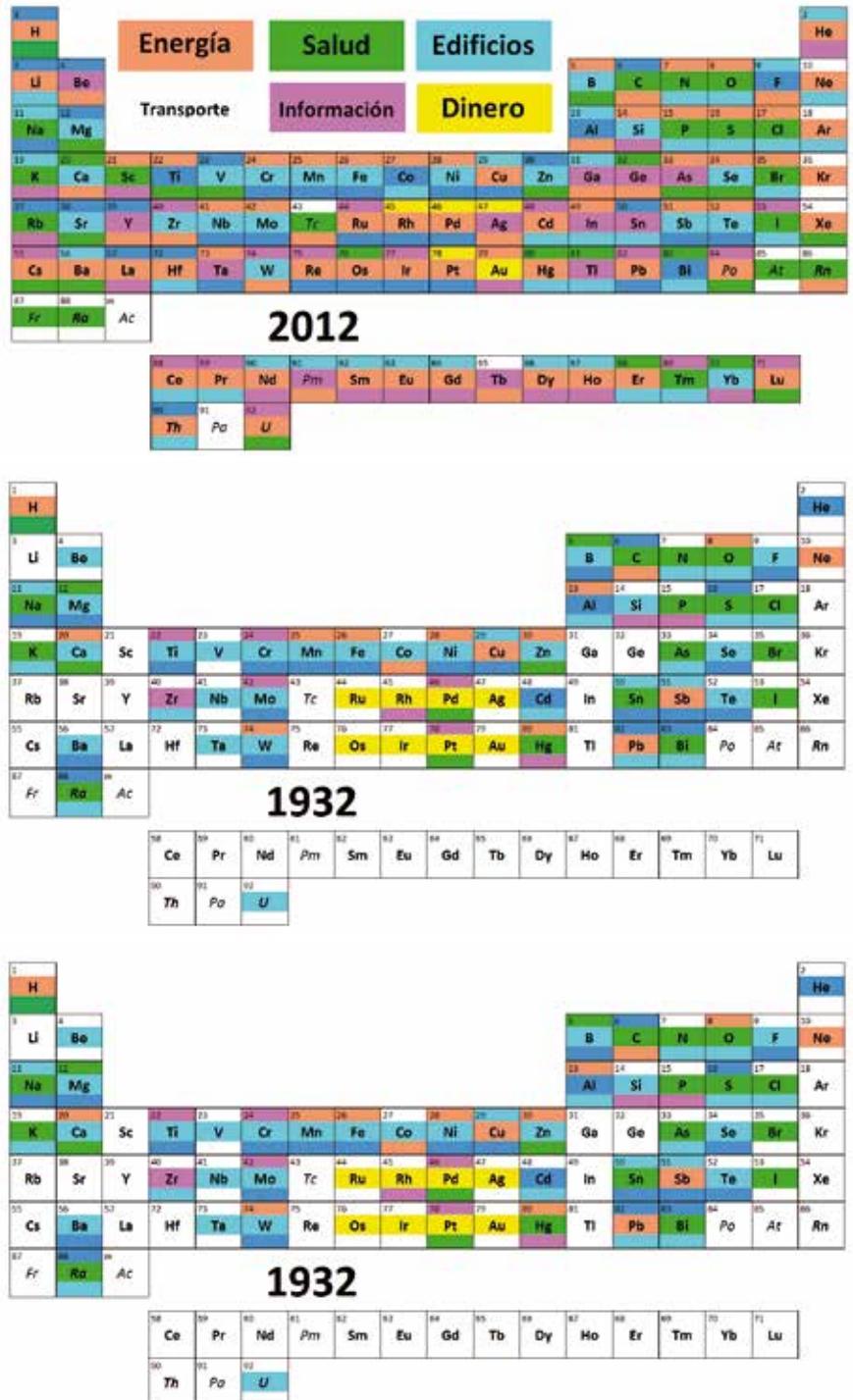
el precio de las “commodities” y su abundancia en la corteza (Fig. 10).

Generalmente, los elementos más abundantes son menos costosos. Así, el diamante y el carbón (dos formas de carbono) se destacan como las anomalías de esta tabla. El diamante es geológicamente poco frecuente, y el carbón es abundante, por lo que sus pre-

cios varían en más de seis órdenes de magnitud. Los precios del aluminio y del hierro ilustran las variaciones en los costes de procesamiento. Como minerales, ambos poseen precios que caen dentro de los rangos predecibles, pero como metal refinado, el aluminio es considerablemente más costoso, debido a la forma de energía que se necesita para reducir los óxidos de los

Figura 9. Incremento de los principales usos de los elementos presentes en la naturaleza, 1932-52 y 2012. Para muchos elementos existen más de tres usos principales. Fuentes: Departamento de Comercio de EE.UU. (1933), el Departamento del Interior de EE.UU. (1955, 2012). Se enumeran seis categorías generales de los informes anuales del U.S. Geological Survey y del U.S. Bureau of Mines. “Energía” incluye los elementos utilizados en la producción, transporte y almacenamiento de energía, así como la iluminación. “Salud” incluye los elementos necesarios para vivir (los alimentos y los productos farmacéuticos) y los cultivos (fertilizantes y pesticidas). “Construcciones” incluye los materiales necesarios para las estructuras y sus contenidos generales y, también, las herramientas necesarias para construirlas. “Transporte” incluye los elementos necesarios para los vehículos y las infraestructuras, incluyendo el agua en movimiento y las aguas residuales. “Información” incluye los sistemas de comunicación, la electrónica y la óptica. “Money” incluye elementos que se mantienen como respaldo de las monedas o como sustitutos para el dinero y se usan en joyería y en los objetos artísticos.

Figure 9. Expanding major uses of the naturally occurring elements from 1932 to 2012. There are more than three major uses for many elements today. Sources: U.S. Department of Commerce (1933), U.S. Department of Interior (1955, 2012). Six general categories of uses are listed, with information primarily from annual reports of the U.S. Geological Survey and U.S. Bureau of Mines. “Energy” includes the elements used in the production, transmission, and storage of energy, as well as lighting. “Health” includes elements necessary for life (in food and pharmaceuticals) and for the growing of crops (fertilizers and pesticides). “Buildings” include materials needed for structures and their general contents and the tools needed to construct them. “Transportation” includes elements needed for vehicles and infrastructure, including moving water and wastewater. “Information” includes communication systems, electronics, and optics. “Money” includes elements that are held as backing for currencies or as a substitute for money and used in jewellery and the arts.



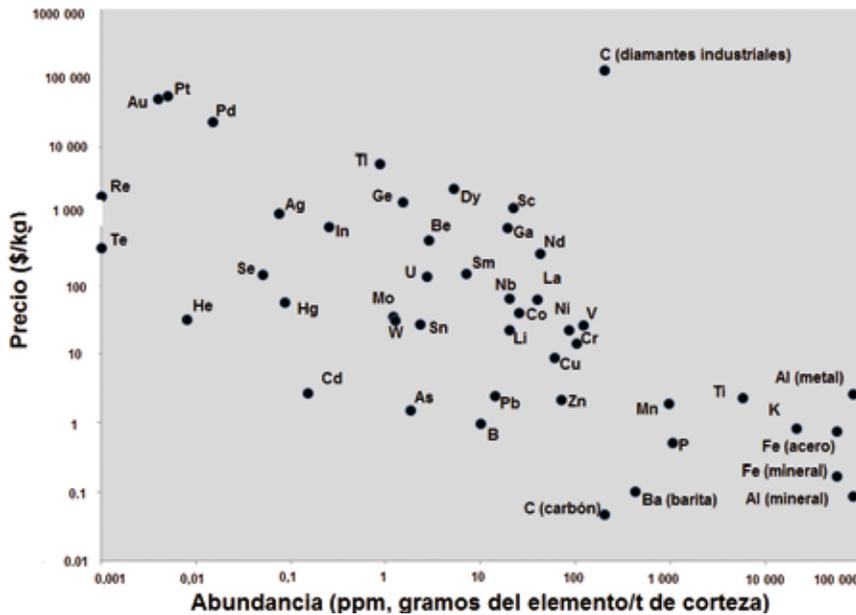


Figura 10. Precio versus abundancia crustal de materias primas minerales (metales) seleccionadas. Los datos proceden, sobre todo, del U.S. Department of Interior – U.S. Geological Survey (2013) para los precios del año 2012 y de Lide (2005) para las abundancias.
Figure 10. Price versus crustal abundance of selected commodities. Data are mostly from U.S. Department of Interior–U.S. Geological Survey (2012) for 2011 prices and from Lide (2005) for abundances.

metales. Se utiliza la costosa electricidad para romper oxígeno del enlace aluminio-oxígeno en el mineral de bauxita y el barato carbón, usado para reducir el hierro a partir del mineral de magnetita y hematites.

En comparación con las abundancias en la corteza, varios productos poseen precios relativamente bajos, debido a que son subproductos de la producción de los principales metales (cadmio como un subproducto de zinc; telurio y selenio como un subproducto de cobre; renio como subproducto de la producción de molibdeno a partir de depósitos de cobre porfídico que son ricos en molibdeno). La demanda limita los precios de algunos productos básicos que tienen preocupaciones ambientales por su toxicidad, entre ellos el cadmio, el arsénico y el plomo.

¿Presentan los minerales signos de escasez o desaparición? En los últimos años las reservas de cobre han permanecido constantes. Además, se ha observado un reavivamiento de la industria minera empeñada en rellenar los huecos causados por una desaforada demanda. Su actuación se ha dirigido, sobre todo, a acelerar la exploración minera y a una innovación de sus tecnologías más sensibles. Riotinto (2010). Ahora, los nuevos recursos conocidos se concentran geográficamente. Así, los mayores depósitos de cobre contienen el 77% del cobre conocido, mientras los recursos y reservas de cobre acumulados (1 950 millones de toneladas de cobre) se encuentran albergados en 866 yacimientos. Esta imagen se mantiene respecto a la producción actual de cobre, ya que ésta se encuentra dominada por los gigantes de la producción. Así, las 16 mayores minas de cobre del mundo producen nada menos que el 44% de la producción mundial.

Además, con categoría de reservas existen 475 Mt de ley 0.94% de cobre, mientras que 1 036 Mt Cu corresponden a la categoría de recursos con ley de 0.71% de cobre. (Río Tinto, 2010).

La riqueza o ley de los minerales, en general, no deja de disminuir. Esto no solo es verdad respecto a la riqueza de los minerales, sino que también alcanza a otras condiciones de su extracción, como es la proporción (razón del desmonte) necesaria para extraer una tonelada de mineral. Las razones son muchas, pero, de manera muy esquemática, se puede decir que el agotamiento de las calidades más elevadas, hablando de una historia de no más de siglo y medio, se ha extendido a las tipologías de yacimiento más explotadas. Este hecho resulta más evidente en aquellas, como los pórfidos, en donde se produjo una soberbia adaptación de la tecnología a la explotación de yacimientos de orden gigantesco.

Con la disminución de los yacimientos “ricos” o bien la drástica disminución de su ley con la profundidad, el planteamiento de su explotación se encuentra en fase de revisión. De esta manera, las leyes bajas coinciden con la necesidad de una mayor extracción de la roca inservible en el desmonte y se alcanza, a pesar de la subida espectacular del precio de los metales, su nivel límite de explotabilidad. Esto bien puede ser el preludio de los cambios que a corto plazo se avecinan. De hecho, Codelco, la primera empresa productora de cobre del mundo, prepara a su enorme explotación subterránea de El Teniente, en Chile, para pasar de las 80 000 toneladas diarias de producción a las 160 000 toneladas diarias, y Chuquibambilla, una vez alcanzado su límite de explotación superficial, se

reconvertirá en una gigantesca explotación subterránea de 150 000 toneladas diarias.

El pico (producción máxima) del petróleo, el pico del sílex y el suministro de los recursos minerales

Hubbert (1956) llegó a predecir con más o menos precisión el pico de producción de petróleo convencional para los límites de EE.UU. y del mundo, y predijo un máximo probable para el carbón en un futuro lejano. Su análisis, lógicamente se aplica para estos combustibles fósiles, ya que su utilización se limita a las tecnologías convencionales, y porque no hay ninguna posibilidad razonable de reciclarlos. Una vez que se queman para generar energía a través de la oxidación del carbono a dióxido de carbono, el reciclaje requeriría incluso más energía (para convertir el CO₂ de nuevo a C) que se produjo inicialmente. El análisis de Hubbert no se aplica a los demás recursos minerales, por dos razones fundamentales: (1) el monto de los recursos finalmente recuperable depende, sobre todo, de la economía de la oferta y la demanda, incluyendo la ley del mineral, las nuevas tecnologías, y el precio de la mercancía, de tal manera que se dispone casi siempre de las leyes más bajas si los precios son bastante altos, y (2) el reciclaje puede ser económicamente viable para numerosos recursos minerales. Como ejemplo de la primera razón, mientras que la extracción convencional de cobre (a través de la fusión de calcopirita, CuFeS₂ y otros sulfuros de cobre) en los EE.UU. occidentales disminuyó en los años 1970

y 1980, la producción de cobre fue revitalizada con la introducción de la extracción con disolventes y electrodeposición (SX-EW), que es una tecnología para el tratamiento de menas de baja ley y que es capaz de producir un cobre tan puro que con él se pueden fabricar directamente los cables eléctricos. En EE.UU. la producción de cobre ha sido testigo de muchos picos (Fig. 11).

Con otros avances tecnológicos similares al SX-EW, se podrían conseguir en el futuro más picos en la producción de cobre de EE.UU. Del mismo modo, el actual auge de la producción de oro (Fig. 12), que supera con creces los picos de producción anteriores, incluyendo el boom de 1849-1859, durante el pico de producción del Mother Lode en California, ha sido impulsado por una combinación del alza de los precios y la introducción de nuevas tecnologías, tales como la extracción por lixiviación en pilas y aglomeración, que ayudó a que el procesamiento de las bajas leyes propias de los minerales de oro diseminado fueran rentables. El uranio, el combustible para los reactores convencionales de fisión nuclear, ilustra bien que los suministros pueden ser casi ilimitados si el precio sube considerablemente. Al igual que los combustibles fósiles, el U235 prácticamente no puede ser reciclado después de que ha sido objeto de una fisión. Sin embargo existe un suministro casi ilimitado en el agua marina (aproximadamente 3.2 g de U/I de agua de mar). Se están desarrollando tecnologías que podrían reducir los costes de captación de uranio del agua de mar utilizando absorbentes orgánicos, a un precio cercano al precio actual del uranio (Tamada, 2009).

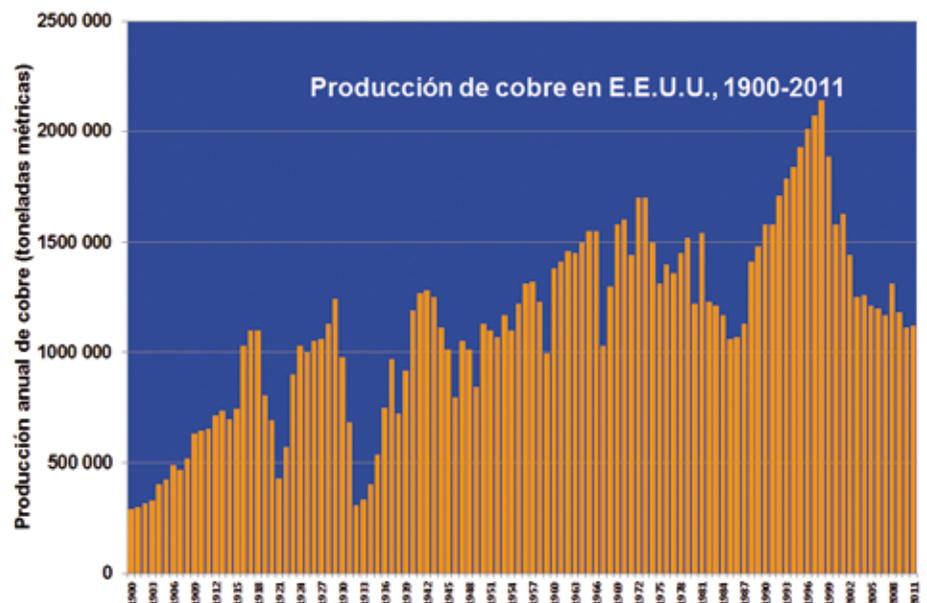


Figura 11. Producción de cobre en los Estados Unidos desde el año 1900 al 2012 (datos obtenidos del U.S. Geological Survey y del U.S. Bureau of Mines).

Figure 11. Copper production in the United States from 1900 to 2011 (data from the U.S. Geological Survey and U.S. Bureau of Mines).



Figura 12. Producción de oro en Estados Unidos y en Nevada, 1835-2012 (modificado de Price et al., 2011; datos procedentes de Dobra, 2002, U.S. Geological Survey y U.S. Bureau of Mines).

Figure 12. Gold production in the United State and in Nevada, 1835-2011(modified from Price et al., 2011; data from Dobra, 2002, U.S. Geological Survey and U.S. Bureau of Mines).

Los costes añadidos del uso de la tecnología a bordo de los barcos anclados en el mar japonés no es susceptible de incrementar el coste global de recuperación de uranio en más de un factor de diez. Si empezáramos a quedarnos sin recursos convencionales de uranio en las operaciones de lixiviación in situ y las minas a cielo abierto y subterráneas, la fuente de uranio del agua de mar podría abastecer la demanda en todo el mundo durante miles de años. Como ejemplos de la segunda razón del pico del petróleo de Hubbert, este criterio, en general no se aplica a los recursos minerales, ya que muchas materias primas minerales actualmente se reciclan en grandes cantidades (véase el recuadro sobre el reciclaje). Las pilas de chatarra de acero, los cables de cobre, las latas de aluminio y el plomo se reciclan de forma rutinaria a fin de satisfacer una parte significativa de la demanda. Debido a que el aumento de la población mundial y el nivel de vida significa que el reciclaje para satisfacer toda la demanda de la mayoría de los recursos minerales no puede lograrse hasta que la población y la demanda per cápita se estabilice, los recursos mineros de nuevos minerales seguirán siendo necesarios.

No nos estamos quedando sin recursos minerales. El Pico de Producción del Sílex (Fig. 13) muestra que en algunas materias primas minerales se posee la experiencia de que lo parecen ser los picos de producción permanente, la causa era que no se estaba quedando sin recursos, sino que los cambios en la tecnología fue lo que permitió su sustitución por otros productos.

Reciclaje

Se puede hacer todavía mucho más para aumentar la cantidad del reciclaje a fin de satisfacer la creciente demanda de recursos minerales. Graedel et al. (2011) han documentado la cuantificación del porcentaje de los elementos presentes en los productos desechados. Así, el reciclado varía ampliamente, puesto que tan sólo 18 de los 60 metales y metaloides (Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Nb, Rh, Pd, Ag, Sn, Re, Pt, Au y Pb) se recicla a una tasa superior a 50%, y 34 de los 60 (Li, Be, B, Sc, V, Ga, Ge, As, Se, Sr, Y, Zr, En, Te, Ba, Hf, Ta, Os, Tl, Bi, y los elementos de tierras raras) son reciclados a tasas inferiores al 1%. Debido a que la economía dirigida por la oferta y la demanda, en general, determina qué elementos se reciclan, es lógico que aquellos disponibles en forma de envases de aluminio, chatarra de acero, cables de cobre y las baterías de plomo sean reciclados con facilidad, así como los elementos de muy alto valor, tales como el oro y el platino. Sin embargo, en la actualidad, los equipos electrónicos modernos, que cuentan con diseños complejos y que utilizan muchos elementos de la tabla periódica, no se reciclan en tasas significativas. Reck y Graedel (2012) señalaron que para aumentar las tasas de reciclaje hay que poner más énfasis en aumentar la recaudación por impuestos a diversos productos, conseguir un mejor diseño de producto teniendo el reciclaje en la mente y, además, dedicar atención a las mejoras en las nuevas tecnologías de reciclado.

Existen gran cantidad de recursos conocidos de sílex (pedernal), obsidiana y otras piedras excelentes para la fabricación de herramientas de piedra, pero hay poca demanda de ellos en la sociedad moderna.

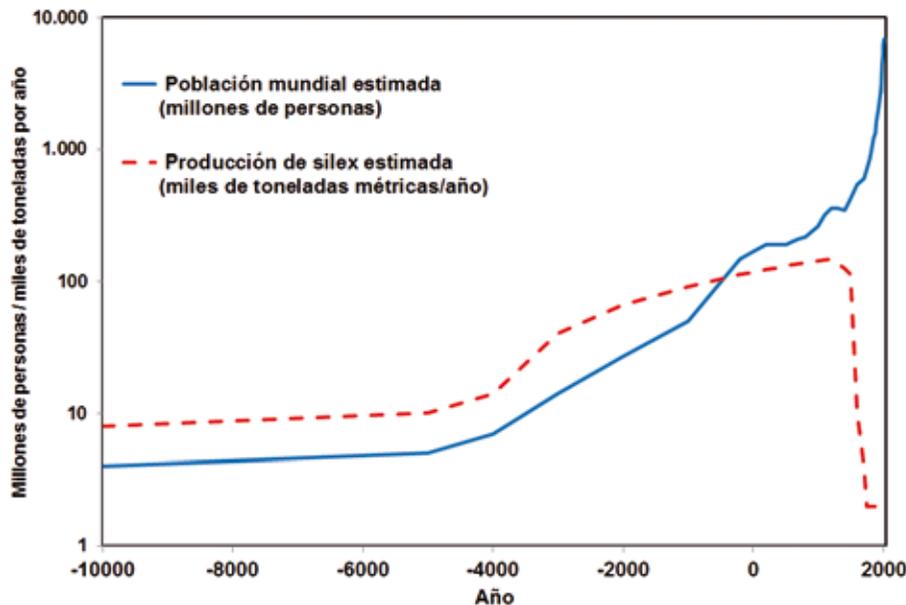


Figura 13. Estimación de la población mundial referida a la producción de pedernal según la edad, mostrando la situación de su pico máximo. Las estimaciones de población son de McEvedy y Jones (1978) hasta el año 1925 y de la Oficina del Censo de EE.UU. desde 1950 a 2010. Para construir el gráfico de la producción del pico de pedernal, la cantidad extraída de este material (en minados subterráneos o en pequeñas canteras) se ha estimado en dos kilogramos por persona y año, dependiendo de los utensilios de piedra utilizados. Otras hipótesis fueron: (1) antes de la Edad de Bronce, comenzando entre 4000 y 3000 aC, se consideraron herramientas de piedra utilizadas en todo el mundo (incluyendo pedernal, donde estaba disponible); (2) cuando la población aumentó rápidamente en las zonas donde comenzaron a obtenerse metales a partir de minerales, primero el bronce y más tarde el hierro (a partir de los años 2000 aC y extendiéndose hasta los años 1000 aC). En esos lugares la población abandonó el uso de herramientas de piedra; (3) las herramientas de piedra se siguieron utilizando en las Américas, Australia y zonas de Oceanía, donde no existieron herramientas de hierro y acero hasta que se produjo la inmigración de los europeos en estas áreas, fundamentalmente a partir de los 1500; (4) se asume que en la población precolombina de las Américas dominaba el uso de las herramientas de piedra después del comienzo de la Edad del Hierro, alcanzando un máximo de alrededor de 75 millones hacia el año 1200, y que fue de aproximadamente de 57 millones en 1492. Estas últimas cifras constituyen un factor de tres en la mayoría de las estimaciones de población del hemisferio occidental que se han resumido por Thornton (1990).

Figure 13. Estimated world population and production of flint over time, illustrating peak-flint production. Population estimates are from McEvedy and Jones (1978) to 1925 and from the U.S. Census Bureau from 1950 to 2010. To construct the chart of peak-flint production, the amount of flint collected (mined or quarried) each year was estimated to be two kilograms per person who relied on stone tools. Other assumptions were: (1) before the Bronze Age, beginning between 4000 and 3000 BCE, everyone used stone tools (including flint, where it was available); (2) as population rose rapidly in areas where bronze and later iron (beginning ~2000 BCE and widespread by 1000 BCE) were extracted from ores and used for tools, those people essentially abandoned the use of stone tools; (3) stone tools continued to be used in the Americas, Australia, and parts of Oceania, where iron tools and steel making did not catch on until the immigration of Europeans into these areas, largely after 1500; (4) pre-Columbus population in the Americas is assumed to dominate the world's use of stone tools after the beginning of the Iron Age, to have peaked at ~75 million around 1200, and to have been ~57 million in 1492. These latter numbers are within a factor of three of most estimates of population in the Western Hemisphere as summarized by Thornton (1990).

Descubrimientos y desarrollo en nuevas áreas

La continua demanda de recursos minerales ha estimulado la exploración en nuevas áreas, en busca de más ejemplos de los tipos de minerales que han sido minados en el pasado. La exploración de los "geos" utiliza las características de yacimientos similares (rocas encajantes, mineralogía, geoquímica, el estilo estructural, tectónica, etc.) para desarrollar modelos de tipos generales de yacimientos minerales. Contando con estos modelos, en los últimos años se han realizado importantes descubrimientos de diamantes, cobre, oro y otras materias primas.

Se investigan nuevas áreas, incluidos los océanos, como futuras fuentes de recursos minerales. Mediante el uso de herramientas geoquímicas e indicadores minerales en sedimentos fluviales y glaciares para la exploración de diamantes, los geólogos Charles Fipke y Blusson Stewart descubrieron una kimberlita diamantífera en los Territorios del Noroeste de Canadá en 1991 (Fig. 14).

La explotación de diamantes de BHP Billiton, Ekati, comenzó su producción en 1998. El descubrimiento desató una avalancha de exploraciones, y Canadá es ahora uno de los principales productores mundiales de diamantes (Net Resources International, 2011).



Figura 14. Corte de un diamante en el yacimiento de Ekati en Canadá, montado en un testigo de sondeo de kimberlita de aproximadamente 7 cm de diámetro. Reconocimiento hecho a Nora Dummett, en memoria de Hugo Dummett, ex presidente de la Sociedad de Geólogos Económicos y líder del equipo de exploración de BHP Billiton cuyos descubrimientos ayudaron a crear la industria de los diamantes canadienses.

Figure 14. Cut Ekati diamond, mounted into a piece of ~7-cm diameter kimberlite core, from an award made to Nora Dummett in memory of Hugo Dummett, past president of the Society of Economic Geologists and leader of the BHP Billiton exploration team whose discoveries helped create the Canadian diamond industry.

La apertura de nuevas áreas para la exploración moderna ha llevado a algunos descubrimientos importantes. Así, en 1996, Magma Copper Corp. comenzó la actividad de exploración en Mongolia. En 1997, BHP Billiton, que había adquirido Magma Copper, obtuvo resultados favorables en los sondeos realizados en Oyu Tolgoi, sin embargo, no siguió adelante con la exploración. Ivanhoe Mines comenzó la exploración en 2000 y descubrió lo que actualmente se perfila como uno de los mayores distritos de pórfidos de cobre-oro del mundo y su producción ya estaba programada para comienzos del 2012 (Ivanhoe Mines, 2012).

Próximamente, la minería en los fondos marinos va a ser una actividad bastante común, en tanto en cuanto aumenten los precios de productos básicos, o bien, las nuevas tecnologías del futuro sean capaces de reducir los costos de extracción y del procesamiento de los minerales. La halita (NaCl) durante siglos se

ha producido de manera económica a partir del agua de mar. Además, durante décadas la arena y la grava se han dragado de las zonas marinas del Océano Atlántico del Norte, y los placeres marinos de estaño, de platino, de oro y diamantes han sido significativos a nivel local, pero, en opinión de los autores, las grandes producciones del futuro procederán de los depósitos de sulfuros masivos de cobre, oro y zinc de las cordilleras oceánicas y las calderas submarinas, del manganeso de los nódulos y costras marinas (Bodénlos y Thayer, 1973), y del uranio del agua de mar (Finch et al, 1973).

Las investigaciones realizadas en las décadas de 1970 y 1980 sobre la viabilidad tecnológica y económica de la recuperación del cobalto y manganeso asociados al cobre y níquel de los nódulos de los fondos marinos, fracasaron cuando se propusieron como operaciones comerciales (Glasby, 2000). En realidad, los intentos más serios se están realizando en la exploración y desarrollo de la minería de sulfuros masivos del lecho marino, de los nódulos de manganeso y de los depósitos de nódulos fosfato (Scott, 2012). Por ejemplo, en 2012, el gobierno de Papúa Nueva Guinea otorgó a Nautilus Minerals una licencia de 20 años para extraer cobre y oro de los "smokers" hidrotermales a 1.6 kilómetros bajo el nivel del mar en el Mar de Bismarck (Milman, 2012).

Ante el temor de daños ecológicos, algunos ambientalistas y pescadores locales se han opuesto al otorgamiento de licencias, sobre todo cuando las mejoras en la tecnología utilizada permiten abarcar más áreas susceptibles de explotación. La Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (The International Seabed Authority, 2012), que se ocupa de autorización en aguas internacionales, de acuerdo con la Convención de 1982 de Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, ha otorgado permisos a los países y empresas para la exploración de sulfuros masivos en los océanos Atlántico e Índico y para la exploración de nódulos de manganeso en el Océano Índico. Por su parte, Japón ha mantenido un programa para investigar la extracción de nódulos de manganeso, cobalto y manganeso cerca de las cordilleras submarinas y los depósitos de sulfuros masivos del lecho marino (Yamazaki, 2007).

Japón también ha intentado recuperar el uranio del agua de mar utilizando su absorción en fibras de polímero (Seko et al., 2003). Recientemente, se tiene conocimiento sobre las mejoras tecnológicas por parte de los investigadores del Oak Ridge National Laboratory y del Pacific Northwest National Laboratory (Ferguson, 2012), pero los costes son aún varias veces superiores al precio del uranio que se encuentra disponible in-situ, a cielo abierto, o por minería subterránea.

La escasez de nuevas explotaciones de dimensiones notables, necesarias para entrar en funcionamiento en un momento de fuerte demanda mundial, se debe, en parte, a la reducción en la exploración que se produjo a finales de los años 90. Mientras que los principales actores de la minería están volviendo a participar en la exploración de nuevos recursos, el hecho de que, aun cuando la exploración se realice con éxito, el tiempo necesario para la puesta en producción puede ser de hasta 10 años, y ello significa que en algunos metales y a corto plazo, la inversión de esta situación sea poco probable.

El descenso en la calidad de los yacimientos. (Crowson, 2011) en su trabajo sobre el cobre titulado "The copper conundrum", marca de manera profunda y concreta los factores estratégicos de la industria de los minerales de cobre en los últimos años, apoyado en los datos y experiencias de periodos más antiguos. De esta manera, Crowson nos hace introducir en el entorno estratégico de más de dos siglos que, hasta cierto punto, sigue con vigencia en nuestros días. En general, dice, se asume que los minerales de mayor ley (riqueza de cobre) que son más accesibles y de fácil tratamiento, se extrajeron en primer lugar. Desde entonces, los avances en la tecnología minera, incluyendo la exploración, han permitido gradualmente la extracción económica de leyes más bajas, menos accesibles y minerales con mayor complejidad metalúrgica. Existe la presunción de que estos factores geológicos y tecnológicos, junto con las economías de escala, compensan de sobra los mayores costes provocados por la minería de baja ley.

Podemos conocer que el Reino Unido fue el mayor productor de cobre del mundo hasta 1850, minando el cobre a partir de ricas vetas en el sudoeste de Inglaterra (Cornwall y Devon). Antes de los EE.UU. asumieron su posición dominante países como Chile y España. Dentro de España, Río Tinto fue el principal productor a partir de 1877. El promedio de sus leyes alcanzó su máximo en la década de 1880, con 3.06% Cu entre 1883 y 1888, y luego disminuyeron gradualmente a 1.21% Cu en 1924-25. Posteriormente, se elevó hasta 1931, antes de volver a recobrar la tranquilidad. Incluso en su apogeo, eran menos de la mitad de los rendimientos medios de las minas británicas, pero con niveles mucho más altos de producción.

Fijándonos solamente en las leyes de extracción a partir de los últimos años del siglo XX, las leyes promedio de cobre oscilaron en un rango estrecho desde finales de 1970 a la década de 2000, sin tendencia clara, pero con menos volatilidad que las leyes de los Estados Unidos. El promedio de ley en 2002 era muy similar al de 1980. Sin embargo, la media universal ha caído desde el año 2003 a una tasa similar a la de la década de 1970.

Por lo general, la tasa de extracción de mineral de un yacimiento aumenta con el tiempo, ya que las empresas tratan de explotar las economías de escala. Tales aumentos de escala pueden estar acompañados por cambios en leyes de corte, (Crowson, 2011). Una importante razón que explica la caída en el tiempo de las leyes de extracción es el cambio en el tipo preponderante de depósito que se explota. Durante el siglo XIX y hasta bien entrado el XX, una parte sustancial de cobre extraído procedía de yacimientos de sulfuros masivos, "skarns" de cobre, filones polimetálicos de cobre y los alojados en sedimentos ("sediments hosted"). Con la reducción en países de África, Europa occidental y la salida al este de Canadá, estos depósitos representaron tan solo una parte de la producción total del cobre mundial.

Sin embargo, con la introducción en el panorama minero mundial de las nuevas minas de la región andina, la situación cambió casi radicalmente. Así, en 1975, los depósitos de pórfidos representaron alrededor del 34% de la producción minera mundial de cobre, (Raw Materials Group, 2011). Su participación se elevó al 47% en 1988, y al 62% en 1998. En 2009, cuando muchas minas se cerraron, o había bajado su producción, especialmente en los EE.UU., la proporción de la producción minera mundial procedente de depósitos de pórfidos cupríferos se había reducido al 55%.

Además, los yacimientos minerales a menudo contienen otros metales de valor en asociación con el cobre, de manera que su contenido en este metal no es el único factor determinante de su viabilidad económica. Los cambios en los precios de los componentes de la mineralización pueden influir en el programa de producción de una mina, como últimamente ha ocurrido con el molibdeno y el oro de los pórfidos cupríferos.

El contenido de cobre de las zonas superiores de los depósitos de cobre porfídico, resulta casi siempre mayor que el promedio del depósito, como resultado de la alteración superficial y el enriquecimiento secundario. Una consecuencia de este hecho es que las leyes de entrada a la planta de concentración suelen ser más altas en los nuevos proyectos que en el caso de una ampliación de las operaciones existentes. Cuando en un periodo de tiempo se desarrollan pocas minas, la ley ponderada de las producciones refleja la tendencia subyacente de las leyes a disminuir con la profundidad.

La agrupación de las aperturas de minas en la década de 1990 ayuda a explicar por qué el promedio de las leyes del mineral en cabeza se mantuvieron bastante estables durante ese periodo. A mediados de la década de 2000, cuando hubo muy pocas nuevas

aperturas, las leyes promedio fueron disminuyendo. Sin embargo, las mejoras en la productividad, por lo general basada en las innovaciones tecnológicas y en el aumento de la escala de las explotaciones mineras, han permitido a la industria minera compensar gran parte del impacto económico de la disminución de las leyes de cobre del mineral. El mismo autor, Crowson, en trabajos anteriores, ha detectado una relación inversa entre las leyes de cobre de cabeza de las explotaciones y su tamaño.

En muchas minas no se suele manipular voluntariamente la ley de explotación en cabeza en respuesta a los cambios en los precios de los productos. La tasa y la ley de extracción se rigen por la geología del depósito, la mineralurgia y por el diseño de la mina. Un cambio en las leyes de corte (aquel contenido de metal que compensa al menos los costes incurridos en la explotación minera) normalmente no se puede hacer rápidamente sin alterar la configuración de la mina, o sin introducir nuevos gastos de capital.

La disponibilidad de recursos es una parte importante de la estrategia de exploración que conlleva un riesgo considerable. Aquí, el riesgo está asociado con la disposición de recursos sin tener completamente evaluado su potencial económico. La estrategia de exploración debería centrarse en la gestión del riesgo. Aun así, las estrategias de gestión de riesgo varían según el tamaño y la capacidad financiera de la compañía. Sólo unos pocos actores internacionales tienen la capacidad de correr un alto riesgo de exploración que implica, tanto las adquisiciones como los descubrimientos en los que se centra la estrategia de exploración. (Botin *et al.* 2009)

En general, las estrategias de exploración de la mayor parte de las compañías productoras de oro y de metales básicos buscan un equilibrio entre las estrategias de exploración y adquisición, realizando su propio programa de exploración y, al mismo tiempo, haciendo un seguimiento del mercado con relación a las oportunidades de adquisición. Además, la mayoría de las compañías mineras medianas y grandes, llevan a cabo la exploración mediante uniones con compañías junior, buscando ventajas competitivas en caso de un descubrimiento. Los programas de exploración de las empresas conjuntas son también llevados a cabo entre grandes compañías mineras, que en este caso buscan la reducción del riesgo financiero.

Las reservas han crecido más deprisa que la producción de metales, pero hay que notar que los aportes sacados de la exploración (por descubrimiento de nuevos yacimientos) forman tan solo parte de esa contabilidad y que el progreso tecnológico produce alternativas de uso y mejoras de rendimientos. La

dinámica de la exploración es tal, que siempre existe una fuerte presión para explotar nuevas reservas descubiertas, casi sin mirar el estado de los mercados y con una visión de que la nueva explotación puede ser realizable. Entre 2002 y 2007 los precios del oro se doblaron y los gastos de exploración también lo hicieron.

Han existido movimientos internacionales cada vez más importantes por parte de empresas rusas y chinas, como la intervención de Chinalco, por ejemplo, en la batalla por la propiedad de Rio Tinto. Así, hoy, la competencia por acuerdos entre grandes empresas es intensa. El valor total de los acuerdos mineros llevados a cabo por las entidades de estos dos países orientales se multiplicó por seis en 2007, pasando de 5300 millones de dólares en 2005 a 32700 millones de dólares en 2007, lo que representa una quinta parte del valor total de los acuerdos en la minería de todo el mundo. Los fundamentos de esta actividad se encuentran en la búsqueda de la diversificación de los recursos a escala mundial o, en algunos casos, en el deseo de asegurar fuentes de suministro de productos básicos que son independientes de las empresas mineras. El crecimiento orgánico de estas empresas también ha sido muy importante, financiado por fuertes flujos de caja y, hasta la crisis de crédito, con un fácil acceso a la financiación de la deuda.

Descubrimientos en antiguas zonas por medio de nuevas ideas

Existen muchos ejemplos de descubrimientos de yacimientos minerales en los distritos mineros ya conocidos. Debido a ello, la industria minera adoptó el adagio "usted debe cazar elefantes en el país de los elefantes." Sin embargo, estos descubrimientos requieren nuevas ideas. Un ejemplo es el Desafío Goldcorp. La historia que se relata a continuación es un resumen de la expuesta por Tischler (2002). En 2000, Rob McEwen, presidente y CEO de Goldcorp Inc., ofreció 575000 dólares en premios en metálico para las ideas necesarias para encontrar otros seis millones de onzas troy de oro en su mina Red Lake, en Ontario. Históricamente, se habían producido en el distrito más de 18 millones onzas, pero sólo tres millones en la mina Red Lake.

Además, McEwen publicó en Internet los datos geológicos y geoquímicos en 3D de la compañía y estimuló a la comunidad de la exploración, que cuenta con más de 1000 individuos, a descargar esos datos. Fractal Graphics de West Perth, Australia, fue la organización ganadora, puesto que desarrolló un nuevo modelo en

3D del yacimiento y recomendó los sondeos necesarios que, cuando fueron perforados, resultaron en el descubrimiento de nuevas reservas de alta ley. Para el año 2007, Goldcorp ya había descubierto otros ocho millones de onzas de oro en la propiedad de Red Lake (Tapscott y Williams, 2007).

Nuevos tipos de yacimientos

Aunque los modelos de tipos de depósitos de mineral generalmente se utilizan como guía de la exploración, se han reconocido en los últimos años varios nuevos tipos de depósitos que no se ajusta a los modelos anteriores (Tabla 1). Nuevos descubrimientos adicionales de estos yacimientos han añadido recursos significativos a los ya conocidos, entre otros, de oro, níquel, uranio y tierras raras.

Uno de los grandes descubrimientos geológicos de los últimos años ha sido en 1961 el yacimiento de Carlin en Nevada (Coope, 1991). La combinación de la actualización de la historia estructural de la zona, desarrollada a partir, sobre todo, de la cartografía

geológica de Ralph Roberts, del USGS, juntamente con la exploración geoquímica, con todo ello, la compañía Newmont Mining Corporation descubrió este yacimiento que propició el mayor desarrollo que se conoce de una nueva clase de yacimientos minerales, el depósito tipo Carlin. Aunque la mayoría de los investigadores creen hoy que se trata de una variación sobre las mineralizaciones epitermales asociadas con intrusiones ígneas y el vulcanismo (Cline et al, 2005; Muntean et al, 2011), en realidad, constituyen una nueva clase de depósitos minerales, con partículas submicroscópicas de oro (y oro en solución sólida en arsenopirita) en calcarenitas y areniscas (Fig. 15).

La exploración continuada de los depósitos de tipo Carlin en Nevada y en otras partes condujo al actual auge de la producción de oro en los Estados Unidos (Figura 12). La producción del yacimiento Carlin comenzó en 1965, pero el auge actual no comenzó hasta unos años más tarde, después de que el gobierno de EE.UU. decidiese no fijar el precio del oro en dólares. El posterior aumento de los precios del oro en la década de 1970, estimuló la exploración

Tipo de yacimiento	Localidad (año descubrimiento) y rasgos nuevos	Referencias
Oro tipo Carlin	Carlin, Nevada (1961). Diseminado en rocas sedimentarias	Cline et al. (2005), Muntean et al. (2011)
Iron oxide Cu-Au	Olympic Dam, S. Australia (1975) Yac. Iron-oxide asociados con rocas graníticas	Roberts and Hudson (1983), Reeve et al. (1990). Oreskes and Einaudi (1990), Hitzman et al. (1992), Williams et al. (2005), McPhie et al. (2011)
Oro relacionado con intrusiones	Fort Knox, Alaska (1980s) Oro en rocas graníticas con cobre	Sillitoe (1991), Lang et al. (2000), Hart (2005)
Níquel diseminado	Mt. Keith, W. Australia (1969)	Butt and Brand (2003), Grguric (2003), Barnes et al. (2012)
Uranio en granitos	Rössing, Namibia (1960s) Concentraciones de uranio en granitos	Schreiber (2005), Ministry of Mines and Energy (2010)
Uranio en disconformidades	Rabbit Lake, Saskatchewan (1968) Uranio de alta ley cerca de disconformidades	Kyser and Cuney (2008), World Nuclear Association (2012a)
Frentes de uranio en sedimentos	Wyoming, Kazakhstan (1960s) Márgenes Redox en areniscas	Granger and Warren (1969), World Nuclear Association (2012b, 2012c)
Tierras raras en lateritas	Sur de China (1980s) Tierras raras de baja ley con caolín	Chin (1980, 1981), Chengyu et al. (1990), Hedrick (1990)

Tabla 1. Ejemplos de nuevos tipos de yacimientos en actividad descubiertos en los últimos 55 años.

Table 1. Examples of some new types of ore deposits recognized and brought into production in the last 55 years.



Figura 15. Rocas sedimentarias paleozoicas plegadas en la mina de Newmont Gold Quarry, en Carlin, Nevada.

Figure 15. *Folded Paleozoic sedimentary rocks in Newmont's Gold Quarry mine on the Carlin trend in Nevada*

y desarrollo que dio como resultado el auge actual (Figura 12). Se siguen realizando nuevos descubrimientos de yacimientos de tipo Carlin, incluyendo los multimillonarios en onzas de oro en Nevada (Barrick Gold Corporation, 2011).

Un gran descubrimiento geofísico (métodos de gravedad y magnéticos), por debajo de 300 metros de cobertura y basado en parte en la comprensión del marco geológico, fue el depósito de Olympic Dam en Australia del Sur, descubierto por Western Mining Corporation en 1975. Este enorme yacimiento, descrito como estrato-confinado, "stratabound" o magmático-hidrotermal (Roberts and Hudson, 1983; Reeve et al, 1990; Oreskes y Einaudi, 1990; McPhie et al, 2011), se ha convertido en un tipo exclusivo para una nueva clase de depósitos, de óxido de hierro-cobre-oro (Hitzman et al, 1992; Williams et al, 2005). Olympic Dam, que comenzó su producción en 1988, es también un importante productor de uranio. Impulsados por la creciente demanda de combustible para plantas de energía nuclear, en las décadas de 1960 y 1970 se han descubierto y desarrollado nuevos tipos de depósitos de uranio.

El mineral económicamente recuperable en granitos ricos en uranio (alaskita o leucogranito) fue definido por la exploración de Rio Tinto Corporation en la década de 1960 en Rössing, Namibia, (Schreiber, 2005; Ministerio de Minas y Energía, 2010). La minería en Rössing, es ahora uno de los yacimientos de uranio más grandes del mundo. Su producción comenzó en 1974 y alcanzó su pleno desarrollo en 1979. En

Saskatchewan, Canadá, Cameco Corporation's Rabbit Lake deposit, representa el nuevo tipo de yacimiento de uranio de "alta ley y en discordancia", fue descubierto en 1968 y comenzó su producción en 1975 (World Nuclear Association, 2012a). Los "roll-front uranium deposits" alojados en areniscas se explotaron por primera vez en minas a cielo abierto en Wyoming en 1960. Los "in-situ lixiviación" (extracción por solución), se desarrollaron en la década de 1960 y entraron en producción comercial en Wyoming en 1974, permitiendo de esta manera la explotación de yacimientos de baja ley de uranio (World Nuclear Association, 2012b). Depósitos similares hacen ahora a Kazajstán el primer productor mundial de uranio, con el 35% de la producción mundial (World Nuclear Association, 2012c).

El yacimiento de Mount Keith en el oeste de Australia, uno de los depósitos de níquel más grandes del mundo, operado por BHP Billiton, es un ejemplo de lo que puede considerarse un nuevo tipo de depósito de níquel. Tal como ocurre en los sulfuros masivos, en la base de una intrusión o en el flujo de rocas ultramáficas, al igual que la mayoría de los otros depósitos de níquel en el mundo, los sulfuros de níquel de Mount Keith se diseminan a través de una dunita serpentinizada dentro de un cuerpo de peridotita-dunita komatita (Butt y Brand, 2003; Grguric, 2003; Barnes et al, 2012).

El depósito principal (llamado MKD5) fue descubierto en 1969 y puesto en producción en 1993 (Fig. 16).



Figura 16. Una enorme operación minera a cielo abierto en la mina Mount Keith, oeste australiano.

Figure 16. Large open-pit nickel operation at the Mount Keith mine, Western Australia.

La alta demanda de tierras raras llevó en la década de 1980 al reconocimiento de que elementos de tierras raras pesadas podrían ser extraídos de un nuevo tipo de depósito “tierras raras enriquecido” en granitos alterados en el sur de China (Chin, 1980, 1981; Chengyu et al, 1990; Hedrick, 1990). Los denominados tipos “ion-adsorción” o “depósitos de laterita” eran anteriormente conocidos por sus recursos, pero aparentemente todavía no se encontraban en producción en 1981 (Chin, 1980, 1981), sin embargo ya comenzaron a producir en el siguiente año, 1982 (Chin, 1982). Mariano (2010) cuestionó si tales depósitos pueden ser extraídos con los controles ambientales que se practican en los países occidentales, debido a que la lixiviación ácida de los minerales se realiza sin impermeabilización de la base, y las aguas superficiales y subterráneas han sido contaminadas a nivel local.

Nuevas herramientas de exploración

Durante las últimas décadas, se han aplicado en la exploración mineral una serie de nuevas y mejoradas herramientas de exploración. Aunque éstas no necesariamente se desarrollaron con la finalidad de la exploración de minerales, sin embargo, se han adoptado de manera rápida. Los geos ahora integran conjuntos de datos con la ayuda de importantes avances en la informática, la tecnología de teledetección y la capacidad y velocidad del análisis. También la teledetección ha florecido en los últimos años. En la exploración mineral, se dispone comercialmente

de la fotografía aérea por satélite que proporciona imágenes detalladas de todo el planeta, y los espectrómetros que van desde el visible al infrarrojo, se utilizan en reconocimiento de litologías y cartografía de las alteraciones.

Los escáneres hiperespectrales a bordo de aviones son capaces de identificar muchas especies minerales y grupos de ellas y, particularmente, resulta muy útil en la cartografía litológica y de alteraciones. El uso del Light Detection and Ranging Detección (LIDAR) aerotransportado es la base de los mapas topográficos detallados y fáciles de transformar en 3D como modelos digitales de elevación, y está proporcionando imágenes espectaculares de fallas activas y deslizamientos. El Satellite Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) se utiliza en la detección de hundimientos, mientras que en tierra, el InSAR se usa para el control de pendientes, estabilidad y cálculos de volumen de roca en minas a cielo abierto y en la cartografía subterránea en 3D. Los Airborne Gamma-Ray Spectrometer Surveys se han aplicado ampliamente en los años 1960 y 1970 en la exploración del uranio y, además, se utilizan en la exploración de otros minerales con concentraciones anómalas de uranio, torio y potasio, incluidos los depósitos de tierras raras y los yacimientos magmático-hidrotermales con zonas de alteración potásica.

Se está expandiendo el uso civil de aviones no tripulados (Unmanned Aerial Vehicles) en teledetección. La disponibilidad comercial del sistema de posicionamiento global (GPS) ha mejorado la precisión de localización de los estudios geofísicos aéreos y de la cartografía sobre el terreno. Los estudios de gravimetría

aérea sólo son posibles con GPS. La integración de los diversos conjuntos de datos geofísicos, geológicos y geoquímicos en los sistemas de información geográfica (SIG) ha permitido evaluar rápidamente los datos de exploración y localizar zonas de perforación.

Otros datos geográficos, incluyendo mapas topográficos y modelos digitales del terreno, mapas de propiedad de la tierra, mapas de ecosistemas, y mapas de zonas arqueológica o culturalmente sensibles, se fusionan en un SIG para ayudar en la obtención de permisos y diseño de las explotaciones. Muchos de los avances en la tecnología de exploración se apoyan en la mejora de la velocidad y capacidad de almacenamiento del equipo de procesamiento de datos. La visualización y el software de modelado en 3D permiten a los ingenieros y otros técnicos ver los datos de exploración y los modelos geológicos desde cualquier perspectiva y, también, hacer el diseño rápido de las explotaciones.

Estafas Mineras

Las estafas mineras eran frecuentes antes de la existencia de la Geological Society of America en los primeros años de los Estados Unidos y, por desgracia, lo siguen siendo hoy en día. Mark Twain (1872) describe un esquema clásico que implica a un analista sin escrúpulos (Fig. 17).

La estafa reciente más notoria fue el episodio Bre-X ocurrido a mediados de 1990 (Louis, 2007). Una empresa "junior" con sede en Calgary, Bre-X Gold Minerals Ltd., supuestamente había descubierto un importante yacimiento de oro en Busang, Indonesia. La compañía presentó un yacimiento de 30 millones de onzas de oro en 1995 y aumentó su estimación de recursos a 70 millones de onzas en 1997. La estafa se descubrió o, cuando Freeport-McMoRan Copper y Gold evaluó el depósito mineral y no encontró nada de valor. A continuación, se descubrió que las muestras enviadas a los analistas habían sido trucadas. Con sus acciones sin valor, los inversores perdieron alrededor de 2 mil millones de dólares. El engaño Bre-X condujo a la elaboración de un estándar internacional, el Canadian National Instrument 43-101, Standards of Disclosure for Mineral Projects.

Por desgracia, para los inversores incautos, las estafas mineras continúan hoy en día, tanto como en los tiempos de la Comstock. Lechler *et al.* (2008) describe algunas de las estafas recurrentes, incluyendo a los analistas sin escrúpulos, minerales que sólo se pueden analizar por el propietario o con técnicas no convencionales y minerales de oro con leyes irracionales para su situación geológica, tales como oro de mineral de grado en configuración geológica irracionales, sedimentos inalterados, conos de ceniza basáltica no alterados. Los geos competentes pueden detectar fácilmente la mayoría de los fraudes, pero el desafío para la sociedad es conectar los inversores con esas personas competentes.

Referente a la exploración geoquímica, los avances se han obtenido con el uso de ordenadores más rápidos y más pequeños que también han revolucionado la instrumentación analítica. Además, las capacidades analíticas se han ampliado a fin de permitir la detección de todos los elementos económicamente importantes que aparecen de forma natural en los niveles de fondo de todos los tipos de rocas. El Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-MS) se ha convertido en un estándar para los trabajos analíticos multi-elemento de la exploración mineral, mientras que otras técnicas de análisis químico, incluyendo los análisis con Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA), el Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES), X-Ray Fluorescence (XRF), Atomic Absorption (AA), Ion Chromatography (IC), y los "ensayos al fuego", siguen siendo valiosos para aplicaciones específicas.

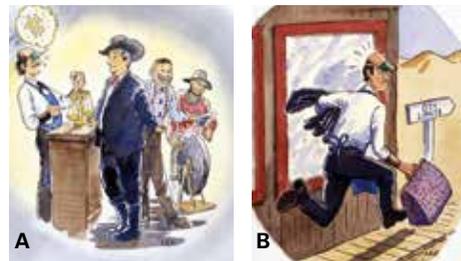


Figura 17. Ilustración sobre la estafa en los análisis de Mark Twain (L. Jacox, Nevada Oficina de Minas y Geología). (A) Analizar era un buen negocio, por lo que algunas personas se dedicaban a ello de vez en cuando ya que no era una actividad estrictamente científica y precisa. Un analista obtenía resultados tan ricos de todas las muestras que con el tiempo adquirió casi un monopolio de la empresa. Pero como ocurre con todos las personas que logran éxito, se convirtió en un objeto de la envidia y el recelo. Los otros analistas conspiraron contra él, y dejaron que algunos prominentes ciudadanos también participasen de ello. Después separaron un fragmento de una piedra de afilar de un carpintero y se lo llevaron a este curioso científico para que lo analizase. Al cabo de una hora salió una ley en metales que, sorprendentemente, se traducía en que ¡una tonelada de roca que daría 1 284.40 dólares en plata y 366.36 dólares en oro! "(B)" Debido a la publicación de todo el asunto, el popular analista tuvo que marcharse de la ciudad al cabo de dos días.

Figure 17. Illustrating Mark Twain's assaying scam (L. Jacox, Nevada Bureau of Mines and Geology). (A) Assaying was a good business, and so some men engaged in it, occasionally, who were not strictly scientific and capable. One assayer got such rich results out of all specimens brought to him that in time he acquired almost a monopoly of the business. But like all men who achieve success, he became an object of envy and suspicion. The other assayers entered into a conspiracy against him, and let some prominent citizens into the secret in order to show that they meant fairly. Then they broke a little fragment off a carpenter's grindstone and got a stranger to take it to the popular scientist and get it assayed. In the course of an hour the result came—whereby it appeared that a ton of that rock would yield \$1 284.40 in silver and \$366.36 in gold!" (B) "Due publication of the whole matter was made in the paper, and the popular assayer left town 'between two days.'

El Laser Ablation ICP-MS, es una herramienta prometedora para análisis especializados de pequeñas muestras (con límites de detección más bajos que las microsondas electrónicas para muchos elementos traza de interés económico) y para roca en polvo (Wilson *et al.*, 2002). Los espectrómetros de infrarrojos portátiles se utilizan en la identificación de algunos minerales en los sondeos y en la cartografía litológica y de alteraciones. Los espectrómetros de XRF portátiles se usan para el análisis de elementos principales y de algunos elementos traza y, más recientemente, los analizadores portátiles de Rayos X se han utilizado en la identificación difractiva de minerales. De esta manera se están poniendo sofisticadas y precisas herramientas analíticas en las manos de la gente relacionada con la geología.

Las técnicas desarrolladas específicamente para la industria del petróleo y del gas natural están viendo aplicaciones en el sector minero. Por ejemplo, Milkerit *et al.* (2000) ha documentado el uso de la exploración sísmica 3D para depósitos masivos de sulfuros de cobre y níquel en Sudbury, Canadá. Como los costos de las técnicas tales como la perforación direccional (incluida la perforación horizontal) se rebajan con mejor tecnología y nuevos mercados, es probable que veamos grandes avances en las herramientas disponibles para la exploración geológica.

Preocupaciones ambientales, salud y seguridad

La minería, por su propia naturaleza, perturba el suelo y se involucra como procesamientos industriales de importancia, que, si no se regulan o no controlan, puede tener efectos devastadores hacia la seguridad de los trabajadores, la salud y otras consecuencias nefastas fuera del lugar de operación. En los países desarrollados, habiendo aprendido de desastres acaecidos anteriormente, tales como los incendios en minas subterráneas de carbón, derrumbes, aguas ácidas vertidas a los arroyos y los derrames de cianuro, se han puesto en marcha las regulaciones gubernamentales a fin de proteger la seguridad y salud del trabajador y del medio ambiente.

Los gobiernos y la industria han financiado la investigación para reducir las muertes, lesiones y daños al medio ambiente, al tiempo que mejoran la eficiencia y rebajan los costes. A medida que se desarrollan nuevas tecnologías, la investigación continua resulta muy necesaria. A pesar de los mejores esfuerzos de las empresas y los gobiernos para eliminar las fatalidades, reducir las lesiones y minimizar los impactos ambientales, han existido algunos importantes problemas en la comunidad minera glo-

bal. Las muertes asociadas a la minería del carbón en China han sido particularmente problemáticas, en parte debido a la mala ventilación y la falta de sistemas de control de incendios en muchas de las minas del país. El gobierno chino está tratando de reducir las muertes con el cierre de minas inseguras, pero la demanda de carbón es inmensa. China en el año 2010 produjo el 44 por ciento de carbón del mundo.

En 1984, Summitville Consolidated Mining Company, Inc., una compañía minera canadiense junior, comenzó la extracción de oro en Summitville, Colorado. Según Plumlee y Edelmann (1995), el drenaje de aguas ácidas se produjo poco después del comienzo de la explotación y falló la retención del agua cianurada de proceso. La compañía se declaró en bancarrota en 1992, y la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. utilizó su autoridad Superfund para controlar la situación. Posteriormente, el Estado de Colorado reforzó sus normativas ambientales en relación con la minería. En 2000, en una operación minera de producción de oro cerca de Baia Mare, en Rumania, se produjo una rotura en la presa que contenía aguas con cianuro, afectando a la fauna fluvial en Rumania, Hungría y Yugoslavia y, además, contaminando el agua potable aguas abajo a lo largo del río Danubio (BBC News, 2001). La operadora era una empresa conjunta formada por una compañía minera australiana junior y el gobierno rumano. Un mal diseño o error de construcción fue la causa que contribuyó al fallo la presa.

Aunque se han dado casos recientes de errores ambientales y de seguridad de la industria minera, las empresas y los gobiernos siguen haciendo esfuerzos para minimizar los daños, lesiones y pérdida de vidas. La mayoría de problemas ambientales asociados con la minería pueden abordarse con éxito si el depósito de garantía es lo suficientemente robusto, económicamente hablando, como para permitir una mitigación adecuada. Los gobiernos proporcionan las normas para la seguridad de los trabajadores y la protección del medio ambiente, y las grandes empresas se han comprometido con la seguridad y protección del medio ambiente.

Por ejemplo, Rio Tinto (2012b) afirma que su "visión de seguridad es que juntos crearemos un lugar de trabajo libre de enfermedades y accidentes donde todo el mundo se va a casa seguro y en condición saludable todos los días de su vida laboral." Freeport-McMoRan Copper y Gold Inc. (2012) tiene una política medioambiental corporativa que "se basa en nuestro objetivo de cumplir con la ley y las regulaciones y reducir al mínimo los impactos ambientales a través de estrategias de gestión de riesgos basadas en datos válidos y del conocimiento científico.

La Minería Artesanal

El atractivo del oro y los diamantes ha mantenido la minería artesanal viva durante siglos. Aunque aportando tan solo una pequeña cantidad de la producción mundial, a veces, las consecuencias de esta actividad son inaceptables en la sociedad moderna. La seguridad que es una prioridad para casi todas las grandes empresas mineras alojadas en los países desarrollados, frecuentemente se carece de ella (fig. 18).

La protección del medio ambiente y de la salud de los trabajadores son a menudo ignoradas. En gran parte del mundo subdesarrollado, el uso de la batea y otros métodos de separación de minerales por densidad se utiliza para concentrar los granos secundarios de oro (Fig. 19). Además, el mercurio todavía se utiliza para extraer las partículas finas de oro en una amalgama de plata. Como hemos aprendido de la minería de los años 1800, en el mundo desarrollado de hoy, existen dos problemas que se producen con la amalgamación en relación con el medio ambiente, lo que lleva a niveles peligrosos de mercurio en peces y animales en la cadena alimentaria y, también, la toxicidad para los trabajadores, que respiran vapores de mercurio durante en el proceso de retirada del oro y la plata de la amalgama. Después de haber aprendido de los errores del pasado, las normativas actuales prohíben el uso del mercurio en las principales operaciones mineras, pero en la práctica, este procedimiento continúa siendo habitual entre los mineros artesanales.



Figura 18. Cuatro mineros artesanales trabajando en condiciones inseguras, sin equipamiento protector ni elementos de consolidación de los huecos.

Figure 18. Four artisanal miners (Galamsey) work unsafely, without personal protective equipment or ground support, near Kyereboso in Ghana in 2008.

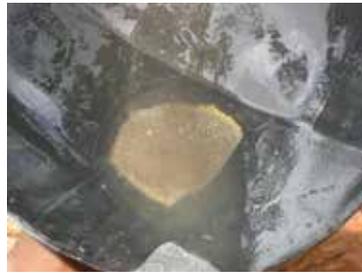


Figura 19. Oro recuperado de la batea. Mina cercana a Kyereboso en Ghana, en el año 2008.

Figure 19. Gold is panned by the artisanal miners in an inner tube, near Kyereboso in Ghana in 2008.

Se requiere que nosotros y nuestras empresas subsidiarias revisen y tomen en cuenta los efectos ambientales de cada actividad, ya sea de exploración, extracción o transformación, y que planifiquemos y llevemos a cabo el diseño, desarrollo, operación y cierre de cada instalación, de manera que optimice el desarrollo económico del uso de los recursos y reduzcamos los efectos ambientales adversos". Las principales compañías mineras internacionales que operan en los países en desarrollo aplican normas que son similares a las regulaciones que se utilizan en los países desarrollados. No sólo es necesario hacer lo que demandan los inversores, en parte debido a las posibles responsabilidades, sino lo que hay que hacer.

Las preocupaciones ambientales sobre la minería constituyen un factor mundial cada vez más relevante en relación con los precios de productos básicos. Los grupos de interés ambiental y la capacidad de las empresas mineras para gestionar los riesgos ambientales de una manera efectiva respecto a su coste podrían convertirse en un aumento de su ventaja competitiva.

Además, está creciendo el nivel de la participación activa con los actores locales en el desarrollo de operaciones mineras. A menudo, un más amplio "grupo

de interés sobre medio ambiente" puede incluir a las comunidades locales, organizaciones no gubernamentales, tales como grupos ecologistas, y a los gobiernos locales y nacionales, así como a los empleados de la empresa minera. La capacidad de las empresas mineras para gestionar cuestiones ambientales es un factor crítico en la obtención de nuevos lugares para operaciones mineras de carácter sostenible.

Preocupaciones sociales y culturales

Se ha definido la sostenibilidad por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1987) como "satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de generaciones futuras para satisfacer sus necesidades", y el desarrollo sostenible es objeto de debate en el contexto de sostener tres áreas características: el medio ambiente, la economía y la estructura social o cultural. Los grupos industriales y gubernamentales han desarrollado los principios del desarrollo sostenible que son específicos a la minería (Tabla 2). Se ha avanzado considerablemente a escala mundial en el desarrollo

sostenible, a pesar de los conflictos que se plantean entre la industria y los grupos de oposición. En su mayor parte, los gobiernos, grupos industriales, empresas individuales y las organizaciones no gubernamentales que representan a las poblaciones locales, han podido ponerse de acuerdo sobre los aspectos ambientales y económicos de un desarrollo sostenible, pero algunas de las preocupaciones sociales y culturales han sido más difíciles de abordar. Newmont Mining Corporation (2012) afirma que “nuestro compromiso con la sostenibilidad es fundamental para lo que somos y cómo hacemos negocios”.

Como una empresa importante de producción de oro, Newmont se ha enfrentado a retos sociales en algunas de sus propiedades. Las relaciones comunitarias de la compañía sufrieron un deterioro en 2000, cuando un camión contratado para transportar mercurio, lo derramó en la carretera en un pueblo

y a lo largo de la ruta de la mina Yanacocha en la Cordillera de los Andes de Perú al puerto de embarque en el Pacífico. En 2004, en respuesta a la oposición local preocupada por la posible contaminación del agua de la ciudad de Cajamarca, Newmont decidió no desarrollar un depósito de agua en la mina de Yanacocha. En 2011, Dave Baker, vicepresidente de Newmont y director de sostenibilidad, hizo hincapié en que el enfoque de Newmont con la sostenibilidad “se basa en un enfoque hacia el esfuerzo por alcanzar el liderazgo en el sector ambiental y la creación de valor compartido con las comunidades que acogen a nuestras operaciones.” En términos de protección del medio ambiente, esto implica el seguimiento de los estándares de calidad de la Organización Internacional de Normalización de gestión ambiental (ISO 14001) para la certificación de todas las operaciones mineras de Newmont y la certificación indepen-

El Banco Mundial (2012), que es un importante financiador de proyectos en países en desarrollo, afirma que su “objetivo (para proyectos de recursos minerales) es facilitar la contribución de las industrias extractivas a la mitigación de la pobreza y el crecimiento económico a través de la promoción de la buena gobernanza y el desarrollo sostenible”.

El *International Council on Mining and Metals* (2012), un grupo de 22 empresas de minería y metales, en 2003, adoptó un marco de desarrollo sostenible, que incluye las prácticas comerciales éticas, la integración del desarrollo sostenible en la toma de decisiones corporativas, la defensa de los derechos humanos y el respeto de las culturas, la conservación de biodiversidad, las contribuciones al desarrollo social, económico e institucional de las comunidades; información pública y las garantías independientes.

La *Prospectors and Developers Association of Canada* (2007), que representa a muchas de las empresas “junior” canadienses que están explorando recursos minerales en todo el mundo, desarrollan normas elaboradas por el sector de la exploración de la industria minera. Para operar, las empresas reconocen que necesitan una licencia social (de la gente, incluyendo las comunidades indígenas locales, y los niveles de gobierno que los representan).

Los miembros de la *National Mining Association* (2012) “se comprometen a integrar los principios sociales, ambientales y económicos de nuestras operaciones mineras de exploración a través del desarrollo, operación, recuperación, cierre y post actividades de cierre, y en las operaciones relacionadas con la preparación de nuestros productos para su uso posterior Desde el punto de vista social, se trata de:

- El compromiso con la seguridad, la salud, el desarrollo y el bienestar de nuestros empleados;
- Respetar los derechos humanos;
- El tratamiento de nuestros empleados con respeto, la promoción de la diversidad, y ofrecer programas de compensación competitivos coherente con el rendimiento y la práctica de la industria;
- Ser un socio progresivo y constructivo para avanzar en las infraestructuras económicas, educativas y sociales de las comunidades en las que operamos;
- Respetar las culturas, costumbres y valores de las personas allí donde operamos, siendo sensible a (y también respetando) las necesidades y prioridades de la comunidad y fomentar y participar en un diálogo abierto y permanente con los grupos interesados, y
- La adhesión a las prácticas comerciales éticas más elevadas en todas nuestras operaciones y la interacción con las comunidades de una manera responsable”.

El *U.S. Forest Service* (2003) y el *Bureau of Land Management* adoptan conjuntamente los principios de sostenibilidad de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible celebrada en Johannesburgo, Sudáfrica, en 2002, y señalan que “estos conceptos básicos de equilibrar los aspectos ambientales, sociales y económicos, el cuidado del medio ambiente, y la participación de los interesados, son los que hemos abrazado”.

Tabla 2. Ejemplos de declaraciones específicas de minería sobre sostenibilidad.
Table 2. Examples of mining-specific statements regarding sustainability.

diente por el Instituto Internacional del Uso del Cianuro. En términos de valor compartido, se trata de “la construcción o el fortalecimiento de la economía local, mejorar la base de activos de una comunidad, como por ejemplo, a través de las infraestructuras, el aumento de la resiliencia de una comunidad o un grupo vulnerable, y asegurar que los procesos y los resultados son social y ambientalmente sostenibles y tienen un enfoque intergeneracional”.

En 2012, el Departamento del Interior de EE.UU./ Oficina de Administración de Tierras otorgó a Newmont el “Hard Rock Mineral Alcance Comunitario y el Premio de Seguridad Económica”, en reconocimiento de la compañía y los esfuerzos de sus empleados por contribuir a organizaciones benéficas locales, escuelas y universidades cerca de sus operaciones en Nevada y por los esfuerzos de la compañía para sostener la economía local después del cierre de las operaciones mineras.

En 2007, el gobierno de Afganistán otorgó un contrato de 3.5 mil millones de dólares a la Corporation China Metallurgical Group para el desarrollo de una gran mina de cobre en Mes Aynak, en la provincia de Logar, 40 kilómetros al sur de Kabul, pero la preocupación por la preservación de restos arqueológicos ha hecho cambiar los planes de este desarrollo (Lawler, 2012). Irónicamente, Mes Aynak es un lugar de importancia histórica de la antigua minería del cobre, con al menos 4000 años de antigüedad. El proyecto inicial contaba con la destrucción de monasterios budistas asociados al procesamiento de cobre de 1500 años de antigüedad, pero ante la presión internacional de arqueólogos, el Ministerio Afgano de Minas llevó a cabo un proyecto de tres años financiado por una subvención de 8 millones de dólares del Banco Mundial para recoger y preservar los antiguos enseres. Debido a que las excavaciones arqueológicas fueron demoradas por cuestiones burocráticas y de seguridad, y porque la minería, al fin y al cabo, no comenzará durante al menos un año más, los arqueólogos han solicitado más tiempo para sus excavaciones.

El público ve de vez en cuando aspectos de la minería moderna, que no son reflejo de las grandes empresas que trabajan dentro del marco legal establecido por los gobiernos. Por desgracia, los fraudes mineros (véase el recuadro sobre fraudes) continúan siendo perpetrados en los inversores incautos, a pesar de que las normas bursátiles se han fortalecido como resultado de uno de los ejemplos más flagrantes. Además, la pequeña minería de subsistencia (véase el recuadro en la minería artesanal) a menudo causa problemas locales de seguridad y daños al medio ambiente y a la salud.

Las preocupaciones nacionales sobre el suministro seguro de las materias primas minerales

La Comisión Europea continúa siguiendo de cerca el desarrollo del sector minero local y, además, ha propiciado una iniciativa sobre las nuevas materias primas de las que carece, apoyando a nuevas e importantes acciones para el sector minero europeo y, de esta manera, sus condiciones generales no han seguido deteriorándose como era habitual.

La Comisión Europea en el año 2008, publica un documento de singular importancia en el mundo de la minería, que señala el punto de partida para toda una serie de iniciativas de reconocimiento de la propia situación y la propuesta de actuaciones específicas que, sin duda, cubrirán todo lo que queda de la actual década (Figura 20). La comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo se titula: “La iniciativa de las materias primas: cubrir las necesidades fundamentales para generar crecimiento y empleo”.

En ella se propone que la Unión Europea (UE) consensue una estrategia integrada sobre materias primas basada sobre los tres pilares siguientes:

- Garantizar el acceso a las materias primas de los mercados internacionales en las mismas condiciones que otros competidores industriales.
- Establecer las condiciones marco adecuadas en la UE para potenciar un suministro sostenible de materias primas de fuentes europeas.
- Fomentar una eficiencia de recursos y promover el reciclaje para reducir el consumo de la UE de materias primas. Disminuir su dependencia relativa de las importaciones.

Además, la Comisión recomienda la determinación, como acción prioritaria de una estrategia europea integrada, de las materias primas fundamentales para la UE. La Comisión, en este documento, propone la puesta en marcha de la Iniciativa Europea sobre Materias Primas con diez actuaciones para los tres pilares antes mencionados.



Figura 20. European Minerals Conference 2010.
Figura 20. European Minerals Conference 2010.

Respecto al segundo pilar, que propone mantener los suministros propios de materias primas minerales, se pretenden las siguientes acciones:

1. Determinación de las materias primas fundamentales.
2. Promoción de un acceso sostenible a las materias primas en el campo de la política de desarrollo, mediante el uso de un apoyo presupuestario, estrategias de cooperación y otros instrumentos.
3. Mejora del marco regulador ligado al acceso a los terrenos.
4. Potenciación de una mejor interrelación entre los Institutos Geológicos nacionales a fin de mejorar la base de conocimientos de la UE sobre los recursos europeos.

La realización de la Comunicación de la Comisión se debe, sin duda, a la alarma surgida ante la vulnerabilidad del suministro de ciertos minerales y metales de los que la UE carece en este momento y que son de vital importancia para el desarrollo de sectores industriales de "alta tecnología" en la Unión Europea:

"Estos metales, que se necesitan únicamente en cantidades muy reducidas, tienen una importancia creciente para el desarrollo de productos de gran complejidad desde un punto de vista tecnológico, con un número de funcionalidades en aumento. La UE no logrará cambiar el rumbo hacia una producción sostenible basada en productos no nocivos para el medio ambiente sin estos metales de alta tecnología"....."la UE se enfrenta a graves riesgos de suministro junto con una gran dependencia de las importaciones y un nivel elevado de concentración en determinados países; y actualmente faltan sustitutos a estos metales".

Se ha encontrado que en la producción de materias primas con destino a las tecnologías emergentes, el tiempo necesario para ello era similar al del desarrollo de las propias tecnologías. Por ello se piensa que el suministro de las materias primas bien puede tener lugar al mismo tiempo que el desenvolvimiento de ese tipo de tecnologías y, por ello, participar de su propio desarrollo. De esta manera, las turbulencias de los mercados (es decir, la volatilidad de precios causada por la prima adicional derivada de la no coincidencia entre el suministro de materias y la demanda) se postula que son el resultado de la incapacidad de la producción de las materias primas a fin de mantenerse al día con la demanda de las tecnologías emergentes. Además, esta situación también resulta de la incapacidad de los productores de materias primas a identificar las tecnologías emergentes lo suficientemente pronto y de la falta de información sobre la demanda de materias primas y las tasas de fabricación de las tecnologías emergentes (Papp, 2011)

El coste de las materias primas puede ser el costo principal de la fabricación de las tecnologías mencionadas en los países industrializados, países que dependen de las materias importadas casi en su totalidad. Los autores han observado que el crecimiento de la economía mundial puede determinar el aumento de la demanda para la producción masiva de materias primas y, en un mundo con una tasa de crecimiento económico de 3.8% anual, el consumo de los productos básicos hasta el año 2030 sería de 2.4 veces mayor que la de 2006. Para el tántalo dedicado a la fabricación de los micro-condensadores y de la tecnología médica, que representó en el año 2006 el 39% de la producción mundial, se ha estimado una tasa de crecimiento de esta demanda sobre un 101% desde ese año hasta el 2030.

La integración de la minería con las empresas industriales productoras de metales, tales como el aluminio, el acero y la energía, ha sido una tendencia clave en los últimos años. Los productores de acero, por ejemplo, están luchando para encontrar yacimientos de mineral de hierro que aún estuvieran disponibles. Los productores de aluminio más importantes, incluyendo Alcan, Alcoa, Rusal, Chalco, Norsk Hydro, Dubal y Indal, buscan activamente depósitos de bauxita para asegurar su suministro. Las transacciones son vistas por las empresas mineras como un mecanismo clave para el dinamismo de su cartera de proyectos de desarrollo de nuevas explotaciones y, también, la diversificación de las carteras en términos de productos y de su geografía (Espí, 2013).

Conclusión

Hoy el futuro se vislumbra algo más brillante para la exploración y explotación de recursos minerales, así como para los profesionales relacionados con la geología ("geos") en áreas de la industria, el gobierno y la academia. Los "geos" serán llamados para hacer frente a los desafíos de encontrar y desarrollar nuevos recursos de manera ambiental, social y económicamente sostenible. La demanda es probable que siga siendo alta e incluso que crezca sostenidamente, mientras que la población mundial y los niveles de vida también sigan aumentando. El mundo no se quedará sin recursos minerales, aunque su sustitución para una misma función y también el reciclaje, probablemente jugarán cada vez más un papel importante en la satisfacción de la demanda mundial. Ello supondrá que los precios de las materias primas impulsarán la investigación y exploración, y que nuevos tipos de yacimientos minerales serán susceptibles de ser descubiertos. Las nuevas tecnologías, a menudo

desarrolladas con el estímulo de los altos precios, sin duda ayudarán a la exploración de concentraciones minerales hasta ahora nada fáciles de alcanzar. Las preocupaciones ambientales, de salud y seguridad y, también sociales, serán factores importantes para decidir dónde se hallarán las minas del futuro y de qué manera van a funcionar.

Referencias

- Barrick Gold Corporation. 2011. Barrick announces two gold discoveries in Nevada (press release dated 7 September 2011).
- Barnes, S.J., Fiorentini, M.L., and Fardon, M.C. 2012. Platinum group element and nickel sulphide ore tenors of the Mount Keith nickel deposit, Yilgarn Craton, Australia: *Mineralium Deposita*, 47, 129-150, doi:10.1007/s00126-011-0348-5.
- BBC News. 2001. One year on: Romania's cyanide spill: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/1146979.stm> (accessed 8 August 2012).
- Bodenlos, A.J., and Thayer, T.P. 1973. Manganese, in Brobst, D.A., and Pratt, W.P., eds., United States mineral resources: *U.S. Geological Survey Professional Paper 820*, 379-399.
- Botin, J.A., Eckley W., Eggert R.G., Espi J.A., Freeman L.W., Millar H.B., Mojtabai N., Rebollo J.L. 2009. Sustainable Management of Mining Operations: *Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME)*.
- Butt, C.R.M., and Brand, N.W. 2003. Mt. Keith nickel sulphide deposit, Western Australia: Cooperative Research Centre for Landscape Environments and Mineral Exploration (CRC LEME), 3 p., <http://crcleme.org.au/RegExpOre/MtKeith.pdf> (accessed 7 August 2012).
- Crowson, P. 2011. The copper conundrum: *Mining Magazine*, 14-21.
- Chengyu, W., Dianhao, H. and Zhongxun, G. 1990. REE Geochemistry in the Weathered Crust of Granites, Longnan Area, Jiangxi Province. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 3, 193-209.
- Chin, E. 1980. The mineral industry of China: *U.S. Bureau of Mines Minerals Yearbook 1980*, 3, 237-259.
- Chin, E. 1981. The mineral industry of China: *U.S. Bureau of Mines Minerals Yearbook 1981*, 3, 225-249.
- Chin, E. 1982. The mineral industry of China: *U.S. Bureau of Mines Minerals Yearbook 1982*, 3, 215-240.
- Cline, J.S., Hofstra, A.H., Muntean, J.L., Tosdal, R.M., and Hickey, K.A. 2005. Carlin-type gold deposits in Nevada: critical geologic characteristics and viable models: *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 451-484.
- Coope, J.A. 1991. Carlin trend exploration history: Discovery of the Carlin deposit: Nevada Bureau of Mines and Geology Special Publication 13, 16 pp.
- Dobra, J.L. 2002. The U.S. gold industry: *Nevada Bureau of Mines and Geology Special Publication 32*, 40 pp.
- Espí, J.A., de la Torre, L. 2014. Claves para la comprensión del entorno actual de las empresas mineras: *Revista de Estudios Económicos*, en prensa.
- Espí, J.A., Sanz, J.L. 2013. Los minerales estratégicos ¿Realmente lo son?: *Revista de Estudios Económicos*, en prensa.
- Ferguson, W. 2012. Record haul of uranium harvested from seawater: *NewScientist*, online article dated 22 August 2012, <http://www.newscientist.com/article/dn22201-record-haul-of-uranium-harvested-from-seawater.html>
- Finch, W.I., Butler, Jr., A. P. Armstrong, F.C., Weissenborn, A.E., Staatz, M.H., and Olson, J.C. 1973. in Brobst, D.A., and Pratt, W.P., eds., United States mineral resources: *U.S. Geological Survey Professional Paper 820*, 455-476.
- Freeport-McMoRan Copper and Gold Inc. 2012. <http://www.fcx.com/envir/envir.htm> (accessed 12 October 2012).
- Glasby, G. 2000. Lessons learned from deep-sea mining: *Science*, 289, 551-553.
- Graedel, T.E., Allwood, J., Birat, J-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B.K., Sibley, S.F., and Gonnemann, G. 2011. What do we know about metal recycling rates?: *Journal of Industrial Ecology*, 15, 355-366.
- Granger, H.C., and Warren, C.G. 1969. Unstable sulfur compounds and the origin of roll-type uranium deposits: *Economic Geology*, 64, 160-171.
- Grguric, B.A. 2003. Minerals of the MKD5 nickel deposit, Mount Keith, Western Australia: *Australian Journal of Mineralogy*, 9, 55-71.
- Hart, C.J.R. 2005. Classifying, distinguishing and exploring for intrusion-related gold systems: *The Gangue*, 87, 1-9
- Hedrick, J.B. 1990. Rare earths: the lanthanides, yttrium, and scandium: *U.S. Bureau of Mines Minerals Yearbook 1990*, 1, 906-922.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., and Einaudi, M.T. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits: *Precambrian Research*, 58, 241-287.
- Hubbert, M.K. 1956. Nuclear energy and fossil fuels, paper presented before the spring meeting of the Southern District Division of Production, American Petroleum Institute, San Antonio, Texas (March 7-9, 1956), Publication No. 95, Shell Development Company, Exploration and Production Research Division, Houston, Texas, 40 p., <http://www.hubbertpeak.com/hubbert/1956/1956.pdf>.
- International Council on Mining and Metals. 2012. Sustainable development framework: <http://www.icmm.com/our-work/sustainable-development-framework>.
- International Seabed Authority. 2012. <http://www.isa.org/jm/en/home>.
- Ivanhoe Mines. 2012. <http://www.ivanhoemines.com>.
- Kyser, K., and Cuney, M. 2008. Unconformity-related uranium deposits, in Cuney, M., and Kyser, K., Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration: *Mineralogical Association of Canada Short Course 39*, 161-219.
- Lang, J.R., Baker, T., Hart, C.J.R., and Mortensen, J.K. 2000. An exploration model for intrusion-related gold systems: *Society of Economic Geologists Newsletter*, 40, 1-15.
- Lawler, A. 2012. Time ticks away for ancient Afghan monasteries: *Science*, 337, 1279-1280.
- Lechler, P.J., Price, J.G., Shumaker, M., Coyner, A., and Driesner, D. 2008. Gold from water (and other mining scams), second edition: *Nevada Bureau of Mines and Geology Special Publication 22*, 16 pp.

- Lide, D.R., ed. 2005. *The CRC handbook of chemistry and physics*, 85th edition: CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Louis, J. 2007. The Bre-X scandal ends: chief geologist found not guilty: <http://www.resourceinvestor.com/2007/07/31/the-brex-scandal-ends-chief-geologist-found-not-gu> (accessed 7 August 2012).
- Mariano, A. 2010. The nature of economic REE and Y minerals on a world level: Critical elements for new energy technologies, An MIT Energy Initiative Workshop Report, April 29, 2010: Massachusetts Institute of Technology, 61-93.
- McEvedy, C., and Jones, R. 1978. *Atlas of World Population History, Facts on File*, New York.
- McPhie, J., Kamenetsky, V.S., Chambefort, I., Ehrig, K., and Green, N. 2011. Origin of the supergiant Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia: Was a sedimentary basin involved? *Geology*, 39, 795-798.
- Milkereit, B., Berrer, E.K., King, A.R., Watts, A.H., Roberts, B., Adam, E., Eaton, D.W., Wu, J., and Salisbury, M.H. 2000. Development of 3-D seismic exploration technology for deep nickel-copper deposits—a case history from the Sudbury basin, Canada: *Geophysics*, 65, 6, Special Section—Mining Geophysics, 1890-1899.
- Milman, O. 2012. Papua New Guinea's seabed to be mined for gold and copper: The Guardian, <http://www.guardian.co.uk/environment/2012/aug/06/papua-new-guinea-deep-sea-mining>.
- Ministry of Mines and Energy. 2010. Strategic Environmental Assessment for the central Namib Uranium Rush. Ministry of Mines and Energy, Windhoek, Republic of Namibia, <http://www.saiea.com/uranium/index.html>.
- Muntean, J. L., Cline, J. S., Simon, A. C., and Longo, A. A. 2011. Magmatic-hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits: *Nature Geoscience*, 4, 122-127.
- National Mining Association. 2012, NMA sustainable development principles, http://www.nma.org/issues/environment/sustainable_development.asp.
- Net Resources International. 2011. Ekati diamond mine, Northwest Territories, Canada: <http://www.mining-technology.com/projects/ekati>.
- Newmont Mining Corporation. 2012. <http://www.newmont.com/sustainability>.
- Oreskes, N., and Einaudi, M.T. 1990. Origin of rare earth element-enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, Roxby Downs, South Australia: *Economic Geology*, 85, 1-28.
- Papp, J.F. 2011. Niobium and Tantalum, U.S. Geological Survey: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium>
- Plumlee, G.S., and Edelman, P. 1995. The Summitville mine and its downstream effects, an on-line update of Open File Report 95-23: U.S. Geological Survey Open-File Report 95-23: <http://pubs.usgs.gov/of/1995/ofr-95-0023/summit.htm>.
- Price, J.G. 2013. The challenges of mineral resources for society, in Bickford, M.E., *The Impact of the Geological Sciences on Society*: Geological Society of America Special Paper 501, 1-19.
- Price, J.G., Muntean, J.L., Davis, D.A., Shevenell, L., and Zehner, R. 2011. The Nevada mineral industry, 2010: Nevada Bureau of Mines and Geology Special Publication MI-2010, 151 pp.
- Prospectors and Developers Association of Canada. 2007. Sustainable development and corporate social responsibility – tools, codes and standards for the mineral exploration industry: <http://www.pdac.ca/pdac/publications/pdf/sd-csr-publication-final.pdf>.
- Raw Materials Group, RMG, 2011: www.rmg.se, 2011
- Reck, B.K, and Graedel, T.E. 2012. Challenges in metal recycling: *Science*, 337, 690-695.
- Reeve, J.S., Cross, K.C., Smith, R.N., and Oreskes, N. 1990. Olympic Dam copper-uranium-gold-silver deposit, in Hughes, F.E., ed., *Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea*: Melbourne, Australia, *Australian Institute of Mining and Metallurgy*, 1009-1035.
- Rio Tinto. 2009, Kennecott Utah Copper's Bingham Canyon mine, teacher guide: <http://www.kennecott.com/library/media/TeacherGuide.pdf>.
- Rio Tinto. 2010. Exploration and acquisition in the global mining industry, Exploration World Mining Investment Congress – London 2010
- Rio Tinto. 2012a. Kennecott Utah Copper, <http://www.kennecott.com/operation>.
- Rio Tinto. 2012b. Safety: <http://www.riotinto.com/sustainabledevelopment2011/social/safety.html>.
- Roberts, D.E., and Hudson, G.R.T. 1983. The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit, Roxby Downs, South Australia: *Economic Geology*, 78, 799-822.
- Schreiber, U. 2005. Uranium mineralization in Namibia (poster): Namibia Geological Survey, <http://www.mme.gov.na/gsn/pdf/URANIUM.pdf>.
- Scott, S. 2012. Deep ocean mining: dawning of new and reborn industries: *Sea Technology*, September 2012, 7.
- Seko, N., Katakai, A., Hasegawa, S., Tamada, M., Kasai, N., Takeda, H., and Sugo, T. 2003. Aquaculture of uranium in seawater by a fabric-absorbent submerged system: *Nuclear Technology*, 144, 274-278.
- Sillitoe, R.H. 1991. Intrusion-related gold deposits, in Foster, R.P., ed., *Gold metallogeny and exploration*, Blackie, Glasgow, 165-209.
- Tamada, M. 2009. Current status of technology for collection of uranium from seawater: Erice International Seminar, http://www.physics.harvard.edu/~wilson/energypmp/2009_Tamada.pdf.
- Tapscott, D. and Williams, A.D. 2007. Innovation in the Age of Mass Collaboration; *Businessweek - Business News, Stock Market & Financial Advice*, <http://www.businessweek.com/stories/2007-02-01/innovation-in-the-age-of-mass-collaborationbusinessweek-business-news-stock-market-and-financial-advice>.
- Tischler, L. 2002 He struck gold on the net (really): *Fast Company*, <http://www.fastcompany.com/magazine/59/mcewen.html?page=0%2C0>.
- Thornton, R. 1990. American Indian holocaust and survival: a population history since 1492, University of Oklahoma Press, Norman, Oklahoma, *The civilization of the American Indian Series*, 186, 247 pp.
- Twain, M. 1872. *Roughing it*: American Publishing Company, Hartford, Connecticut, 1962 edition republished by the New American Library, Inc., New York, 448 pp.
- U.S. Department of Commerce. 1933. Minerals yearbook, 1932-33: Bureau of Mines, 819 p., <http://digi->

- coll.library.wisc.edu/cgi-bin/EcoNatRes/EcoNatRes-idx?id=EcoNatRes.MinYB193132.
- U.S. Department of Interior. 1955. *Minerals yearbook, metals and minerals (except fuels)*, 1952: Bureau of Mines, v. 1, 1218 p., <http://digicoll.library.wisc.edu/cgi-bin/EcoNatRes/EcoNatRes-idx?id=EcoNatRes.MinYB1952v1/>.
- U.S. Department of Interior. 2013. Mineral commodity summaries 2013: *U.S. Geological Survey*, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2013/mcs2013.pdf>.
- U.S. Forest Service. 2003. Sustainable development minerals applications, http://www.fs.fed.us/geology/fs_blm_statement_of_support.pdf.
- U.S. Geological Survey. 2012. The national map, <http://viewer.nationalmap.gov/viewer/>.
- Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., de Haller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S., and Rarschik, R. 2005. Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin: *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 371-405.
- Wilson, S.A., Ridley, W.I., and Koenig, A.E. 2002. Development of sulfide calibration standards for the laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry technique: *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17, 406-409.
- World Bank. 2012. <http://www.worldbank.org>.
- World Commission on Environment and Development. 1987. Our common future: *Oxford University Press*, 400 pp.
- World Nuclear Association. 2012a. Brief history of uranium mining in Canada: http://www.world-nuclear.org/info/inf49i_Canada_Uranium_Mining_Historya.html.
- World Nuclear Association. 2012b. In situ leach (ISL) mining of uranium: <http://www.world-nuclear.org/info/inf27.html>.
- World Nuclear Association. 2012c. Uranium and nuclear power in Kazakhstan: <http://www.world-nuclear.org/info/inf89.html>.
- Yamazaki, T. 2007. Economic validation analyses of Japan's proposed nodule, crust, and Kuroko-type SME mining in 2006: Oceans 2007 conference, 6 p., <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4449129>.

Recibido: agosto 2013

Revisado: noviembre 2013

Aceptado: enero 2014

Publicado: febrero 2014

