

## 5. QUÍMICA

### 5.1

## Minerales no renovables

Cómo enfrentar el desafío de mantener o participar del crecimiento en un mundo cada vez más hambriento de recursos

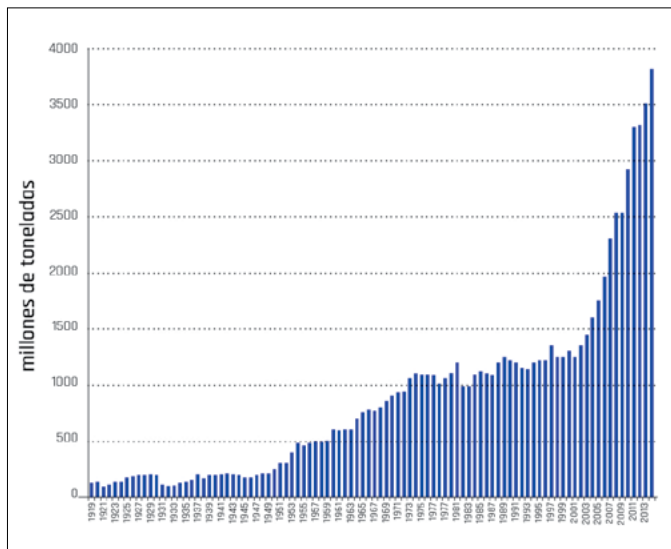
Por el Cnl A (RE) OIM Carlos Hugo Trentadue\*

A veces, parecería que creemos que algunos recursos minerales que posee nuestro planeta son infinitos. Y los de nuestro país también. Cada vez que hablamos de recursos no renovables automáticamente pensamos en el petróleo, o a lo sumo en el gas, olvidándonos de que estos son sólo algunos de los materiales que desde la segunda revolución industrial se consumen de manera creciente en Argentina y el mundo.

Y este pensamiento se ha hecho particularmente más persistente en esta era postindustrial que nos toca vivir, en la que el crecimiento económico impulsado por el conocimiento se ha convertido en el factor central del progreso y, como consecuencia, parece que el valor de los recursos naturales ha disminuido, en especial al considerar que la tecnología proporciona nuevas formas de utilizar los recursos existentes de manera más eficiente e incluso sustitutos sintéticos de alguno de los recursos naturales no renovables.

Además de lo expresado en el párrafo anterior, la globalización del comercio ha reducido aún más la importancia relativa de estos recursos en cuanto a poseerlos en el territorio propio. La existencia de un sistema institucionalizado de comercio internacional implica que los países ya no estarían tan limitados por la relativa abundancia de sus recursos naturales en cuanto se refiere

ILUSTRACIÓN 1: PRODUCCIÓN MUNDIAL DE 14 MINERALES Y METALES ESENCIALES PARA LA ECONOMÍA GLOBAL 1919 - 2015- FUENTE USGS



a sus perspectivas de crecimiento y potencial nacional, si la situación entre el país demandante y el o los posibles proveedores no es de competencia.

Estos conceptos son hoy más vigentes dado que el número de materias primas críticas ha disminuido a partir de la especialización que cada país ha experimentado en cada rama de la industria, por lo que dependiendo de donde se encuentra en la cadena de producción de cada producto, se interesará más o menos en determinados minerales o sustancias.

A esto se agrega que son también muy pocas las materias primas que sólo tienen una fuente de suministro... en tiempos de paz. Esto es aplicable hoy incluso para los recursos naturales de alta prioridad como los vinculados con la energía.

Pero el progreso tecnológico y el incremento del estándar de vida de la población del planeta implica un mayor consumo de recursos de toda índole, entre ellos los minerales, como podemos ver en la Ilustración 1 que refleja la producción de catorce minerales y metales que se consideran esenciales para la economía global. Ellos son el aluminio, cobalto, cobre, cromo, el grupo del platino, manganeso, níquel, oro, plomo, zinc, y el mineral de hierro, y minerales como la roca fosfatada, la potasa, y la barita. La aparición de los BRIC, es decir Brasil, Rusia, India y China, como demandantes de recursos a partir de 2001 ha hecho que se triplicara la producción en un período de apenas 14 años.

Y es de esperar que, como consecuencia del crecimiento de la clase media<sup>1</sup> en el mundo, no sólo en los países enunciados, esta tendencia se mantenga o incluso se incremente.

ILUSTRACIÓN 2: MATERIALES COMPONENTES DE UNA TURBINA P&W F100 CON SUS PAÍSES DE ORIGEN

Material	Peso (Kg)	Precio total del metal a granel (u\$s)	Fuentes de suministro
Titanio	2.485	32.305	EEUU, China, Japón, Rusia, Ucrania, Kazajistán, etc (esponja de titanio)
Níquel	2.085	22.174	Rusia, Canadá, EEUU, Indonesia, Brasil, etc
Cromo	697	7.574	Sudáfrica, Kazajistán, Rusia
Cobalto	402	11.598	Congo, Cuba, China, Canadá, Brasil, Rusia, etc
Aluminio	42	82	China, Rusia, India, Canadá, Brasil, EEUU, etc
Niobio	74	6.926	Brasil, Canadá
Tantalio	1,4	270	Brasil, Mozambique, Ruanda, Canadá

### Factores que afectan la disponibilidad de recursos

Cualquiera sea el país considerado, varios factores pueden hacer que uno o varios de los materiales que le son críticos para que su industria funcione, vean afectada su cadena de suministros: la escasez física, por no ser accesibles o por agotamiento de las reservas; los altos costos, dados por la volatilidad de los precios o por desarrollos del mercado; y, finalmente, por aspectos geopolíticos<sup>2</sup>, como el establecimiento de control de exportaciones, establecimiento de barreras, o conflictos armados o económicos. Estos factores están interrelacionados y pueden presentarse

1 En el 2000, de acuerdo al Banco Mundial, habían cerca de dos mil millones de personas en esa categoría en el mundo; en 2016, se catalogaban 3.200 millones. Para 2028 se estima que casi 5,2 mil millones estarán incluidos en ella. <https://www.brookings.edu/research/the-unprecedented-expansion-of-the-global-middle-class-2/>. Último acceso 23 Nov 2017.

2 Westermann, A. *Geology and World Politics: Mineral Resource Appraisals as Tools of Geopolitical Calculation, 1919-1939*; Historical Social Research; 2015. DOI: 10.12759/hsr.40.2015.2.151-173

aislados o en conjunto, teniendo a veces una acción sinérgica que incrementa el riesgo a la industria en cuestión.

Pese a lo que vimos respecto de la globalización y el flujo de materiales, ningún país del mundo es autosuficiente en todos los minerales que requiere su industria.

Estados Unidos, la Unión Europea, Rusia, China y Japón dependen de sus importaciones de ciertos, muchos o pocos, materiales para poder seguir manteniendo o acrecentando sus producciones. Se puede suponer que la palabra “dependencia” sugiere una vulnerabilidad, por lo que podría desearse que la remplazáramos con otros conceptos tales como “insuficiencia doméstica en las actuales condiciones del mercado” o “déficit de comercio exterior”, pero cualquiera sea el criterio semántico que se le quiera dar a la expresión, permanece el problema de que todo país necesita de esos suministros para funcionar<sup>3</sup>.

Podemos ver un ejemplo de esto en la Ilustración 2, en la que se encuentra una descripción de los materiales componentes de una turbina del tipo que forma parte del sistema de propulsión de un avión F15 y también del F16. Como se puede ver en la tabla, gran parte de dichos materiales proviene de países tradicionalmente no alineados detrás de Estados Unidos, fabricante de estas turbinas.

Nuestro país es dependiente de muchos productos importados, no sólo para la industria en general sino para la industria militar en particular. Desde el latón militar (la aleación de cobre y zinc que se usa para la producción de vainas de munición) hasta los aceros de blindaje, deben ser obtenidos en el mercado internacional, pese a que Argentina dispone de las materias primas para producir los materiales mencionados, pero no ha desarrollado o ha perdido las capacidades tecnológicas para obtenerlos localmente.

Los cambios producidos en países como China e India, con crecimientos notables de sus estándares de vida y niveles de

ILUSTRACIÓN 3: PROYECTOS MINEROS EN ARGENTINA 2016 - FUENTE CAEM

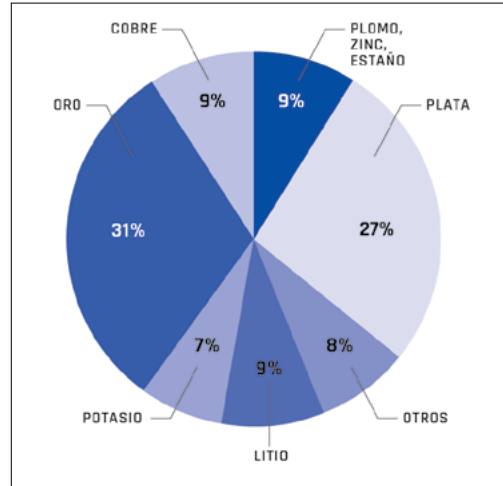
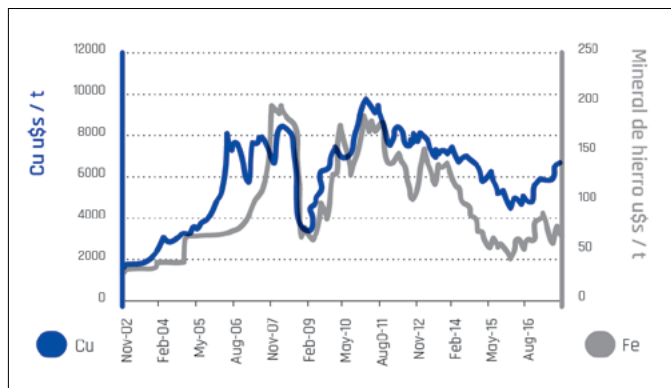


ILUSTRACIÓN 4: PRECIO DEL MINERAL DE HIERRO Y COBRE -2002-17 - FUENTE FMI



<sup>3</sup> Este concepto es analizado aquí restringido a algunos minerales usados como ejemplos, pero en la industria globalizada actual, esto es aplicable a todas las producciones de un país, por ejemplo, la importación de ciertos conservantes para alimentos que permiten la fabricación de golosinas o de pan y que sin ellos no sería posible producir a escala internacional y exportar estos productos.

industrialización, incrementaron la demanda de hierro<sup>4</sup> y cobre<sup>5</sup>, haciendo que estos cuadruplicaran y duplicaran, respectivamente sus precios entre 2002 y 2017, como puede verse en la Ilustración 4.

El precio del renio, que es usado en la fabricación de aleaciones que resisten muy altas temperaturas, como por ejemplo las requeridas para la fabricación de motores de aviación de alta eficiencia, alcanzó en 2008 los US\$11.250 /kg, cerca de 12 veces su precio en 2006, cayendo luego hasta los US\$2.300/kg a noviembre de 2017. Aún después de la caída sigue siendo una buena noticia para los países que poseen grandes reservas de este metal, como Chile y Kazakstán. Es interesante notar que este metal se encuentra compartiendo depósitos de cobre tipo pórfido, que la Argentina también dispone y que podrían ser evaluados para su extracción en nuestro país.

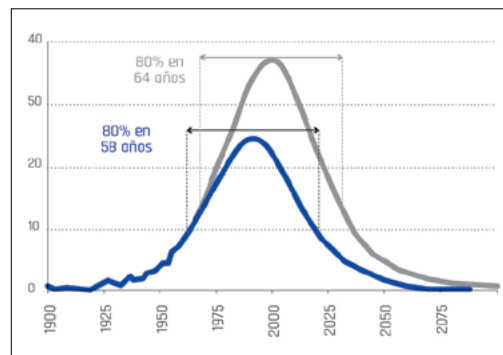
Las reservas mundiales de indio<sup>6</sup>, usado para la producción de celdas colectoras de energía solar y paneles de cristal líquido (LCD), junto con las de hafnio<sup>7</sup>, un componente esencial de chips de computadoras y barras de control en reactores nucleares, son realmente desconocidas. En un artículo en una publicación en 2007 se anunciaba que para 2017 no habría más reservas en el mundo<sup>8</sup>. Esto no ha sucedido. Esta afirmación tiene que ver con la confusión entre las definiciones de reservas y recursos. Reserva no significa “la cantidad de un elemento disponible para nosotros”. Significa la cantidad que hemos examinado, perforado, probado, pesado, y que, fundamentalmente, puede extraerse a los precios actuales y con la tecnología actual... y todavía producir un beneficio al hacerlo.

Es lo que explica la diferencia entre las cifras de “recursos” y “reservas” de los diferentes metales. Hay una gran cantidad de recursos en el mundo, pero no ha habido interés en su búsqueda por no tener una utilización que los haga atractivos, o la ecuación económica no ha permitido convertirlos en reservas, porque su precio es bajo o porque la tecnología actual no nos permite alcanzarlos.

Esto es aplicable a casi todos los minerales de los cuales nuestra sociedad extrae los elementos que caracterizan a nuestra civilización, incluidos los energéticos.

Por ello, cuando hablamos de cuantos recursos disponemos debemos precisar cuáles son las reservas del mismo, y una forma de evaluar

ILUSTRACIÓN 5: PROYECCIÓN DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PETRÓLEO REALIZADA POR HUBBERT EN 1971 Y PUBLICADA EN SCIENTIFIC AMERICAN. LA CURVA SUPERIOR MUESTRA QUE, AUNQUE LAS RESERVAS FUESEN UNA VEZ Y MEDIA MAYORES, LA FECHA DEL PICO DE LA PRODUCCIÓN SOLO SE RETRASARÍA 8 AÑOS Y EL TIEMPO PARA CONSUMIR EL 80% DEL RECURSO SE RETRASARÍA SEIS AÑOS



4 Fuente Fondo Monetario Internacional, Mineral de hierro, 62% Fe spot (CFR Tianjin), Dólares norteamericanos por tonelada métrica seca. En marzo de 2008 el precio alcanzó los 197,12 dólares norteamericanos por tonelada, siendo este también el más alto los últimos 25 años. A octubre de 2017 se pagaba a US\$61,66/ton.

5 A febrero de 2011, el precio del Cobre alcanzó los \$9.867 por tonelada en el London Metal Exchange, siendo este el más alto de la historia. A octubre de 2017 se pagaba US\$6.807/ton.

6 El indio se obtiene principalmente hoy a partir del procesamiento del mineral de zinc y tiene un precio FOB Rotterdam de 340 u\$s/ kg. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/mcs-2017-indiu.pdf>

7 También obtenido a partir del procesamiento del mineral de zinc. El precio ronda los 600 u\$s/kg según la misma fuente anterior.

8 D Cohen, New Scientist 2007, 194, 35.

por cuánto tiempo dispondremos de ellas es a través de la relación de la cantidad económicamente recuperable dividida por la tasa de uso presente del recurso.

La teoría económica clásica nos indica que a medida que esta relación, a la cual podríamos llamar “vida remanente” de la reserva, se hace menor, el precio del recurso se incrementará, siendo todos los otros factores que afectan la demanda, constantes. Este incremento hará que la demanda por esa reserva disminuya, al mismo tiempo que otras fuentes del mineral considerado, originalmente muy costosas, entren en el mercado. Este es el caso del aluminio. La fuente primaria de obtención de este metal es la bauxita, cuyas reservas conocidas se estiman suficientes para los próximos 70 años al ritmo de consumo presente. Pero el aluminio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, por lo que, si consideramos fuentes alternativas, hoy no rentables, se cree que existe aluminio para más de 1000 años.

Como ya expresáramos, cada vez que analizamos recursos naturales, no sólo debemos poner en la ecuación la existencia o no de los depósitos sino la factibilidad técnica para extraerlos.

Mientras que algunos elementos son abundantes, el proceso por el cual pueden ser producidos para convertirlos en usables (es decir, el proceso de transformación de mineral, tal cual se encuentra en la naturaleza, hasta el metal como lo usa la industria) establece un límite en la rapidez en que una reserva determinada puede ser explotada. Un ejemplo de esto es el platino que es obtenido básicamente de dos minas en todo el mundo, una que suministra cerca del 80 por ciento de la oferta mundial, en el Bushveld Complex<sup>9</sup> en Sudáfrica, y cerca del 14 por ciento en Rusia, por la compañía Norilsk Nickel<sup>10</sup>.

Uno de los usos más relevantes del platino es para la fabricación de celdas de combustible, lo que aparece como una opción eficiente para suministrar energía a vehículos. La oferta mundial de platino es del orden de las 200 toneladas por año<sup>11</sup>, lo que es suficiente sólo para equipar unos 2 millones de automóviles<sup>12</sup>, lo que representa menos del 0,3 por ciento de la flota mundial prevista para el 2028 de cerca de 700 millones. O, dado que se usan alrededor de cuatro gramos de este metal en el convertidor catalítico de automóviles, permitiría fabricar estos dispositivos para un siete por ciento de ellos.

Las cifras del párrafo anterior han sido determinadas suponiendo que todo el platino que entre al mercado será consumido en la producción de celdas de combustible o en convertidores catalíticos, sin ningún remanente para cubrir la demanda en catalizadores para la industria química mundial y la joyería, que hoy representan un 40 por ciento de la demanda. La tecnología actual para extraer el platino permite un rendimiento de unos tres gramos por tonelada de mineral procesado<sup>13</sup>, no es un proceso sencillo y no se prevé ningún método alternativo que permita hacerlo más rápido.

## El “pico” de un recurso

El sismólogo estadounidense Marion King Hubbert (1903-1989) postuló una teoría, que hoy lle-

<sup>9</sup> Esta empresa posee el 90 por ciento de las reservas conocidas de este metal.

<sup>10</sup> Si bien se estima que Rusia posee cerca del ocho por ciento de las reservas mundiales, no es posible precisarlo dado que el suministro de este origen proviene tanto de la producción de las minas de níquel, de cobre y de depósitos aluviales como de reservas gubernamentales que nadie ha podido estimar.

<sup>11</sup> USGS. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/mcs-2016-plati.pdf>

<sup>12</sup> CJ Rhodes, Energy balance blog: [ergobalance.blogspot.com](http://ergobalance.blogspot.com)

<sup>13</sup> Esto representa que, para obtener un kilogramo de platino, deberá remover de la mina cerca de 330 toneladas de mineral, transportarlo hasta la planta de procesamiento, procesarlo y disponer del material de desechos.

va su nombre, referida al agotamiento de recursos naturales, en particular al petróleo pero que puede ser extendida a otros recursos no renovables. La teoría postula que, para una zona geográfica determinada, ya sea una región particular o el planeta en su conjunto, la tasa de producción del recurso en cuestión tiende a seguir una curva en forma de campana (Ilustración 5). Es una de las principales teorías sobre el llamado “pico” petrolero y se basa en la observación de que la cantidad de petróleo bajo tierra en cualquier región es finita y, por lo tanto, la tasa de extracción que inicialmente se incrementa en forma rápida debe alcanzar un máximo para luego declinar.

Esto implica la existencia de un pico en todos los procesos de obtención de recursos naturales, es decir, un punto en el tiempo donde la cantidad extraída del recurso en cuestión será máxima y caerá indefectiblemente luego.

El United States Geological Survey (USGS o Servicio Geológico de los Estados Unidos) publica anualmente estadísticas sobre 57 minerales, sobre los que se han aplicado este concepto<sup>14</sup>, llegando a la conclusión de que hay 11 de ellos que ya han alcanzado su “pico” a nivel mundial. Bardi y Pagani han evaluado los datos del USGS buscando no sólo la presencia del pico de producción, sino también analizando la cantidad de mineral extraído hasta ahora y extrapolando las posibilidades futuras siguiendo el modelo de Hubbert.

En su forma básica, como vemos en la Ilustración 5, este modelo afirma que la curva de producción es simétrica, es decir, el pico de producción se produce cuando se ha extraído aproximadamente la mitad de los recursos extraíbles.

El concepto de “recurso extraíble” se define por el área bajo la curva de extracción al final del ciclo; lo extraíble es lo que realmente se extrae. Sin embargo, es posible calcular esta cantidad como los “Últimos Recursos Recuperables” (URR). La empresa British Petroleum (BP) en el caso del petróleo crudo lo define como “la estimación de la cantidad total de petróleo que será recuperado y extraído. Es una estimación subjetiva basada en información parcial”.

Esta estimación es incluso más subjetiva en el caso de los minerales por varias razones. El primer factor es que el conocimiento de los recursos del mundo es mucho más incierto que en el caso del petróleo.

Otra dificultad puede ser la falta de datos confiables sobre consumo históricos, dado que los mercados de uso varían a medida que la tecnología cambia. Un claro ejemplo de esta situación puede verse en la fabricación de microprocesadores. De acuerdo a Intel, en 1980, para fabricar un chip de computadora se usaban 12 elementos de la tabla periódica; en 1990 se usaban 16 y hoy, para los chips de la generación tipo Intel® Core™ i7, se usan 60<sup>15</sup>.

TABLA 1: METALES CUYO EMPLEO SE PREVÉ CRECIENTE POR DEMANDA TECNOLÓGICA

Mineral	Usos
Antimonio	Catalizadores e industria farmacéutica
Gallo	Semiconductores, celdas solares y materiales de contraste para RMN
Hafnio	Chips de computadoras, barras de control nuclear
Indio	Celdas solares y paneles LCD
Plata	Catalizadores industriales, joyería
Platino	Catalizadores, joyería, celdas solares
Tantalio	Telefonía celular, lentes para cámaras fotográficas
Uranio	Combustible nuclear
Zinc	Galvanoplastia

14 Ugo Bardi and Marco Pagani: Peak minerals, <http://www.theoil drum.com/node/3086>

15 National research Council: *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*. 2008. National Academy of Sciences. EEUU.

Por último, los minerales a menudo aparecen como recursos con “riquezas” variables, es decir, como depósitos de concentraciones diferentes. Esto impacta en el costo de extracción, siendo este inversamente proporcional a dicha concentración. A medida que la riqueza del mineral baja, el costo de obtenerlo sube.

Por lo tanto, es difícil determinar un punto límite de qué es exactamente extraíble y qué no.

Para varios metales, por ejemplo para el mercurio, se postula haber encontrado evidencia de que se ha alcanzado el pico de producción alrededor de 1962; para el zirconio en 1990 y para el selenio en 1994<sup>16</sup>. Cabe señalar que en el caso del primer elemento su demanda ha disminuido drásticamente a partir de su reemplazo en gran cantidad de aplicaciones por otras sustancias de menor toxicidad, de poco menos de 10.000 toneladas<sup>17</sup> a principios de los años 70 a unas 4.500 toneladas en 2016, por lo que es difícil precisar si realmente se alcanzó el pico de producción por agotamiento del recurso o por reducción de la demanda. También es discutible en los otros dos casos, dado que los recursos identificados de zirconio al presente alcanzan para casi 70 años de consumo al ritmo actual de demanda<sup>18</sup>, mientras que los de selenio alcanzan, con las mismas consideraciones, a unos 50 años; esto es si no se descubren nuevos yacimientos o se tornan viables nuevos recursos.

ILUSTRACIÓN 6: ALGUNOS MINERALES PROCESADOS Y LA CANTIDAD DE ELLOS QUE SON RECICLADOS AL FIN DE SU CICLO DE USO



Caídas en la producción de telurio y selenio, que son usados por la industria de semiconductores, también pueden limitar el desarrollo de tecnologías que dependan de ellos, puesto que no hay materiales de sustitución con propiedades equivalentes. Ambos se obtienen de los barros de procesamiento del cobre.

El cobre, zinc, estaño, níquel y platino muestran un aumento casi exponencial en la producción. Sin embargo, las existencias de algunos metales pueden ser insuficientes para abastecer las demandas tecnológicas a largo plazo o incluso en un futuro próximo.

Las cifras anteriores se basan en la suposición de que los picos determinados representan máximos de producción global real. Reiteramos que, de hecho, podrían aparecer más reservas de todos los minerales si se encararan proyectos de prospección para su búsqueda<sup>19</sup>.

Pero los factores que sustentan los costos de extracción, en términos tanto de financiación como sobre todo de la energía, pueden ser finalmente los elementos que determinen el pico real y la declinación de las reservas recuperables de minerales.

16 Ibidem Ugo Bardi and Marco Pagani.

17 [http://acmg.seas.harvard.edu/publications/2014/Horowitz\\_2014\\_EST\\_HgProducts.pdf](http://acmg.seas.harvard.edu/publications/2014/Horowitz_2014_EST_HgProducts.pdf)

18 USGS Zirconium and Hafnium. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/zirconium/mcs-2017-zirco.pdf>. Último acceso 23 Nov 2017.

19 En 1916 el ingeniero Enrique Martín Hermitte, quien era director de la Dirección de Minas Geología e Hidrología de nuestro país, escribe en la memoria anual de ese organismo la necesidad de "...proceder a la confección del mapa geológico –económico de la República" para poder conocer cuáles eran los recursos con que el país podía contar para transformarlos en reservas.

La energía involucrada en la extracción de un metal, por ejemplo, cobre, no sólo depende de la energía necesaria para extraerlo del mineral y refinarlo. También depende de la energía necesaria para extraer petróleo (o carbón, gas o uranio) y convertir a éste en potencia y maquinaria útil para extraer el cobre. Dado que los combustibles fósiles son cada vez más difíciles de obtener, más energía se necesita para su producción y el resultado es un nuevo incremento en la energía necesaria para la extracción de cualquier mineral.

El sistema de extracción de todo el mundo está interconectado de este modo. Esta conexión puede explicar por qué se supuso que los picos de la mayoría de los productos minerales parecían estar agrupados en un período que va desde las últimas décadas del siglo XX hasta las primeras décadas del siglo XXI, el período cuando las dificultades en la producción de combustibles fósiles se estaban comenzando a sentir en todo el mundo y se hablaba de haber alcanzado el pico del petróleo<sup>20</sup>, hasta que la aparición de tecnologías rentables de explotación de los yacimientos de energéticos en esquistas (shale) como reserva hizo que ese tema fuese postergado.

Por lo tanto, puede ser la escasez de energéticos lo que determine la cantidad real de todos los otros minerales que pueden extraerse y enviarse a los mercados del mundo.

### **La opción para disminuir el impacto: Reciclado**

Frente al agotamiento de los recursos, la opción de reciclaje parece cada vez más atractiva. Esta idea no es novedosa y se emplea en la industria desde hace años, con porcentajes variables pero importantes según el metal, como se puede observar en la Ilustración 6, donde vemos que, por ejemplo, el 85 por ciento del acero es reciclado como chatarra en la producción de metal nuevo.

En una sociedad que ha desarrollado la cultura de tirar todo lo que dejamos de usar, quizás podría ser el momento de comenzar la “minería” de sus desechos.

Una evaluación desarrollada en Europa recientemente ha encontrado que la concentración de platino en el polvo de las banquinas de las principales autopistas es similar a la concentración de tres partes por millón en el mineral de platino de África del Sur. Esto sugiere que extraerlo de este polvo, que se origina en los convertidores catalíticos de los vehículos, podría resultar económicamente viable y ampliaría la cantidad de platino disponible.

Para varios metales tales como el hafnio, el indio, el galio, el telurio y el selenio, críticos de la industria electrónica, el reciclaje es la forma más sencilla de extender la duración de las reservas, dado que, aunque sea discutible que se hayan alcanzado sus picos de producción, es conveniente, por un lado, desde un punto de vista conservacionista y, por el otro, a menos que el país sea un productor de dichas sustancias, para evitar la salida innecesaria de divisas.

Una fuente interesante de desechos minerales reutilizables son los teléfonos celulares descartados. Las ventas mundiales sólo de teléfonos inteligentes en 2016, fueron poco más de 1,7 mil millones de unidades, de un total de más de 7,8 mil millones de suscripciones de telefonía celular<sup>21</sup>. Y en nuestro país, el 90 por ciento de la población dispone de una suscripción de telefonía móvil<sup>22</sup> al mismo tiempo que las estadísticas internacionales nos dan 50 millones de celulares<sup>23</sup>. En total, generamos en nuestro país alrededor de 290.000 toneladas de residuos

<sup>20</sup> Como una aproximación cuantitativa, puede verse aplicando Google Ngram que en los libros que están registrados en ese sistema, se produjo un incremento del uso de la expresión oil peak de más del 1000 por ciento entre el 2000 y el 2008, último año registrado.

<sup>21</sup> <http://www.statista.com/statistics/262950/global-mobile-subscriptions-since-1993/>

<sup>22</sup> <https://www.infobae.com/economia/2017/03/13/en-la-argentina-hay-mas-de-3-usuarios-de-celulares-por-cada-uno-con-cuenta-bancaria/>

<sup>23</sup> <http://www.cronista.com/negocios/Efecto-smartphone-las-lineas-de-celulares-ya-superan-a-la-poblacion-mundial-20160307-0055.html>



electrónicos, de las cuales, alrededor de 800 toneladas son teléfonos celulares<sup>24</sup>, es decir unos 10 millones de aparatos.

Lo que no es muy conocido es que, para hacer posible la telefonía celular tal cual la conocemos hoy, necesitamos usar una amplia variedad de minerales. En un estudio realizado en 2015 por investigadores de la Yale University<sup>25</sup>, estos encontraron que actualmente se usan 62 de los elementos de la tabla periódica para fabricar un celular, y en particular, de los 17 elementos categorizados como tierras raras (ETR), 16 son usados en este tipo de aparatos.

Dos componentes esenciales de la telefonía celular son los interruptores magnéticos cerámicos que contienen elementos de ETR e indio; y las estaciones de base para las redes, que también usan el elemento indio, así como tantalio. Cada uno de estos minerales tiene propiedades específicas importantes que hacen su sustitución difícil (al menos al presente), totalizando 12 elementos que se encuentran en la misma situación.

Los mercados de muchos de los productos minerales necesarios para la manufactura de los componentes de un teléfono celular son pequeños en cuanto el volumen necesario para satisfacerlo no es muy grande. Como consecuencia de ello, cualquier ampliación de la demanda global para el elemento puede hacer que los precios aumenten significativamente. El indio es un buen ejemplo. El óxido de estaño e indio ( $\text{In}_2\text{O}_3\text{Sn}$ ), un ingrediente utilizado en la producción de la pantalla de cristal líquido para muchas aplicaciones, incluso teléfonos celulares, ha sido objeto de aumento de la demanda durante los últimos años y el precio del indio, como vimos anteriormente, aumentó desde aproximadamente 200-300 dólares por kilogramo en el decenio de 1990 a unos de 500 dólares por kilogramo en 2016. Un exceso de oferta actualmente ha hecho descender el precio a unos 340 dólares por kilogramo.

El tantalio y los ETR están sujetos a aumentos similares en demanda. El primero es esencial para los resonadores dieléctricos en estaciones de base de telefonía celular de 2,2 GHz. Aunque algunos sustitutos de tantalio existen, tienen pérdida de rendimiento y menor duración de las baterías. Las segundas son necesarias para interruptores magnéticos cerámicos en el teléfono móvil.

Los ETR, que son los 15 lantánidos, además del escandio e itrio, son vitales para la tecnología moderna, no sólo para la telefonía móvil, como ya vimos, sino también para manufactura de catalizadores, aplicaciones en metalurgia, cerámicas y vidrios especiales. China es el principal proveedor de estos elementos, con cerca del 83 por ciento de la producción mundial, seguido por Brasil con un 11 por ciento. La vulnerabilidad de las industrias tecnológicas que dependen de los ETR se hizo evidente cuando en 2010, China redujo los cupos de exportación en casi un 40 por ciento por razones medioambientales, haciendo que los precios subieran agudamente. Desde entonces, la situación parece haber mejorado, los precios han bajado y comienzan a aparecer fuentes alternativas de suministro, mientras se ha incrementado la exploración.

Uno de los mayores consumidores, sino el mayor, de ETR es la industria automotriz. Un auto eléctrico contiene cerca de 35 sustancias con ETR. Y en autos de motor de combustión interna, por ejemplo, se encuentran los sensores que miden y controlan el contenido de oxígeno en la mezcla combustible, estos contienen itrio, mientras los convertidores catalíticos y los parabrisas contienen cerio. En los híbridos, las baterías de níquel – metal hidruro contienen lantano, mientras los magnetos de los motores de tracción utilizan neodimio y disprosio. Y, en la manufactura de los combustibles usados para estos vehículos, desde hace muchos años se utilizan, en la etapa del

<sup>24</sup> <http://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2015/11/gsma-unu-ewaste2015-eng.pdf>

<sup>25</sup> <https://news.yale.edu/2015/03/23/metals-used-high-tech-products-face-future-supply-risks> y <https://www.pnas.org/content/early/2015/03/20/1500415112.abstract>

craqueo catalítico (cracking), justamente como componentes de los catalizadores lantano, cerio y mezclas de minerales de tierras raras<sup>26</sup>.

Mientras que el reciclaje de chatarra de metales comunes es una industria madura y que mueve en el orden de US\$300 mil millones<sup>27</sup>, tratar de recuperar y reciclar RE es algo mucho menos desarrollado. Sin embargo, a partir del alza notable de precios de algunos de ellos, como por ejemplo, el renio, hace que sea comercialmente atractiva la recuperación de este metal a partir de la chatarra de catalizadores bimetálicos utilizados en la industria del petróleo.

Los dos tipos de imanes de tierras raras, los imanes neodimio-hierro-boro y los de samario-cobalto son los responsables del consumo de aproximadamente una quinta parte de las RE que se producen anualmente y representan más de un tercio del mercado de ellas, haciéndolos muy interesantes para implementar su reciclaje. Los imanes de neodimio conforman la mayor parte del mercado y pueden encontrarse en discos duros de computadora, los coches eléctricos e híbridos, bicicletas eléctricas y turbinas eólicas.

Investigadores de varias instituciones de los Países Bajos y de la Universidad de Birmingham<sup>28</sup>, evaluaron el impacto ambiental de producir un kilogramo de imanes de neodimio a partir de reciclar imanes de discos duros de computadora, en relación con hacerlo a partir de minerales obtenidos por explotación minera. Según este trabajo, el reciclaje consume un 88 por ciento menos de energía y es alrededor de un 98 por ciento menos riesgoso desde el punto de vista de la toxicidad humana. El proceso de reciclaje fue desarrollado por uno de los autores del estudio, Allan Walton y su grupo en la escuela de metalurgia y materiales en la Universidad de Birmingham, Reino Unido.

ILUSTRACIÓN 7: ALGUNO DE LOS ELEMENTOS PRESENTES EN UN TELÉFONO CELULAR TÍPICO



## Conclusiones

¿De quién es la responsabilidad de asegurar el suministro de materiales críticos para la economía de un país? ¿De quién es la responsabilidad de asegurar los materiales críticos para su defensa? ¿Quién define cuáles son esos materiales críticos? ¿Cuál es el inventario disponible de estos? Preguntas que deberíamos formularnos como país y cuya respuesta requiere un profundo y consensuado análisis.

Se podría argumentar que nunca nos quedaremos sin metales debido a que sus átomos permanecen intactos durante todas las transformaciones químicas a las que los sometemos para su uso; pero con cada transformación y con la dilución de los concentrados minerales a los productos finales, cada vez será más difícil y, asimismo, requerirá un uso más intensivo de energía para poder recuperar esos metales de manera económicamente viable.

<sup>26</sup> <https://grace.com/catalysts-and-fuels/en-us/Documents/108-The%20Role%20of%20the%20Rare%20Earth%20Elements%20in%20Fluid%20Catalytic%20Cracking.pdf>

<sup>27</sup> <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/metal-recycling.asp>

<sup>28</sup> Environmental Science & Technology, doi: 10.1021/es404596q

Vemos que el reaprovechamiento de materiales es una opción para reducir su escasez. El desafío hoy está en buscar y encontrar fuentes más ricas para reciclar o, teniendo en cuenta el ciclo de vida de los productos, diseñarlos de tal manera que sea más fácil el reciclaje de los materiales que nos interesan.

Existe en nuestro país un amplio espacio para pensar en iniciativas sobre este tema. Es cierto que el universo de obtención aún es pequeño, pues son pocos los artefactos como teléfonos, computadoras, televisores de plasma, etcétera, que son descartados por nuestra sociedad. Pero eso mismo nos podría permitir comenzar a diseñar el sistema antes de que la necesidad haga que no nos quede más remedio que hacerlo.

En definitiva, el reciclaje de materiales no renovables debe estar deliberadamente pensado para ser incorporado en un paradigma integrado de extracción, uso y reutilización, en lugar de tratarlo como una consecuencia no planificada. Esto implica el desarrollo de una conciencia en quienes desarrollan productos, por un lado, en quienes planifican y legislan sobre su uso y disposición final por otro, y en quienes controlan a todos los anteriores. Como en la mayoría de las actividades humanas, el punto crucial termina siendo la capacitación de los recursos humanos que participan en el ciclo.

(\*) **Carlos Hugo Trentádue:** es ingeniero militar de la especialidad química y oficial retirado del Ejército Argentino, donde alcanzó el grado de coronel de Artillería. Fue director de dos plantas de materiales energéticos y miembro de la Organización para la prohibición de Armas Químicas.

Es docente e investigador universitario. Autor de numerosos artículos y presentaciones. Es miembro activo de la Sociedad de la Industria Química del Reino Unido, de la Sociedad para la Historia de la Tecnología de los Estados Unidos. También es integrante del Área de Prospectiva en Energía Eléctrica de la UTN-FRGP, y del Grupo de Interés en Energías del Mar Argentino.