

COLECCIÓN PARANINFO
PRIMA LECTIO



ANTONIO VALERO CAPILLA



EVALUACIÓN DEL AGOTAMIENTO
DEL CAPITAL MINERAL DE LA TIERRA.
MÁS ALLÁ DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Antonio Valero Capilla



STVDIVM
GENERALE
CAESARAV-
GVSTANAE
CIVITATIS



Universidad Zaragoza

EVALUACIÓN DEL AGOTAMIENTO DEL CAPITAL MINERAL
DE LA TIERRA. MÁS ALLÁ DEL CAMBIO CLIMÁTICO

STVDIVM
GENERALE
CAESARAV-
GVSTANAE
CIVITATIS



Prensas de la Universidad
Universidad Zaragoza

EVALUACIÓN DEL AGOTAMIENTO
DEL CAPITAL MINERAL DE LA TIERRA.
MÁS ALLÁ DEL CAMBIO CLIMÁTICO

**EVALUACIÓN DEL AGOTAMIENTO
DEL CAPITAL MINERAL DE LA TIERRA.
MÁS ALLÁ DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

Antonio Valero Capilla

PRENSAS DE LA UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

© Antonio Valero Capilla

© De la presente edición, Prensas de la Universidad de Zaragoza
1.ª edición, 2012

Prensas de la Universidad de Zaragoza

Edificio de Ciencias Geológicas

c/ Pedro Cerbuna, 12 • 50009 Zaragoza, España

Tel.: 976 761 330. Fax: 976 761 063

puz@unizar.es <http://puz.unizar.es>

Impreso en España

Imprime: Tipolína, S. A.

ISBN: 978-84-15538-64-6

Depósito legal: Z-1705-2012

*A mi padre, que me enseñó
la verdadera eco-nomía:
αλήθεια οικονομία*

AGRADECIMIENTOS

A mi hija, Dra. Alicia Valero Delgado, cuyo trabajo compartido, dedicación y devoción han dado sentido a mi vida, pues las catedrales de las ideas perduran más que las de piedra.

Y a María Jesús, mi mujer, cuya paciencia y adaptación a mí, superan todo lo imaginable.

También, a todos nuestros coautores científicos, tanto de CIRCE como internacionales, sin los que hubiera sido imposible escribir este trabajo.

INTRODUCCIÓN

La extracción de minerales en el siglo xx y en lo transcurrido de este siglo no ha hecho más que crecer de una forma exponencial. Mucho se ha hablado de los combustibles fósiles, el carbón, el petróleo y el gas que mantienen nuestra civilización, calientan o refrescan nuestras casas, nos dan movilidad y mantienen la infraestructura eléctrica, que nos permite interconectarnos y mover las máquinas que nos sirven. Pero esos órganos exosomáticos, como los llamó Nicholas Georgescu-Roegen, quizás el más importante economista-filósofo del siglo xx, están hechos de metales y de minerales como grava y cemento, que han necesitado ingentes cantidades de combustibles fósiles para construir todas las ciudades, infraestructuras, carreteras, automóviles, equipos electrónicos y demás artefactos que necesitamos para vivir. Sin energía no hay materiales, pero sin materiales no hay energía. Más del 10% de todo el consumo mundial de energía se dedica a la extracción de los materiales que demanda nuestra sociedad, y ello sin contar los procesos metalúrgicos, de transporte u otras actividades primarias como conformado o reciclado.

Las figuras siguientes dan una idea de los grandes números y tendencias de uso de algunos metales a lo largo de los últimos cien años:

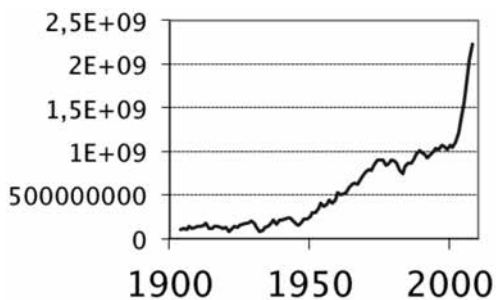


Figura 1. Producción de arrabio (t) a lo largo del siglo xx. Datos USGS.

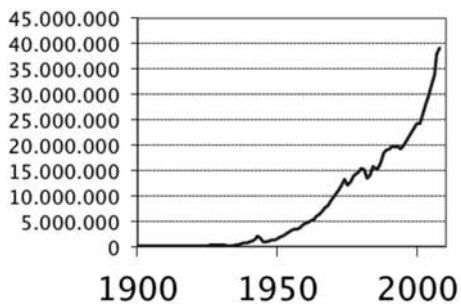


Figura 2. Extracción de aluminio (t) a lo largo del siglo xx. Datos USGS.

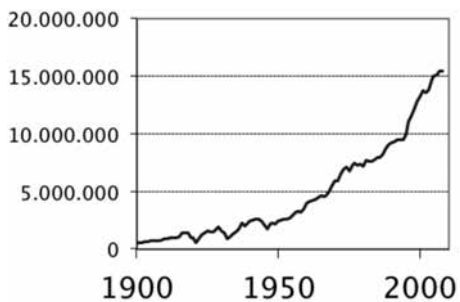


Figura 3. Extracción de cobre (t) a lo largo del siglo xx. Datos USGS.

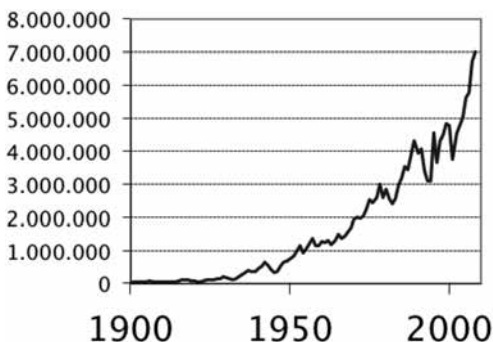


Figura 4. Extracción de cromo (t) a lo largo del siglo xx. Datos USGS.

En general, la demanda acumulada de minerales y de combustibles fósiles puede verse en las figuras 5 y 6:

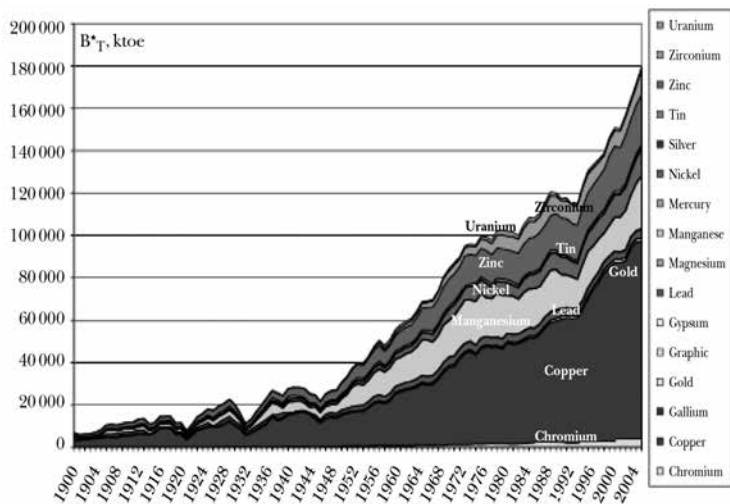


Figura 5. Extracción acumulada de U, Zr, Zn, Sn, Ag, Ni, Hg, Mn, Pb, Mn, yeso, grafito, Au, Ga, Cu, Cr (ktoe) a lo largo del siglo xx y durante los años transcurridos del siglo xxi. Elaboración propia a partir de datos USGS.

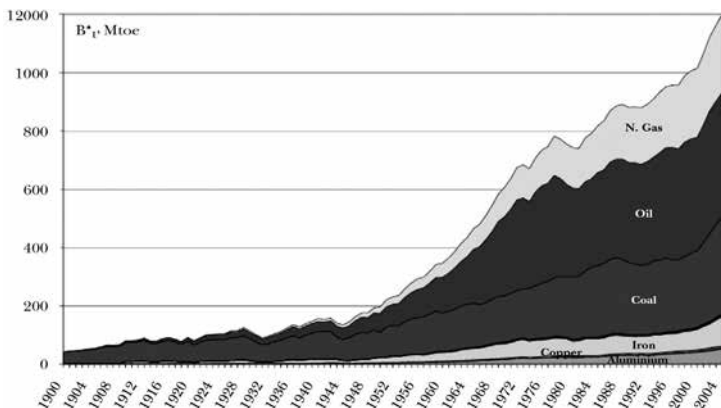


Figura 6. Extracción acumulada de Al, Fe, Cu, carbón, petróleo y gas (Mteop) en el mismo período. Elaboración propia a partir de datos USGS.

Como puede observarse, el planeta se ha convertido en una gran mina en la que en 1999 se extrajeron unos 9 600 millones de toneladas de materiales comercializables. Y en 2000, la cantidad de metales extraídos en las minas de todo el mundo fue de unos 900 millones de toneladas que dejaron unos 6 000 millones de toneladas de residuos, sin tener en cuenta los terrenos de recubrimiento [1].

Por otra parte, la minería y las actividades asociadas realizan un uso intensivo de los ecosistemas y producen dos efectos sobre la naturaleza: 1) agotan los recursos minerales y 2) degradan el medio ambiente. Por lo tanto, el capital natural se reduce. En efecto, consumen grandes cantidades de energía, especialmente en los procesos metalúrgicos de fundición y refinado; hay que remover miles de toneladas de roca estéril; consumen enormes cantidades de reactivos como el coque que actúa como agente reductor; afectan a los acuíferos y a las aguas superficiales produciendo aguas residuales; contaminan los ríos, los

suelos y los ecosistemas, como árboles y otras plantas, los peces y la vida silvestre; emiten gases a la atmósfera, principalmente CO₂ y SO₂; ocupan grandes extensiones de tierra afectando a los paisajes en las minas a cielo abierto, y perturban a las poblaciones locales. El proceso de conversión de los minerales en materias primas, desde la naturaleza a la economía, provoca quizás el mayor impacto ambiental entre todas las actividades humanas. Basado en cifras de finales de la década de los noventa del siglo pasado, la minería consumió cerca del 10 % de la energía mundial, es responsable del 13 % de las emisiones de dióxido de azufre y se estima que amenaza casi al 40 % de las extensiones desarrolladas del mundo. Sin embargo, directamente solo representa el 0,5 % del empleo y el 0,9 % del producto interior bruto mundial [2].

Cuando se analiza el panorama completo, es un proceso insostenible, pero necesario para suministrar las materias primas que nuestra sociedad devora. El agotamiento de los recursos y la degradación de los ecosistemas es su verdadero coste. Pero estas actividades han acompañado al desarrollo del ser humano desde las primeras etapas de la civilización. Tal es así que las edades de la civilización se han denominado por el recurso prominente que apoyó a su época: Edad del Bronce, del Hierro, del Carbón o del Petróleo. Cuando la naturaleza era abundante, los efectos secundarios no se tomaron en cuenta. Sin embargo, el intenso desarrollo tecnológico del siglo xx ha obligado a reaccionar a la sociedad. En primer lugar, por el desarrollo de medidas correctoras de abatimiento; en segundo lugar, presionando a los gobiernos para que asuman que hay una pérdida de riqueza que nunca va a ser repuesta, y, en tercer lugar, reconociendo el problema mundial del cambio climático.

Lejos de estas preocupaciones, la economía internacional considera que se ha mantenido desde los años ochenta una situación de equilibrio entre la oferta y la demanda en la que los precios de las materias primas incluso llegaron a bajar por la entrada en el mercado de nuevos países en desarrollo productores tanto de minerales como de materias ya elaboradas [3]. Pero con el gran incremento de la demanda de países con fuerte desarrollo, como Brasil, India, Rusia y China (países BRIC), la pérdida de calidad de las minas (leyes de mina decrecientes) y los problemas geopolíticos crecientes, empieza a considerarse seriamente que en los próximos cinco años va a haber un grave problema de escasez de minerales y materiales. Por ejemplo, se considera que el 25 % del valor final de un vehículo depende de estos materiales [4]. Ello estimulará la investigación y desarrollo en los procesos de sustitución, reciclado, miniaturización, eficiencia en los procesos productivos y el ahorro de materiales en general. Lo que se ha dado en llamar eficiencia en el uso de los recursos.

Por otra parte, la exploración y prospección geológicas, así como la búsqueda de materias primas en los fondos marinos, en regiones remotas y la apertura de minas a mayores profundidades serán una necesidad. Sin descuidar las relaciones internacionales de cooperación entre países, hoy poco imaginables. No tardaremos en ver asociaciones de países que al estilo OPEP crearán *lobbies* en defensa de sus materias primas escasas, por ejemplo, el fósforo, el litio, el tántalo o el neodimio. Asimismo, no se descartan guerras y conflictos regionales por los minerales estratégicos, al igual que han existido y seguirán existiendo por el petróleo.

Han pasado justo cuarenta años de la publicación del libro *Los límites del crecimiento* [5] que tuvo gran impacto

en su momento, ya que un año más tarde ocurrió la primera crisis del petróleo. En el libro se vaticinaba que con el crecimiento de la población, con el aumento exponencial de los recursos fósiles y minerales y su uso masivo, el mundo estaría al borde del colapso en pocas generaciones. No solo la crisis de los setenta pasó, sino que la segunda crisis del petróleo en los ochenta volvió a pasar, y aun en los noventa e incluso en los primeros años de la primera década de este siglo, se vivió un desarrollo desaforado que aparentemente negó cualquier colapso. Lejos de evitar el crecimiento exponencial, se vivió como modelo político y económico a seguir. De tal forma el crecimiento basado en el consumo ha sido el motor de la economía mundial, basado implícita y explícitamente en que:

- 1) el planeta puede absorber todos los impactos medioambientales que nuestro desarrollo provoque;
- 2) hay recursos minerales y energéticos suficientes para mantener un desarrollo ilimitado, y que
- 3) la innovación y el ingenio humano, es decir, el desarrollo tecnológico nos salvará de cualquier problema.

Esto se conseguirá bien corrigiendo y disminuyendo nuestros impactos medioambientales, bien explorando el planeta en la búsqueda de recursos hasta los lugares más recónditos, como el océano, los polos, las selvas o las mayores profundidades de la corteza terrestre, o bien con las tecnologías de sustitución, de reciclado, de miniaturización y de conservación.

Con la perspectiva del tiempo transcurrido, vemos que los problemas medioambientales se han agudizado, y que la huella ecológica del ser humano sobre la Tierra está por encima de lo que el planeta puede soportar. Hemos sobrepasado todos los límites planetarios imaginables. Aquellos problemas que en los setenta planteaban los límites del suministro de recursos se han quedado pequeños con respecto

a los problemas medioambientales que nos amenazan, como el cambio climático generado por el exceso de emisiones de gases de efecto invernadero con la quema masiva de los combustibles fósiles, la desaparición de la capa de ozono, la pérdida de los bosques tropicales, las pesquerías, la fusión acelerada de los polos, etc. Problemas que en los años setenta no se consideraban tan evidentes [6].

Surge una pregunta fundamental: ¿Puede salvarnos la innovación tecnológica del colapso tanto ambiental como de materias primas?

Responder a esta pregunta es a su vez responder a un conjunto de preguntas derivadas, que vamos a ir desgarrando a lo largo de la exposición.

En primer lugar, es indudable que debemos hacer caso a las evidencias científicas. Negarlas es suicidarse socialmente. Los hechos objetivos están ahí, su interpretación puede estar sujeta a discusión pero los hechos no. Las toneladas de materiales extraídos anualmente del planeta, las emisiones, las cantidades de bosques tropicales talados, etc., son informaciones disponibles fuera de discusión. A partir de los hechos, hay que crear un sistema contable que, como hacen los economistas, refleje los impactos ambientales de todo tipo así como las recuperaciones realizadas, año tras año. Una vez definida la brújula, crear un sistema de gestión planetaria que permita identificar el rumbo para, finalmente, crear los instrumentos institucionales necesarios que dirijan el planeta hacia un desarrollo sostenible mundialmente concertado.

El objetivo de este texto es poner algunas bases hacia dicho programa. Por ello, lo dividimos en tres partes: 1) El acoplamiento energía-materiales-medio ambiente; 2) la necesidad de una contabilidad global de los recursos, y 3) la propuesta.

EL ACOPLAMIENTO ENERGÍA-MATERIALES-MEDIO AMBIENTE

Más del 81 % de la energía comercial mundial se basa en los combustibles fósiles. Es evidente que las emisiones de gases de efecto invernadero van a crecer al mismo ritmo al que se incrementa la demanda, incluso más, porque los países asiáticos basan su producción eléctrica en las centrales de carbón, que al tener peor rendimiento que las plantas de gas natural aumentan notablemente las emisiones.

De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía, el consumo energético de los países no-OCDE va a crecer un 85 % de aquí al 2035, en contraste con los países de la OCDE en las que crecerá un 18 %. En 2012, se ha conseguido que el consumo energético esté repartido casi al 50 % entre ambos grupos de países [7]. Además, la tendencia hacia la concentración de la población en grandes urbes en los países en desarrollo no facilita el uso de las energías tradicionales (madera, agua o energía animal), lo cual aumentará su consumo de energía comercial y su dependencia de los combustibles fósiles.

Cada vez que compramos alimentos, agua, productos de limpieza, ropa, prensa y libros, muebles, vivienda, automóviles, etc., o cuando disponemos de servicios públicos como educación, sanidad, seguridad social, defensa o

infraestructuras o cuando compramos servicios como espectáculos, información o seguridad, etc., estamos adquiriendo energía incorporada. Independientemente del contenido energético que lleve un determinado producto o servicio, lo que importa, lo que aquí nos importa, es su coste energético, es decir, las cantidades de energía que han sido necesarias para producirlo.

No obstante, el panorama aún no está completo. Cuando utilizamos algo, después de una vida media más o menos corta, lo deseamos. Y para desechar un producto también se necesita energía. Por lo tanto, en el coste energético de un producto o servicio debe contabilizarse también la energía necesaria para desecharlo. De igual forma, si durante su vida útil se ha necesitado energía para mantenerlo y repararlo, también esta debe contabilizarse. En otras palabras, el coste energético de un producto o servicio debe contarse *desde la cuna hasta la tumba*, es decir, a lo largo de su ciclo de vida útil. Las basuras y la energía necesaria para deshacernos de ellas también cuentan como servicio.

Desde la década de los setenta, ha sido común correlacionar el Producto Interior Bruto (PIB) con el consumo energético de los países. En un principio era síntoma de país en desarrollo ver que sus consumos energéticos crecían. Ello es cierto. Más infraestructuras, más vehículos, calefacción, electrodomésticos y más tarde aire acondicionado, demandan más energía y, además, de mayor calidad. Se pasó de una economía tradicional basada en la combustión de biomasa a una economía que hace un uso generalizado de la electricidad y de los combustibles fósiles, tanto para la automoción como para uso industrial. Por otra parte, un mayor consumo significa más fibras artificiales para satisfacer la demanda de ropa, mayores desplazamientos tanto laborales como recreativos,

mayor superficie de vivienda y más servicios en general. El bienestar de un país, en mayor o menor medida, se asocia con un incremento de la renta y esta lleva consigo un aumento del consumo de energía per cápita.

Sea por el fenómeno de la urbanización que extiende la industria y sus infraestructuras y con ellos el poder adquisitivo de las familias que adquieren vehículos, electrodomésticos y servicios, o bien por el fenómeno de la globalización que incrementa los usos del transporte. O bien porque con las cadenas de frío, la producción de alimentos y los bienes de consumo se realiza lejos de donde se demandan, el consumo energético global va a incrementarse en las próximas décadas.

De la misma forma, las emisiones de dióxido de carbono están aumentando cada año, del orden de 1,7 % anual. Y se han duplicado desde 1970, llegando a ser en 2005 de 26 402 Gt/año de CO₂, con una concentración de CO₂ en la atmósfera actualmente de 387 ppm [8]. La Agencia Internacional de la Energía alertó de que a pesar de la crisis financiera global, en 2010 se había alcanzado el récord en el incremento de las emisiones de CO₂ en un 5,3 %, después de un ligero descenso al 1,5 % en 2009 [9]. Los países más pobres y en desarrollo produjeron el 50 % de las emisiones mundiales, debido no solo a su propio desarrollo, sino también al traslado de los procesos productivos de bienes de consumo de los países más desarrollados hacia Asia. Estos países constituyen, además, el 80 % de la población mundial.

La Agencia Internacional de la Energía pronostica el incremento en un 130 % de las emisiones de CO₂ hasta 2050. Concluyendo que «la inversión necesaria para reducir a la mitad las emisiones y desarrollar una “revolución internacional de las tecnologías energéticas” se elevará a 45 000 millones de dólares de aquí a 2050» [10 y 11].

En la Cumbre del Cambio Climático celebrada en Cancún en diciembre de 2010, se adoptó el compromiso de limitar a 2° C el incremento de temperatura para 2050. Pero con los niveles de consumo de combustibles fósiles que se prevén, muchos científicos opinan que ese incremento se superará hasta los 3 a los 5° C. De hecho la IEA prevé 3,5° C y no se excluyen los 6° C [12 y 13]. Este incremento tan brutal solo se ha registrado en el Plioceno hace unos tres millones de años, cuando los niveles del mar subieron 25 metros [14].

¿Pueden la naturaleza y el planeta que nos acoge soportar esta presión cada vez mayor?

Es evidente que el mundo debe marchar hacia la revolución tecnológica basada en las energías renovables en conjunción con las nuevas tecnologías informáticas y de las comunicaciones. Como dicen Jeremy Rifkin y Maria da Graça Carvalho: «Todas las decisiones económicas y políticas, que se adopten en el transcurso del próximo medio siglo, se verán condicionadas y supeditadas al coste creciente de la energía procedente de los combustibles fósiles y al deterioro paulatino del clima y la ecología terrestre» [15]. Y continúa diciendo: «De cara al futuro, todos los Gobiernos deberán explorar formas alternativas de energía y crear modelos económicos innovadores con el fin de que las emisiones de carbono sean lo más próximas posibles a cero [...]. Podrían utilizarse los mismos principios de diseño y las mismas tecnologías inteligentes que hicieron posible Internet y una red amplia y descentralizada de comunicación global para reconfigurar las redes eléctricas de manera que las personas pudieran generar su propia energía renovable y compartirla de igual a igual, como actualmente se genera y comparte la información, creando así un uso energético nuevo y descentralizado. [...] La creación de un régimen de energía

renovable, almacenado parcialmente en forma de hidrógeno, y distribuida por redes interconectadas inteligentes, abre la puerta a una tercera revolución industrial y debería tener un efecto económico multiplicador tan fuerte en el siglo XXI como la convergencia de la tecnología de la imprenta con las tecnologías del vapor en el siglo XIX, y la conjunción de las formas de telecomunicación eléctricas con el petróleo y el motor de combustión interna en el siglo XX. Se vislumbra en el horizonte la tercera revolución industrial, y la primera región que consiga sacar el máximo partido a la misma será quien marque el ritmo del desarrollo económico del resto del siglo. [...] Los tres pilares fundamentales, en los que se apoya la tercera revolución industrial, son la energía renovable, la tecnología de almacenamiento y las redes eléctricas inteligentes».

Es, pues, manifiesto que existe la necesidad de que el planeta camine hacia el desarrollo y uso masivo de las energías renovables que sustituyan a los combustibles fósiles y a la tecnología de fisión del uranio. Esto parece técnicamente posible, daría energía para todos y aseguraría el suministro si se consiguiera almacenar esta energía y transportarla inteligentemente.

A pesar de ello, hay voces pesimistas tan reputadas como Hoffmann que en un informe para la UNCTAD, duda de que una descarbonización drástica pueda alcanzarse. La dependencia global de los combustibles fósiles cayó en treinta años, desde 1980 hasta 2008, desde 1 kg/\$ hasta 0,77 kg/\$ actualmente, es decir, un 23 % o un 2 % anual. Teniendo en cuenta que para 2050 habrá una población de unos 9000 millones de habitantes y con los incrementos del producto interior bruto mundial que se esperan (2 % anual), se necesitaría llegar a unos límites extremos de descarbonización global equivalentes a 6 g/\$, es decir, 130 veces menos que los actuales y a un

ritmo del 11 % anual de decrecimiento [14]. Son reducciones tan drásticas que solo una revolución industrial, como propugnan Rifkin, Carvalho y muchos otros analistas políticos, harían posible la transición hacia una economía verde basada en una mejora sustancial de la eficiencia en el uso de los recursos naturales, materiales y energéticos escasos, y el paso a una sociedad basada en las energías renovables.

Sin embargo, hay una cuestión que los Gobiernos no se han planteado seriamente: ¿Hay suficientes recursos minerales para cambiar de modelo energético productivo? ¿Es realista esta visión que defiende un crecimiento económico verde?

A continuación, vamos a analizar los problemas asociados al suministro de materias primas asociadas a la demanda de esta nueva revolución industrial que debe realizarse.

I. Materiales escasos para la nueva economía verde

Teléfonos móviles

Una economía verde deberá estar basada en un uso eficiente de los recursos, en una expansión masiva de las energías renovables, y para ello los sistemas electrónicos de automatización, de información, de redes y de comunicaciones deberán ser la base más sólida de ese desarrollo.

Los dos elementos físicos clave en las tecnologías de la información y las comunicaciones son el ordenador y el teléfono móvil. A través de ellos se ha conseguido la comunicación global, tanto por Internet como por la voz y las imágenes. En el teléfono móvil convergen todas las tecnologías tanto de *software* como de *hardware*. Pantallas táctiles, sensores de voz, de imagen, emisores y receptores de voz y de datos, almacenamiento eficiente de energía,

miniaturización, ergonomía y acceso a toda la información mundial de un modo instantáneo. Algo impensable hace unos años se ha convertido en un elemento imprescindible en nuestra vida. Y su desarrollo no solo no ha acabado, sino que se ha acelerado.

Pero existe una cara oculta de la tecnología de móviles, y es su falta de reciclado. Un móvil puede contener 9 mg de Pd, 24 mg de Au, 250 mg de Ag, 9 g de Cu, 3,5 g de Co (baterías), Ta (condensadores) e In (pantallas TFT). Sus circuitos electrónicos están fabricados con 1/3 de metal; 1/3 de cerámica y vidrio, y 1/3 de plástico. La placa base está hecha de resina epoxi recubierta electrolíticamente con una lámina de oro. Su circuitería puede contener Cu, Au, As, Ga, Cd, Pb, Ni, Pd, Hg, Mn, Li, Be, Br, Ag, Zn, Ta e incluso Ir, además de adhesivos y recubrimientos. La pantalla de vidrio puede contener mercurio, u oxido de estaño e indio en las pantallas más modernas del iPhone, iPad y similares. Sus baterías recargables son las partes más contaminantes, ya que contienen Cd, Co, Ni, Zn, Cu y / o Li. Igualmente, en el cargador aparece cobre mayoritariamente, pero también cadmio y oro [16].

Si esos metales no se reciclan y se llevan a los vertederos, se corroen, y por tratarse de metales pesados son muy tóxicos con los ecosistemas, pues persisten durante mucho tiempo, son bioacumulativos en la grasa animal y entran en la cadena alimentaria causando importantes problemas de salud afectando al sistema nervioso, al reproductivo, al desarrollo infantil y, además, son cancerígenos. Así, por ejemplo, ocurre en el caso del plomo que afecta al hígado y a los riñones y causa problemas neurológicos a los niños. Por otro lado, el litio, aunque no es tóxico, cuando reacciona con el agua puede causar incendios fácilmente en los vertederos porque es muy difícil de apagar.

La producción mundial de teléfonos móviles superó en 2010 los 1000 millones, pero menos de un 2-3% se recicla actualmente. En los Estados Unidos se desechan cada año más de 130 millones, y en China se retiran de uso más de 100 millones. Uno de los negocios emergentes en muchos países va a ser la «minería urbana», para recuperar los metales nobles que contienen. Una tonelada de teléfono móvil contiene un kilogramo de plata y 300 gramos de oro.

Mucha de esta basura electrónica del primer mundo se lleva a Agbogbloshie, próxima a Accra, la capital de Ghana, donde una ínfima parte se recicla, pero la mayor parte contamina todo lo imaginable. Un negocio marginal floreciente consiste en extraer los metales rompiendo las placas base a martillazos y quemando directamente la cubierta plástica del cobre, cuyos humos se inhalan sin protección [17].

El director responsable de medio ambiente de Nokia, Markus Terho, afirmó que:

Si los tres mil millones de personas que disponen de teléfono móvil en el mundo devolvieran su teléfono usado, se podrían ahorrar 240 000 toneladas de materias primas escasas y se reducirían las emisiones de gases de efecto invernadero en una magnitud equivalente a retirar cuatro millones de vehículos del tráfico.

Lo comentado para los teléfonos móviles sirve de ejemplo para la basura informática y electrónica, cuyo fin de vida pasa bastante desapercibido y desde luego prácticamente no se recicla en ningún lugar del mundo de una manera significativa. A pesar de ello, una tonelada de teléfono móvil contiene entre diez y treinta veces más oro que las minas actualmente explotadas. Y si no se recicla es porque las cantidades de basura a reciclar no son muy grandes y no compensan económicamente los costes de

reciclado. En consecuencia, la dispersión de la basura electrónica es enorme.



Figura 7. Basura de teléfonos móviles.

Energías renovables

La producción de energía de origen renovable está lejos de ser común. Al ser energías dispersas e intermitentes necesitan grandes cantidades de espacio, están distribuidas por el territorio y cada territorio tiene las suyas propias que difieren de las de otros lugares; deben acoplarse y desacoplarse de las redes eléctricas de forma automática; producen densidades energéticas bajas y necesitan tecnologías cada vez más sofisticadas. Son tecnologías más caras y complejas que las de las energías convencionales, porque estas se aprovechan de las economías de escala, mientras que las renovables no pueden alcanzar elevadas potencias.

El uso de materias poco abundantes es un tema a tener en cuenta, sobre todo cuando se pretende que las renovables sustituyan universalmente a los combustibles fósiles.

Por ello, vamos a analizar algunas renovables con gran potencial actual o futuro desarrollo en relación con materias escasas y su capacidad de reciclado.

Biomasa

La energía de la biomasa se obtiene a partir de residuos agrícolas o forestales. Sin embargo, para que llegue a pesar verdaderamente en la cesta energética mundial, será necesario recurrir a la agroenergía. Es decir, plantar especies de crecimiento vegetal intenso, que puedan proveer de material combustible, tanto sólido (en briquetas, por ejemplo) como líquido, llamado biocarburante o biocombustible. Se habla incluso de productividades de 3 t/ha/año en bosques tropicales y templados con suelos ricos en materia orgánica y agua. Para ello, se necesitarán extensiones elevadas que permitan reducir los costes de cosecha, pero sobre todo se necesitarán masivamente fertilizantes de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). Mientras que los nitratos pueden obtenerse industrialmente a través de la síntesis Haber-Bosch, y el cloruro potásico es una sustancia muy abundante tanto en salares como en el mar, la roca fosfática es muy poco abundante. Wellmer (2008) analizó recientemente sus reservas actuales, y concluyó que, a la velocidad de su consumo actual, y a partir de las reservas probadas, se espera el pico de producción hacia 2030-2040. La roca fosfática, por lo tanto, constituye uno de los elementos esenciales para el futuro desarrollo de la agricultura, incluso para la producción futura de alimentos. Hoy en día el 82 % del fósforo se utiliza para fertilizantes y solo un quinto se ingiere y pasa a la constitución ósea animal y humana, lo que significa que la cadena de utilización de fósforo es muy ineficiente, con lo que se debe esperar un alto desarrollo tecnológico en

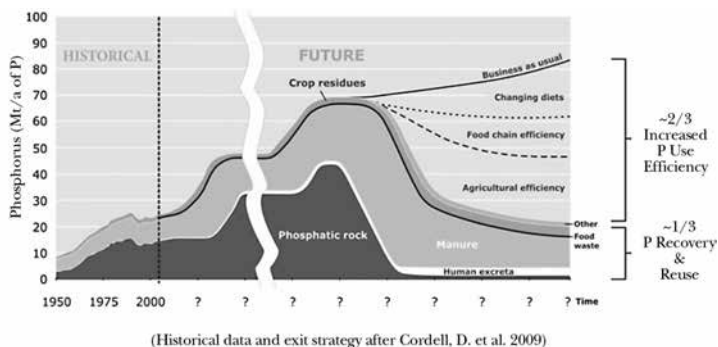


Figura 8. Panorama preocupante de la demanda mundial de fosfatos a largo plazo [20].

la dosificación y en el reciclado del fósforo en el estiércol y en residuos vegetales y animales [18 y 19].

El problema se agrava con la localización geoestratégica de las principales minas en el mundo. Según un estudio publicado por Cordell *et al.* (2009), cuatro países poseen más del 85 % de todas las reservas probadas de mena fosfática, así en el Sáhara Occidental existiría el 35,5 % de las reservas mundiales, en China el 23,7 %, en Jordania el 9,8 % y en Sudáfrica también el 9,8 %. Esta situación puede explicar muchos conflictos potenciales y futuros [20].

La Comisión Europea encargó recientemente un estudio muy completo sobre el uso sostenible del fósforo [21]. Un escenario para el fósforo a largo plazo indefinido se presenta en la figura 8. Según los autores no se ve cómo la demanda mundial de fosfatos para la alimentación y usos humanos podrá suplirse si no hay drásticos cambios en las tecnologías de reciclado, en las de fertilización, en la eficiencia de la cadena de uso y en el cambio de dieta. El fósforo es posiblemente el elemento químico que más preocupa de todos los necesarios para mantener

nuestro desarrollo tecnológico. Porque mientras hay sustitutos para los combustibles fósiles que se agotan, las plantas y los seres vivos no admiten otro elemento alternativo como sustituto. En otras palabras, la cantidad de biomasa que el planeta puede producir está limitada por los recursos del planeta y nuestra capacidad de reciclado. Lamentablemente, miles de toneladas de detergentes que utilizan fosfatos para blanquear la ropa, así como los fertilizantes no utilizados terminan en los ríos a los que eutrofizan y, finalmente, en el mar, donde es imposible su reciclado. Es un derroche que las generaciones futuras pagarán muy caro.

Energía solar fotovoltaica

La Agencia Internacional de la Energía en su hoja de ruta hacia el 2050 prevé que la energía solar fotovoltaica podrá suministrar el 11 % de la electricidad (4500 TWh/año) que corresponderían a una potencia instalada de 3000 GW, contribuyendo a evitar 2,3 Gt de CO₂ al año [22]. En 2012 la tecnología fotovoltaica solo aporta el 0,1 % de toda la electricidad mundial. Esta tecnología es aún cara, aunque se espera que a los precios de la energía eléctrica convencional se alcance la paridad de red (*grid parity*), es decir, que su coste sea equivalente al de la electricidad comprada a la compañía suministradora, entre 2015 y 2020. El esperado autoconsumo podría ser una realidad muy pronto si se sabe legislar bien, pero para ello se necesita aún mucha más investigación.

Los módulos comerciales de obleas fotovoltaicas de silicio cristalino representan el 85-90 % del mercado mundial. Todavía son caros aunque el precio del silicio haya bajado significativamente en los últimos años desde 450 € el kilo en 2008 a 20 € en la actualidad, según la asociación ASIF. Se espera que las nuevas tecnologías basadas en

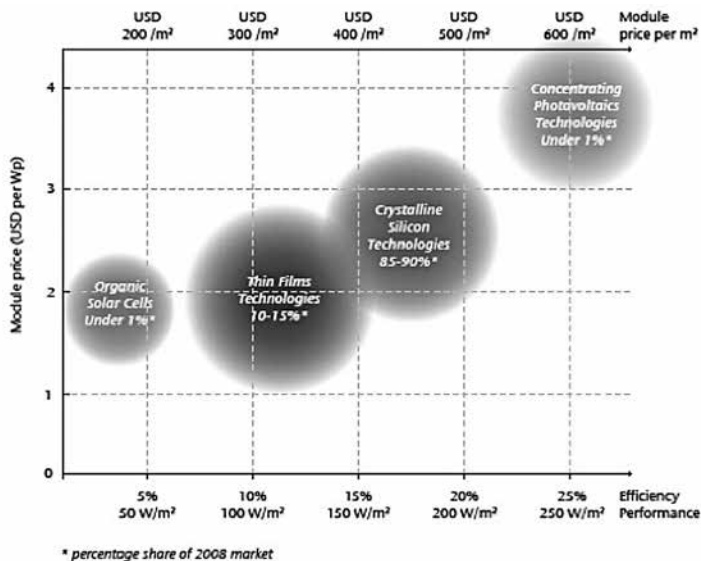


Figura 9. Precios y eficiencia de las células fotovoltaicas según la Agencia Internacional de la Energía (2010) [22].

capa fina, en sistemas de concentración y en células orgánicas, reduzcan considerablemente los costes y mejoren la eficiencia. Ello conllevaría unos costes de la fotovoltaica en tejado de alrededor de 1€/W en los próximos años, lo que representaría una reducción de hasta diez veces los costes actuales [23].

El problema reside en que los módulos de capa fina de alta eficiencia, en los que mayor reducción de costes se espera, están hechos con materiales escasos y difícilmente mundializables. En efecto, el telururo de cadmio (CdTe), el diselenuro de indio y cobre (CuInSe_2), el diselenuro de galio y cobre (CuGaSe_2) y el diselenuro de galio, indio y cobre son los materiales con las mejores perspectivas. Pero tanto el telurio como el indio y el galio son elementos muy

escasos en la corteza y su producción está sujeta a estrictos controles políticos y medioambientales, en especial en China [24]. Así, la capacidad mundial de producción de galio era de 184 toneladas en 2008, de las que el 32 % se producen en China. De acuerdo con el Fraunhofer Institut, para 2030 se espera multiplicar su demanda por 22, mientras que la del indio por 8,2 [25]. Esta es una demanda difícilmente sostenible en el largo plazo.

Es evidente que si la tecnología fotovoltaica quiere desarrollarse a precios competitivos tendrá que basarse en minerales abundantes como el silicio o el sulfuro de hierro (pirita). A pesar de ello, las células de silicio policristalino utilizan uniones de plata que a su vez son un elemento escaso y que también será necesario sustituir para su necesaria globalización. Lo cual puede colocar a la tecnología fotovoltaica lejos de la promesa de cubrir el 11 % de la producción mundial de electricidad en las próximas décadas.

Energía eólica

Un aerogenerador convencional utiliza imanes permanentes para proteger y evitar posibles cortes de suministro. Dichos imanes están compuestos por neodimio-hierro-boro: $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Así, un aerogenerador de 5 MW contiene unas dos toneladas de imán permanente del que un 12 % de su masa es neodimio u otras tierras raras como gadolinio, disprosio y terbio. La utilización de estos elementos es básica no solo en energía eólica, sino también en vehículos eléctricos, nuevos catalizadores y cientos de otras aplicaciones de alta tecnología «verde» [24].

Aunque el neodimio no es un elemento raro en la naturaleza como podría parecer, sí que aparece muy disperso, haciendo su extracción muy costosa y contaminante. De hecho, es más complejo extraer tierras raras que el

mismo oro. Sus concentraciones naturales se mantienen en un rango desde diez hasta pocos cientos de partes por millón en peso. Las tierras raras se encuentran en los minerales monacita y bastnasita, y las mayores reservas mundiales están en China y en los Estados Unidos, aunque en este país no se explotan. China dispone del 36% de esas reservas económicas mundiales, mientras que sus reservas base constituyen el 59,3% de las mundiales. La compañía sueca LKAB ha empezado a explotar las reservas del Círculo Polar Ártico. Su procesado limpio y una rebaja sustancial de sus costes de producción son los auténticos retos tecnológicos para su producción.

Debido a la política de exportar tecnologías contaminantes hacia países en desarrollo, el 97% de la producción mundial actual se localiza en China. Eso pone a este país en una posición de monopolio mundial. En 2009 su producción era de 120000 t, sobre las 124000 t mundiales, y se espera que su crecimiento llegue hasta las 170000-185000 t para 2015. Sin embargo, será insuficiente en relación con la demanda global que crecerá muy por encima de esas cifras en las próximas décadas y a lo largo de este siglo. A finales de 2011 la demanda ya superó a la oferta.

No es extraño, pues, que China adopte una posición de control del mercado mundial exigiendo exportar aquellas tecnologías que se basan en las tierras raras en vez de exportar estas. Anima así a inversores externos a invertir en productos acabados dentro del país, y ejerce incluso un abusivo control al restringir sus exportaciones, sin que las amenazas de sanción de la Organización Mundial del Comercio sean efectivas. Sus exportaciones de 2011 se limitaron a 24000 t frente a la demanda exterior que se cifró en unas 55000-60000 t. Por otra parte, el valor estratégico y crítico de dichos materiales favorece la opacidad china. Periódicos como *Wall Street Journal* o

Financial Times han alertado al mundo, puesto que al controlar la llave de la exportación, China llegará a controlar el desarrollo global de las nuevas tecnologías sostenibles.

Por otra parte, las redes y las máquinas eléctricas en general utilizan grandes cantidades de cobre para sus transmisiones y bobinados. García-Olivares *et al.* estiman que se necesitan unas 2,7 t de Cu/MW instalado en un parque eólico convencional. En un parque eólico marino, estos valores se disparan en función de la longitud de la línea de transmisión hasta la costa y la red eléctrica, pudiendo alcanzar entre las 8 y las 15 t/MW. En particular, estos autores proponen un consumo de cobre de 70 kg por metro de línea de cobre de 630 mm², lo que equivale a 0,416 t/(MW km) [24].

Además, estos autores proponen una solución combinada global de 11,5 TW eléctricos renovables para 2030 (actualmente es de 2 TW sobre un total de 12,5 TW en 2010) con un 51 % de energía eólica, un 40 % de energía solar termoelectrónica concentrada y el resto de hidroelectricidad. Sobre esta hipótesis calculan que la cantidad de cobre que se necesitaría, tanto para los equipos como para la transmisión, sería de 221 millones de toneladas. Teniendo en cuenta que las reservas mundiales económicamente explotables son de 550 millones de toneladas, significa que el 40 % de dichas reservas (es decir, la producción global equivalente a catorce años sin contar el reciclado) se destinaría a cubrir la solución renovable propuesta. Si a ello sumamos la demanda de cobre para la electrificación de los transportes nos acercaríamos al 60-70 % de las reservas mundiales, dejando el resto del cobre para los demás usos industriales. Esta fuerte demanda haría que el cobre alcanzara precios similares a los de los metales preciosos como la plata. Una alternativa viable será usar aluminio en las líneas eléctricas. En este

caso, como las reservas mundiales de aluminio son muy elevadas, la producción de 1,4 años de aluminio bastaría para cubrir todas las transmisiones necesarias.

Vehículo eléctrico

La flota mundial de vehículos es actualmente de unos 600 millones de vehículos ligeros, 250 millones de vehículos pesados y unos 270 millones de motocicletas [26]. Prácticamente el 100 % de estos vehículos están movidos con combustibles líquidos derivados del petróleo. Proponer una transición global hacia el vehículo eléctrico supondrá una demanda extraordinaria de nuevos materiales que no son ahora excesivamente comunes. En particular para un almacenamiento eléctrico eficiente y ligero.

Las baterías de ion litio son las que mejores prestaciones ofrecen. Son ligeras y presentan una gran densidad energética (0,3 kg/kWh). De acuerdo con García-Olivares *et al.* (2012), si toda la flota actual se repusiera a lo largo de los próximos treinta años con vehículos eléctricos usando baterías de ion litio, se necesitarían 8 millones de toneladas de litio, solo para los vehículos eléctricos sin contar otros usos. Eso significa que habría que aumentar la producción mundial anual diez veces y utilizar 1,9 veces más que todas las reservas probadas mundiales. Si bien las reservas mundiales se localizan en los salares de la cordillera andina sudamericana (Bolivia, Chile y Argentina), el planeta tiene recursos probados más allá de estas. Por ejemplo, el litio aparece en minerales como el espodumeno que se encuentra más repartido. De la misma forma, el océano contiene inmensas cantidades de litio. Por lo tanto, el problema será su disponibilidad económica, más que su escasez.

Tabla 1*Metales requeridos para una globalización del sistema de transporte*

Metal	Density	Global mass (t)	Reserves ⁽⁶⁾ (10 ⁶ t)	Production (10 ⁶ t/yr) ⁽⁶⁾	Fraction of Reserves	Years of Production
Copper	0.73 kg/kW ⁽¹⁾	(98+209+11) x10 ⁶	550	16	0.58	20
Lithium	0.3 kg/kWh ⁽²⁾	8x10 ⁶	4.1	0.027	1.9	290
Nickel	2.5 kg/kWh ⁽³⁾	66x10 ⁶	70	1.61	0.95	41
Zinc	0.9 kg/kWh ⁽⁴⁾	19.7x10 ⁶	180	11.3	0.13	2.1
Platinum	0.004 kg/kW ⁽⁵⁾	31.x10 ³	0.07	1.61x10 ⁻³	0.44	19

Fuente: [24], (1) [27], (2) [28], (3) [29], (4) [30], (5) [31] y (6) [32].

Existen otras alternativas como las baterías Zebra, de sodio/cloruro de níquel, con una densidad energética de 2,5 kg/kWh mucho menor que las de litio. Sin embargo, presentan un problema similar al del litio. Para cubrir toda la flota se necesitaría el 95 % de todas las reservas mundiales de níquel. Es evidente que se necesita mucha investigación aún para conseguir utilizar materiales abundantes y ligeros, si queremos hacer una transición realista hacia el vehículo eléctrico sustituyendo los combustibles fósiles. Este sería el caso de las baterías de zinc-aire [24].

En cuanto a los vehículos híbridos, un Toyota Prius carga un conjunto de 38 baterías de níquel-hidruro metálico que pesa 53,3 kg, de los cuales de 10 a 15 kg son litio. Además, el automóvil requiere 1 kg de neodimio, con lo que es descrito como el «mayor usuario de tierras raras de cualquier objeto en el mundo».

Escasez de elementos químicos estratégicos.

Un problema internacional

La demanda mundial de materias primas no deja de aumentar. De acuerdo con Wellmer y Steinbach (2011),

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Y	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	La	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Ac	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra																
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
		Ac	Th	Pa	U												

Figura 10. Elementos usados en la producción de componentes para ordenadores: 61 de 92 elementos.

la demanda mundial de minerales fue en 2010 de 45 000 millones de toneladas. Prácticamente todos los elementos estables de la tabla periódica tienen hoy uso industrial. Los minerales más consumidos son los combustibles fósiles, los materiales de construcción, como la cal, los yesos, la grava y las arenas, las sales, como la sal común y el cloruro potásico y los fosfatos. En cuanto a los metales, los más utilizados son el hierro, el aluminio, el cobre, el manganeso, el zinc, el cromo, el plomo, el titanio y el níquel. En total, un millón de toneladas, siendo el hierro el más utilizado con diferencia [33].

Pickard (2008) mostró que, analizando 81 elementos estables de la corteza terrestre, en un escenario de uso convencional, la disponibilidad de rutenio, rodio, paladio, telurio, renio, osmio, iridio, platino, oro y, especialmente, fósforo será cuestionable en un futuro no muy lejano; mientras que el suministro de helio, cromo, níquel, cobre, zinc, molibdeno, plata, cadmio, estaño, antimonio, wolframio, mercurio, plomo y bismuto será problemático. Muchos metales nobles escasos van a tener una fuerte demanda industrial tanto para sistemas

eléctricos/electrónicos como para catalizadores y, posiblemente, su uso en joyería perderá peso [34].

Recientemente (2011) el Instituto para la Información de Minerales (MII) [35], publicó un estudio en el que un norteamericano medio necesita cada año para mantener su nivel de vida 38052 libras de minerales (17 t). Y la revista *New Scientist* en su número de 23 de mayo de 2007 [36] plantea que a lo largo de su vida, 77,8 años, habrá necesitado además las cantidades siguientes de otros elementos: Sb, 7,13 kg; Ga, 5 g; Sn, 15 kg; Ta, 180 g; Cu, 630 kg; Pt, 45g; P, 8322 t; Al, 1576 t; Cr, 131 kg; Zn, 349 kg; U, 5,95 kg; Ge, 10 g; Pb, 410 kg; Ag, 1,58 kg; Au, 48 g; Ni, 58,4 kg; y cantidades no menores de In, Hf y otros elementos.

La Comisión Europea encargó un reciente estudio al Fraunhofer Institute ISI, preparado por el Grupo de trabajo ad hoc para definir las materias primas críticas, publicado en 2010, dentro del EU Raw Materials Initiative, en el que se planteó la cuestión sobre cuáles son los materiales críticos para la Unión Europea. Dicho estudio define los materiales críticos en función del alto riesgo de falta de su suministro y de su importancia económica. Se analizó un grupo de 41 materias primas. En la figura 11 aparecen los elementos marcados en la parte superior derecha: Sb, Be, Co, fluorita, Ga, Ge, grafito, In, metales del grupo del Pt, tierras raras, Ta y W [37]. Este trabajo se presentó en 2010, pero la situación cambia rápidamente a peor, habiéndose constatado en estos dos últimos años que la demanda hacia el 2030 va a aumentar entre dos y tres veces las previsiones que se habían propuesto en 2010. Entre ellos, el Ta, In, Ga, Ge, Pt, Sc y Nd, debido a la amplia expansión de las nuevas tecnologías emergentes [25].

Con similar preocupación, el Instituto de Tecnología de Massachussets, junto con la Sociedad Americana de

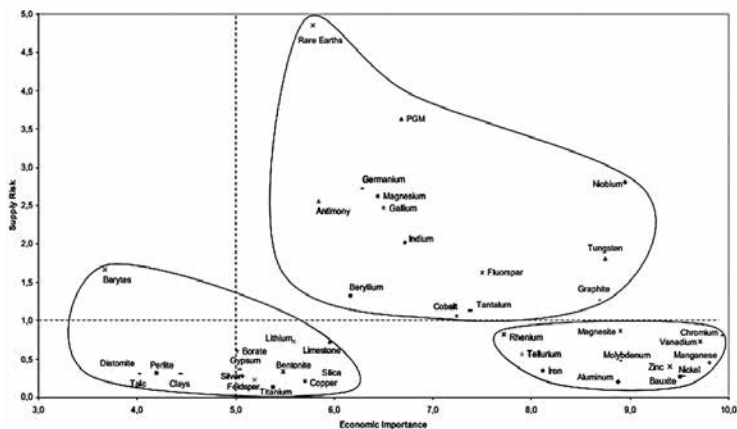


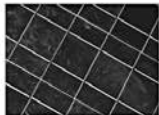






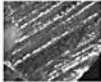





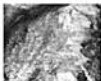
Figura 11. Materias primas críticas para la UE (2010) en función del riesgo de su suministro y de su importancia económica [37].

Física y la Sociedad para la Información de los Materiales, presentaron un estudio en 2010 sobre los elementos críticos que son necesarios para el desarrollo de las nuevas tecnologías energéticas más avanzadas [38]. Al telurio, germanio, neodimio y litio ya explicados, añaden el platino como catalizador necesario para las pilas de combustible con hidrógeno, el renio como elemento esencial para aleaciones especiales para la tecnología de turbinas, el terbio como elemento para las lámparas de bajo consumo y el helio-4 por sus aplicaciones en criogenia, soldadura, refrigerante nuclear y otras muchas aplicaciones. Ver figura 12.

En definitiva, que el problema energético nunca podrá resolverse, si no se tiene en cuenta una contabilidad global de los elementos escasos del planeta, lo que obligará a reciclarlos así como a sustituirlos en la medida de lo posible. Es un reto abierto a la investigación de nuevos materiales y a una contabilidad sistemática de ellos a nivel

Energy Critical Elements: Powering Our High-Tech World

Energy Critical Elements (ECEs) are found in a myriad of high-tech, environmental and military equipment. From smart phones to solar panels to jet engine parts, ECEs play crucial roles in products affecting our daily lives.

	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;">52 Te Tellurium 127.60</div>		TELLURIUM —brittle, silvery-white metallic element used in solar panels
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;">32 Ge Germanium 72.61</div>		GERMANIUM — hard, grayish-white element with metallic luster; used in solar panels
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;">78 Pt Platinum 195.078</div>		PLATINUM —silvery-white, lustrous, ductile and malleable; used in pollution control devices for cars, and in fuel cells
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;">60 Nd Neodymium 144.24</div>		NEODYMIUM —bright, silvery rare-earth metal element; used in wind turbines and hybrid cars
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;">3 Li Lithium 6.941</div>		LITHIUM —a soft, silver-white metallic element; used in wind turbines and lithium-ion batteries in hybrid cars
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;">75 Re Rhenium 186.207</div>		RHENIUM —silvery-white metal with one of the highest melting points of all elements; used to make advanced turbines and jet engine parts
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;">65 Tb Terbium 158.92534</div>		TERBIUM —a soft, silvery-white rare earth metal; used along with its fellow rare earth europium in compact fluorescent light bulbs to provide an acceptable color balance

Energy-critical element images obtained from: <http://images-of-elements.com>



Headquarters:
One Physics Ellipse,
College Park, MD 20740

Washington Office:
529 14th Street, NW, Suite 1050
Washington, DC 20045

Figura 12. Elementos críticos más demandados en altas tecnologías energéticas según la American Physical Society, la Iniciativa Energética del MIT y la Sociedad para la Investigación de Materiales, MRS. Te, Ge, Pt, Nd, Li, Re y Tb [38].

global. Surge entonces la cuestión: ¿Hasta qué punto el reciclado y la sustitución pueden ser soluciones tecnológicas viables? En el siguiente apartado analizamos esta cuestión.

Reciclado de materiales: ¿Amenaza u oportunidad?

Parece evidente que hay que reciclar. El problema es ver hasta qué punto esto se realiza y cuál es el nivel de reciclado necesario para que el futuro de las tecnologías renovables y las de la información puedan desarrollarse sin sobresaltos de escasez de materiales.

En primer lugar, reciclar es necesario porque supone un importantísimo ahorro de energía. Así, Wellmer y Steinbach (2011) [33] describen que el ahorro energético que se obtiene al reciclar acero en vez de producirlo desde el mineral de hierro es de un 74 %, mientras que para el aluminio es de un 95 %, para el cobre de un 85 % y para el plomo es de un 65 %. Con estas cifras, parece evidente que debe favorecerse por todos los medios una tecnología del reciclaje lo más exhaustiva posible. Sin embargo, la realidad es muy diferente. El estudio del MIT antes citado presenta el trabajo de S. Sibley del USGS Mineral Information Team [38], en el que se plantea que a nivel internacional, solo en el caso del plomo, la disponibilidad de este metal en el mercado proviene en un 60 % de su reciclado y en un 40 % de nueva extracción. Sin embargo, el porcentaje de reciclado/nueva extracción para distintos elementos industriales críticos es inferior al 50 %, siendo, aproximadamente, los siguientes: titanio, níquel y germanio, 50/50; wolframio, 45/55; hierro y acero, 40/60; manganeso y aluminio, 35/65; molibdeno, manganeso, plata, cobalto, cadmio y cobre, 30/70; oro y zinc, 27/73; estaño, niobio, tántalo, cromo y antimonio, 20/80; platino, 15/85,

Recycling Rate and Percent Primary for Selected Metals
(1998-2004)

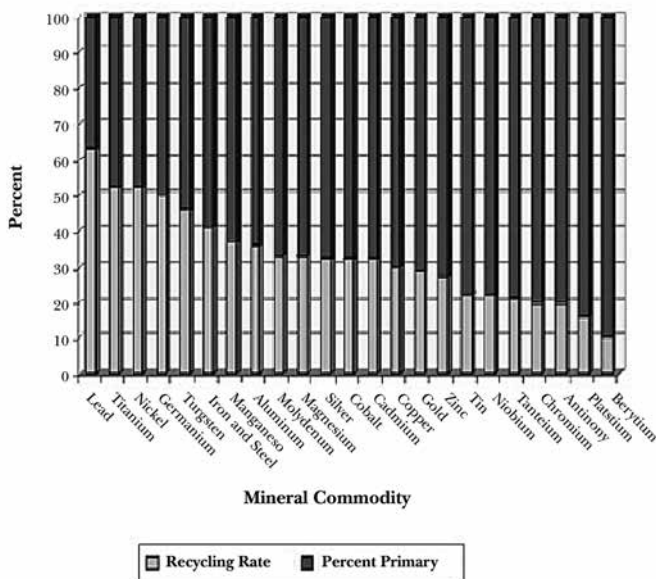


Figura 13. Porcentaje de reciclado y de nueva extracción de metales industrialmente relevantes de acuerdo con S. Sibley del USGS Mineral Information Team [38].

y berilio, 10/90 (ver figura 13). Lo cual indica que estamos aún lejos de depender solo de los metales ya extraídos.

Desde el punto de vista histórico, Jurg Gerber presidente del Comité Global para el Reciclado del Aluminio presentó en Davos (Suiza), en septiembre de 2007, los datos que aparecen en la figura 14. En ella se observa que, aunque la proporción de aluminio reciclado aumenta desde los años cincuenta, como la demanda mundial de aluminio también aumenta, solo se espera que el aluminio reciclado llegue al 38 % del total disponible en el mercado, mientras que un 62 % de todo el aluminio mundial seguirá siendo de nueva extracción.

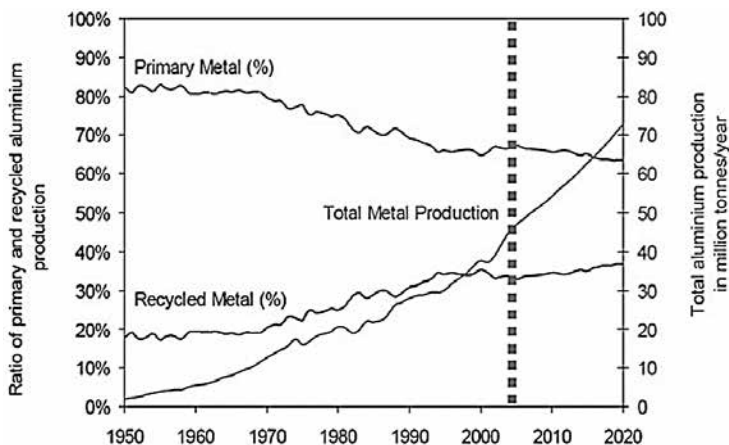


Figura 14. Evolución histórica de la producción de aluminio reciclado con respecto a la producción total [39].

En el estudio del MIT antes citado [38], Sibley proporciona también las eficiencias del proceso de reciclado de diferentes metales, dando los datos siguientes: para plata, oro, plomo y titanio, >90 %; antimonio y cromo, 85-90 %; platino, germanio y estaño, 75 %; cobalto, wolframio y mercurio, 65-60 %; níquel, manganeso, hierro y acero, y niobio, 55-50 %; cobre, aluminio y magnesio, 42-38 %; tántalo y molibdeno, 33-29 %; zinc, 18 %; cadmio, 15 %, y berilio, 5 %, aproximadamente.

En resumen, pueden apuntarse varias conclusiones referentes al reciclado de materiales metálicos necesarios para el desarrollo industrial:

- 1) El reciclado de materias primas minerales no cubre nunca ni el 50 % de la demanda de metales estratégicos. Por lo tanto, se sigue extrayendo mucho más de lo que se recicla.
- 2) Aun en los metales más fácilmente reciclables, de mayor demanda industrial y que mayores ahorros

energéticos proporcionan, como son el aluminio y el acero, el reciclado no llega al 40 %, ni se espera que alcance valores superiores hacia 2020.

- 3) Las eficiencias de la recuperación de metales son extraordinariamente bajas. Solo están mejor desarrolladas las relativas a los metales nobles. Ello tiene una doble lectura. En primer lugar, aquello que no se recupera puede generar problemas de contaminación de metales pesados. Y, en segundo lugar, obliga a extraer más mineral de lo estrictamente necesario.

Sagar y Frosch [40] estudiaron como caso excepcional que en Nueva Inglaterra (EE. UU.) más del 95 % del metal reciclado permanece dentro del sistema de reciclado de chatarras metálicas. Este es un esfuerzo considerable en el que solo se pierde un 5 % de metal. A pesar de ello, esta cifra significa que, manteniendo las mismas condiciones, en menos de 15 años toda la extracción actual se habrá dispersado. Como Wernick y Themelis (1998) comentan: «El cien por ciento de recuperación para satisfacer la demanda representa más una meta que una realidad alcanzable, incluso para los metales preciosos, donde el incentivo para recuperarlos es mayor» [41].

El agotamiento, el reciclaje, la dispersión y la sustitución son diferentes fases del ciclo de cada elemento en el planeta bien sea impulsado bio-geológicamente o geotecnológicamente. La ecosfera funciona con energía solar y con tiempo suficiente cierra sus ciclos naturales. Pero la humanidad extrae minerales sin la prevención de analizar el coste de reemplazar lo que se extrae con nuestra tecnología actual. Como hemos visto, el valor de un mineral está hoy en día más en relación con su precio de mercado que con su escasez física. Los precios de mercado son más sensibles a la indisponibilidad del material en el mercado que su escasez objetiva. De hecho, esta

escasez física se niega, en muchos casos, como falta de información, y solo se percibe como un problema importante cuando se observa indisponibilidad de una materia prima en un futuro cercano. Los mercados son sensibles a los acontecimientos a corto y medio plazo, pero no a responsabilidades a largo plazo. Históricamente se sabe que muchos recursos biológicos ya extinguidos se agotaron debido a que su explotación era barata y no se tuvo el menor cuidado en su conservación para las generaciones futuras. No hay ninguna razón para pensar que nuestra generación deseará conservar recursos minerales con el fin de dejarlos para futuros usos desconocidos, ni siquiera aunque tengamos la certeza de que se van a agotar. Lo único que hacemos es dar una cuenta anual de la «producción» de estas materias primas.

La percepción de la escasez no se ve como un problema permanente, sino como un problema temporal que está influido por aspectos sociopolíticos, tecnológicos o económicos. Pero este asunto puede llegar a ser un problema crítico porque afecta al futuro sostenible de la humanidad. Aunque unos lo nieguen diciendo que siempre habrá un coste de oportunidad, y otros den la alarma y vean el agotamiento como un hecho físico limitado por las reservas en vez de por los recursos más o menos hipotéticos. En cualquier caso, siempre existen diversos tipos de escasez. Por un lado, está aquella que afecta a la biología; es el caso del fósforo, en el que su cantidad limita la cantidad de biomasa que el planeta podría producir. Otro tipo estaría provocada por limitaciones tecnológicas, como en el caso del rodio. Por otro lado, estaría la generada por razones geopolíticas como la que afecta a los elementos del grupo del platino. Y, finalmente, habría razones económicas como en el caso del cobre, e

incluso razones medioambientales como en el plomo, el cadmio o el mercurio [42].

Hay una especie de optimismo tecnológico más o menos ciego que piensa que las tendencias globales van en la dirección de reciclar materiales, diseñar para reciclar ahorrando materiales, miniaturizando con nanotecnologías y otros avances. Además, se considera este problema de tan largo plazo que no habrá que preocuparse por él antes de 2028-2100 y que en cualquier caso el planeta está inexplorado, así que los polos, los fondos marinos, los ecosistemas apenas hoy explotados como son la Amazonía, o los desiertos, pueden albergar enormes cantidades de minerales para el futuro. Como si quienes vayan a vivir a finales de este siglo no importasen en absoluto.

Pero la verdad es reticente a ese optimismo, porque la ley de rendimientos decrecientes nos dice que cada vez es más improbable encontrar minerales de una ley suficientemente explotable. La energía necesaria para extraer los materiales será cada vez más elevada y, por lo tanto, será más contaminante la extracción de minerales paulatinamente más escasos. Si hoy la extracción de los minerales consume más del 10% de la energía mundial, este valor no hará más que crecer en el futuro, aun a pesar de que se favorezcan todas las técnicas de reciclado imaginables.

Heinberg [43] define cuatro condiciones para que una fuente energética primaria tenga futuro:

- 1) Debe proveer una cantidad muy sustancial de energía. No ser marginal su contribución a los países.
- 2) La energía que provea debe ser al menos diez veces mayor que la que se necesita para ponerla en el mercado desde la cuna.
- 3) Que sea aceptable desde el punto de vista social, geopolítico y medioambientalmente, incluyendo sus efectos sobre el clima.

4) Que sea renovable.

García-Olivares *et al.* [24] añaden un quinto punto:

5) Que no dependa su explotación y uso de materiales escasos.

Este punto es fundamental y ha sido el gran olvidado en prácticamente todas las defensas que se hacen de las energías renovables.

El problema no es ponerse a favor de los tecno-optimistas, que consideran que el planeta tiene suficientes recursos minerales como para no preocuparse, o en favor de los que consideran que los recursos son limitados y que deben ponerse límites al desarrollo, volviendo a renovar el mensaje de «los límites del crecimiento» de los años setenta, sino de cuantificar el agotamiento que nuestra civilización está sometiendo a los recursos minerales finitos, aunque no se tenga certeza de esa finitud [5].

En definitiva, hasta aquí hemos respondido a las siguientes cuestiones:

- a) ¿Cuáles son las aplicaciones tecnológicas de las que más se prevé su crecimiento en los próximos años?
- b) ¿Qué minerales pueden llegar a ser escasos y críticos para el desarrollo futuro?
- c) ¿Hasta qué punto el reciclado y la sustitución pueden ser soluciones tecnológicas viables?

Creemos que el problema central está en responder a la pregunta: ¿Cómo disponer de una contabilidad global de los recursos minerales del planeta? Esta es la base para una gestión inteligente y ordenada de los recursos minerales.

CÓMO CONTABILIZAN LOS ECONOMISTAS LOS COSTES AMBIENTALES

Contabilizar es registrar y describir organizadamente el coste de las cosas. No es necesario empezar de cero. Los economistas contables tienen bien establecidos los procedimientos para hacerlo. La única diferencia es que el objetivo no es contabilizar transacciones monetarias, sino la pérdida (o recuperación) de recursos naturales. En particular buscamos aquí los recursos minerales. Lo que podríamos llamar la pérdida del capital mineral del planeta. Por ello, antes de recurrir a indicadores físicos vamos a ver qué hacen los economistas para evaluar las cuentas ambientales de los países, con objeto de aprender de ellos la organización contable y analizar si sirve o no para nuestros propósitos.

¿En qué medida los economistas han desarrollado herramientas para la contabilidad y la gestión de los recursos naturales? ¿Disponen los contables de una metodología general para contabilizar los costes económico-medioambientales que pueda ser de utilidad para evaluar el capital mineral del planeta? ¿Se han desarrollado sistemas contables que puedan fácilmente conectar los mensajes económicos con los termodinámicos? Este es el objetivo último de esta sección.

De la misma manera que las empresas presentan su balance normalizado al final del año fiscal, los países lo hacen a través del Sistema de Cuentas Nacionales (SCN). El SCN es un sistema internacionalmente acordado de conceptos, definiciones, clasificaciones y reglas contables para el registro de cómo la producción se distribuye entre los consumidores, las empresas, los Gobiernos y las naciones. Es una herramienta macroeconómica en la que se normalizan y estandarizan las estadísticas económicas con las cuentas nacionales que sirven para el análisis económico y el diseño de las políticas de los países [44]. Los economistas ambientales contemplan el SCN como una infraestructura perfecta sobre la que contabilizar los costos ambientales de una forma paralela o satélite al SCN. Es una iniciativa adoptada por las Naciones Unidas y, por lo tanto, dispone de un consenso internacional suficiente como para tenerlo como base de nuestro objetivo. Nuestro propósito aquí es describir someramente sus métodos y analizar críticamente la forma en que presentan estas cuentas, analizando qué conceptos se aplican y viendo sus pros y contras para evaluar el agotamiento de los recursos naturales del planeta.

I. El Sistema de Naciones Unidas para la Contabilidad Ambiental y Económica Integradas (SEEA)

Los economistas ambientales han desarrollado métodos para evaluar los impactos económicos que causa el uso de los recursos naturales necesarios para desarrollar actividades económicas. Convierten los activos físicos y los impactos sobre los ecosistemas en cuentas monetarias que se pueden añadir o restar de las cuentas agregadas y, finalmente, del PIB. Hay bastantes opiniones y diferentes metodologías para hacerlo. La ventaja

de utilizar unidades monetarias es que permite comparar los impactos sobre el medio ambiente con otros activos y analizar su contribución positiva o negativa a la riqueza de un país. Los economistas se preocupan de establecer indicadores objetivos que respondan a cuestiones tales como si la gente está mejor o peor que el año pasado, o si una política de gestión de recursos ha mejorado algún servicio, o simplemente conocer cómo ha variado en el mercado el valor de los recursos de un país.

Como el proceso de valoración de los recursos es muy opinable y es difícil de acordar internacionalmente, pero, por otra parte, es de una importancia enorme, ya que conocer año tras año la apropiación humana de la naturaleza sería un objetivo de importancia mundial, las Naciones Unidas propusieron desarrollar un Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica Integrado (SEEA). Consiste en un sistema paralelo o satélite al Sistema de Cuentas Nacionales en el que se refleja el deterioro ambiental con el fin último de corregir el SCN. Para nosotros es un marco de referencia óptimo para ver cómo los economistas realizan sus métodos de valoración más consensuados de los recursos naturales

De acuerdo con las Naciones Unidas: «el SEEA es el marco estadístico que provee, con acuerdo internacional, conceptos, definiciones, clasificaciones, reglas contables y tablas estandarizadas sobre el medio ambiente y su relación con la economía de los países. Sigue una estructura contable similar al SCN y utiliza conceptos, definiciones y clasificaciones consistentes con el SCN para facilitar la integración de las estadísticas económicas con las ambientales» [44]. La comunidad internacional acordó elevar el manual de mejores prácticas SEEA-2003 a estándar internacional al mismo nivel que el SCN. Para conseguir este objetivo, el Comité de Estadística de Naciones Unidas

(UNSC), comenzó un proceso iterativo consultando a un amplio grupo de expertos de donde surgió el SEEA revisado. Dicho sistema está organizado en tres partes principales: la Estructura Central o de referencia, las Cuentas Experimentales de los Ecosistemas, y Extensiones y Aplicaciones. En la Estructura Central se recogen los conceptos, las definiciones, clasificaciones, tablas y modos contables que se han acordado internacionalmente. Ha sido completado este año. Y se espera que en febrero de 2013 se complete todo el SEEA. Para llevar a cabo todo este proceso se creó un Comité de Expertos para la Contabilidad Ambiental y Económica Integradas (UNCEEA) que se encarga de gestionar y supervisar el proceso de revisión. El Grupo de Londres para la Contabilidad Ambiental ha jugado un papel muy importante al dirigir los aspectos técnicos.

A continuación, hacemos un breve resumen de la Estructura Central del SEEA centrándonos solamente en recursos mineros y energéticos. Los textos que son traducción literal aparecen en cursiva o en redonda entre comillas para diferenciarlos de nuestros comentarios.

II. La Estructura Central del SEEA en referencia a los recursos minerales y energéticos

La Estructura Central del SEEA presenta seis capítulos: 1. Introducción; 2. Estructura contable; 3. Cuentas de los flujos físicos; 4. Contabilidad de las actividades ambientales y flujos relacionados; 5. Asientos contables, y 6. Integración y presentación de cuentas. Cada capítulo se divide en secciones y cada sección se organiza en párrafos, indicando el número del capítulo y ordinal del párrafo en dicho capítulo. Así 3.82 indica párrafo 82 del capítulo 3.

Introducción general

La Estructura Central del SEEA pretende ser un sistema universal y único de información sobre el agua, la energía, los minerales, la madera, los suelos, el territorio, los ecosistemas, la contaminación y los residuos, la producción y el consumo de todas las interacciones que nuestra sociedad realiza con la naturaleza. Recomienda presentar año tras año las cuentas de todas estas interacciones de manera paralela al Sistema Nacional de Contabilidad. Y se basa en definir y contabilizar sistemáticamente el concepto de *activo ambiental*.

Definición de activo ambiental

Se define activo ambiental (2.17) como aquel componente de la Tierra vivo o no vivo que aparece de forma natural en conjunción con su ambiente biofísico y que puede proveer beneficios a la humanidad. Estos activos se presentan tanto en datos físicos como monetarios. La Estructura Central defiende que esto facilita la comprensión de los datos tanto por científicos como por economistas, y es un puente entre ambas comunidades.

Tenemos dos objeciones a esta visión. Primero, dividir a la naturaleza por activos no refleja todas las interacciones entre sistemas naturales y es, en realidad, un reduccionismo antropocéntrico. Por ejemplo, convertir el valor de un bosque en cantidad de madera no refleja todos los beneficios que provee, tal como la protección de inundaciones, o la producción de aire limpio, o como sistema que soporta la vida o como sistema natural para disfrutar de él. Los números nunca reflejarán la causalidad y pueden provocar la avaricia de explotar rápidamente los recursos naturales. Para el SEEA el todo es exactamente igual a la suma de sus partes. Renuncia al holismo en favor del reduccionismo, como hemos dicho. En segundo

lugar, aunque el poder explicativo del dinero permite comparaciones fáciles entre diferentes aspectos de la realidad, solo refleja valores sociales y no valores físicos más objetivos. Estos valores sociales varían con el tiempo y de país a país.

El dinero refleja el poder de compra del hombre en la sociedad. Pagamos a la gente, no a la naturaleza que no demanda nada por sus servicios. Por ello el sistema de contabilidad monetaria solo refleja los intereses actuales de la gente que vive hoy. No obstante, el SEEA constituye una iniciativa impresionante para poner números a las interacciones hombre-naturaleza de una forma racional y global. Quizás el principal valor del SEEA es el sistema mundial organizado de estadísticas que los economistas han ido tejiendo, así como los procedimientos contables sobre los que basarse.

Contabilidad de flujos y stocks. Definiciones

Para comenzar, los contables definen flujos y *stocks*. Así, los *inputs* naturales (2.89) son flujos físicos que van desde el ambiente a los procesos productivos. Estos son recursos minerales, energéticos y madera, también los recursos renovables y, finalmente, aquellos que provienen del suelo, de las aguas y del aire. Al mismo tiempo que producimos productos, se producen residuos (2.91). Estos flujos se descargan al medio ambiente en forma de emisiones al medio líquido o al aire o bien al territorio controlado (vertedero) o no. Son flujos sólidos, líquidos, gaseosos o en forma de calor o de presión (ruido).

Los *stocks*, en términos físicos, se refieren a la cantidad total de activos ambientales individuales en un momento dado. «Estos activos se definen por su contenido material sin hacer referencia a sus elementos constitutivos» (2.100). Esto es un serio inconveniente, ya que las toneladas de un

metal dado no hablan de la riqueza que incorporan. Pues esta depende de su composición mineral, ley de mina, otros minerales acompañantes, ganga y otras características que pueden hacer dicha riqueza muy variable.

Valoración a precios de mercado

Las unidades físicas de estos flujos y *stocks* son las del Sistema Internacional de Unidades: masa, longitud, volumen, julios, etc. La conversión de estas unidades en dinero permite, en teoría, comparar entre diferentes activos. La valoración monetaria que prefiere hacer el SEEA es la de utilizar valores de mercado siempre que se pueda. «Estrictamente los precios de mercado se definen como cantidades de dinero que los compradores desean pagar para adquirir algo de lo que los vendedores están dispuestos a desprenderse» (2.144). No obstante, valorar los activos a precios de mercado tiene un importante inconveniente, ya que «existen pocos mercados que compren y vendan activos en su estado natural y de aquí que determinar el valor económico de un activo sea difícil» (2.107). Por ello, la Estructura Central recomienda utilizar la aproximación del valor actual neto para estimar los precios de mercado de aquellos activos a los que les falta mercado. Esta aproximación se denomina también valor descontado de futuros retornos. Y como es bien conocido, «utiliza pronósticos de tasas de extracción futuras del activo a la vez que pronósticos de su precio de mercado para generar una serie temporal de ingresos esperados» (5.110).

Contabilidad de los flujos físicos

La manera en que se contabilizan los flujos físicos es la misma que para las Tablas Monetarias de Oferta y Uso que se utilizan para mostrar las transacciones entre

diferentes entidades económicas como industrias, residencias, Gobiernos y el resto del mundo. La estructura de las Tablas Físicas de Oferta y Uso (*Physical Supply and Use Tables, PSUT*) agrega otra entidad: el medio ambiente. Se realiza añadiendo columnas y filas que dan cuenta de los flujos que entran y que salen de él. Además, las tablas muestran cuentas separadas para los subsistemas de flujos materiales, de agua y de energía.

Curiosamente, las PSUT del SEEA ponen gran énfasis en describir detalladamente los residuos que vuelven al ambiente. Recomiendan, por ejemplo, contabilizar todos los residuos sólidos, líquidos y emisiones al aire, a las aguas y al suelo, así como las dispersiones en los usos, por ejemplo, la de fertilizantes, o pérdidas como las originadas por la abrasión de los neumáticos. También recomienda contabilizar los residuos naturales y las pérdidas de agua y energía en los procesos de extracción, distribución, almacenamiento y transformación.

Cuentas de los flujos físicos de energía y agua

La energía y los flujos de agua se contabilizan en unidades físicas desde la cuna hasta la tumba. Los flujos que se consideran son (i) la energía proveniente de *inputs* naturales como hidrocarburos, nuclear o renovables; (ii) los productos energéticos como combustibles, calor o electricidad, y (iii) los residuos energéticos como pérdidas (3.140). De la misma forma, las cuentas de flujos de agua describen: (i) la extracción de aguas superficiales o subterráneas así como aguas marinas para desalación y refrigeración; (ii) los flujos de agua dentro del proceso económico en forma de suministro y uso por parte de industrias y edificios residenciales, y (iii) los flujos de agua que retornan al medio ambiente (3.184). Las emisiones al agua se registran en una tabla PSUT aparte, así como las cuentas

de calidad del agua que son discutidas en más detalle en el apartado dedicado al agua (3.188).

Cuentas de los flujos físicos de materiales

Las cuentas de los flujos físicos para los materiales son un tema complejo para el SEEA. Ello se debe a su diversidad en comparación con los flujos energéticos de energía y agua. El SEEA propone trabajar sobre la base de la masa para cada tipo de material. Pero en la medida en que los materiales pueden ser separados, o reaccionar o mezclarse con otras sustancias para producir nuevos materiales, la traza de los flujos físicos se hace muy complicada de seguir especialmente en un contexto desde la cuna hasta la tumba. Lo que suele ocurrir es que se hacen descripciones poco detalladas y solo en algunos casos se sigue la pista a los materiales, como ocurre con algunos elementos químicos peligrosos como el mercurio.

Para dar una visión agregada en toneladas se utilizan las cuentas de flujos materiales para toda la economía (EW-MFA). Estas cuentas describen los *inputs* y *outputs* de materiales de toda la economía incluyendo el medio ambiente y el resto del mundo como subsistema (3.279). Su esquema conceptual así como sus procedimientos siguen la «guía metodológica» de Eurostat, publicada por la OECD en 2008 [45] (3.281).

Tener en cuenta el agotamiento tanto de los minerales como de los recursos energéticos es crucial. No obstante, puede haber posibles cambios en los *stocks* de un activo debido a nuevos descubrimientos o bien a revaluaciones o reclasificaciones de los ya existentes, e incluso debido a catástrofes. Hay que hacer notar que es más fácil contabilizar variaciones en el agotamiento que en la degradación. Y en esto el SEEA no dispone de respuestas claras, ya que no es fácil contabilizar la degradación física de un

activo natural. Aquí se ve claramente que una evaluación exergética adicional en las PSUT ayudaría a resolver la dificultad.

Todas las actividades mineras, bien sean extractivas de minerales o de recursos energéticos, tienen impacto sobre el medio ambiente. Actúan sobre el aire, las aguas y los suelos en forma de contaminación y en degradación de las reservas naturales. También afectan a los paisajes, a los ecosistemas y a los poblados. El procedimiento que el SEEA propone para resolver estos casos es organizar estos costes dentro de un marco que permita evaluarlos y seguir el rastro durante varios años. En teoría los ingresos provenientes de la actividad minera deberían ser mayores que el valor de la pérdida temporal o permanente del entorno natural. La única manera de saberlo es monitorizar y contabilizar todos los impactos en una forma organizada y estandarizada. Desafortunadamente estos sistemas contables suelen ser insensibles a la pérdida de paisajes, de ecosistemas que contengan biotas particulares o a los efectos sobre comunidades locales indígenas. Otro problema es la pérdida de una sola unidad universal de medida. Esto puede resolverse con los conceptos de *exergía* y *coste exergético de reposición* que se explican más adelante.

Existen, además, algunas actividades ambientales que difícilmente pueden contabilizarse en unidades físicas. Por ejemplo, aquellas cuyo propósito primario es reducir o eliminar presiones sobre el entorno, o hacer un uso más eficiente de los recursos naturales. Su objetivo es la protección ambiental, como las medidas de prevención, reducción y eliminación de la contaminación u otras formas de degradación del medio ambiente, o bien una mejor gestión de los recursos como preservar y mantener el *stock* de recursos naturales y así evitar su agotamiento (4.11-4.13).

Un caso interesante para nuestro propósito son los costes de desmantelamiento de los proyectos mineros. «Se definen dos tipos de costes de desmantelamiento, los costes terminales y los de remediación. Los primeros son costes que pueden anticiparse durante el tiempo de producción de la mina y antes de cerrarla. Sin embargo, los costes de remediación son aquellos en los que se incurre una vez que la mina ha cesado su actividad sin haberse hecho ninguna previsión durante el tiempo de producción.

Este sería el caso de rehabilitar los lugares contaminados por actividades pasadas, por ejemplo, lugares de almacenamiento de combustibles, antiguos vertederos o minas abandonadas» (4.194).

Contabilidad de la actividad medioambiental y flujos relacionados

Hemos visto que, excepto para algunas actividades medioambientales, la metodología del SEEA se basa en una contabilidad física integral de todas las interacciones económicas con el entorno. Pero el SEEA da un paso más para convertir las en valores monetarios. Esto se describe en el capítulo 5, «Contabilidad de actividades medioambientales». De hecho, las cuentas monetarias concuerdan exactamente con los flujos definidos por parámetros físicos. Por otra parte, en el SEEA se comenta que «una ventaja general que tiene el aplicar las valoraciones económicas, es que pueden compararse diferentes activos utilizando una unidad común de medida. Lo cual no puede hacerse utilizando datos puramente físicos», y, además, «la valoración de recursos en términos monetarios puede ofrecer información útil para evaluar los ingresos futuros de los gobiernos a partir de las extracciones mineras» (5.94). En realidad, esto es una ignorancia más que

una ventaja, pues con exergía puede solucionarse este problema sin necesidad de recurrir a valoraciones monetarias. No es cierto que solo el dinero pueda utilizarse como indicador universal.

Los activos se consideran asuntos de valor para la sociedad y el objetivo de la contabilidad de activos es medir, registrar y explicar los cambios en dichos activos. La Estructura Central del SEEA se basa en una suposición conceptual: «En principio, todos los beneficios librados por los activos ambientales pueden ser evaluados en términos monetarios» (5.31), no obstante, también se avisa de que «en consistencia con el SCN, el alcance de la valoración se limita a sopesar los beneficios que consiguen los propietarios económicos. Un propietario económico es una entidad institucional que puede reclamar los beneficios asociados al uso de un activo en el curso de una actividad económica en virtud de que también acepta los consiguientes riesgos asociados» (5.32). Esta es una limitación muy importante porque en el largo plazo el propietario puede cambiar, y ni las generaciones futuras ni los sistemas que soportan la vida son considerados directamente sujetos a proteger. Por el contrario, el sistema de contabilidad propuesto enfatiza el concepto de *valor actual neto* y «asume que los retornos conseguidos hoy valen más para la compañía extractora que los que se consigan en el futuro» (5.110). La idea llega hasta el extremo de insistir en que las valoraciones deben estar lo más próximas posible a los precios actuales de mercado incluso aunque puedan no reflejar un valor más completo de dicho activo desde una perspectiva social. «En particular, la aproximación del valor actual neto representa razonablemente bien a los precios observables del mercado pero no tiene en cuenta todo el amplio rango de beneficios (y costes) que podría considerarse relevante» (5.103). Los beneficios

son beneficios económicos incluso con activos ambientales en forma de excedentes económicos a partir de la venta de recursos naturales o en forma de rentas conseguidas a partir de extracciones permitidas legalmente. Incluso cuando un activo ambiental físico no tiene un valor monetario medido se registra separadamente de aquellos que libran beneficios a sus propietarios económicos.

Aproximaciones a la valoración de activos ambientales.

El método VAN en relación con las actividades extractivas

La forma en que el SEEA recomienda la valoración de activos de los que no se dispone de información de mercado es, como hemos comentado, el valor actual neto. La idea es generar una serie temporal de retornos esperados debido a las extracciones. Esta serie se obtiene de la tasa esperada de extracción junto con las previsiones de los precios esperados basados en los retornos históricos anteriores. Esta lista se descuenta para reflejar el valor que un comprador dispuesto a pagar pagaría por el activo hoy (5.110):

Hay cinco aspectos clave del VAN que requieren explicación: la medida de los retornos de los activos ambientales; la determinación del patrón de rentas basado en los perfiles esperados de extracción y de los precios; la estimación de la vida del activo; la selección de una tasa de retorno producida por los activos y la elección de una tasa de descuento (5.112).

En general, el VAN es un método contable que puede evaluar monetariamente los activos que la naturaleza provee de una forma racional. Así, el medio ambiente se considera tanto una fuente de recursos naturales como un sumidero de residuos. Para un científico naturalista este es un método utilitario demasiado crudo para valorar a la naturaleza como un elemento *input/output* para el sistema productivo humano. No obstante, el SEEA tiene el mérito

de ser una propuesta acordada globalmente que tiene en cuenta a la naturaleza. Y no existe ninguna iniciativa alternativa. Aunque hay algunos países que disponen de sus propias clasificaciones para valorar sus activos medioambientales, estas no son completas ni estandarizadas y no existe acuerdo suficiente ni siquiera en las definiciones. En muchos casos, es necesario aplicar conversiones para hacer comparaciones internacionales. Por ello, el SEEA es un medio interesante para establecer un panorama completo hacia una gestión global efectiva de los recursos naturales.

Contabilidad de activos minerales y energéticos en el SEEA

Los recursos minerales y energéticos fósiles son recursos no renovables cuya extracción conduce a su agotamiento, y en consecuencia hacia el final de la actividad industrial asociada. Por ello, las cuentas deben organizarse de tal forma que recojan la información de los *stocks*, los flujos de extracción, el agotamiento, los nuevos descubrimientos, así como las estimaciones monetarias del valor añadido, los excedentes de operación de las compañías extractoras, y las medidas del valor añadido ajustadas por el agotamiento previsto. En esta sección se describen estos aspectos.

El SEEA clasifica los depósitos conocidos de minerales y recursos energéticos fósiles de acuerdo con la Clasificación de 2009 de las Naciones Unidas para las Reservas y Recursos de Combustibles Fósiles y Minerales [46]. La UNFC-2009 clasifica los depósitos con un criterio de triple dimensión: viabilidad social y económica (E), estado del proyecto en el terreno y viabilidad técnica (F), y conocimiento geológico (G). El primer criterio establece la viabilidad comercial del proyecto. El segundo indica si el proyecto técnico está en algún lugar de la ruta que va desde la exploración hasta el mercado. Y el tercero designa el nivel de certidumbre en el conocimiento geológico y en el

potencial de recuperación de determinadas cantidades. Cada criterio se numera desde uno hasta cuatro indicando el 1 un valor alto; 2, moderado; 3, bajo, y 4, muy bajo.

Además, los depósitos conocidos se clasifican en tres clases: clase A para proyectos comerciales con recursos recuperables, es decir, depósitos E1 con proyectos F1; clase B para proyectos potencialmente comerciales con recursos recuperables, es decir, depósitos de la categoría E1 o E2 con proyectos F2; y clase C para proyectos no comerciales y para otros depósitos conocidos. En estas tres clases el conocimiento geológico puede ser G1, G2 o G3.

Tabla 2

Versión abreviada de la UNFC-2009, mostrando las primeras clases de recursos minerales [46].

Total Commodity Initially in Place	<i>Extracted</i>	<i>Sales Production</i>			
		<i>Non-Sales Production</i>			
		<i>Class</i>	<i>Categories</i>		
			E	F	G
	Future recovery by commercial development projects or mining operations	Commercial Projects	1	1	1,2,3
	Potential future recovery by contingent development projects or mining operations	Potentially Commercial Projects	2	2	1,2,3
		Non-Commercial Projects	3	2	1,2,3
	Additional quantities in place associated with known deposits		3	4	1,2,3
	Potential future recovery by successful exploration activities	Exploration Projects	3	3	4
	Additional quantities in place associated with potential deposits		3	3	4

El Sistema de Cuentas Nacionales (SCN) solo contabiliza los depósitos comercialmente explotables, mientras que el SEEA abre el alcance para incluir una visión más completa de la disponibilidad de *stocks* de este tipo de recursos.

A pesar de ello, estos criterios consideran la riqueza de una mina de una forma muy simplificada y con una visión al día de hoy. Pierden de vista que la geología es más compleja que lo que las estadísticas reflejan. Por ello, no hay una clasificación acordada y detallada internacionalmente para estos recursos y que sea apropiada para efectos estadísticos (5.181). Por ejemplo, hay muchos tipos de minerales y combinaciones de ellos con estructuras geológicas específicas para cada lugar. Además, su explotación puede dar lugar a problemas ambientales de disposición de estériles, de balsas y residuos, en general, que pudieran haber sido descartados en función de la demanda del mercado.

Así que el SEEA simplemente propone compilar los activos ambientales en cuentas físicas por tipo de recurso incluyendo estimaciones de aperturas y cierres de *stocks* y de sus cambios en el período contable. Está claro que el tipo de indicadores físicos da una idea de la incertidumbre de los datos recogidos por el sistema contable. En efecto, se miden en toneladas, metros cúbicos o barriles. No hay homogeneidad en las unidades ni mayor especificidad en el tipo de mineral. De hecho, «se hace notar que un total para cada clase de depósito para diferentes tipos de recursos no puede dar resultados muy significativos debido al uso de diferentes unidades físicas para recursos diferentes. Para ciertos subconjuntos de recursos, por ejemplo recursos energéticos, un valor agregado como julios u otras unidades energéticas sería más apropiado» (5.184). Por contraste, el uso de unidades exergéticas

permitiría disponer de una medida común no importa para qué mineral, recurso energético o para cualquier otra sustancia mezclada o no.

Contabilidad monetaria para recursos minerales y energéticos

La estructura de las cuentas monetarias es totalmente paralela a la estructura de las cuentas físicas (5.191). «La valoración de *stocks* utiliza la aproximación del VAN al nivel de cada tipo de recurso individual, e idealmente para depósitos específicos, que luego se suman entre sí para todos los recursos con objeto de obtener un valor total de recursos minerales y energéticos» (5.194).

Comentarios finales sobre el SEEA

El SEEA y el SCN están firmemente basados en valoraciones a precios de mercado. Las naciones y las empresas desean el dinero fresco. El paradigma implícito es: si pudiéramos extraer y vender todo el capital actual y convertirlo en dinero sería mejor que tener activos físicos que no han sido explotados aún. Esto es un reduccionismo absurdo y solo la imposibilidad de tener tanto dinero como para extraer todos los recursos y convertir a la naturaleza en dinero, inhibe esta enajenación. Por otra parte, si todo se convirtiera en dinero, el valor de la moneda se depreciaría. Por ello, aquellos que hubieran retenido sus recursos serían los más ricos. El deseo de pagar se debilita con la abundancia y se refuerza con la escasez. A pesar de ello, la falta de un indicador físico excusa el uso del dinero como mejor indicador.

Un problema importante es que el SEEA utiliza las cuentas físicas sin homogeneidad en las unidades ni especificidad en el tipo de mineral/material. Esto resulta muy confuso para seguir la traza de los flujos físicos a lo largo de su ciclo de vida, ya que los materiales reaccionan, se

mezclan y se descomponen. Convertir estas unidades en valores exergéticos facilitaría mucho los análisis de evolución de los materiales a través de los diagramas de Sankey. En lo que sigue presentamos una alternativa que, aprovechando la información provista por el SEEA, pudiera valorar mejor el capital mineral del planeta utilizando la termodinámica como base científica.

UNA PERSPECTIVA TERMODINÁMICA DE LOS RECURSOS DEL PLANETA

El planeta Tierra es un sistema termodinámico limitado en materiales, sometido a la ley de la degradación entrópica y muy complejo en su interdependencia ecológica. Cada día recibe la luz solar en igual cantidad y calidad, y la devuelve al universo que está a 2 K, excepto por las pequeñas cantidades de energía que las plantas absorben por la fotosíntesis (0,023 %). Anualmente se reciben $8,9 \times 10^8$ TWh, que son 52 300 veces más que toda la energía eléctrica que utilizamos. El ser humano desarrolla su actividad en la corteza terrestre más externa, así como en la atmósfera que la rodea, y convierte los materiales geológicos y biológicos en productos comerciales para su uso y disfrute. Los ritmos naturales del cambio biológico y geológico, cuya amplitud se mide en millones de años, han sido acelerados por el ser humano. Y ello sin tener en cuenta la limitación en materiales y su degradación, ni las complejas interacciones ecológicas que nos hacen interdependientes del resto de los seres vivos que habitan el planeta, ni de los ciclos geológicos que permiten la vida.

La economía ha sustituido a la biología y a la geología como motor planetario. Sin embargo, las leyes físicas no pueden ser soslayadas. La energía acumulada en los

combustibles fósiles o nucleares transforma los materiales en productos que rápidamente se convierten en desechos. Es un proceso de aumento de la entropía que está acortando la vida en el planeta y acelerando su destrucción. No existe un segundo planeta «vertedero» donde depositar los materiales degradados. El planeta no es lo suficientemente grande como para extraer todos los materiales que cada generación humana necesite para sus ambiciones.

Si el crecimiento económico se basa en el uso de los recursos finitos, este crecimiento no podrá sostener indefinidamente la vida del ser humano en la Tierra. Podremos desarrollarnos en conocimientos y en la gestión inteligente de esos recursos, pero ni la extracción de los materiales, ni la ocupación del espacio vital de los demás seres vivos podrá ser ilimitado.

La conciencia de finitud no ha sido interiorizada en la sociedad humana. Sin embargo, como señala Daly [47], las leyes económicas favorecen y estimulan el crecimiento como única forma de supervivencia. Demandar un modesto crecimiento global de un 2% anual, significa que al cabo de 35 años estaremos extrayendo de la geosfera el doble de lo que hacemos actualmente. No solo crecemos sino que lo hacemos exponencialmente, pues a la misma tasa un siglo después (105 años) estaríamos pidiendo una extracción ocho veces mayor.

Las actuales leyes económicas no tendrán sentido conforme vayamos alcanzando la capacidad límite del planeta. El bienestar no podrá estar ligado al crecimiento en el uso de los materiales porque además a medida que se agotan las reservas aumenta la contaminación de los residuos.

A ese efecto se une una segunda exponencial: las leyes de mina decrecientes. En efecto, la siguiente unidad

extraída necesita más energía y provoca más impacto ambiental que la anterior. De hecho, si la energía necesaria para extraer un determinado mineral creciera también a un 2% anual, al cabo de 35 años cada tonelada de material extraído necesitaría el doble de energía. Pero como requeriremos el doble de tonelaje, la energía necesaria para satisfacer la demanda se multiplicaría por 4 en 35 años o bien por 64 en un siglo. Lo mismo puede decirse del consumo de agua, de destrucción del medio natural o del impacto sociológico de su extracción, es decir, guerras y conflictos.

La ley física de la entropía no ha calado en las leyes económicas y es ignorada o mal entendida por los economistas. Bien porque consideran que el fin está lejos, es decir, admiten la finitud de los recursos pero consideran que antes de llegar a ello la tecnología nos salvará. O bien consideran que con dinero puede pagarse todo. La respuesta a la primera objeción es que el progreso tecnológico aumenta también el tamaño y la incertidumbre en el control de los peligros. Y está dentro de lo posible que la propia humanidad se extinguiera en su cenit tecnológico. La respuesta a la segunda objeción es que si el dinero se puede crear a partir de la deuda que alguien acepta pagar con trabajo futuro y si el trabajo futuro se basa en un uso masivo de los materiales biológicos y geológicos del planeta, como este está limitado, simplemente no será posible. La naturaleza no entiende de dinero, sino de acciones y reacciones. Con dinero solo podemos pagar al ser humano para que reponga lo que ha destruido.

Por la ley de la entropía, la destrucción que ocasione la reposición será siempre mayor que el orden que haya repuesto. Además, nuestro metabolismo humano y social nunca podrá reducirse por debajo de unos límites, es decir, necesitamos alimentarnos, defendernos de las

inclemencias, reproducirnos, desplazarnos, intercambiar información y aprender continuamente. Para ello se necesitan artefactos y transformación de materiales, energía, agua y medio ambiente. Y 7000 millones de personas demandan mayor equidad entre los humanos para disminuir a cero los conflictos.

Si no sabemos cuál es el límite planetario y no disponemos de una contabilidad global de los recursos, siempre tendremos la sensación de que falta mucho para el fin y, además, no lo vamos a ver esta generación ni quizás las siguientes más próximas. Es curiosa la desafección que tenemos al concepto *generaciones futuras*. Un hijo es producto de dos personas, que tienen cuatro abuelos y ocho bisabuelos. Así que mientras nuestros hijos son nuestros y solo nuestros, nuestros descendientes en la sexta generación, $1/2^6$, serán solo $1/64$ nuestros. Es decir, pertenecerán a la sociedad, no a mi familia. No los veremos y serán vagamente nuestros.

Por razones de supervivencia, la termodinámica debe jugar un papel determinante en la economía del futuro. La economía debe hacer caso a su raíz termodinámica, como ciencia para gestionar la escasez. Hay que desarrollar una teoría termodinámica que contabilice objetivamente tanto los límites físicos del planeta como los consumos de los materiales, y luego desarrollar una contabilidad global que ponga en el «debe» la pérdida entrópica de materiales que nuestra sociedad realiza año a año. Hay que dar una dimensión temporal a la existencia del ser humano en la Tierra. Poniendo los conocimientos en reciclado y en miniaturización en el «haber» y las desigualdades en el «debe». La cantidad de bienestar es finita y quizás incontable porque esta está ligada a la cantidad de recursos que existen en el planeta y la capacidad que tengamos de vivir del Sol y del reciclado de materiales. Las

políticas económicas deberían estar regidas por la gestión de la escasez global de materiales más que por la del dinero.

Si la asunción de deuda que somos capaces de firmar entre nosotros es ilimitada, el dinero ya no se convierte en un bien escaso, por lo tanto, la economía entendida como en sus orígenes, *oikonomos*, 'gestión de la casa', ha perdido sentido. Debe darse una dimensión temporal a la existencia del ser humano en la Tierra [48]. La economía nueva debe basarse en la gestión de la escasez de los recursos físicos medida en unidades físicas que no se ven alteradas ni por la inflación ni por la revalorización monetaria. Mientras que la actividad económica está movida por el deseo de beneficio, a toda actividad física se asocia una pérdida exergética o irreversibilidad. Es decir, el beneficio va siempre ligado a la irreversibilidad. Y cuanto mayor irreversibilidad, más aceleramos la flecha del tiempo. En un planeta finito, esto significa menos tiempo de vida. De tal forma que cualquier actividad, por menor que esta sea, está ligada a la degradación entrópica, y es falso que los efectos solo se percibirán en el muy largo plazo, lejos de las preocupaciones actuales. El cambio climático, el rápido agotamiento de los recursos naturales acumulados por el planeta durante millones de años, o la alteración y desplazamiento del medio natural por el medio humano, están sometidos a la ley de la entropía. Y aunque sea difícil evaluarlos, por falta de datos fehacientes, tenemos la certeza de que podría conseguirse. La exergía no es un indicador más, es una propiedad medible de los sistemas con unidades del sistema internacional, una vez definido su ambiente de referencia. Puede ser incómoda de calcular o aparentemente poco significativa, pero es una propiedad emergente de cualquier sistema físico.

Un sistema cerrado en masa y aislado energéticamente del exterior solo puede evolucionar hasta que su entropía no pueda crecer más. Es decir, si un ser inteligente viviera en dicha burbuja trataría de utilizar hábilmente los recursos para alargar su vida. Por ejemplo, tomaría muy en serio mejorar la eficiencia de su respiración para consumir la menor cantidad de oxígeno. Tendría la consciencia de que cada vez que utilizara los recursos no degradados afectarían al medio ambiente que le permitiría vivir, pero si no hiciera nada, tampoco podría vivir. Su debate esencial sería la velocidad óptima de destrucción de recursos que le permitieran vivir el máximo tiempo posible. Además, como a la vez que se consumen materiales se degrada el medio, los estadios serían del tipo colapso, nunca de muerte dulce. La ley de la entropía no es una ley lineal, sino exponencial.

La Tierra no es un sistema energéticamente aislado del exterior, por lo que el debate es más complejo. Pero el ser humano para vivir necesita agua dulce, materiales concentrados, y un medio natural complejo que interactúa con él. La única forma termodinámica que tiene el ser humano de sobrevivir es viviendo de la energía del Sol (o de otras fuentes alógenas como la energía de fusión). Aunque los materiales dispersados podrían, en teoría, ser concentrados por la energía del Sol, lo cierto es que no se reponen y nos comportamos como en un sistema cerrado, al menos parcialmente. Es decir, utilizamos los combustibles fósiles y los minerales como si viviéramos en un sistema abierto de materiales. Y nos apropiamos del agua dulce que se regenera por la acción solar que sirve para sostener el medio ambiente que nos provee de incontables servicios.

En vez de optimizar la vida en la Tierra, optimizamos nuestra vida individual, acelerando así el colapso del

conjunto. Solo si repusiéramos/recicláramos los materiales dispersos con la energía externa del Sol, podríamos asegurar que la vida en el planeta es termodinámicamente viable, al menos hasta el fin de la estrella. Cuanto más tarde repongamos, más próximos estaremos del modelo de sistema cerrado. Además, la energía del Sol no sobra, sino que habrá de repartirse entre diferentes alternativas. Después de millones de años, el medio natural ha ocupado todo el planeta. Está por analizar qué fracción de la energía solar que llega todos los días podría ser apropiada para usos exclusivamente humanos, en detrimento de los naturales. Es un debate abierto que deberá ser resuelto en el futuro, y solo para el caso de que la humanidad apostara intensamente por la energía del Sol. Por el momento, la energía eólica instalada causa alteraciones locales de los vientos, pero es inapreciable a nivel global, lo mismo pasa con las demás energías renovables, incluyendo toda la energía hidroeléctrica instalada sobre el ciclo del agua. Los efectos locales de las energías renovables pueden ser en algunos casos importantes, pero dentro del presupuesto solar global son hoy casi inapreciables.

Más importante puede ser el efecto de la demanda global de materiales para mantener una sociedad basada solo en energías renovables y su necesidad de reposición/reciclado solar. Aumentaría considerablemente la apropiación de la energía del Sol para fines de supervivencia humana. La dieta metabólica de materiales que el ser humano necesita para su desarrollo es variada. No es solo la cantidad lo que importa, sino su variedad. Por ejemplo, no podemos vivir sin fósforo que fertiliza las plantas que luego nos alimentan. Hoy en día necesitamos todos los elementos de la tabla periódica para nuestras necesidades. En cantidades siempre crecientes y con composiciones cada vez más variadas. Así que el problema de

la escasez de materiales no es unidimensional. Siguiendo con el ejemplo del sistema cerrado, la supervivencia puede ponerse en peligro por el defecto (o exceso) de un determinado material en el medio. Por ejemplo, la falta de fósforo disponible o el exceso de CO₂ en la atmósfera. Cada material tiene una escasez propia, unas leyes de mina decrecientes, unos procesos de extracción, reducción, procesamiento y refinado diferentes, y tiene una capacidad de sustituir o de ser sustituido por otros también diferentes y en muchos casos aún ignorada.

La energía consumida por el ser humano en la extracción de minerales es cada vez mayor. Igualmente lo es el impacto sobre el medio natural, sobre los consumos de agua y sobre las poblaciones locales. Necesitamos tener criterios objetivos que indiquen los verdaderos costes de extracción y refinado de la siguiente unidad de mineral, y conocer cuántos recursos explotables quedan. Los informes sobre recursos minerales que hablan de recursos indicados, demostrados, inferidos, hipotéticos o especulativos [49], nunca ponen el impacto ambiental que supondría extraerlos. Es por ello por lo que es necesario desarrollar una metodología que al menos se aproxime a dar una respuesta física a la cuestión. Necesitamos tener criterios objetivos que indiquen los costes marginales verdaderos de la minería y el refino de las materias primas, así como una contabilidad global que indique cuántos recursos se extraen anualmente y cuál es su velocidad de explotación.

Volvemos pues a la cuestión antes planteada: ¿Es el SEEA una herramienta apropiada sobre la que basar nuestra propuesta contable?

Cuando se hacen las cuentas de los países o de las compañías, el concepto de *contabilidad ambiental* y de los recursos tiene mayor o menor sentido, como es el caso del

SEEA. Siempre existe un referente humano a quien presentarlas. La compañía minera presenta sus cuentas al Estado, o el país presenta las cuentas ante otros países. Son sistemas humanos que interaccionan, acuerdan y deciden entre sí las reglas de contabilidad. Estas atienden a modelos de mayor o menor sostenibilidad o de mayor o menor prosperidad. De tal forma que adoptan sistemas de sostenibilidad débil o fuerte en función de la cantidad de capital que dejan a las generaciones posteriores o incluso del concepto de *intercambiabilidad* entre las diversas formas de capital que se adopten.

Sin embargo, cuando el objeto a contabilizar es el planeta como conjunto, ya no hay referente humano con quien negociar las reglas de contabilidad. Los insumos son el Sol, el calor interno de la Tierra y la influencia del espacio exterior sobre ella. Y si el objetivo es conservar el capital natural del planeta las reglas de contabilidad son las leyes físicas, nunca las leyes humanas. El ser humano no puede infringirlas, pero sí infligir acciones bien para sobrevivir o bien para su despilfarro/placer. El principio de acción/reacción es el que marca el camino evolutivo. El ser humano constituye una fuerza geológica más. Vivimos en la época del Antropoceno [50]. Fuera del laboratorio, todas las acciones son irreversibles, pero en la escala temporal humana nos gusta pensar que todo material es recuperable e intercambiable. No obstante, incluso en aquellos procesos que pueden ser reversibles, los tiempos naturales de reposición suelen superar la escala temporal humana. Es la inteligencia la que nos puede permitir acelerar los tiempos de reposición y evitar o limitar las acciones irreversibles. Para ello, hay que iniciar una contabilidad global de los recursos naturales que tenga en cuenta los *stocks*, su variación, los insumos externos y los impactos humanos y naturales. Esto es una condición necesaria

para una posterior gestión global del capital natural del planeta.

La contabilidad monetaria será al final irrelevante, pero necesaria como instrumento de comparación entre medidas físicas de reposición. La auténtica unidad contable será el tiempo de permanencia de la especie humana en el planeta. Y la exergía será la medida de comparación. SEEA quedará como un intento precursor de acercarse a dicho sistema contable definitivo.

I. Cerrando los ciclos de materiales.

La visión por debajo del arco iris

Las cuentas físicas del SEEA se realizan en una visión macroeconómica que va desde la cuna hasta la tumba. Sin embargo, en esta visión no se contempla el agotamiento, porque ni los sistemas contables físicos ni los económicos son efectivos para valorar el agotamiento de los recursos no renovables.

Alo falta en esta visión global, y es que la dotación mineral y de recursos no renovables está decreciendo constantemente. No podemos reemplazar aquellos recursos no renovables que extraemos de la Tierra y los perdemos irrevocablemente. No hay forma de evaluar aquellas cosas valiosas que la humanidad ha perdido para siempre. La escasez y el esfuerzo necesario para reemplazar los recursos no renovables están ausentes de las metodologías de contabilidad convencionales. Los indicadores para reciclado de materiales, para la sustitución y la disminución de los consumos también faltan en la parte del «haber» de los sistemas contables. Se podría argumentar que teniendo un indicador de escasez por elemento químico podría ser posible resolver el problema. Pero los cientos de sustancias minerales que podemos extraer y la

gran cantidad de productos químicos en los que pueden convertirse hacen casi imposible tener una contabilidad decente de todos los ciclos de materiales para todos los elementos químicos.

Creemos que falta una teoría más que un conjunto de indicadores. Las evaluaciones parciales o totales del tipo desde-la-cuna-a-la-tumba constituyen la mitad del ciclo. Tipificaremos a estas contabilidades como contabilidades «por encima del arco iris» (EAI). Les falta la otra parte del ciclo, es decir, la visión desde-la-tumba-hasta-la-cuna. De igual forma que los números imaginarios no pueden explicarse en el espacio real, algunos aspectos como el agotamiento de los minerales se explican mejor en una visión «por debajo del arco iris» (DAI).

Es bien conocido que el planeta funciona por ciclos movidos por la energía solar. Así, el carbono, el oxígeno, el nitrógeno, el fósforo, el azufre o el agua tienen sus ciclos. Sin embargo, al menos hasta donde nuestro conocimiento alcanza, no se han postulado ciclos de los metales y de los elementos químicos en general. Aquellos elementos relacionados con la vida tienen ciclos cortos, incluso aunque sus tiempos de completado del ciclo se midan en escalas geológicas. Pero aquellos elementos que no intervienen en la composición de la vida se cierran muy difícilmente. Estos elementos son constituyentes de nuestros órganos exosomáticos y están en peligro de volverse escasos para futuros órganos a causa de la dispersión que les provocamos con nuestro uso no ciclado. En términos prácticos, tanto los elementos constituyentes de los órganos endosomáticos como los de los exosomáticos deben tener su ciclo. Y el ser humano debe hacer un esfuerzo importante para cerrarlos de la manera más rápida posible. El desarrollo sostenible requiere cerrar todos los elementos químicos en el planeta tanto para constituir órganos

endo como exosomáticos. Su velocidad de cierre y el esfuerzo requerido para cerrarlos deben ser una función de cuán intenso es su uso en relación con su escasez física. Si el ser humano altera los ciclos, le corresponde al ser humano cerrarlos.

Al extraer el mineral de la mina aumentamos algo su exergía, a pesar de que hayamos gastado mucha exergía para extraerlo. Pero lo cierto es que desde el punto de vista de las generaciones futuras, tener la materia prima en un «almacén» sería una buena herencia, en vez de tenerlo en la mina. Todos los costes ambientales, los energéticos y los medioambientales, serían cosa del pasado. Como quien deja al futuro las pirámides o las catedrales. Es evidente que si utilizamos esa materia prima y la volvemos a reciclar, solo la estaríamos usando temporalmente.

El problema viene con la dispersión. Aquello que se dispersa debe reponerse con más extracción, y evidentemente el incremento de la demanda de una determinada materia prima también necesitará más extracción. Esto aumenta el tamaño del ciclo y la deuda energética que adquirimos «bajo el arco iris». La parte de «encima del arco iris» es el consumo real, mientras que la parte de «debajo del arco iris» es la deuda que adquirimos con las generaciones futuras. Todo aquello que reduzca la extracción nueva será positivo: la sustitución, la miniaturización, el reciclado, la eficiencia en el uso de materiales y, por supuesto, la eficiencia en la extracción.

El problema de la dispersión de las materias primas no ha sido suficientemente considerado en los análisis económicos. Se ignoran las pérdidas de material disponible y solo se considera la contaminación que se produce con su dispersión. Como el calor en los balances de energía, que se obtiene por diferencia, así se obtiene la dispersión, por balance de materiales. Lo que se extrae menos lo que se

recicla es igual a lo que se dispersa. No ha habido ningún empeño universal por tener una contabilidad sistemática de los ciclos de todos los elementos. Esta teoría muestra su necesidad.

Pero la dispersión es clave para entender el fenómeno de las materias primas. La mochila ambiental de materias primas que todos acarreamos tiene dos componentes: uno es el impacto global de su extracción y el otro es la deuda que adquirimos por no impedir su dispersión. Cada materia prima tiene su costo medioambiental por dispersión. Bajo este panorama, la sustitución de una materia prima por otra tendrá sentido si ambas partes de la mochila decrecen. Estas evaluaciones son esencialmente físicas. Mientras la parte EAI puede ser restaurada directamente por la naturaleza en el transcurso de varias generaciones—siempre teniendo en cuenta que nuestros residuos no excedan la capacidad asimilativa de los ecosistemas—, la parte DAI necesita tiempos geológicos para cerrarse naturalmente para cada elemento en particular. Restaurar el planeta al nivel de cómo estaban las minas antes de la civilización solo sería posible con el calor interno de la Tierra por medio del vulcanismo. Algo que está fuera de la imaginación. Los combustibles fósiles serían, bajo este prisma, los «más fáciles» de restaurar. Giampietro y Pimentel [51] proponen una productividad energética fósil al planeta Tierra de un valor tan bajo como $0,016 \text{ MJ/m}^2/\text{día}$ o $1000 \text{ kcal}/0,7 \text{ m}^2/\text{año}$.

II. Una aproximación termodinámica a la contabilidad del capital mineral de la Tierra

Los economistas ecológicos tienen clara la fuerte conexión de la ley de la entropía con la economía [52 y 53]. Esta ley nos habla de la dirección en la que los flujos

físicos fluyen (como parte del entorno natural). Pero la entropía es una propiedad difícil de comprender y es a menudo utilizada y mal utilizada de una forma metafórica. De tal manera que podemos encontrar sentencias tales como que «las minas de baja entropía se convierten en minas de alta entropía». Pero si bien este aserto es correcto, no proporciona mucha información. ¿Cómo podemos salvar esta deficiencia? La respuesta es con la propiedad exergía. A través de esta propiedad podemos convertir metáforas en números reales. Una buena gestión de nuestros depósitos minerales concentrados necesita estar basada en teorías e informaciones fiables, objetivas, sólidas y alejadas de las subjetividades del mercado.

Esta ha sido la motivación para el desarrollo de la Exergoecología [54, 55 y 56]. Su instrumento fundamental es el cálculo de los costes de reposición de los minerales encontrados en los depósitos naturales como forma de evaluar el «esfuerzo» que la naturaleza puso en juego para concentrar las sustancias desde un estado completamente disperso hasta el estado en el que se encuentran en la mina. Conforme la ley de mina tiende a cero, la exergía requerida para extraer el mineral de la mina tiende a infinito. Gracias a que la naturaleza nos provee de minas, la exergía necesaria para extraer los minerales es definitivamente menor que si necesitáramos extraerlos de la «roca madre». Pero si la extracción continúa, el estado de los depósitos se aproximaría a los de esta roca y las generaciones futuras tendrán que trabajar sobre depósitos con leyes de minas cada vez menores, necesitándose, para ello, cantidades crecientes de energía y con impactos ambientales asociados cada vez mayores.

Así que si añadimos un asiento contable a la contabilidad de minerales, justamente los costes de reposición «bajo el arco iris», tendremos en cuenta de una manera

muy simple el factor de escasez. De esta manera agotar un mineral de alta ley se penaliza, porque la exergía requerida para reponerlo con la tecnología actual será muy grande. Nótese que esto va en la dirección opuesta a las prácticas corrientes: a mayor ley de mina, más coste-eficiente es su explotación, ya que sus costos de producción son mucho menores. Así que este criterio favorece el agotamiento e ignora la escasez futura. Ambos aspectos, costes de reposición y costes convencionales de procesado, proporcionan una forma más amplia y equilibrada de ver la sostenibilidad en el sector minero a la vez que cerrar el ciclo de los materiales al menos contablemente, porque cubrimos tanto el camino EAI como el camino DAI.

Nótese también que estos dos indicadores no necesitan especulaciones sobre el capital mineral restante de la Tierra. Independientemente de lo que quede y su nivel hipotético de agotamiento, lo que se evalúa es el coste evitado a la humanidad por haber explotado la mina en vez de la roca madre. Estos indicadores también proporcionan el nivel de agotamiento y su velocidad para todos los minerales que estamos extrayendo y hemos extraído a lo largo de la historia. Y se hace con unidades de energía aditivas en lugar de unidades monetarias. Además, las cantidades obtenidas para los costes de reposición se pueden fácilmente convertir en unidades monetarias sin más que conocer el coste real de todas las operaciones unitarias mineras asociadas. Por contraste, convertir la exergía de reposición en unidades monetarias no tiene sentido, ya que los procesos reversibles para producir el mineral desde la roca madre son puramente teóricos. Este segundo indicador depende del estado de nuestra tecnología y cambia con el tiempo. Proporciona números fácilmente comprensibles: el esfuerzo que nos costaría recuperar desde la roca madre lo que estamos extrayendo en la actualidad sin

compensar al planeta por el esfuerzo geobiológico que realizó a lo largo de su existencia. Incorporar las «mejores técnicas disponibles» en su definición tiene un inconveniente: si la tecnología mejora, el número decrece. Desafortunadamente las tecnologías mineras no han cambiado de forma tan drástica en los últimos años, puesto que la extracción, concentración, procesado y refinado requieren de técnicas fisicoquímicas aparatosas que son difíciles de optimizar. No obstante, este inconveniente es en realidad una ventaja interesante: cualquier mejora tecnológica se contabilizará como un éxito medido en kWh del progreso de la humanidad al transferir conocimiento a las generaciones futuras en lugar de deuda.

III. Tanatia, la roca madre

Para calcular la exergía, o energía utilizable entre dos estados, se necesita obviamente definir ambos estados. Las propiedades de la mina están claras, una composición, una concentración y unas condiciones atmosféricas perfectamente identificadas. Sin embargo, cuando hablamos de roca madre, ¿de qué estamos hablando? La corteza terrestre no tiene una roca madre homogénea por todas partes, con una composición media equivalente al promedio de concentración de todos los elementos químicos que se encuentran en la parte superior de la biosfera, donde el ser humano habita y unos kilómetros más en profundidad. Tampoco es uniforme. Existen la corteza, la hidrosfera y la atmósfera. Así que si quisiéramos extraer helio de la atmósfera no tendrá sentido hablar de roca madre. De la misma manera si algún día queremos extraer litio del océano ocurrirá lo mismo. Hay que distinguir, además, qué es roca madre y qué es una mina potencial en una determinada localización. Y, finalmente, la

temperatura, que juega un papel trascendental en los cálculos exergéticos, necesita definirse, ya que no es la misma en los polos que en los trópicos. Y el cambio climático puede afectar a la temperatura media de la Tierra, por lo tanto, si hablamos de un estado límite, habrá que tener en cuenta también los efectos del cambio climático.

Otra vez el segundo principio de la termodinámica puede jugar un papel muy importante en descubrir la mejor aproximación a ese «planeta crepuscular» que buscamos. Por ello, indagaremos primero en los antecedentes.

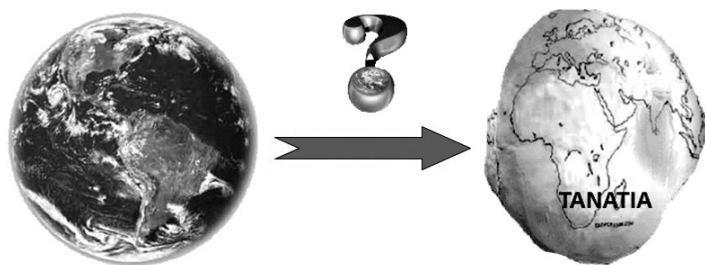
En 1852 lord Kelvin sugirió la idea de la muerte térmica del universo. Si el universo es un sistema aislado y la entropía siempre crece, con tiempo suficiente, la energía se distribuirá homogéneamente y el movimiento mecánico se disipará en forma de calor. De acuerdo con los fundadores de la Termodinámica, la detención perpetua de todo movimiento y la muerte son una consecuencia del segundo principio. ¿Y qué hay con el planeta Tierra? De hecho, la humanidad está agotando sus combustibles fósiles y los minerales, y con ellos acelerando la degradación de sus recursos exergéticos. ¿Estamos acelerando la muerte térmica de la Tierra? Hay una diferencia crucial entre la Tierra y el universo tal como se concibió por los fundadores. La Tierra no es un sistema aislado. Mientras el Sol brille todos los días no hay peligro de enfriamiento, sino que más bien el peligro estriba en convertir en algo insuperable el coste de recuperar todos los materiales dispersos y vivir únicamente del Sol sin dispositivos tecnológicos que lo conviertan en energía útil.

En otro lugar [57 y 58], propusimos una corteza terrestre que llamamos Tierra Crepuscular o Tanatia, que representa imaginariamente al planeta Tierra degradado, donde todas las minas hubieran sido agotadas, todos los materiales dispersos, y todos los combustibles

quemados y convertidos en CO_2 y agua. Propusimos una atmósfera degradada con un contenido en dióxido de carbono de 683 ppm y una temperatura media superficial de 17°C . Se asume que la hidrosfera degradada tiene la composición química media del agua marina, con los polos y glaciares fundidos, y estaría en equilibrio térmico con la atmósfera a 17°C . La corteza continental de la roca madre base presenta la composición y concentración de 324 sustancias, de las cuales 292 son minerales y el resto elementos diadójicos incluidos en la estructura cristalina de otros minerales.

Tanatia sí que constituye una línea base coherente para evaluar el capital mineral de la Tierra y su velocidad de agotamiento. Y ambos factores podrán ser utilizados para gestionar eficientemente nuestra herencia mineral, proporcionando al mismo tiempo una fotografía de la velocidad a la que nos estamos aproximando a este «fin comercial» del planeta. Este «fin comercial» nunca llegará a ser el modelo de nuestro «planeta muerto», sino más bien un inquietante modelo hipotético, pero termodinámicamente coherente de planeta en el cual la ausencia de recursos minerales provocaría consecuencias inimaginables a nuestro modo actual de sociedad o incluso llegaría a ser un planeta sin seres humanos.

Si elegimos el modelo Tanatia como planeta de referencia, la exergía de los minerales se convierte en un candidato perfecto para disponer de un sistema universal de unidades para medir los recursos abióticos del mundo. Cualquier diferencia material respecto de los constituyentes de Tanatia, tal como un depósito mineral, una nube, un río o un glaciar es un recurso exergético. La exergía depende de las propiedades del recurso (cantidad, composición y concentración o ley de mina) y constituye una herramienta universal, objetiva y útil para



El planeta se va aproximando a uno con ausencia de recursos minerales, fósiles y con una atmósfera e hidrosfera degradadas y sobrecalentadas por el cambio climático

Figura 15. Evolución hipotética de la Tierra hacia Tanatia.

clasificar los recursos de acuerdo con sus estados de agotamiento. Desplegados a lo largo del tiempo, proporcionarán la velocidad de degradación que tiene lugar de todos y cada uno de los minerales. Todos los conceptos propuestos, planeta crepuscular o Tanatia, recursos exergéticos y costes de reposición, son contribuciones de la Termodinámica y están sólidamente anclados en su segundo principio. No responden a apreciaciones, sino a definiciones dentro del campo de la Física. Así, nuestro objetivo se convierte ahora en evaluar los recursos minerales del planeta Tierra con respecto a la línea base trazada con Tanatia.

IV. Casos de estudio

La tabla 3 muestra un resumen de 1) costes exergéticos de reposición; 2) costes convencionales de concentración, y 3) costes convencionales de procesado y refinado. Los costes exergéticos de reposición de cada depósito

Table 3

Values in GJ/ton of metal if not specified

	$E(x)$	$xc[g/g]$	$xm[g/g]$	$xv[g/g]$	$k(x=xc)$	$k(x=xm)$	Bonus	Mining and conc.	Smelting and refining
Aluminium - Bauxite (Gibbsite)	$E=1,508x-0.5$	1,38E-03	7,03E-01	9,50E-01	2,088	1,041	627	10,5	23,9
Antimony (Stibnite)	$E=2,72x-0.5$	2,73E-07	5,27E-02	9,00E-01	3,929	40	474	1,4	12,0
Arsenic (Arsenopyrite)	$E=26,3x-0.5$	4,71E-06	2,17E-02	9,00E-01	1,470	63	400	9,0	19,0
Beryllium (Beryl)	$E=4,51x-0.5$	3,22E-05	7,80E-02	9,00E-01	3,62	26	253	7,2	450,0
Bismuth (Bismuthinite)	$E=26,3x-0.5$	5,10E-08	2,46E-03	9,00E-01	7,859	94	489	3,6	52,8
Cadmium (Greenockite)	$E=26,3x-0.5$	1,16E-07	1,28E-04	3,86E-03	39,230	3,609	5,898	263,9	278,5
Chromium (Chromite)	$E=11,81x-0.5$	1,98E-04	6,37E-01	8,10E-01	48	18	5	0,1	36,3
Cobalt (Linnaeite)	$E=2,24x-0.64$	5,15E-09	1,90E-03	4,56E-02	-	-	10,872	9,2	129,0
Copper (Chalcopyrite)	$E=23,81x-0,35$	6,64E-05	1,67E-02	8,09E-01	525	170	110	28,8	21,4
Fluorite	$E=7,25x-0.5$	1,12E-05	2,50E-01	9,00E-01	582	25	183	1,5	-
Gold	$E=135,664x-0,285; x [g/t]^n$	1,28E-09	2,24E-06	1,38E-04	6,380,357	2,135,879	583,668	107751,8	-
Gypsum Iron ore	$E=3,58x-0.5$	1,26E-04	8,00E-01	9,50E-01	118	35	15	0,2	-
Lead (Hematite)	$E=3,58x-0.5$	9,66E-04	7,30E-01	9,50E-01	165	78	18	0,7	13,4
Lime (Galena)	$E=3,58x-0.5$	6,67E-06	2,37E-02	6,35E-01	384	21	37	0,9	3,3
Lime	$E=3,58x-0.5$	8,00E-03	6,00E-01	9,50E-01	13	9	3	0,4	5,8
Lithium (Spodumene)	$E=3,58x-0.5$	3,83E-04	8,04E-01	9,50E-01	190	88	546	12,5	420,0
Manganese (Pyrolusite)	$E=0,911x-0.5$	4,90E-05	5,00E-01	6,71E-01	37	8	16	0,2	57,4
Mercury (Cinnabar)	$E=96,8x-0.5$	5,73E-08	4,41E-03	9,00E-01	209,116	2,154	28,298	157,0	252,0

Table 3

Values in GJ/ton of metal if not specified (continuation)

<i>E(x)</i>	<i>xc</i> [g/g]	<i>xm</i> [g/g]	<i>xv</i> [g/g]	<i>k(x=xc)</i>	<i>k(x=xm)</i>	<i>Bonus</i>	<i>Mining and conc.</i>	<i>Smelting and refining</i>
Molybdenum (Molybdenite)	E=23.6x-0.5	5,01E-04	9,18E-01	6,505	660	908	136,0	12,0
Nickel (sulphides)	E=17.01x-0.67	3,36E-02	4,68E-01	13,039	585	761	15,5	100,0
Pentlandite								
Nickel (laterites)	E=2.11x-0.5	4,42E-02	8,04E-02	876	136	167	1,7	412,0
Garnierite								
Phosphate rock (Apatite)	E=0.373x-0.5	5,97E-03	9,00E-01	77	29	0,4	0,3	4,6
Potassium (Sylvite)	E=15.4x-0.5	3,99E-01	9,00E-01	1,926	45	1,224,2	3,1	N.A.
Silicon (Quartz)	E=3.97x-0.5	6,50E-01	9,80E-01	6	9	0,7	0,7	76,0
Silver (Argentite)	E=24.7x-0.5	4,27E-06	9,00E-01	112,846	8,813	7,371,4	1281,4	284,8
Sodium (Halite)	E=8.13x-0.5	2,00E-01	9,00E-01	71	14	44,1	3,3	39,6
Tantalum (Tantalite)	E=429x-0.5	7,44E-03	3,80E-01	6,729,367	111,449	482,828	3082,8	8,1
Tin (Cassiterite)	E=10.6x-0.5	2,61E-06	6,09E-03	2,704	133	426	15,2	11,4
Titanium (Ilmenite)	E=8.16x-0.5	4,71E-03	2,42E-02	172	105	5	7,2	128,1
Titanium (Rutile)	E=6.32x-0.5	2,73E-04	2,10E-03	143	67	9	13,8	243,8
Uranium (Uraninite)	E=38.8x-0.28	1,51E-06	3,18E-03	13,843	3,697	901	188,8	N.A.
Vanadium (Vanadinite)	E=1.92x-0.5	2,00E-02	9,00E-01	4,174	632	1,055	136,0	381,0
Wolfram (Scheelite)	E=1.61x-0.5	2,67E-06	8,94E-03	69,721	3,033	7,429	213,0	381,0
Zinc (Sphalerite)	E=3.01x-0.5	9,96E-05	6,05E-02	104	13	25	1,5	40,4
Zirconium (Zircon)	E=3.01x-0.5	3,88E-04	4,02E-03	10,580	4,588	654	738,5	633,0

considerado se representan como «bono» o «coste evitado» en la tabla. Las letras x_c , x_m y x_r representan, respectivamente, la concentración cortical de la Tierra degradada Tanatia, la concentración media de los depósitos minerales y la concentración del mineral antes del refinado. Se ha supuesto que cada elemento se obtiene de un único mineral (excepto del níquel, que se obtiene de dos). Para aquellas sustancias en las que no se encontró información relativa a los grados antes del refino, se asumieron valores de $e_r=0,9$. El consumo de energía en función de la ley de mina $E(x_m)$ se calcula tomando valores de concentración expresados en porcentaje másico del metal considerado a no ser que se especifique de otra forma en la tabla. Para calcular $k(x_c)$ y $k(x_m)$, es decir, los costes unitarios a la concentración crepuscular y la de la mina, se asume que la tendencia en consumos de energía se aplican para todas las concentraciones (desde x_c hasta x_r). Finalmente, el bono representa la exergía natural del depósito que se pierde gradualmente cuando la mina se explota (costes de reposición). A los anteriores hay que añadir los costes convencionales asociados a la minería y la metalurgia que se presentan en la tabla 3.

De la tabla anterior se pueden extraer algunas conclusiones. Los datos empíricos encontrados para algunos minerales como el oro, el cobre, el níquel, el cobalto o el uranio sugieren que la energía requerida para la minería sigue un consumo exponencial con la ley de mina. Este hecho observado, que está de acuerdo con el segundo principio de la Termodinámica, nos ha permitido concluir que el mismo comportamiento puede extrapolarse al resto de los minerales donde no hemos encontrado información empírica.

Los costes exergéticos unitarios se calculan como el cociente entre la energía real requerida para extraer y

concentrar la sustancia y el mínimo termodinámico (exergía) para realizar el mismo proceso. Esto significa que proporcionan una medida de la irreversibilidad (o ignorancia tecnológica) del proceso. Cuanto más cerca no esté el valor de k a 1, menos irreversible es el proceso y, por lo tanto, menor es la energía real requerida. Pero k también es función de la ley de mina. Cuanto menor sea esta, mayor será el coste unitario exergético del mineral.

Por ejemplo, el oro tiene el mayor valor de costes unitarios $k(x=x_m)$ asociados a los metales analizados en este trabajo, atribuible a su baja concentración en las minas y su consecuente cantidad de energía requerida para concentrarlo. Además, el grado actual de las minas es cercano al de Tanatia. El ejemplo opuesto es el del silicio o calcita, que tienen valores bajos de $k(x=x_m)$, debido a los altos grados de mina actuales en comparación con otros minerales.

Pero el estado de la tecnología también juega un papel importante. Este hecho se visualiza bien en el caso del aluminio. A pesar de que su ley es similar a la del cromo o manganeso, los elevados costes unitarios $k(x=x_m)$ son un indicador de la significativa irreversibilidad de su proceso de producción. Lo mismo ocurre con el tántalo, que tiene un coste unitario elevado comparado con otros minerales con parecidas concentraciones en la mina como el estaño o el wolframio. Esto puede explicarse por la elevada intensidad energética del tántalo en los procesos de extracción y concentración.

Un caso particular es el del níquel y sus menas. Históricamente, el metal se obtenía preferentemente de menas sulfurosas debido al mayor consumo de energía asociado a las lateritas en los procesos de refinado. No obstante, hay más recursos de níquel en forma de lateritas que de sulfuros (cerca del 60 % para menas lateríticas

frente al 40 % para sulfurosas). Pero si nos centramos en la energía de concentración, las menas sulfurosas tienen mayores requerimientos que las lateríticas, como revelan los mayores costes unitarios exergéticos.

De especial interés es el valor de $k(x=x_c)$. Este último multiplicado por la exergía mínima requerida para concentrar el mineral de x_c a x_m representa la cantidad de energía requerida para obtener y concentrar el mineral desde la tierra madre (Tanatia) hasta las condiciones en la mina y proporciona una medida del bonus exergético mineral en la Tierra. El valor de $k(x_c)$ es siempre mayor que el asociado a los depósitos minerales actuales $k(x_m)$. La diferencia entre ambos aumenta generalmente con la separación entre ambos grados (el crepuscular y el de la mina). Por ejemplo, el valor de $k(x_c)$ para el silicio, la calcita o el titanio está en el mismo orden de magnitud que sus respectivos $k(x_m)$. Lo contrario ocurre con el antimonio, el bismuto o el tántalo, que tienen muy bajas concentraciones en la tierra degradada en comparación con las leyes de mina actuales.

Si consideramos todos estos factores, el bonus exergético da pistas sobre cuáles son los minerales que serían más difíciles de reponer después de su completa dispersión. Extraer y dispersar un mineral con un bonus exergético elevado implica perder irreversiblemente un capital natural que el hombre difícilmente podría reemplazar. Y si lo pudiese, con cantidades ingentes de energía. Los minerales con los costes exergéticos de reposición más altos de acuerdo con nuestros cálculos son oro, tántalo, mercurio, plata, cobalto, cadmio o wolframio. Esto significa que es crítico gestionar bien estos metales.

Es necesario recalcar que los valores obtenidos son primeras evaluaciones. Se han realizado suposiciones importantes, como suponer que se aplica la misma tecnología

en todo el rango de concentraciones analizado, incluyendo el de la Tierra crepuscular. Una de las mayores limitaciones encontradas es la falta de datos reales en función del tiempo. Así que la estimación de tendencias futuras sobre este hecho sin información real y fiable se hace subjetiva. Por lo tanto, los resultados que se presentan son un intento de obtener indicadores basados en hechos físicos y no leyes de mercado subjetivas, con la meta de identificar retos y oportunidades en el sector minero. Pero estos no deberían tomarse como resultados finales y cerrados, puesto que pueden mejorarse a medida que se dispone de mejores datos de partida.

V. La pérdida de la riqueza del capital mineral debida a la extracción de materias primas

El método descrito arriba podría usarse para evaluar la riqueza del capital mineral de la Tierra y su degradación anual debido a la minería. Sin embargo, se deben realizar algunos comentarios adicionales. Los procesos mineros no implican necesariamente una pérdida del bonus exergético del material. Al contrario, una vez extraídos, este se eleva desde la mina o nivel R#1, hasta el nivel R#2, a través de procesos de concentrado y refinado adicionales (ver fig. 16). Lo mismo ocurre cuando el material acaba en los vertederos (R#2 a R#3). Solo perdemos este bonus cuando los materiales no pueden recuperarse de nuevo, es decir, cuando el material va de R#1 a R#0. Este es el caso de pigmentos metálicos en pinturas, zinc en neumáticos, fósforo en tratamientos superficiales de coches, plomo en gasolinas, fosfatos en agricultura, metales no recuperados en aceros aleados, la dispersión del cadmio y otros metales en la incineración de residuos, muchos materiales en técnicas de galvanizado,

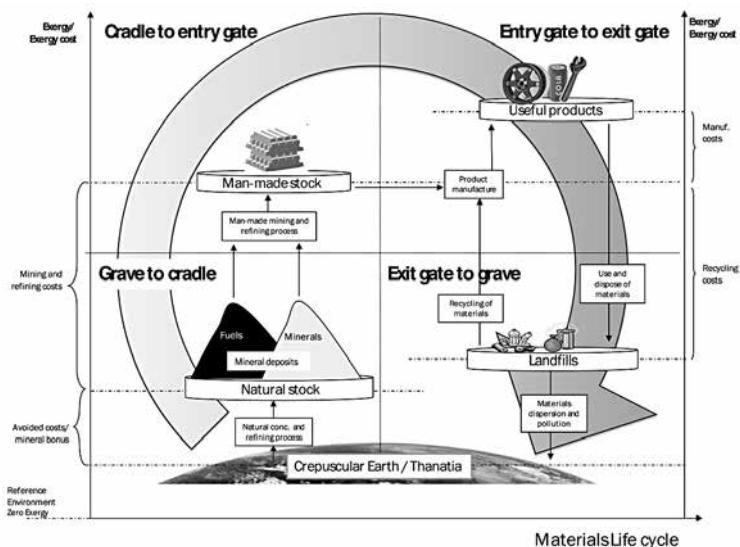


Figura 16. Ciclo global de materiales: de la tumba a la cuna y de la cuna a la tumba [59].

residuos mineros y cientos de otros ejemplos. También todos los combustibles fósiles necesarios para elevar la exergía de los materiales, desde R#1 y R#3 a R#2 se degradan y contribuyen poco a poco, pero irreversiblemente a formar Tanatía (R#0).

Teniendo en cuenta dichas consideraciones, podemos ahora evaluar la pérdida de capital debido a la producción minera. Para ello se necesitan datos sobre la producción mundial de minerales como los que proporciona el USGS (2010) [60].

La tabla 4 muestra los costes exergéticos totales de las cadenas de producción estudiadas. De acuerdo con nuestros resultados, los costes exergéticos de reposición (bonus) asociados a la producción de los minerales estudiados en el 2008 fue de 5,3 Gtep.

Tabla 4*Costes exergéticos totales asociados a la producción de minerales en 2010 [61].*

<i>Substance reported by USGS</i>	<i>2008 Production, t</i>	<i>Bonus, Mtep</i>	<i>Mining and concentration, Mtep</i>	<i>Smelting and refining, Mtep</i>
Aluminium (Bauxite)	2.05E+08	3.06E+03	5.15E+01	1.16E+02
Antimony	1.97E+05	2.23E+00	6.57E-03	5.63E-02
Arsenic	5.27E+04	5.02E-01	1.13E-02	2.38E-02
Beryllium	1.38E+02	8.30E-04	2.37E-05	1.48E-03
Bismuth	7.70E+03	8.97E-02	6.60E-04	9.68E-03
Cadmium	1.96E+04	2.75E+00	1.23E-01	1.30E-01
Chromium	6.98E+06	7.54E-01	1.40E-02	6.03E+00
Cobalt	7.59E+04	1.96E+01	1.66E-02	2.33E-01
Copper	1.54E+07	4.05E+01	1.06E+01	7.86E+00
Fluorspar	6.04E+06	2.63E+01	2.09E-01	-
Gold	2.26E+03	3.14E+01	5.80E+00	-
Gypsum	1.59E+08	5.83E+01	7.65E-01	-
Iron ore	2.22E+09	9.38E+02	3.70E+01	7.10E+02
Lead	3.84E+06	3.35E+00	8.16E-02	3.00E-01
Limestone	1.23E+08	7.66E+00	1.06E+00	1.69E+01
Lithium	3.82E+05	4.96E+00	1.14E-01	3.82E+00
Manganese	1.33E+07	4.95E+00	5.13E-02	1.82E+01
Mercury	1.48E+03	9.97E-01	5.53E-03	8.88E-03
Molybdenum	1.84E+05	3.98E+00	5.96E-01	5.26E-02
Nickel - laterites	1.19E+06	4.76E+00	4.89E-02	1.17E+01
Nickel - sulfides	1.00E+06	1.82E+01	3.71E-01	2.39E+00
Phosphate rock	1.61E+08	1.35E+00	1.10E+00	1.77E+01
Potash	3.48E+07	1.01E+03	2.54E+00	-
Rhenium	5.65E+01	1.38E-01	2.10E-04	2.02E-05
Silicon	2.83E+06	4.92E-02	4.85E-02	5.12E+00
Silver	2.13E+04	3.74E+00	6.50E-01	1.44E-01
Sodium	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Tantalum	1.17E+03	1.35E+01	8.59E-02	2.27E-04
Tin	2.99E+05	3.04E+00	1.08E-01	8.09E-02
Titanium-rutile	6.21E+05	1.30E-01	2.04E-01	3.61E+00
Titanium-ilmenite	6.79E+06	7.29E-01	1.17E+00	2.07E+01
Uranium	6.09E+04	1.31E+00	2.74E-01	0.00E+00
Vanadium	5.61E+04	1.41E+00	1.82E-01	5.09E-01
Wolfram	5.59E+04	9.89E+00	2.83E-01	1.92E-01
Zinc	1.16E+07	6.85E+00	4.13E-01	1.12E+01
Zirconium	1.28E+06	1.99E+01	2.25E+01	1.93E+01
TOTAL	2.98E+09	5,307.97	137.87	972.49

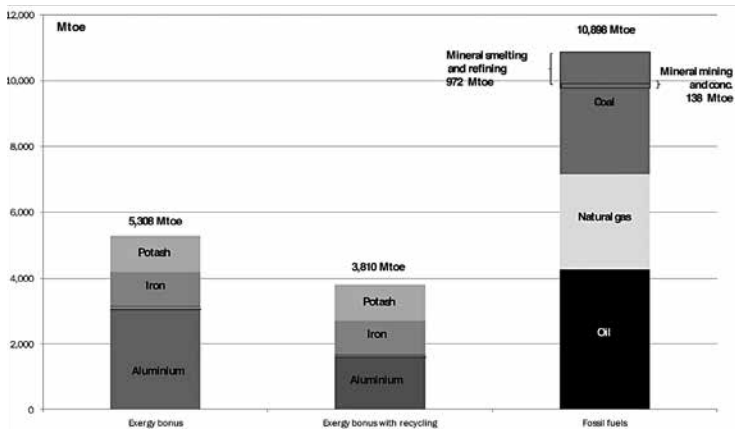


Figura 17. Reducción de la riqueza capital mineral debida a la producción de minerales en el año 2008 [61].

La economía convencional solo contabiliza la energía requerida en los procesos de extracción y refinado (en la perspectiva desde la cuna hasta la tumba de forma macroeconómica). En el caso de los materiales estudiados, estos representan alrededor del 9% del total del consumo de combustibles fósiles producidos en el año 2008 (ver fig. 17). Este valor está en el rango que proporcionan el World Watch Institute (hasta el 7% del consumo global de energía) y la Agencia Internacional de Energía (hasta el 10% de la energía consumida en el mundo).

Pero una contabilidad justa de recursos debería tener también en cuenta el uso y decrecimiento del capital mineral no energético. Esto significa que el balance final de pérdida de exergía de la riqueza mineral del planeta debería tener en cuenta no solo la exergía de los combustibles fósiles, sino también la asociada al coste de reposición de los minerales no energéticos. Como puede verse en la figura 18, este supone el 32% del total, teniendo en

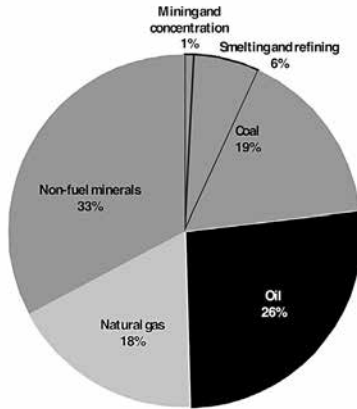


Figura 18. Distribución de los costes exergéticos asociados a la producción de minerales en 2008 [61].

cuenta el ciclo total de los materiales. Además, es del mismo orden de magnitud que la pérdida asociada a la producción de carbón, petróleo o gas natural.

La figura 18 también muestra de forma esquemática el bonus exergético mineral (costes de reposición) de los minerales considerados en el año 2008. Pero este bonus no se pierde completamente. Como se ha venido explicando, tan solo la parte que no se recicla se pierde realmente. El USGS recoge tasas de reciclaje para distintos minerales en EE. UU. Asumiendo estas mismas tasas de reciclado para todo el mundo, implicaría que del total del bonus mineral extraído, en realidad el 72 % se perdería. De acuerdo con esto, la pérdida de capital mineral debido a la extracción en 2008 supondría una disminución de las riquezas planetarias de alrededor de 3,8 Gtep. Si además sumamos la exergía de los combustibles fósiles utilizados en la extracción y procesado de minerales, obtenemos que la pérdida total de minerales en el 2008 fue

de entorno a los 5,3 Gtep. Esta cifra representa alrededor del 41 % de la degradación total (teniendo en cuenta minerales energéticos y no energéticos). Debe recordarse que el estudio se ha hecho para 37 minerales, y que la cifra aumentaría si se tuviesen en cuenta todas las materias primas. En [62], estimamos que las reservas de metales del planeta solo constituyen el 0.0000000024 % de la masa de la corteza terrestre. Y en [63], calculamos que si todas las masas heladas se fundieran mezclándose con el agua del océano, necesitaríamos para reponerlas, con nuestra tecnología actual, 9000 veces más energía que la de todas las reservas fósiles convencionales que existen en la Tierra.

Estas ideas proporcionan un meta-mensaje: «Los materiales constituyen una parte esencial, tanto en calidad como en cantidad, a tener en cuenta en el futuro del Planeta. Es un aspecto que había sido minimizado al no haberse estimado su auténtica magnitud. El futuro climático del Planeta afectará al agua, la energía y los materiales, pero el uso de estos y su gestión afectarán al cambio climático. Es un proceso sinérgico en la evolución hacia Tanatia».

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Las formas físicas de medición quedan dentro del ámbito científico y pocas de ellas trascienden y se convierten en relevantes socialmente. Para atravesar esta frontera, tanto el objeto de estudio como las unidades deben tener una serie de propiedades consistentes que faciliten su comprensión, universalidad, capacidad de medición y evolución social.

El objeto de medida que aquí nos ocupa es el agotamiento global de recursos minerales a nivel planetario. Nosotros postulamos la exergía como unidad de medida. Para hacerlo, necesitamos una teoría de cómo debe llevarse a cabo. Los fundamentos de dicha teoría son:

- 1) Se puede proponer un planeta imaginario degradado, en el que la corteza, la hidrosfera y la atmósfera han alcanzado la máxima disipación de sus materiales compatible con la energía solar y el calor interno de la Tierra. Llamamos a este planeta Tanatia o Planeta Crepuscular. En él, no existen minas, todos los materiales se han dispersado y degradado alcanzando la composición de la roca madre de la corteza; la hidrosfera carece de polos y está compuesta prácticamente por agua salada; y la atmósfera ha alcanzado el estado predicho

por modelos climáticos a largo plazo, donde la concentración de gases de efecto invernadero es muy superior a la actual debido a la completa combustión de todos los combustibles fósiles convencionales. Tanatía no está en estado de equilibrio, sino que está en un estado estacionario geológico imaginario que puede caracterizarse por una pequeña serie de parámetros físico-químicos. Tanatía puede postularse como el último estado de la degradación inducida por el hombre actual en la Tierra.

- 2) La exergía mide el mínimo trabajo necesario para convertir un estado termodinámico de un sistema caracterizado por una masa constante de elementos químicos a otro estado del sistema. Por lo tanto, cualquier estado del planeta entre el actual y Tanatía puede medirse conociendo los parámetros físico-químicos que caracterizan ambos estados. Esta definición general permite calcular la distancia exergética entre dos estados de cualquier mina, sin importar cuál sea su composición. Lo mismo ocurre cuando el mineral se convierte en una materia prima, se procesa, refina, manufactura, transporta, utiliza, se recicla, se deposita en el vertedero y/o se dispersa.
- 3) Una vez que se caracterizan dos estados cualesquiera del sistema, es posible calcular el coste exergético que necesitamos invertir con nuestra mejor tecnología disponible para alcanzar el estado final a partir del inicial. Puesto que nuestra tecnología está muy lejos de ser reversible, los costes exergéticos y la exergía mínima difieren en muchos casos en varios órdenes de magnitud. Mientras que los costes exergéticos dependen de la tecnología actual, la exergía es independiente de esta. Sin embargo, la historia nos dice que las tecnologías mineras y metalúrgicas han cambiado

lentamente a lo largo de las décadas y que, por lo tanto, los costes exergéticos pueden asumirse constantes en un período de tiempo no muy corto (en algunos casos durante décadas). La exergía puede ser un mejor indicador para propósitos puramente científicos, mientras que los costes exergéticos son más apropiados para interpretaciones sociales. Ambos son igualmente válidos termodinámicamente hablando.

- 4) Proponemos que cada elemento químico debe tener su ciclo propio, ya sea movido directa o indirectamente por la energía solar o geotérmica. La tecnología puede acelerar o desacelerar estos ciclos. Así, los elementos metálicos se sitúan en algún sitio de la geosfera o la tecnosfera. Un elemento en una mina no ha iniciado aún el ciclo. Cuando se extrae, el ciclo empieza. Cuanto mayor es la cantidad de mineral extraído, más ancho es su ciclo. Y cuanto menor es el tiempo de residencia en la tecnosfera, mayor es su velocidad de disipación. Recuperar lo que se ha dispersado requeriría cantidades significantes de exergía e inteligencia que hacen que en muchos casos sea imposible cerrar el ciclo. Pero la humanidad deberá recuperar más y más elementos de la roca madre por el uso despilfarrador de las minas anteriores. Muchas tierras raras y elementos escasos ya se están obteniendo casi de rocas madre. Y la tecnología existe para ello.
- 5) Bajo esta perspectiva, proponemos medir el agotamiento de un mineral dado como el coste exergético necesario para cerrar el ciclo entre las condiciones en Tanatia y en la mina al estado actual. Además, su exergía mínima es también una medida complementaria del agotamiento. A estos parámetros los hemos denominado coste exergético y exergía de reposición, respectivamente. El proceso global desde la minería

hasta la dispersión y disipación es el conocido como proceso desde la cuna hasta tumba. Esta es la parte que todo el mundo ve, por ello la hemos llamado la parte «over the rainbow» (*por encima del arco iris*, EAI). Sin embargo, existe una parte imaginaria «down the rainbow» (*bajo el arco iris*, DAI), o enfoque desde la tumba hasta la cuna, que puede explicar y medir el agotamiento debido a la acción del hombre. Hemos visto que todos los intentos para medir la degradación EAI ya sea en términos monetarios o físicos colisionan con la imposibilidad de dar un valor objetivo a la escasez física. La degradación del capital mineral en la Tierra debe medirse en una base de «tumba-cuna» y no viceversa.

I. ¿Cumple la exergía con los estándares de indicadores ambientales adecuadamente?

Con los costes exergéticos de reposición no podemos medir el progreso hacia la sostenibilidad, pero sí hacia el agotamiento, hacia Tanatía. Puede verse como un reloj para medir el tiempo que queda hasta la muerte. Podemos desacelerar la llegada de la muerte, pero no podemos evitarla. No obstante, puede convertirse en un instrumento de gestión adecuado, puesto que puede cuantificar la degradación anual del capital mineral y explicar de forma clara las medidas necesarias para pararla o por lo menos frenarla. La única cuestión que queda es saber si cumple con los requisitos necesarios.

La OCDE [64 y 65] propuso una serie de criterios que debían tener los buenos indicadores ambientales: relevancia política, solidez analítica y capacidad de medición.

Respecto de la relevancia política, un indicador debe:

- a) ser fácil de interpretar;
- b) mostrar tendencias con el tiempo;
- c) dar respuesta a cambios en condiciones

importantes, y *d*) tener un valor de referencia respecto del cual medir distintas condiciones.

La exergía como la energía disponible es fácil de interpretar, ya que es lo que los no especialistas llaman energía. En realidad, no pagamos energía sino exergía. La exergía y los costes exergéticos de reposición pueden mostrar de forma agregada o desagregada tendencias en función del tiempo como respuesta a cualquier variación en la extracción, mejoras en la eficiencia del proceso, sustitución, reciclado o cualquier otro cambio en el ciclo. Finalmente, Tanatia, como límite último, es el mejor referente para medir el grado de agotamiento. Por lo tanto, estos indicadores sí tendrían relevancia política según la OCDE.

Con relación a la solidez analítica, los indicadores deben estar robustamente fundamentados en términos físicos y científicos. Es obvio que los indicadores exergéticos están bien basados en el segundo principio de la Termodinámica.

Por su capacidad de medición, los indicadores deben ser: *a*) calculados a partir de datos que estén disponibles a un coste razonable; *b*) los datos deben estar bien documentados y ser de calidad contrastada, y *c*) los datos y los indicadores deben actualizarse a intervalos regulares. La información necesaria para calcular los costes exergéticos de reposición debe provenir de datos de las tablas físicas del SEEA. Los asientos relativos a la cantidad de material extraído, composición, leyes de mina, cantidad de minerales procesados, productos químicos refinados, cantidades de material reciclado, etc., que están o deberían estar disponibles en las tablas PSUT son los ingredientes necesarios para el cálculo de costes exergéticos. La información obtenida de los costes exergéticos de reposición será tan fiable como los datos proporcionados por las cuentas del SEEA. Y los cálculos requeridos son

fácilmente abordables con programas informáticos. Se podrá llegar a acuerdos internacionales para actualizar tanto la información como los indicadores, así como para mejorar las interpretaciones de estos y actuar en consecuencia. Puesto que la exergía es una propiedad aditiva, tiene la capacidad de integrar y agregar una gran variedad de causas de variación, y muestra cómo la sustitución, reciclado o las nanotecnologías pueden mejorar positivamente nuestro capital mineral global. Igualmente, cada país, empresa o mina pueden utilizar el coste exergético de reposición para cuantificar el grado de agotamiento alcanzado. Este coste puede convertirse fácilmente a unidades monetarias multiplicándolo por un precio energético previamente acordado. Las cuentas monetarias son útiles a nivel micro desde empresas hasta países, pero a escala global y a lo largo del tiempo las cuentas exergéticas pueden proporcionar una visión más clara y alejada de incertidumbres económicas.

Finalmente, los indicadores propuestos son complementarios a otros, especialmente a los indicadores cunatumba que cierran el ciclo de los elementos. Todos juntos pueden proporcionar una medida de «insostenibilidad» y su variación anual como palanca de gestión.

COMENTARIOS FINALES:
DESDE EL SEEA HACIA UN SISTEMA GLOBAL
DE CUENTAS AMBIENTALES
TERMO-ECONÓMICAS (SETEA)

La degradación de un mineral ya no debiera ser la diferencia entre su precio en el mercado y su coste económico de producción, como proponen los economistas. Por el contrario, debiera valorarse como la pérdida de reservas cuantificada como su coste de reposición con las mejores tecnologías disponibles, desde la roca madre hasta las condiciones de concentración de las minas. Este indicador de agotamiento puede utilizarse para todos los combustibles fósiles y minerales no energéticos independientemente de su composición o concentración. Los combustibles fósiles deben reemplazarse con energías renovables y este progreso debe cuantificarse. Del mismo modo, frenar el agotamiento de metales se conseguirá a través de técnicas como el diseño para aumentar el reciclado, reducir el número de aleaciones utilizadas, evitar el diseño de híbridos monstruosos, como explican McDonough y Braungart [66] o Wernick y Themelis [41], diseñar para desensamblar, simbiotizar complejos industriales, aumentar la eficiencia de las fundiciones para evitar pérdidas metálicas en escorias, etc. Todas estas técnicas reducen el agotamiento y deben ser contabilizadas igualmente.

La idea de exergía de reposición, restauración, remediación o reparación podría extenderse de forma sencilla para indicar la degradación de muchos otros recursos no renovables de origen bio-geológico como son los bosques, los paisajes, los suelos fértiles, las aguas subterráneas, los ecosistemas acuáticos, el cambio climático, etc. La cantidad de trabajo necesario para restaurar lo que se ha degradado debería contabilizarse aun sabiendo que no podrá restaurarse fácilmente. Es algo así como una cuenta de débito para las generaciones futuras. Cada vez que aprendemos a mejorar las reposiciones, a reciclar o a vivir con menos, es como frenar la máquina del tiempo hacia Tanatía.

Si las mejores tecnologías son un reflejo del conocimiento embutido o incorporado, deberíamos ver en qué medida estas disminuyen nuestra deuda con las futuras generaciones. Sin embargo, no está claro que cualquier nueva tecnología que mejore la eficiencia directa o indirectamente de un proceso productivo reduzca nuestra deuda. El efecto rebote siempre va en el sentido contrario, cuanto más eficientes somos, más se promueve el consumo [67].

Valorar nuestras mejoras tecnológicas es tan importante como conservar nuestros recursos. Conservar es algo más que reparar, restaurar o reponer. Se necesita un cambio en nuestro estilo de vida a través de la educación. Esta es una herramienta indispensable para la innovación tecnológica y la conservación. Y no está claro todavía cuál de ambas ha sido más importante en la historia del ser humano en este planeta. La conservación y las mejoras tecnológicas pueden contabilizarse con la teoría propuesta. Por lo tanto, el segundo principio de la termodinámica debería estar en el centro del pensamiento económico.

Si la reposición puede calcularse y registrarse para casi cualquier acción del hombre en el planeta, necesitamos un marco internacional para proporcionar conceptos, definiciones, clasificaciones, reglas contables y tablas estándares para todos los países. El Sistema de Cuentas Económico-Ambientales (SEEA) de las Naciones Unidas bien podría proporcionar dicho marco estadístico. Como se explicó anteriormente, el Sistema de Cuentas Nacionales es un sistema establecido para producir estadísticas económicas comparables internacionalmente. Está aceptado y establecido a nivel mundial.

Los Institutos Nacionales de Estadística (Bureaus of Statistical Offices, BSO) compilan datos y realizan las contabilizaciones económicas que existen en todos los países. Las empresas y los países informan sobre sus datos económicos y físicos basándose en los procedimientos contables establecidos y los BSO son los que los producen e integran. Es una infraestructura enorme. Desde hogares hasta compañías y países, estas cuentas se presentan en valores monetarios. El SEEA sigue la estructura de los SCN y, por lo tanto, se facilita la integración de las estadísticas ambientales con las económicas. Por ello, cada BSO nacional necesitará tomar la responsabilidad de recopilar información ambiental para realizar una contabilidad económico-ambiental. Pero dichas oficinas están compuestas principalmente por estadísticos económicos que tienden a convertir de forma natural sus asientos en valores monetarios. Cuando describimos las tablas físicas necesarias para el SEEA, vimos que la información recuperada es bastante pobre, puesto que los datos expresados en toneladas de material no son lo suficientemente sensibles para calificar gran parte de los fenómenos físicos.

A nivel nacional, tanto las cuentas monetarias como las físicas especulares son necesarias. La monetización funciona bien de los hogares a las empresas. Pero entre los países, la vara de medir del dinero es insuficiente para las cuentas económico-ambientales. Y, definitivamente a nivel global agregado, el dinero pierde peso en favor de las cuentas físicas. Para visualizar la evolución planetaria, la contabilidad monetaria no solo es insuficiente, sino inapropiada. El nivel de agregación determinará el numerador que haya de usarse en las cuentas.

Proponemos la palabra clave *reposición* como concepto central para re-producir las cuentas planetarias globales partiendo de los hogares hasta el nivel agregado global de forma comprehensiva. Y ello utilizando el coste exergético medido en unidades del sistema internacional como indicador de más sólida base científica. El coste de reposición de los recursos no renovables y el coste de restaurar recursos renovables deteriorados debe utilizarse para medir el trabajo necesario para cerrar los ciclos naturales y antropogénicos. Cuando reponemos pagamos nuestra deuda, pero si no se reponen permanecerán como deuda para generaciones futuras que lo tendrán que hacer si quieren seguir viviendo. Como dijo el anterior vicesecretario general de la OCDE B. Ásgeirsdóttir: «los lujos de una generación suelen ser necesidades de la siguiente» y «necesitamos alcanzar modelos de consumo y producción más sostenibles para desacoplar cada vez más la presión ambiental del crecimiento económico, para asegurar una gestión sostenible de los recursos naturales trabajando juntos para reducir la pobreza» [68]. Para alcanzar este objetivo, el SEEA debe ser el punto de partida y su marco. El SEEA necesitaría dar un paso más para llegar a convertirse en un sistema de cuentas termoeconómico-ambientales (SETEA).

Para ello, se necesitará un esfuerzo intelectual importante a partir de los conceptos que hemos descrito. Al final, la unidad de contabilización global más definitiva será el tiempo de residencia del ser humano en el planeta.

REFERENCIAS

- [1] WHITMORE, A. (2006), «The emperor's new clothes: Sustainable mining?», *Journal of Cleaner Production*, 14, pp. 309-314.
- [2] SAMPAT, P. (2003), «Scrapping mining dependence», en *State of the World 2003*, World Resources Institute, p. 111.
- [3] MACHADO, I. F., y S. B. SUSLICK, *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Earth System: History and Natural Variability*. Vol. IV: *Mineral Resources for Life Support*.
- [4] «La escasez de materias primas será un grave problema para las empresas del automóvil en los próximos cinco años», *Sernauto informa*, nº 65 (2012), p. 7.
- [5] MEADOWS, D. H., D. L. MEADOWS, J. RANDERS y W. W. BEHRENS III (1972), *The limits to growth*, Londres: Earth Island; Nueva York: Universe Books.
- [6] TRAINER, F. E. (1999), «The limits to growth argument now», *The Environmentalist*, 19, pp. 325-335.
- [7] <<http://www.eia.gov/forecasts/ieo/index.cfm>>. [Consultado en junio de 2012].
- [8] <<http://www.ipcc.ch/>>. [Consultado en junio de 2012].
- [9] IEA (2011), *CO₂ emissions from fuel combustion: Highlights*, París: International Energy Agency. Disponible en <<http://www.iea.org/co2highlights>>. [Consultado en junio de 2012].
- [10] <<http://www.eia.gov/forecasts/ieo/index.cfm>>. [Consultado en junio de 2012].

- [11] <http://es.wikipedia.org/wiki/Emisiones_de_CO2>. [Consultado en junio de 2012].
- [12] IEA (2011), *World Energy Outlook 2011*, París: International Energy Agency. Disponible en <<http://www.worldenergyoutlook.org>>. [Consultado en junio de 2012].
- [13] UNEP (2010), *The Emissions Gap Report, Technical Summary*, Nairobi. Disponible en <<http://www.unep.org/publications/ebooks/emissionsgapreport>>. [Consultado en junio de 2012].
- [14] HOFFMANN, U. (2011), «Some Reflections On Climate Change, Green Growth Illusions And Development Space», *UNCTAD*, nº 205. Disponible en <<http://www.unctad.org>>. [Consultado en junio de 2011].
- [15] RIFKIN, J. (2011), *La tercera revolución industrial: cómo el poder lateral está transformando la energía, la economía y el mundo*, Barcelona: Paidós. Y también, RIFKIN, J., M. G. CARVALHO, y M. BONIFACIO (2008), «Leading the Way to the Third Industrial Revolution and a New Social Europe in the 21st Century», en <www.fcirce.es>.
- [16] FISHBEIN, B. K. (2002), «Waste in the Wireless World, Inform», en <http://www.cleanup.org.au/PDF/au/additional-info-sheet_mobilephones-the-environment.pdf>. [Consultado en junio de 2012].
- [17] <http://www.textually.org/textually/archives/cat_cell_phone_recycling.htm>. [Consultado en julio de 2012].
- [18] WELLMER, F.-W. (2008), «Reserves and resources of the geosphere, terms so often misunderstood. Is the life index of reserves of natural resources a guide to the future?», *Zeitschr. Deutsche Ges. Geowissenschaften*, 159, pp. 575-590.
- [19] WELLMER, F.-W., y M. KOSINOWSKI (2003), «Sustainable development and the use of nonrenewable resources», *Geotimes*, 48(12), pp. 14-17.
- [20] CORDELL, D., T. SCHMID-NESET, S. WHITE y J. O. DRANGERT (2009), «Preferred future phosphorus scenarios: A framework for meeting long-term phosphorus needs for global food demand», en D. MAVINIC, K. ASHLEY y F. KOCH (eds.), *Proceedings International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams*, Vancouver.

- [21] SCHRÖDER, J. J., D. CORDELL, A. L. SMIT y A. ROSEMARIN (2010), «Sustainable Use of Phosphorus», *EU Tender ENV.B.1/ETU/2009/0025*, Report 357 Plant Research International, Wageningen (Holanda), 122 pp.
- [22] IEA (2010), *Technology Roadmap for Solar Photovoltaic Energy*. Disponible en <http://www.iea.org/papers/2010/pv_roadmap.pdf>. [Consultado en junio de 2012].
- [23] DENHOLM, P., R. M. MARGOLIS, S. ONG y B. ROBERTS (2009), «Break-Even Cost for Residential Photovoltaics in the United States: Key Drivers and Sensitivities», *Technical Report NREL/TP-6A2-46909*.
- [24] GARCÍA-OLIVARES, A., J. BALLABRERA-POY, E. GARCÍA-LADONA y A. TURIEL (2012), «A Global Renewable Mix with Proven Technologies and Common Materials», *Energy Policy*, vol. 41, pp. 561-574.
- [25] TERCERO-ESPINOZA, L., C. GANDENBERGER y F. MARSCHIEDER-WEIDEMANN (2011), «Critical raw materials and the EU», Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, GER, en *Fifth Intl. Conf. on Sustainable Development in the Minerals Industry*, SDIMI 2011, Aachen, pp. 737-745.
- [26] WALSH, M. P. (2005), «Motor Vehicles: Overview, Alternatives, Issues». Disponible en <<http://www.walshcarlines.com/pdf/Walsh%20Climate%20ConferenceVersion2.pdf>>. [Consultado en junio de 2010].
- [27] BRUSH, E. F., J. G. COWIE, D. T. PETERS y D. J. VAN SON (2002), *Die-cast Copper Motor Rotors: Motor Test Results, Copper Compared to Aluminum*. Disponible en <http://www.copperinyourhome.com/applications/electrical/motor-rotor/pdf/EEMODS-Motor_Test.pdf>. [Consultado en junio de 2012].
- [28] TAHIL, W. (2006), *The Trouble with Lithium. Implications of Future PHEV Production for Lithium Demand. Meridian International Research*. Disponible en <<http://www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/refs/nuclear/TroubleLithium.pdf>>.

- [29] GAINES, L., y R. CUENCA (2000), *Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles*, Argonne, Illinois: United States Department of Energy. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory. Disponible en <http://www.doe.gov/bridge>.
- [30] http://www1.duracell.com/oem/Zinc/zinc_air_tech.asp.
- [31] YANG, C.-J. (2009), «An Impending Platinum Crisis and Its Implications for the Future of the Automobile», *Energy Policy*, 37, pp. 1805-1808.
- [32] USGS Fact Sheet (2009), *Facts About Copper. Copper Uses, Resources, Supply, Demand and Production Information*. Disponible en <<http://geology.com/usgs/uses-of-copper>>.
- [33] WELLMER, F.-W., y V. STEINBACH (2011), «Is a road to sustainable use of non-renewable mineral raw materials possible?», *Fifth Intl. Conf. on Sustainable Development in the Minerals Industry*, SDIMI 2011, Aachen, pp. 517-534.
- [34] PICKARD, W. F. (2008), «Geochemical constraints on sustainable development: Can an advanced global economy achieve long-term stability?», *Global and Planetary Change*, vol. 61, pp. 285-299.
- [35] <http://www.mii.org/pdfs/Baby_Info.pdf>. [Consultado en junio de 2012].
- [36] COHEN, D. (2007), «Earth's natural wealth: an audit», *New Scientist*, 2605.
- [37] <http://www.ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf>.
- [38] *Critical Elements for New Energy Technologies*. <<http://www.aps.org/policy/reports/popa-reports/loader.cfm?csModule=security/getfile&PageID=236337>>.
- [39] GERBER, J. (2007), en el Simposio «From availability to accessibility –insights into the results of an expert workshop on mineral raw material scarcity», Davos (Suiza), septiembre de 2007. Disponible en <<http://www.ied.ethz.ch/newsletter/newsletter2/resscholz>>.
- [40] SAGAR, A. D., y R. A. FROSCHE (1997), «A Perspective on Industrial Ecology and Its Application to a Metals-industry Ecosystem», *Journal of Cleaner Production*, 5(1-2), pp. 39-45.

- [41] WERNICK, I., y N. J. THEMELIS (1998), «Recycling Metals for the Environment», *Annual Reviews Energy and Environment*, vol. 23, pp. 465-497.
- [42] «From availability to accessibility –insights into the results of an expert workshop on mineral raw material scarcity», Davos (Suiza), septiembre de 2007. Disponible en <<http://www.ied.ethz.ch/newsletter/newsletter2/resscholz>>.
- [43] HEINBERG, R. (2009), «Searching for a miracle. The International Forum on Globalization and The Post Carbon Institute», *Report False Solution Series*, nº 4.
- [44] <<http://unstats.un.org/unsd/nationalaccount/sna.asp>>. [Consultado en febrero de 2012].
- [45] OECD (2008), *Measuring Material Flows and Resource Productivity*. Volume II. *The Accounting Framework*.
- [46] <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC2009_ECE_EnergySeries39.pdf>. [Consultado en febrero de 2012].
- [47] DALY, H. E. (1987), «The Economic Growth Debate: What Some Economists Have Learned But Many Have Not», *Journal Of Environmental Economics And Management*, 14, pp. 323-336.
- [48] VALERO, A. (1995), «Thermoeconomics: the meeting point of Thermodynamics, Economics and ecology», en E. SCIUBBA y M. MORAN (eds.), *Second Law analysis of energy systems: towards the 21st century*, Roma: Circus, pp. 293-305.
- [49] <<http://www.nwrc.usgs.gov/techrpt/sta13.pdf>>. [Consultado en junio de 2012].
- [50] CRUTZEN, P. J., y E. F. STOERMER (2000), «The “Anthropocene”», *Global Change Newsletter*, 41, pp. 17-18.
- [51] GIAMPIETRO, M., y D. PIMENTEL (1991), «Energy efficiency: assessing the interaction between humans and their environment», *Ecological Economics*, 4, pp. 117-144.
- [52] DALY, H. E. (1992), «Is the entropy law relevant to the economics of natural resource scarcity? Yes, of course it is!», *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 23, pp. 91-95.

- [53] GEORGESCU-ROEGEN, N. (1971), *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard: Harvard University Press.
- [54] VALERO, A. (1998), «Thermoeconomics as a conceptual basis for energy-ecological analysis», en S. ULGIATI (ed.), *Advances in Energy Studies. Energy Flows in Ecology and Economy*, Roma: Musis, pp. 415-444.
- [55] VALERO, A., y AL. VALERO (2010), «Exergoecology: A thermodynamic approach for accounting the Earth's mineral capital. The case of bauxite-aluminium and limestone-lime chains», *Energy*, vol. 35, pp. 229-238.
- [56] <<http://www.exergoecology.com>>.
- [57] VALERO, A., AL. VALERO y J. B. GÓMEZ (2011), «The crepuscular planet. A model for the exhausted continental crust», *Energy*, vol. 36, pp. 694-707.
- [58] VALERO, A., A. AGUDELO y A. VALERO (2011), «The crepuscular planet. A model for the exhausted atmosphere and hydrosphere», *Energy*, vol. 36, pp. 3745-3753.
- [59] VALERO, AL., y A. VALERO (2012), «From Grave to Cradle: A Thermodynamic Approach for Accounting for Abiotic Resource Depletion», *Journal of Industrial Ecology*. [En prensa.]
- [60] USGS (2010), *Mineral commodity summaries. Technical report*, US Geological Survey.
- [61] VALERO, AL., y A. VALERO (2012), «What is the cost of losing irreversibly the mineral capital on Earth?», *25th International Symposium ECOS 2012*, 26-29 de junio, Perugia (Italia).
- [62] VALERO, A. y E. BOTERO (2002), «Exergetic evaluation of natural mineral capital (2): Application of the methodology to current world reserves». Proceedings of the 15th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. ECOS 2002, G. Tsatsaronis, M. Moran, F. Czielsa and T. Bruckner (eds.), Berlin, Germany, vol. 1, pp. 62-68, July 3-5, 2002.
- [63] VALERO, A., E. BOTERO, y L. Serra (2002), «The Exergy Replacement Cost of the World's Renewable Water

- Resources and Ice Sheets», Proceedings of the 15th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. ECOS 2002, G. Tsatsaronis, M. Moran, F. Czielsa and T. Bruckner (eds.), Berlin, Germany, vol. 1, pp. 158-164, July 3-5, 2002.
- [64] OCDE (1994), *Environmental Indicators-OECD Core Set*, París.
- [65] HAMILTON, K. (2004), «Accounting for Sustainability», *Measuring Sustainable Development, Integrated Economic, Environmental and Social Frameworks*, OECD, pp. 29-38.
- [66] McDONOUGH, W., y M. BRAUNGART (2002), *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, North Point Press.
- [67] SORRELL, S., y UK ENERGY RESEARCH CENTRE (2007), *The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency*, Imperial College, Centre for Energy, Policy & Technology. Consultado en julio de 2012.
- [68] ÁSGEIRSDÓTTIR, B. (2004), «Opening Remarks “The Role of the OECD”», *Measuring Sustainable Development, Integrated Economic, Environmental and Social Frameworks*, OECD, pp. 15-20.
- [69] NAREDO, J. M., y A. VALERO (1999), *Desarrollo económico y deterioro ecológico*, Madrid: Fundación Argentario.

ANEXO

I. Exergía y el mito de Blancanieves [69]

En este anexo explicamos someramente para el lector interesado el concepto de *exergía*.

Quizás la gran aportación de Carnot fue notar que la fuerza motriz de las máquinas térmicas era la diferencia de temperaturas, y lo hizo por comparación con los saltos hidráulicos cuya capacidad específica de proporcionar trabajo está relacionada con la diferencia de niveles, es decir, la altura del salto.

En el salto hidráulico solo podemos convertir en trabajo la diferencia de energías potenciales entre la cota mayor y la menor, es decir

$$W = mg Z - mg Z_0 \quad (1)$$

y todo ello si la turbina fuera ideal y no tuviera fricciones y pérdidas. Nadie pretendería diseñar una máquina que extrajera también la energía potencial del agua una vez que ya hubiera salido de la turbina en la propia cota de la turbina.

De la misma manera, la cota de la energía térmica es su temperatura y para convertirla en trabajo mecánico es

necesario que exista una cota inferior de temperatura a su alrededor. Entonces el calor fluye desde T hasta T_0 y si se interpone una máquina térmica sin pérdidas ni disipaciones podrá convertirse en el máximo trabajo posible.

$$W = Q(T) - Q_0(T_0) \quad (2)$$

El segundo principio se entiende bien así: Dado T_0 diferente de cero nunca podremos convertir íntegramente el calor en trabajo. Es obvio a partir del símil hidráulico.

El máximo rendimiento se obtendrá cuando no hay generación de entropía, es decir, cuando

$$Q/T = Q_0/T_0 \quad \text{o bien} \quad T_0/T = Q_0/Q \quad (3)$$

En esas condiciones el rendimiento valdrá

$$\eta = W/Q = (Q - Q_0)/Q = 1 - Q_0/Q = 1 - T_0/T \quad (4)$$

A esta expresión del rendimiento máximo se le llama factor de Carnot y es el máximo alcanzable por un flujo de calor que fluye reversiblemente entre dos temperaturas dadas. El trabajo máximo alcanzable bajo estas condiciones será, por lo tanto,

$$W_{\text{máx}} = Q(1 - T_0/T) \quad (5)$$

Esta expresión es muy importante porque nos permite pensar en otros términos. En efecto, volviendo al símil hidráulico, podemos decir que la capacidad máxima de producir trabajo mecánico de un flujo de agua a una cota Z con respecto a otra Z_0 es justamente $W_{\text{máx}} = mgh = mg(Z - Z_0)$, y a esa magnitud la llamaremos energía potencial del flujo másico con respecto a la cota Z_0 .

¿Por qué no hacer lo mismo con la energía térmica? Podemos llamar al término $Q(1 - T_0/T)$ la energía potencial que tiene el flujo de calor a una temperatura T para producir trabajo mecánico con respecto a otra tempera-

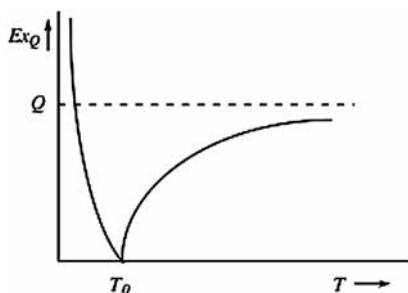
tura T_0 . Y a esa magnitud, el yugoslavo Zoran Rant en 1956 la llamó *exergía*.

Dadas unas condiciones de referencia, θ , que luego analizaremos en detalle, la exergía es una propiedad absolutamente generalizable. Las exergías cinética, potencial, eléctrica y magnética coinciden con las respectivas energías cinética, potencial, eléctrica y magnética. La exergía química de una sustancia está relacionada con la función de Gibbs que está tabulada para multitud de sustancias, y en particular la exergía de los combustibles fósiles prácticamente coincide con la conocida potencia calorífica superior que es el término que se utiliza técnicamente. Solo la exergía presenta una fórmula poco usual cuando tratamos de flujos de calor porque, como hemos visto, esta depende de la temperatura a la que fluyan:

$$Ex_Q = Q (1 - T_0/T) \quad (6)$$

Si no fuera la energía térmica la energía más común y degradada, y por la pérdida de calidad en una mezcla, casi no tendría sentido cambiar el nombre de energía por el de exergía. Sin embargo, el cambio vale la pena, ya que la persona no especialista cuando piensa en términos energéticos, en realidad lo está haciendo en términos exergéticos. Quizás lo que es difícil de entender sea el primer principio o de conservación de la energía. ¿Cómo es posible aceptar que si la energía se conserva, un tronco de leña solo se pueda quemar una vez? La energía se conserva, la exergía se usa una sola vez y se destruye en forma de calor que se emplea en calentar inútilmente la atmósfera. La calidad de la energía no se conserva, su cantidad sí. Y la exergía expresa a la vez la cantidad y la calidad de un flujo energético. Comprender la Termodinámica con el concepto de *exergía* resulta simple, no así con los conceptos más fundamentales de *energía* y *entropía*.

La fórmula (13) además nos enseña muchas cosas sobre la discrepancia entre la energía fluyente Q y su exergía. En efecto, si la representamos gráficamente frente a T obtenemos la siguiente figura



Vemos que cuando T es mayor que T_0 la exergía siempre es menor que Q y solo a temperaturas infinitas coincidirá con la energía. Por ejemplo, la exergía que recibimos del Sol, a una temperatura equivalente de unos 6700 *Kelvins*, constituye el $95,5\%$ de su energía con respecto a la temperatura ambiental media de 300 *K*.

En la medida en que el flujo de calor está próximo a T_0 su exergía se va anulando. Así, la exergía del calor que emite el cuerpo humano a 37° *C* es solo un $3,2\%$ de su energía. O en otras palabras, la mejor máquina térmica que pudiéramos diseñar para extraer trabajo del calor corporal solo tendría el rendimiento de un $3,2\%$. Aunque es teóricamente posible mover las manecillas de un reloj con el calor corporal, es muy probable que saliera un poco caro y lo que es peor voluminoso, por el trasiego de fluidos de trabajo que habría que realizar.

Sin embargo, lo más sorprendente de la gráfica está en las condiciones en las que $T < T_0$. La primera observación es que la exergía no se hace negativa. Ello se debe a que

si antes el calor pasaba del sistema a T hasta T_0 , ahora pasa del ambiente al sistema, es decir, cambia la dirección del flujo de calor respecto del punto de vista del sistema porque el calor siempre fluye de los cuerpos calientes a los fríos. Por otra parte, el término $(1 - T_0/T)$ se hace negativo y tanto más cuanto más baja sea la temperatura del sistema. Aquí la exergía llegaría hasta infinito cuando la temperatura llegara al cero absoluto. Ello significa que enfriar un cuerpo por debajo de la temperatura ambiental cuesta mucho, tanto más cuanto más baja sea la temperatura, y para alcanzar el cero absoluto toda la exergía del universo no sería suficiente. Esta es una formulación de la *inalcanzabilidad* del cero absoluto que constituye el tercer principio de la Termodinámica.

Y lo que es peor, si el cero absoluto es infinitamente difícil de alcanzar, una vez próximos a él, es infinitamente fácil perderlo, ya que cualquier pequeña entrada de calor haría inútiles todos nuestros esfuerzos.

La exergía es la expresión termodinámica del poder, no vale lo que somos sino lo que nos distinguimos del ambiente que nos rodea. Un premio Nobel es tanto más alabado cuantos menos haya en su entorno. Y un rico es tanto más poderoso cuantos más pobres haya a su alrededor. Un mismo periódico aporta un valor u otro según sea de hoy, de ayer, para un historiador del siglo xxx o para un extraterrestre.

Y hasta Blancanieves tiene fácil lucir su hermosura alrededor de los siete enanitos.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	9
INTRODUCCIÓN	11
EL ACOPLAMIENTO ENERGÍA-MATERIALES-MEDIO AMBIENTE	19
I. Materiales escasos para la nueva economía verde	24
Teléfonos móviles	24
Energías renovables	27
Biomasa	28
Energía solar fotovoltaica	30
Energía eólica	32
Vehículo eléctrico	35
Escasez de elementos químicos estratégicos. Un problema internacional	36
Reciclado de materiales: ¿Amenaza u oportunidad?	41
CÓMO CONTABILIZAN LOS ECONOMISTAS LOS COSTES AMBIENTALES	49
I. El Sistema de Naciones Unidas para la Contabilidad Ambiental y Económica Integradas (seea)	50
II. La Estructura Central del SEEA en referencia a los recursos minerales y energéticos	52
Introducción general	53
Definición de activo ambiental	53
Contabilidad de flujos y stocks. Definiciones	54
Valoración a precios de mercado	55
Contabilidad de los flujos físicos	55
Cuentas de los flujos físicos de energía y agua	56
Cuentas de los flujos físicos de materiales	57
Contabilidad de la actividad medioambiental y flujos relacionados.....	59
Aproximaciones a la valoración de activos ambientales. El método VAN en relación con las actividades extractivas.....	61

Contabilidad de activos minerales y energéticos en el SEEA ..	62
Contabilidad monetaria para recursos minerales y energéticos	65
Comentarios finales sobre el SEEA	65
UNA PERSPECTIVA TERMODINÁMICA DE LOS RECURSOS DEL PLANETA	67
I. Cerrando los ciclos de materiales. La visión por debajo del arco iris	76
II. Una aproximación termodinámica a la contabilidad del capital mineral de la Tierra	79
III. Tanatia, la roca madre	82
IV. Casos de estudio	85
V. La pérdida de la riqueza del capital mineral debida a la extracción de materias primas	91
RESUMEN Y CONCLUSIONES	97
I. ¿Cumple la exergía con los estándares de indicadores ambientales adecuadamente?	100
COMENTARIOS FINALES: DESDE EL SEEA HACIA UN SISTEMA GLOBAL DE CUENTAS AMBIENTALES TERMO-ECONÓMICAS (SETEA)	103
REFERENCIAS	109
ANEXO	117
I. Exergía y el mito de Blancanieves	117

*Este libro se terminó de imprimir
en los talleres gráficos de Tipolínea, S. A.
de Zaragoza,
el 31 de agosto de 2012*

