

EL RETO DE LA TECNOLOGÍA Y LOS RECURSOS MINERALES: LA REALIDAD DE UN PROGRESO SOSTENIBLE PARA EL SIGLO XXI

LUIS DE LA TORRE PALACIOS

Investigador colaborador UPM

En estos últimos dos siglos, la actividad del hombre ha resultado intensiva en el uso de los recursos del Planeta, consecuencia en principio, ineludible, del aumento poblacional, así como de un imperante modelo económico que presume mantener un consumo en auge en el medio plazo. Así, se mantienen las estimaciones de crecimiento mundial para 2017 y 2018 de un 3,5% y 3,6% respectivamente (IMF, 2017). Los analistas estiman un continuado

crecimiento global del número de habitantes y, lo que resultará más acusado en cuanto al consumo de recursos, un mayor alcance de la población al estatus de clase media, con las consecuentes necesidades de recursos.

Lo que otrora fue considerado un triunfo como predominancia de una especie, el incremento en el número de individuos sobre el Planeta se plantea, en estos momentos, como una amenaza para los recursos naturales. De esta manera, se estiman 3000 millones de personas de países en desarrollo listas para entrar en la rueda del consumo de la clase media para 2030 (McK, 2014), o mejor expresado, como una fuerte presión sobre los recursos existentes.

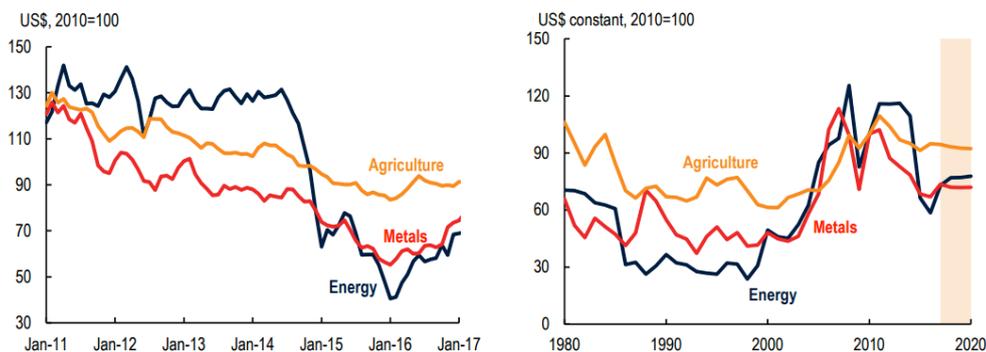
Como modelo insaciable de lo efímero, sirva de dato anecdótico cómo se ha duplicado el consumo de prendas de ropa de 2000 a 2014 estimándose que, hasta 2025, se incrementarán las emisiones de CO₂ en un 77%, el uso de agua un 20% y de tierra el 7% (McK, 2017).

El «super-ciclo» económico en el que se han visto envueltas las materias primas desde el año 2000, estuvo propiciado principalmente por la elevada demanda ante el crecimiento de países críticos como China, y en menor término India (con incrementos del PIB de 10,3% y 7,4% respectivamente en el período 2002-2012), viéndose principalmente motivado por su rápida urbanización e industrialización, así como por un aumento del comercio exterior chino.

El consumo de metales por parte de China se triplicó desde el año 2000, alcanzando en 2014 el 47% del consumo mundial. Sin embargo, ese «super-ciclo» se detuvo en los últimos años, al aparecer una transición desde el reciente patrón de crecimiento intensivo chino en el uso de recursos, hacia una disminución en su industria pesada a favor del sector servicios.

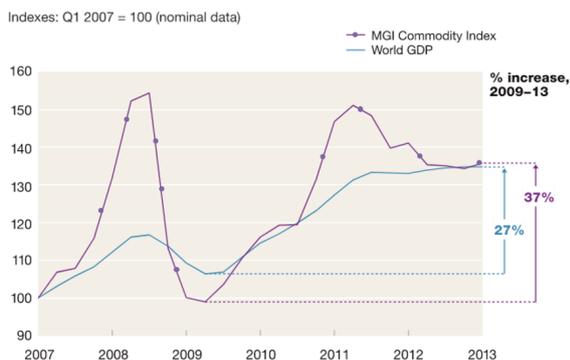
La esperada subida de precios en 2017 de las materias primas no energéticas (agricultura, fertilizantes, metales y minerales), mostrada en la Fig. 1, se considera la primera en cinco años, siendo las causas en

FIGURA 1
PRECIO MENSUALIZADO Y ANUALIZADO DE LAS MATERIAS PRIMAS (WB, 2017)



Fuente: WB, 2017

FIGURA 2
RECUPERACIÓN EN LOS PRECIOS DE LOS
RECURSOS, FRENTE AL CRECIMIENTO
ECONÓMICO. (MGI)



Fuente: Mck, 2017

el caso de los metales, la fuerte demanda esperada por parte de China, y las restricciones en la oferta debidas a las interrupciones de suministro de Chile, Indonesia y Perú (WB, 2017).

Ligado con la escasez de los recursos minerales, la determinación de los precios de los recursos es difícil de prever, incluso para las propias compañías mineras que manejan la oferta. Afectan simultáneamente dos ciclos económicos, el propio del metal, y el ciclo económico global, ambos con significativas fluctuaciones en la demanda (la crisis financiera internacional, el cambio de modelo chino, etc.), y en la oferta (huelgas, largos períodos de maduración de las explotaciones, aparición de yacimientos en países anteriormente conflictivos, etc.).

Si bien es cierto que, en otros tiempos, el precio de los recursos naturales no era tan influyente, de un tiempo a esta parte, la creciente demanda de éstos, los problemas geopolíticos, y la disminución paulatina pero inexorable de la concentración mineral (con una clara orientación hacia una minería subterránea más

costosa), han marcado la necesidad de un suministro con un crecimiento de los precios, que se llegó a anticipar en 2013 como «el fin de los recursos baratos» (37% en el período 2009-2013, ver Fig. 2) (McK, 2017).

Sin embargo, a pesar del elevado consumo de los últimos años, los precios cayeron de nuevo (ver Fig. 1).

Cuando desde ciertos foros se insiste sobre la amenaza del agotamiento de los recursos minerales, no se está valorando adecuadamente, ni la oferta mineral, ni el potencial de innovación del ser humano. Suele tratarse de hipótesis que parten de estimaciones estáticas (como se estudiará más adelante, las reservas en la naturaleza y la demanda futura son conceptos dinámicos), y que dan pie a unos análisis simplistas, que concluyen erróneamente en la drástica desaparición de la oferta natural existente.

Sería únicamente la circunstancia, la que otorgara una cierta realidad temporal a estas hipótesis pesimistas, siendo norma en las estimaciones sobre el agotamiento de cualquier recurso, el no acertar en el plazo.

La realidad se muestra tozuda ante unos pronósticos tempranos, suscitados por la complejidad de una presencia natural habitualmente poco conocida, los cada vez más frecuentes saltos en la técnica, o por la incertidumbre en la demanda.

UN IMPROBABLE AGOTAMIENTO DE LOS RECURSOS MINERALES. ↓

Para lograr una perspectiva más amplia, que la compartida por Malthus (1798) sobre la preocupación de la suficiencia de los recursos naturales, se convierte en obligatorio atender al profesor J. Tilton, referencia en el tema de los recursos no renovables. Tilton indicaba que, antes de pronunciarnos respecto al concepto de la escasez, existe la necesidad de aumentar la información geológica que acompaña a la aparición de las concentraciones de minerales, así como la necesidad de analizar las condiciones geológicas de la formación de los yacimientos y los condicionantes, tanto de su aparición o descubri-

miento, como de las circunstancias prácticas de su aprovechamiento real y económico. (Tilton, 2001).

Este economista americano aborda el estudio del tópico económico de la escasez mineral contemplando diferentes enfoques desde una visión más real (Tilton, 2003). Respecto al paradigma del agotamiento, analiza los siguientes enfoques, que resultan ser los habitualmente empleados para esta tarea.

El enfoque del *stock* fijo, básicamente pesimista, considera que una cantidad base de recursos estimados deberán ser repartidos entre una población en crecimiento exponencial. Más cercana a la realidad, la visión del *stock* variable considerará como cierta la aparición de nuevos recursos en el tiempo, bien por encontrarse en áreas remotas de escaso interés económico en otros tiempos, bien por la aplicación de nuevas tecnologías de exploración y explotación, o bien por los avances en la metalurgia que permiten tratar menas anteriormente despreciadas, sin olvidar, que se alejará aún más la hipotética escasez si se consideran los sustitutos o el reciclaje.

Otro enfoque con mayor perspectiva y carácter práctico, es el que logra pensar desde la óptica del coste-oportunidad, preguntándose qué debe la sociedad abandonar para obtener otro barril de petróleo, u otra tonelada mineral. Se debe considerar que antes de un agotamiento físico y traumático, la realidad se enfrentará con un agotamiento económico y gradual, alcanzándose el momento donde el coste de producción no resultará asumible (aumento de costes de extracción, mayor internalización de costes, etc.). Esta situación la anticiparía el mercado con un aumento en los precios de los recursos, al considerarse en economía, que los aumentos en la escasez de un bien incrementan el precio del mismo en el mercado.

En esta línea que relaciona el precio con la escasez, existe una carrera que enfrenta al abaratamiento logrado mediante el uso de nuevas tecnologías, contra el aumento del coste de extracción ante disminuciones de la concentración mineral, ubicaciones más remotas, la paulatina desaparición de algunas tipologías de explotación en superficie, etc., y los consecuentes aumentos de precio del metal (motivado, aparte, por diversos factores) (Espí, 2009). La tecnología, mediante este abaratamiento en la extracción, permite indirectamente el alejamiento de la escasez, y de manera más efectiva mediante la innovación en la exploración, la explotación y la adaptación al aprovechamiento de minerales de menor ley o diferente composición.

Habitualmente, se tiende a confundir el término recurso, con el concepto dinámico de reservas. Las reservas son la parte económica de los recursos. Por tanto, la cantidad de reservas variará en función de múltiples factores, como el precio del metal, el coste de operación, o la tecnología del momento, lo que dificulta la interpretación de modelos a la hora de estimar cualquier agotamiento.

Mientras que resulta ingenuo hablar del agotamiento de un mineral en concreto, lo que sí resulta a simple vista es la desaparición de ciertas condiciones de explotación, así como del escenario actual en que se estén desarrollando. Se podría hablar de la desaparición futura de ciertas tipologías minerales, en cuya definición estuviera integrada, no sólo la genética del yacimiento, sino la tecnología y la economía intrínsecas a su definición, como sería el ejemplo de los pórfidos. Esta tipología que supone aproximadamente el 60% de la explotación mundial de cobre, engloba explotaciones de gran volumen y muy baja ley (0,4-1% en riqueza de cobre), habitualmente superficiales o de bajo desmonte que, tras su explotación intensiva en los últimos años, la encontramos como referente de los inversores como fuente de este mineral, pese a tender a desaparecer en la forma en que se conoce actualmente.

¿Pero esto indicará que exista riesgo con la escasez del cobre? En absoluto, de hecho todavía no existe el caso del agotamiento de ninguna materia prima mineral a pesar de la presión creciente en el consumo de recursos, y sí de eminentes mejoras tecnológicas en exploración, mineralurgia y metalurgia.

Podrá generarse una escasez temporal, ante una ruptura en la cadena de suministro o algún problema político, que verá su reflejo en el mercado con un alza en el precio. Ese plazo en que las compañías mineras recuperan su posición a la hora de influir sobre los precios, vendrá marcado por el tiempo en abrir nuevas minas (*greenfields* o *brownfields*) que, a su vez, será proporcional a la inversión en exploración. En caso de no lograr abastecer al mercado y, por tanto, de mantenerse un elevado nivel de precios, crecerá la competencia con sus sustitutos naturales o artificiales.

Será entonces, cuando se ponga en valor la tecnología, bien por su ayuda en el descubrimiento de nuevas tipologías, bien por la posibilidad de explotación de yacimientos antes impensables (ubicación, minería subterránea de profundidad), o bien mediante nuevos procesos que permitan el beneficio de menas anteriormente despreciadas, convirtiendo así en posible lo que fue económicamente inviable.

Por todo esto, el predecir una fecha de agotamiento de las sustancias minerales, dado lo incierto de unos modelos poco aproximados y que tienen como base las reservas o una demanda desconocida, resulta mucho aventurar.

EL CASO DEL ANUNCIADO AGOTAMIENTO DEL PETRÓLEO ↓

Las predicciones respecto a la escasez de los recursos naturales, no deben ser consideradas como algo fundamentado hasta que no se analiza, y por tanto se conoce en profundidad, su naturaleza mineral. Y no sólo eso, como se viene demostrando, la técnica proporciona tamaños saltos en la oferta, que convierte las pre-

FIGURA 3
ANUNCIADA DISMINUCIÓN DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO E INCREMENTO DE LA ENERGÍA NUCLEAR EN EEUU

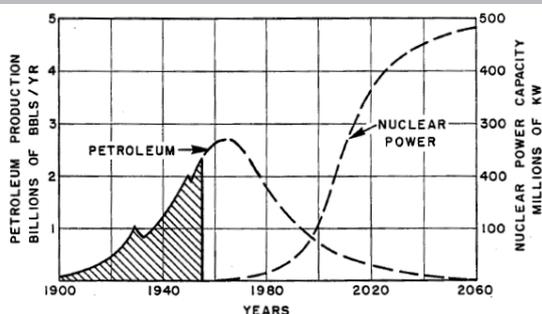


Figure 29 - Concurrent decline of petroleum production and rise of production of nuclear power in the United States. Growth rate of 10 percent per year for nuclear power is assumed; actual rate may be twice this amount.

Fuente: Nuclear Energy and the Fossil Fuels, Meeting American Petroleum Institute, 1956

dicciones en papel mojado. La portada aparecida en 2004 en la revista National Geographic «El fin del petróleo barato», en una etapa de crecimiento del consumo y los precios, trajo de nuevo a escena el miedo que ya introdujo K. Hubbert (1956) con un informe que predecía la cercanía del «Peak Oil» en EE.UU.

Este economista americano, en 1956, estudió de una manera analítica las posibles reservas de crudo existentes en EE.UU, y estimó el consumo esperado en años siguientes. En sus informes reflejaba un punto cercano de inflexión en su producción (en 1970 en EE.UU como se observa en la Fig. 3, y en 2000 a nivel mundial), dando lugar a la desde entonces constante amenaza del agotamiento del petróleo.

Los acontecimientos apoyaron inicialmente las hipótesis del economista, debido al fuerte aumento de precios provocado por la guerra árabe-israelí que condujo a la crisis energética de 1973. Sin embargo, como se constató, la realidad posterior no se correspondió con la

predicción, la producción media en EE.UU fue de 8.9 M b/d, y se estima que para 2017 alcance 9.3 M b/d y 10 M b/d en 2018, excediendo así el récord marcado en 1970 de 9.6 M b/d (EIA, 2017).

Atendiendo a otros escenarios publicados, se adivina una vida más longeva a la producción de petróleo, como se observa en la Fig. 4 de la EIA (2016).

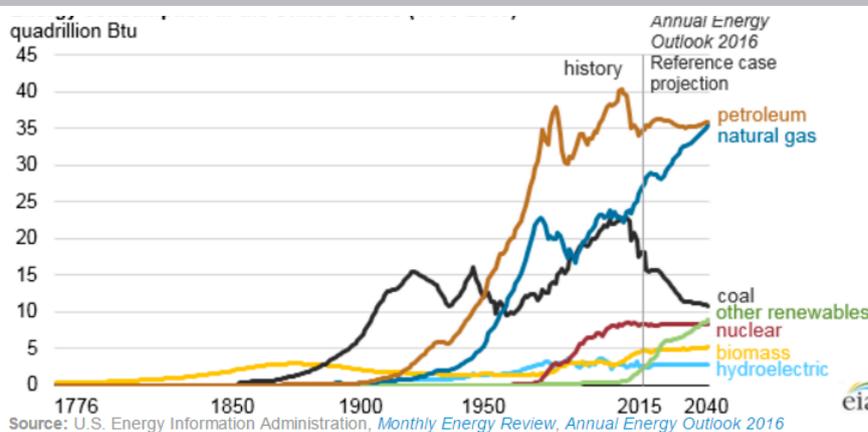
Aunque la fractura hidráulica lleva más de sesenta años funcionando en el país norteamericano, fue gracias a los avances tecnológicos por lo que actualmente supone más de la mitad de su producción anual (ver figura 5). Cuando se habla de posibles futuros agotamientos minerales, supone demasiado aventurar el no considerar que las técnicas venideras, así como la información geológica o de beneficio mineral no vayan a mejorar, invalidando cualquier estimación.

Es conocido que la influencia en el precio del petróleo de la geopolítica es crucial. Habitualmente, los aumentos de precio han coincidido con guerras en zonas productoras, como la guerra del Golfo de 1990 que duplicó el precio entonces vigente, la invasión de Irak de 2003, la guerra de Irak y Líbano de 2006, o la Primavera Árabe y sus efectos, que han servido de acicate al aumento de precios.

Con este impulso de base, los máximos de 146 dólares alcanzados en 2008 ante la fuerte demanda (especulación aparte), se ven sucedidos por una brusca disminución en su consumo, debido a la crisis financiera mundial que se materializaba en ese mismo año, y a la posterior desaceleración china como segundo mayor consumidor. Este panorama (Fig. 6), junto con el aumento en la oferta debido al incremento de producción del «fracking» estadounidense, conduce a unos precios actuales del crudo que no logran superar los 50 \$/barril (junio de 2017).

El esperado momento del punto de inflexión en la producción del petróleo siempre ha generado gran incertidumbre en el sector financiero. Desde la visión de las

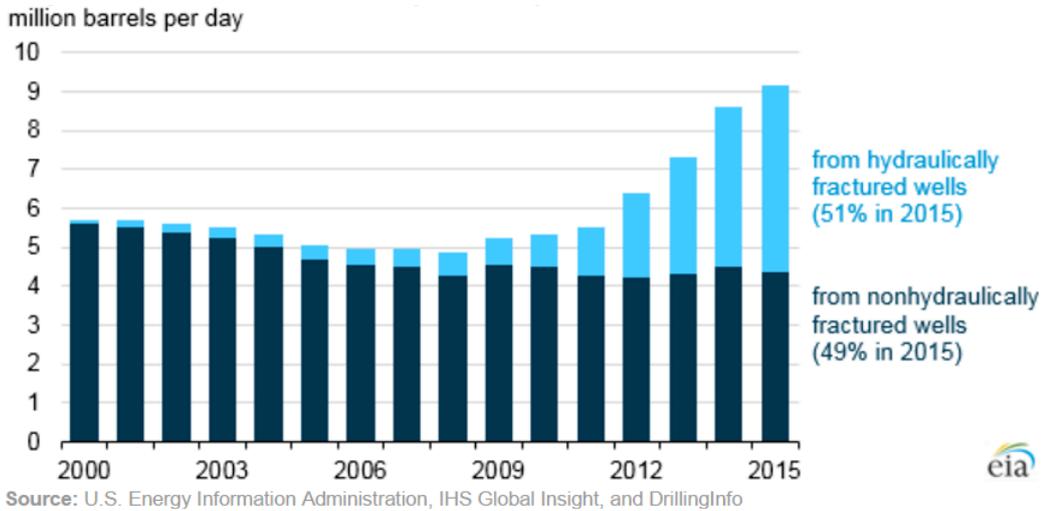
FIGURA 4
CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS EN EEUU (1776-2040)



Source: U.S. Energy Information Administration, Monthly Energy Review, Annual Energy Outlook 2016

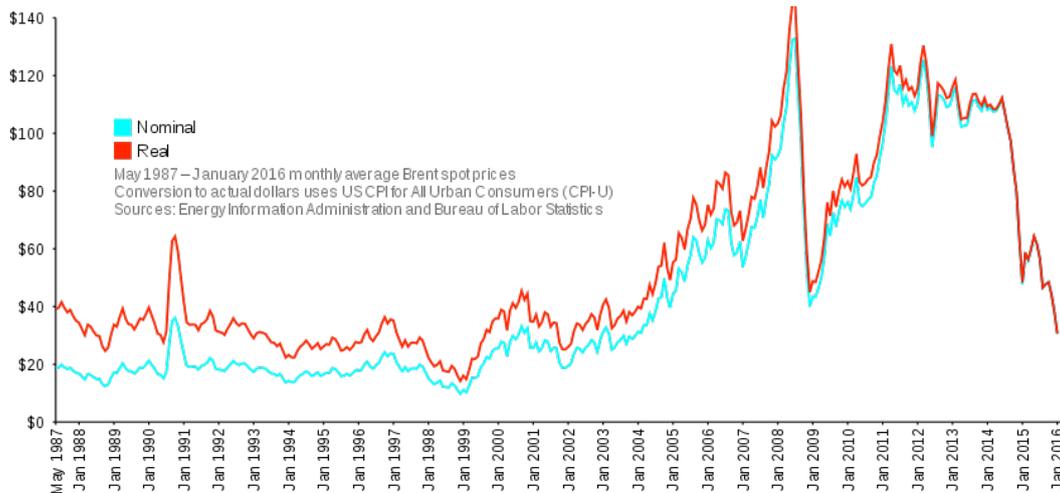
Fuente: Annual Energy Outlook 2016

FIGURA 5
PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO EN EEUU (2000-2015)



Fuente: EIA, 2016

FIGURA 6
PRECIOS SPOT DEL CRUDO BRENT



Fuente: EIA, 2017

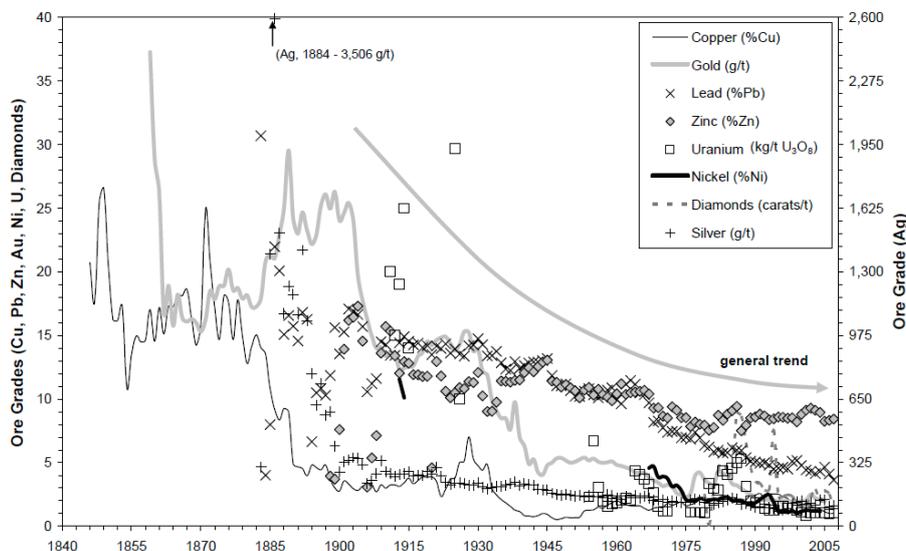
empresas petroleras, ese momento llegará lo más temprano en 2025 (Royal Dutch Shell), en 2030 (Statoil), en 2040 (BP) o continúan sin avizorar ese cambio de tendencia (Chevron), mientras que la IEA lo estima posterior al 2040. (WSJ, 2017)

De igual manera que resulta arriesgado hablar de agotamiento, a falta de un extenso conocimiento de los recursos o de la ignorancia de los posibles adelantos de la técnica, del lado de la demanda ocurre lo mismo. No se puede olvidar que ante la escasez de algún recurso, la reacción del mercado será de inmediato un aumento de precio, lo que traerá consigo por parte del productor nuevas oportunidades de gasto en exploración y búsqueda de nuevas tecnologías (I+D+i) para

lograr una mayor obtención del recurso o unos costes de explotación menores; pero también supondrá cambios en el consumidor, ya que este buscará sustitutos de menor precio que otros intentarán cubrir con soluciones que, o bien estaban fuera por precio, o bien necesitarán de mayor inversión en innovación.

Resulta ingenuo creer que, ante el abuso en la explotación mineral en el medio plazo, el hombre se encuentre con que haya extraído la última gota de petróleo. Seguramente, el ser humano, consciente y adelantado al agotamiento, decidirá cuándo prescindir de un recurso (lamentablemente, a nivel biológico, el maltrato al medioambiente puede resultar irreversible, por lo que el pilar medioambiental go-

FIGURA 7
DESCENSO DE LAS LEYES MINERALES EN AUSTRALIA



Fuente: G.M., 2009

zará, en el retraso del agotamiento del petróleo, de mayor predicamento que en el caso de otros bienes naturales).

LA TECNOLOGÍA DERROTA EL ANUNCIADO AGOTAMIENTO DEL COBRE ↓

Desde el Servicio Geológico Americano (USGS, 2014) se estiman unos recursos de cobre por descubrir, de más de 3500 Mt (sin contar con lo existente bajo los océanos, extendidos por un 75% de la Tierra), considerándose bajo las condiciones actuales, contar con 2000 Mt de cobre. También vaticina que, para el 2050, unos 1100 Mt de cobre podrán ser descubiertos (USGS, 2012).

Con el consumo actual (20Mt), e incluso con el esperado (30Mt), las reservas pueden mantenerse al menos durante dos siglos. Hay que tener en cuenta cómo la realidad ha demostrado que, aparte de la variabilidad de la oferta mineral (económica y tecnológicamente mejorable), los cambios en la demanda pueden ser igualmente significativos (substitutos, mejores tasas de reciclaje, desistimiento ante conflicto medioambiental, etc.).

La caída en leyes, en general de todos los minerales habitualmente empleados, ha resultado notoria desde finales del siglo XIX (Fig. 7). Resulta obvio que se tiendan a explotar primero aquellos depósitos minerales más accesibles y con mayor ley, dejando para mejores coyunturas los ubicados en territorios más remotos o con una ley menos atractiva por su mayor coste de operación para obtener una misma cantidad de metal.

Alejados de encontrarnos en un escenario de agotamiento, con esta tendencia natural, y con el fuerte

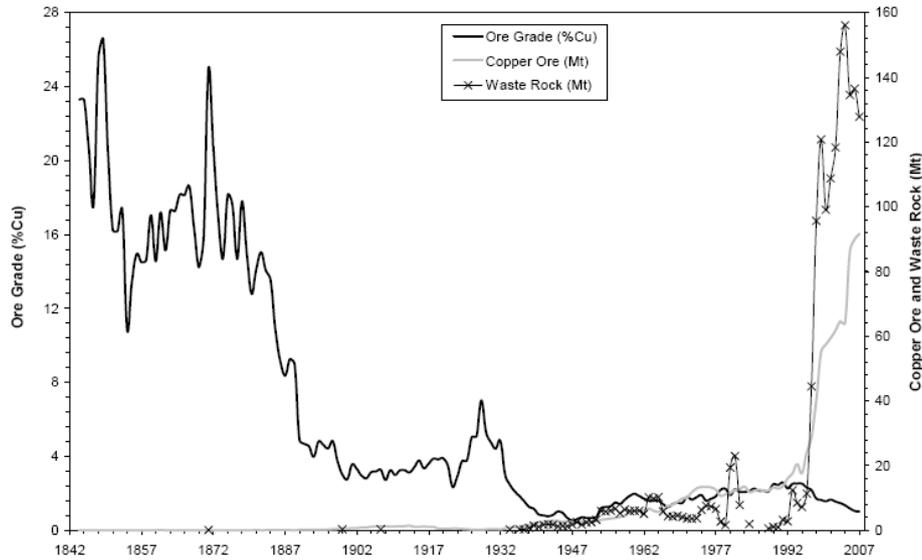
aumento previsto en la demanda de recursos, cabría pensar en un aumento de costes proporcional a la disminución de la ley, o incluso en un panorama de escasez. Sin embargo, como se muestra en este artículo, el empleo de la tecnología va logrando amortiguar el efecto negativo de estos hechos.

Para entender esta situación, se analiza el entorno de un mineral de la importancia del cobre, en valor el tercer metal en producción mundial, y con las mayores perspectivas de crecimiento por la necesidad de unas nuevas tecnologías en auge (McKinsey, 2017, predice un incremento en el consumo de cobre de un 43% para el año 2035).

Las caídas en ley, son constatadas (Fig. 8). Chile, primer productor de cobre, cuenta con la mina de Escondida como primera explotación del mundo de este mineral, sufriendo una disminución en sus leyes entre 2007 y 2011, de alrededor del 43%. En las explotaciones australianas, otro ejemplo que resulta notorio recordar, es la mina Burra, donde en 1945 se extraía un mineral con un 20% en cobre, frente al 0,87% de las explotaciones actuales en ese país (Olympic Dam). (Mudd, 2009)

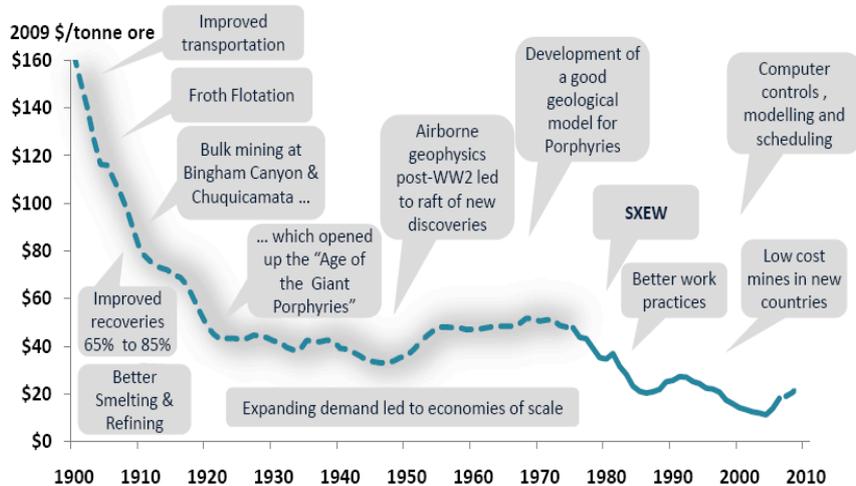
Parece lógico pensar que la disminución en el contenido metal sufrido a lo largo de los años, supusiera indiscutiblemente un mayor coste económico en su explotación (ubicaciones más remotas, lejanía de infraestructuras, mayor empleo de energía y maquinaria...). Sin embargo, resulta fácilmente observable la influencia que ha ejercido la evolución de la técnica en la explotación de este mineral, como se puede observar en la Fig.9. La mejora en el transporte, la introducción de la flotación, las mejoras en la pirometalurgia (que suponen recuperaciones que alcanzaban a principios del siglo XX entre el 65% y el 85%), la en-

FIGURA 8
LEYES DE COBRE, MINERAL EXTRAÍDO Y ESTÉRIL (*THE SUSTAINABILITY OF MINING IN AUSTRALIA*)



Fuente: Mudd G., 2009

FIGURA 9
INNOVACIONES TÉCNICAS CLAVE EN EL AHORRO DE COSTES (\$/T), EN LA MINERÍA DEL COBRE



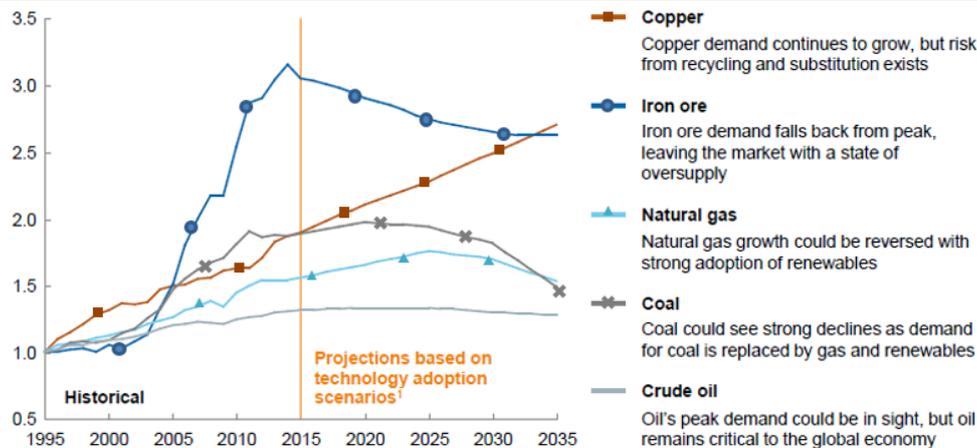
Fuente: Minex Consulting, 2010

trada del gigantismo de los pórfidos, o la aplicación de la hidrometalurgia, suponen una evolución de la técnica que, junto con la economía de escala, logran unas disminuciones porcentuales en el coste de operación del 70% y el 30% respectivamente (Minex Consulting 2010). Ambas mejoras eran del todo necesarias para poder competir en una carrera en la que la disminución de la ley parece imparable.

Sin embargo, hay que ser conscientes que, si bien es cierto que a través de economías de escala se alcanza una importante reducción en los costes, esto más bien supone una transferencia de costes, si se puede titular así el efecto ambiental provocado.

El gigantismo en los pórfidos, necesario para rentabilizar ciertos yacimientos (recordemos leyes explotadas con menos de 5 kg de cobre por tonelada), el mayor consumo energético o la mayor cantidad de estéril generado, obligan a pensar en la necesidad de internalizar ciertos costes todavía pendientes. A pesar de esto, se debe tener en cuenta que, cuando se agote esta tipología como la conocemos, masiva y en superficie (aproximadamente el 60% de la explotación son pórfidos), la minería a cielo abierto se abrirá paso hacia las explotaciones subterráneas a baja profundidad, de menor impacto ambiental y mayor coste de operación, aprovechando

FIGURA 10
CAMBIO DE TENDENCIA EN EL CONSUMO DE RECURSOS MINERALES



Fuente: Mck GIA

yacimientos de mayor riqueza (como los Sediment Hosted). (de la Torre, 2017)

Los cálculos del USGS mostraban que la caída en ley de los pórfidos entre los años 2000 y 2008 había resultado pasar del 0,49% Cu al 0,44% Cu, cálculo ajustado que se explicaba como reflejo de diferentes factores: el aumento en el aprovechamiento de menas oxidadas mediante hidrometalurgia, permitir la extracción de cobre desde sulfuros de todavía menor ley también basados en esa tecnología, o bien el decaimiento habitual tras la minería de una tipología después de varias décadas de explotación. Aquí de nuevo, la tecnología permite explotar leyes anteriormente impensables, consiguiendo actualmente extraer cobre de mineralizaciones que no resultaban económicas mediante una mineralurgia cada vez más intensiva, sino a través de cambiar de tecnología en la metalurgia, empleando hidrometalurgia en pilas que retornaba la extracción a la zona de beneficio.

Revisitando la teoría de Kuznets, aplicándola al caso del cobre, se podría considerar la existencia de una divergencia en su Curva Ambiental, debida a la aparición de nuevos usos que resultarán recurrentes lo menos durante las próximas décadas (recordemos la necesidad del cobre para el desarrollo de las energías renovables o del vehículo eléctrico), y que extenderán la duración en el consumo de cobre con una pendiente de crecimiento. Aun así, esto no puede señalarse como un fallo en la curva, puesto que países con un nivel de desarrollo suficiente como para reducir su consumo en recursos, si decidieran incrementar su consumo en este metal, significaría probablemente la reducción de otros efectos, por lo que, en términos absolutos, la curva concluiría con la forma descendente habitual.

El caso del cobre resultará un ejemplo de cómo un mineral puede aumentar positivamente su consu-

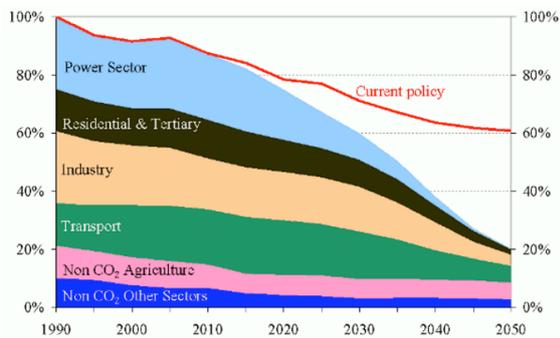
mo en una sociedad desarrollada, motivado por la aparición de diferentes usos en la nueva economía. Aproximadamente, la mitad de la demanda de cobre proviene de la industria eléctrica y electrónica, un cuarto de la construcción y el resto como maquinaria industrial, vehículos y aparatos domésticos. A pesar de la eficiencia energética esperada, la demanda de cobre se estima crecerá en las próximas dos décadas un 2% anual, debido al mayor consumo en electrónica (el vehículo eléctrico emplea un 7% de cobre más que el convencional), energías renovables, red eléctrica inteligente, etc. Continuará siendo China el principal consumidor de cobre, estimando el incremento desde los 7,2 kg per cápita en 2015 hasta los 11-12 kg en 2035, acompañado de otros países asiáticos. (MCK, 2017).

Paradójicamente, en busca del desarrollo sostenible, el consumo de cobre, lejos de quebrar su tendencia, se espera que continúe creciendo (ver Fig. 10), al considerarse soporte fundamental de las nuevas tecnologías en el fomento de las energías renovables, vehículos eléctricos, entre otras mejoras tecnológicas.

EL SIGNIFICATIVO CASO DEL CARBÓN: INFLEXIÓN SIN ESCASEZ. UNA SOCIEDAD CONSCIENTE ↓

Cosa diferente es la utilidad que le dé el hombre a los avances tecnológicos. Un oportuno ejemplo de esto es «la paradoja de Jevons» (1865), que reflejaba cómo la mejora tecnológica que propició el menor consumo de carbón en la producción eléctrica, abaratando ésta, lo que trajo consigo fue un mayor empleo de la misma (con lo que los efectos entendidos como positivos de cara a la extensión de vida del recurso y sus implicaciones medioambientales, se vieron así empañadas). Sin embargo, como en otras ocasiones, estas conclusiones deben ser atendidas en su contexto. El escenario que acompañaba a este economista inglés, en plena

FIGURA 11
ESTIMADA REDUCCIÓN GASES INVERNADERO
POR SECTORES EN LA UE



Fuente: EC, 2017

Revolución Industrial, venía marcado por un crecimiento impararable, sin visos de aminorar, salvo por la escasez de la materia prima que hizo posible aquella época.

No obstante, años más tarde, Kuznets con su «Curva Ambiental» da esperanza a la reducción en el uso continuado de los recursos, al establecer la curva en U invertida, donde tras producirse un fuerte consumo inicial, correspondiente con el empuje de un país en pleno crecimiento, se adivinaba una posterior disminución en el consumo de recursos, una vez alcanzadas ciertas cotas de progreso dentro del mismo. Aunque criticado, existen múltiples ejemplos que justifican su teoría, donde una vez alcanzada la madurez, no resulta tan necesario el uso intensivo de recursos naturales.

Parece que la teoría ambiental de Kuznets, lejos de resultar obsoleta, podría explicar las predicciones que se observan en el gráfico del informe de la Fig. 10, cuando se refiere al caso del carbón térmico. Este informe prevé el *coal peak* para 2020, resultando así, un claro ejemplo de cómo no será el agotamiento mineral (en el caso del carbón las reservas mundiales conocidas resultan elevadas) el que determine el fin en la explotación de un mineral, sino que será la propia sociedad a través de sus instituciones, quien así lo considere.

El miedo ante la amenaza del agotamiento de los recursos minerales no debe preocupar al lector bien informado. No es únicamente la falta de conocimiento geológico lo que aleja esa amenaza lo suficiente, sino el cómo se adelantará la realidad de los mercados, y una sociedad cada día más consciente, que podrá decidir abandonar la explotación de una materia prima (ante valoraciones ambientales o sociales), y no marcado meramente por su escasez.

El caso del carbón, a pesar de sus grandes reservas energéticas y su mejor ubicación geopolítica, actualmente continúa en entredicho en el «mix»

energético, ante la existencia de otras energías más limpias y baratas. Se estima una reducción en países OCDE, que alcance el 3% en 2035, como fuente de energía primaria (frente al 14% actual) (McK, 2017) considerado siempre dentro de un escenario de fuerte desarrollo tecnológico.

Sin embargo, dada mayor facilidad de acceso al carbón, la tecnología también persigue mejorar la captura y almacenamiento del dióxido de carbono, así como previamente logró contener las emisiones de azufre (la desulfuración en Centrales) o los óxidos de nitrógeno, mejorando notablemente las presiones y temperaturas de las calderas para aumentar su rendimiento (lecho fluido, calderas supercríticas, etc.).

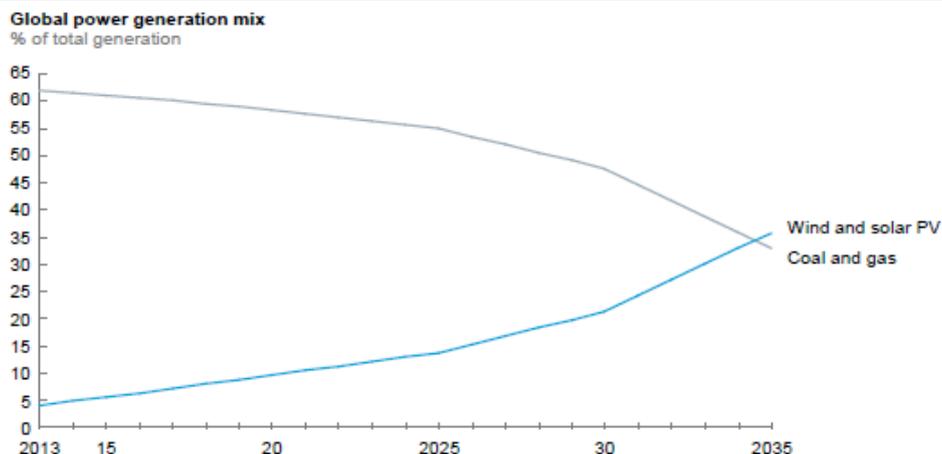
En el terreno medioambiental, aparece una clara diferencia entre el consumo de los combustibles fósiles y otros recursos minerales, y es la amenaza del cambio climático. El petróleo, el gas y el carbón deben afrontar dos desafíos: una posible escasez de recursos por su «no renovabilidad», y la discutida influencia por la producción de gases de efecto invernadero en la elevación de la temperatura del planeta.

Posiblemente, éste último sea el motivo que ponga fin a la minería de estos recursos que permitieron las sucesivas revoluciones industriales pero que, los sucesivos acuerdos internacionales (reforzados por la COP21 en París), dirigen la producción eléctrica hacia una descarbonización definitiva en 2050 (se espera una reducción del 80% de GEIs en la UE desde 1990, con una producción eléctrica de fuentes renovables, nuclear o con captura y almacenamiento de carbono, apostando por una fuerte presencia en el transporte y consumo doméstico de una electricidad de fuentes renovables). (ver Fig. 11)

De nuevo, es la tecnología la que puede cambiar la viabilidad en la explotación de un mineral, al tener la capacidad de modificar la demanda a través de la visión social de la misma (por ejemplo, un menor impacto visual de la minería subterránea frente al cielo abierto), su impacto ambiental, o la perspectiva económica (lograr la explotación de unas leyes minerales todavía menores, resultando beneficioso).

Es cierto que se espera, en el largo plazo, alcanzar un punto de inflexión en el consumo energético global, supuestamente motivado por una futura estabilidad poblacional, y una eficiencia energética más óptima. Sin embargo, previo a ese momento, la Fig. 12 muestra que, a pesar de la próxima disminución del uso de combustibles fósiles y su generación de gases de efecto invernadero, la producción mineral debe continuar funcionando para obtener los metales que, de una manera más eficiente en diseño y reutilización, permitirán que la tecnología se vuelva práctica en forma de paneles solares mejorados, turbinas eólicas o hidráulicas, o conductores y *chips* más avanzados.

FIGURA 12
PENETRACIÓN EN EL PORCENTAJE DEL MIX DE GENERACIÓN



Fuente: Mck, 2017

LA TRÍADA PROGRESO, TECNOLOGÍA Y RECURSOS NATURALES

Este trabajo parte de una visión optimista del progreso, valorando a una tecnología que avanza, en su relación con los recursos, como un instrumento necesario (de la Torre, 2017). Hoy más que nunca resulta en entredicho esta perspectiva positiva, pareciendo únicamente comprensible tal desengaño, ante los momentos concretos de «descivilización» sufridos en el siglo pasado. Aún así, las amenazas y desafíos actuales en el panorama mundial (cambio climático, escasez de recursos, envejecimiento de la población, etc.), cederán ante las soluciones que guarda el progreso. Desde la Tercera Revolución Industrial, resulta exponencial el crecimiento en los cambios tecnológicos, acercándonos a mundos adelantados en la ciencia ficción, como la biotecnología o la inteligencia artificial, cuyas aplicaciones y capacidades, todavía por estudiar, modificarán el paradigma actual en todos sus aspectos, energético, industrial, laboral e incluso religioso.

Intuir un mundo sin tecnología resulta utópico, la existencia de pueblos indígenas en Sudamérica que reniegan de cualquier contacto con el resto de la humanidad, no eclipsa que la norma bien haya sido lo contrario (Krauze, 2015). La naturaleza se presenta como enemigo del hombre desde el origen de éste (frío, hambre, epidemias, etc.), y en ese enfrentamiento desigual, sólo recurriendo a la tecnología, el ser humano descubre un efímero control sobre su entorno, y se aventura a pensar en su futuro material.

Así pues, la no consideración en su justa medida de la tecnología, ha resultado, cuanto menos, ingenua, demostrando el modo de vida del «*laissez faire*» carecer de éxito (si se considera como tal, alargar y mejorar la vida del ser humano).

Es a partir del año 1800, cuando el ser humano se libera de la trampa de Malthus. En épocas anterior-

es, una mejora en el nivel de vida de una sociedad traía consigo un aumento en su tasa de nacimientos, y un descenso en su mortalidad, sufriendo en consecuencia un descenso en el nivel de vida, que equilibraría de nuevo ambas tasas.

Los inventos y descubrimientos científicos no tenían entonces dimensión suficiente como para modificar ese paradigma, hasta el advenimiento de la Revolución Industrial (el ratio de avance tecnológico previo a 1800 era del 0,05%, treinta veces inferior al actual), donde la magnitud de los acontecimientos sí lograron, gracias a la tecnología, desasociar el aumento poblacional de la riqueza (Clark, 2007). Así pues, este salto tecnológico supone la primera ruptura de la sociedad humana con las restricciones de la naturaleza.

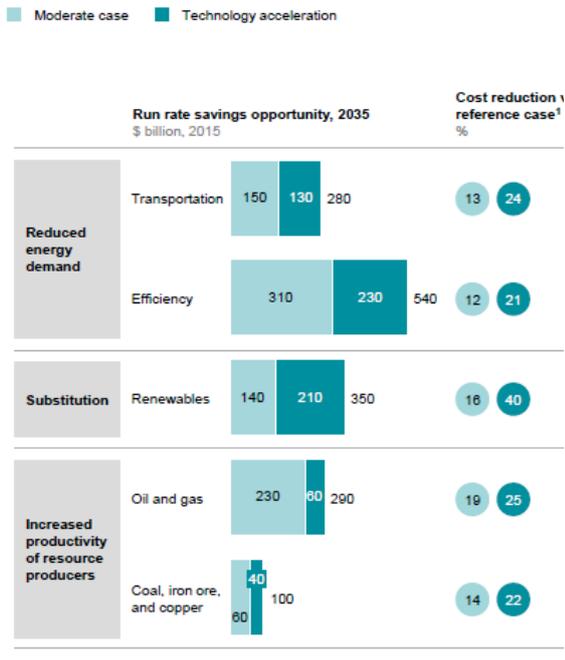
Es desde entonces que, la única solución conocida que ofrece mejoras en la esperanza y calidad de vida de nuestra sociedad, necesita del crecimiento económico, la tecnología, y de su inseparable aliado, el consumo de recursos.

Tal es así, que reconociendo el progreso técnico como factor fundamental del crecimiento económico, el Premio Nobel R. Solow (1987), dentro de la teoría del modelo neoclásico del conocimiento, determinó en sus trabajos cómo el crecimiento de la productividad viene impulsado por la innovación tecnológica.

La capacidad de ahorro de las nuevas tecnologías, se verá reflejada en muchos de los sectores, como se puede observar en la Fig. 13, observando posibilidades de disminución de costes en el 2035, que van desde un 12% a un 40% en el mejor escenario de desarrollo tecnológico.

Resulta ineludible recordar que, si alguna actividad resulta clave en la marcha del progreso, este es el caso de la minería, actividad sustento prácticamen-

FIGURA 13
OPORTUNIDADES DE AHORRO EN 2035



Fuente: Mck, 2017

te de la totalidad de los bienes que nos rodean. Como el resto de industrias, la explotación mineral se ha visto beneficiada del uso de la tecnología, alcanzando su influencia en el siglo pasado, una cifra nada baladí, de ahorro en costes del 70%. Sin embargo, es desde el lado de la demanda, donde la tecnología debe intervenir, liberando en parte la progresiva presión sobre los recursos, gracias al aumento en la eficiencia, mejora en la tecnología de reciclado, nuevos sustitutos, etc.

RECURSOS MINERALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE

La palabra sostenibilidad, concepto con que en los años ochenta se bromeaba, indicando que tenía tantas definiciones como personas la utilizaban, ha resultado convertirse en tendencia en la actualidad, alcanzando su dimensión desde la problemática de los recursos y la preocupación por el cambio climático, hasta una estrategia de gestión empresarial o una manera selectiva de invertir buscando minimizar riesgos.

En su día llamado oxímoron, el sintagma desarrollo sostenible se persigue actualmente como un objetivo deseable, buscando aliados al revisar la teoría de la economía circular, o en la desasociación entre el consumo de recursos y el crecimiento económico (la UNEP pretende alcanzarla mediante la innovación, aunque la desmaterialización lleve años en marcha como se observa desde el pasado siglo en máquinas o barcos más ligeros, o actualmente en el camino hacia un mundo más digital y menos físico, el desacoplamiento mencionado se encuentra todavía alejado de la sociedad actual) (Fischer-Kowalsky, 2011), (Weizsäcker,

2014). Esta desasociación sería más cierta si los recursos se estimaran, más que por su valor económico, por un precio real que englobe a su vez, los términos sociales y una nueva contabilidad ambiental (Martínez-Alier, 2003), internalizando ciertos costes no incluidos actualmente.

Hoy en día, convertido en realidad, no son extraños los ejemplos de protestas contra las grandes explotaciones mineras, las dificultades en la financiación de proyectos considerados «sucios», o casos como el de Apple que, en 2016, anunció mejorar el reciclado de metales y la reducción de su dependencia del suministro minero (cobra mayor fuerza la necesidad de mejorar la imagen en industrias donde la decisión del cliente final afecta de forma tan directa). Otra clara muestra, de la actual presión de la sostenibilidad sobre la industria, se materializa en la presentación voluntaria del correspondiente informe de sostenibilidad (GRI) por parte del 90% de las cuarenta principales empresas mineras. (PWC, 2017)

Concretamente en el campo de la explotación de las materias primas, aparecen dos caminos para intervenir hacia el desarrollo sostenible: por el lado del suministro, y por el del consumo.

Retomando el ejemplo del cobre, desde el lado de la oferta se observa, no sin cierta preocupación, una minería que explota leyes con un cada vez menor contenido metálico. Como se comenta anteriormente, el modelo geológico actual más explotado, el del pórfido de cobre, donde concurren una serie de condiciones que aceptan baja ley y elevado volumen, llega a extraer medias inferiores a 5 kg de cobre por tonelada. Llegando a ser incluso menores, cuando en el subproducto aparecen mínimas cantidades de oro o algún otro metal precioso. (USGS, 2008).

Sin embargo, la aparición de minería en países vetados por conflictos internos, la posibilidad de nuevas tecnologías con metalurgia mejorada en su tratamiento y beneficio, así como la minería a mayor profundidad o incluso bajo los océanos, son factores que pueden introducir de nuevo leyes superiores, y por tanto, más sostenibles, necesitando para esto mayor inversión en exploración y desarrollo tecnológico. Asimismo, el aumento del reciclaje como segunda vida de los metales, debe verse incrementado a nivel global, debiendo permitir mediante una metalurgia avanzada, unas ventajas económicas en su uso, que releguen la minería extractiva únicamente al reemplazo necesario.

La otra perspectiva, con más potencial para el cambio, es la de la demanda. El consumo responsable, la cooperación en el reciclaje, y una mayor eficiencia en el consumo, se adivinan necesarios ante la fuerte presión en el consumo de recursos que se avecina.

Sin embargo, la máxima desvinculación entre consumo y crecimiento, se presume fantasiosa por ciertos autores (Fletcher, 2017), aunque exista esperanza ante la evolución aparecida en diversos campos como tecnologías de la información y comunica-

ción, energía, materiales, procesos y agricultura. (Sachs, 2015).

La idea del salto de una economía lineal, a una economía circular, no es algo nuevo. Resulta que, la necesidad del cambio de modelo, ante el uso intensivo de recursos en estos últimos años, es ahora en mayor manera entendida. Una de las vías que hará posible desligar los aumentos de consumo provocados por los incrementos de población, y su mayor acceso a un mejor nivel de vida del uso intensivo de recursos, supondrá un cambio en el modelo industrial lineal que ha imperado en estos últimos dos siglos.

La fabricación de productos, bien de mayor durabilidad y que acepten su reparación, bien con posibilidades de recuperación prácticamente totales que limiten cualquier contaminación, necesitará de un rediseño que logre minimizar el residuo inservible. De nuevo señalar que, el desarrollo sostenible no ha de suponer un aumento en el coste final, sino que puede suponer, como se observa claramente en el caso del reciclaje, un ahorro directo en materiales, energía y mano de obra, así como asegurar una fracción del suministro de ciertos minerales considerados bajo ciertos criterios como críticos. Aparecen ejemplos como el del caso de la factoría de Renault de Choisy-le-Roi, donde se actualizan motores, transmisiones, o bombas de inyección para su venta con un 80% menos de consumo energético y un 90% menos de agua, así como generando un 70% menos de aceite y detergentes, logrando un margen elevado (Nguyen, 2014).

En uno de los estudios sobre el desarrollo económico circular, se aventura la posibilidad de reducir el consumo de materias primas medido por los materiales de vehículos y construcción, suelo inmobiliario, fertilizantes sintéticos, pesticidas, uso de agua agrícola, combustibles y electricidad no renovable, que fue del 32 % desde el año 2015 a 2030, y del 53 % a 2050. (Fund. E. McArthur, 2015)

Los avances son ciertos en un sector considerado la antítesis de la sostenibilidad, la minería, que como proveedor de recursos debe cumplir con una serie de limitaciones no contempladas anteriormente. La sociedad tiende a exigir una sostenibilidad global, que a través de la paridad económica distribuya justamente riesgos y beneficios. La reconsideración de las economías de escala, la optimización de los usos del suelo buscando su máximo aprovechamiento, el cumplimiento de permisos, controles y rehabilitación posterior, son factores a tener en cuenta.

Una visión muchas veces olvidada por los ambientalistas es que, el mineral bajo tierra no aporta ningún valor a la sociedad y que, sin embargo, en forma de puentes o aerogeneradores de última generación, resulta clave, no ya sólo para el crecimiento económico, sino como palanca principal del desarrollo sostenible. Se trata de que el valor económico y social compense el limitante, y habitualmente tempo-

ral, menoscabo ambiental de las explotaciones. No se puede olvidar el impulso social al crecimiento de regiones con graves problemas de desarrollo.

Otro de los dilemas en el ámbito de la escasez de recursos, aunque algo abandonado ante la premura medioambiental del cambio climático, es contestar a si estamos consumiendo los recursos que nos corresponden a nivel intergeneracional.

La definición que parece perdurar, en cuanto a lo que a desarrollo sostenible se refiere, es la que aparecía en el «informe Brundtland», garantizando la satisfacción de nuestras necesidades, pero también las de las siguientes generaciones. Lamentablemente, esta consciencia no se acompaña de la capacidad para resolver los problemas de la humanidad rápida y efectivamente, debido a que, todavía en esta época, la organización social, económica y política del mundo se está persiguiendo.

Es por ello, que el hombre, cada día más consciente de sus decisiones, continuará creciendo en beneficio propio y como especie, en el intervalo que le corresponde, debiendo intentar equilibrar la construcción o progreso, frente a la destrucción o consumo desmedido, y fijándose como límite último, la resiliencia del Planeta.

CONCLUSIONES ↓

Conviene no olvidar que el progreso necesita del apoyo del uso adecuado de los bienes naturales, para que la tecnología que avanza, se oriente de manera compatible con sus necesidades.

El anunciado, aunque improbable, agotamiento de los recursos minerales como parte no renovable, podría llegar a darse en el largo plazo. El agotamiento resultaría una verdadera amenaza si resultara drástico en su aparición, sin embargo, esto ha resultado no ser así. Existen indicadores claros que anticipan cualquier presunto agotamiento, como es el caso de los precios en el mercado que, ante ascensos mantenidos, sirven a su vez de autorregulación. Este crecimiento de los precios provoca a los productores a continuar invirtiendo en exploración o en tecnologías mineras y metalúrgicas más eficientes, que permiten mantener el mineral en el mercado.

Los avances tecnológicos permiten aumentar la oferta mediante nuevos desarrollos en exploración, extracción y concentración, y a su vez, desde el lado del consumidor, con adelantos en el reciclado, o la aparición de sustitutos, permitiendo desde ambos lados alejar constantemente los picos temporales de escasez.

Se podrá hablar de agotamiento de un escenario de explotación, de una tipología mineral, o de un modelo al que estemos habituados, pero no tanto de la desaparición de un mineral. Un ejemplo es la incipiente explotación de los depósitos marinos, que anularía valoraciones anteriores.

Así pues, una mayor información geológica, y una más apropiada internalización de los costes sociales y medioambientales, determinarán más adecuadamente la falta de viabilidad de un recurso, y no tanto el miedo al agotamiento o a una teórica curva exponencial de costes de producción ante la continuada disminución de la riqueza mineral.

Parece ser que el conjunto formado por el desarrollo tecnológico, los precios del metal en el mercado, el conocimiento geológico, y las condiciones ambientales como consciencia social, marcarán la continuidad de la existencia de minerales económicamente explotables, y por tanto la de un progreso sostenible.

Como en todo debate abierto, existen seguidores y detractores del progreso, y de la tecnología que lo impulsa. Lo que no deja duda alguna es que, en los últimos cien años, la tecnología ha ido proporcionando las herramientas materiales que el progreso ha ido reclamando. Y así se estima que siga siendo, desde una visión optimista en relación con los nuevos descubrimientos y el progreso tecnológico, como decía K. Willett «ni optimistas ni pesimistas han proporcionado información suficiente para garantizar su postura, aunque la historia se muestra del lado de los optimistas». (Willett, 2002)

BIBLIOGRAFÍA

CLARK, G., 2007. *A Farewell to Alms*. Princeton University Press, Princeton, USA.

COOK, L., CHERNEY, E., 2017. Get Ready for Peak oil demand, *Wall Street Journal*, https://www.wsj.com/articles_get-ready-for-peak-oil-demand-1495419061

DE LA TORRE, L., ESPÍ, J.A., 2017. Las Razones Geológicas de la Minería del Cobre. Ciclo conferencias Economía en los Proyectos Mineros, GERRM. En publicación monográfica *Boletín Geológico y Minero*, 2018.

ESPÍ, J.A., DE LA TORRE, L., 2013. Factors influencing metal price. Selection in mining feasibility studies, *Mining Engineering*, Vol. 65, No. 8, pp. 45-51 (Official publication of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.).

JEVONS, W., 1865. *The coal question*. Mc Millan Publishers, London.

ENERGY INTERNATIONAL AGENCY, 2017. Short-Term Energy Outlook, US Energy Information administration June 2017, *Forecast highlights EIA*. https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/global_oil.cfm

ENERGY INTERNATIONAL AGENCY, 2016. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=25372>; Hydraulic fracturing accounts for about half of current U.S. crude oil production, 15 Jun 2016, Today in Energy, US Energy Information Administration

ENERGY INTERNATIONAL AGENCY, 2016. *Annual Energy Outlook 2016*.

EUROPEAN COMMISSION, 2017. 2050 *Low carbon economy, Climate Action*, https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en

FISCHER-KOWALSKY, M., SWILLING, M., 2011. Decoupling natural resource use and environmental impacts from eco-

nomie growth, *Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel*. UNEP.

FUNDACIÓN ELLEN MACARTHUR, 2015. *Growth Within: a circular economy vision for a competitive Europe*, SUN, McKinsey & Co.

HECK, S., ROGERS, M., 2014. Are you ready for the resource revolution? *McKinsey Quarterly*

HUBBERT, K., 1956. Nuclear Energy and the Fossil Fuels, *Meeting American Petroleum Institute*.

INTERNATIONAL MONETARY FUND, 2017. *World Economic Outlook 2017*, <http://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2017/07/07/world-economic-outlook-update-july-2017>

JOHNSON, K., HAMMARSTROM, J., et al., 2014. *Estimate of Undiscovered Copper Resources of the World*, U.S. Geological Survey, Reston.

KRAUZE, E., 2015. *Personas e Ideas*, Penguin Random House, México, D.F.

MALTHUS, T., 1798. *An Essay on the Principle of Population*. J. Johnson, London.

MARTÍNEZ-ALIER, J., 2003. Ecología Industrial y Metabolismo Socioeconómico: Concepto y Evolución Histórica. *Economía Industrial*, nº 351, 2003

MCKINSEY, 2017. Mapping the benefits of a circular economy <http://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resourceproductivity/our-insights/mapping-the-benefits-of-a-circular-economy>

MCKINSEY, 2017. Beyond the Supercycle: How Technology is Reshaping Resources, www.mckinsey.com/mgi.

MUDD, G., 2009. The Sustainability of Mining in Australia: Key Production Trends and their Environmental Implications, Research Report Nº RR5, Department of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute.

NGUYEN, H., STUCHTEY M., ZILS, M., 2014. Remaking the industrial economy. *McKinsey Quarterly*. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resource-productivity/our-insights/remaking-the-industrial-economy>

NATIONAL GEOGRAPHIC, 2004. The End of Cheap Oil, Vol. 205, nº 6

PWC, 2017. Stop. Think... Act. Mine Report. <https://www.pwc.com/gx/en/mining/assets/mine-2017-pwc.pdf>

ROBERT, F., RAMMELT, C., 2017. Decoupling: A key Fantasy of the Post-2015 Sustainable Development Agenda, *Globalizations*, 14:3, 450-467

ROBINSON, G., MENZIE, W., 2012. Economic Filters for Evaluating Porphyry Copper Deposit Resource Assessments Using Grade-Tonnage Deposit Models, with Examples from the U.S. Geological Survey Global Mineral Resource Assessment, *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5090-H*, U.S. Geological Survey: Reston

SACHS, J., 2015. *The age of sustainable development*. New York, NY: Columbia University Press

TILTON, J.E., 2001. Mining, Minerals and Sustainable Development. *IIED*.

TILTON, J.E., 2003. On Borrowed Time? Assessing the Threat of Mineral Depletion. Washington, DC: Resources for the Future.

WEIZSÄCKER, E., 2014. Decoupling 2: technologies, opportunities and policy options, Nairobi, *UNEP*.

SINGER, D., BERGER, V, MORING, B., 2008. Porphyry Copper deposits of the world: Database and Grade and Tonnage Models, *U.S. Geological Survey*.

WILLETT, K., 2002. Managing australian mineral wealth for sustainable economic development, *MMSD*.

WORLD BANK GROUP, 2017. *World Bank, Washington, DC*, <http://www.worldbank.org/en/news/press-release/2017/04/26/industrial-commodity-prices-to-rise-in-2017-world-bank>

WORLD BANK GROUP, 2017. *Commodity Markets Outlook*, April. World Bank, Washington, DC. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO