ECONOMÍA Y NATURALEZA

Desarrollo económico y deterioro ecológico

J. M. Naredo y A. Valero (dirs.)

FUNDACION ARGENTARIA

VISOR (dis., s.a.)

José Manuel Naredo Pérez
Antonio Valero Capilla (Dirs.)

Desarrollo económico y deterioro ecológico

Colección
ECONOMÍA Y NATURALEZA
Serie «Textos Aplicados»

José Manuel Naredo Pérez
Antonio Valero Capilla (Dirs.)

Desarrollo económico y deterioro ecológico

FUNDACION ARGENTARIA

VISOR (dis., s.a.)

Colección «Economía y Naturaleza». Volumen XI
Serie «Textos Aplicados»

Las ideas contenidas en esta publicación son responsabilidad exclusiva de los autores.
La Fundación Argentaria no se identifica necesariamente con las mismas.

Diseño portada: Aitor Méndez y Raquel de la Fuente

© Fundación Argentaria - Visor Dis., 1999
Tomás Bretón, 55 - 28045 Madrid
ISBN: 84-7774-981-7
Depósito Legal: M-12.554-1999

Visor Fotocomposición
Impreso en España - *Printed in Spain*
Gráficas Rógar. Navalcarnero (Madrid)

ÍNDICE

EQUIPO DE TRABAJO Y APOYO INSTITUCIONAL. *José Manuel Naredo y Antonio Valero* 13

SOBRE EL PROPÓSITO Y EL INTERÉS DE ESTE ESTUDIO. *José Manuel Naredo* 15

Primera parte

SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA CIVILIZACIÓN INDUSTRIAL Y LAS LIMITACIONES DE LOS ENFOQUES ECONÓMICOS ORDINARIOS PARA ANALIZARLO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN. *José Manuel Naredo* 35

CAPÍTULO 2. LA IDEA USUAL DE SISTEMA ECONÓMICO (PLASMADA EN LOS SISTEMAS DE CUENTAS NACIONALES) Y SUS LIMITACIONES. *José Manuel Naredo* 37

CAPÍTULO 3. SOBRE LAS «EXTERNALIDADES» QUE GENERA LA IDEA USUAL DE SISTEMA ECONÓMICO Y EL MODO DE ABORDARLAS. *José Manuel Naredo* 43

CAPÍTULO 4. EL ENFOQUE «ECOINTEGRADOR» Y SU SISTEMA DE RAZONAMIENTO. *José Manuel Naredo* 47

CAPÍTULO 5. SOBRE LA «SOSTENIBILIDAD» DE LOS SISTEMAS. *José Manuel Naredo* 57

5.1. Introducción 57
5.2. Sobre el origen y el uso del término «sostenible» 57
5.3. Sobre el contenido del término «sostenible» 60
5.4. Claves para la sostenibilidad de los sistemas físicos 67
5.5. Hacia una revalorización del patrimonio natural 69

CAPÍTULO 6. ESTIMACIONES DEL REQUERIMIENTO TOTAL DE MATERIALES DE LA CIVILIZACIÓN INDUSTRIAL 71
6.1. Introducción. *José Manuel Naredo* 71
6.2. La utilización del agua y del aire. *José Manuel Naredo* 73
6.3. Cuantificación de la fotosíntesis intervenida por los sistemas agrarios y pesqueros. *Dolores Romano* 79
6.4. Cuantificación de la extracción de rocas y minerales de la corteza terrestre. *Antonio Ortiz* 103
6.5. Síntesis de la intervención de la especie humana sobre la Tierra. *José Manuel Naredo* 139

Segunda parte

BASES PARA UNA TEORÍA GENERAL DEL COSTE FÍSICO DE LOS PROCESOS ECONÓMICOS. ECONOMÍA Y TERMODINÁMICA

CAPÍTULO 7. INTRODUCCIÓN: LA TERMODINÁMICA, ESA ECONOMÍA DE LA FÍSICA. *Antonio Valero y José Manuel Naredo* 157
7.1. Termodinámica 157
7.2. Sus implicaciones filosóficas 158
7.3. Medida, caos e incertidumbre 161

CAPÍTULO 8. Y EN LOS PRINCIPIOS FUE LA TERMODINÁMICA. *Antonio Valero* 167
8.1. El Primer Principio 167
8.2. El Segundo Principio 169
8.3. Exergía y el mito de Blancanieves 174

CAPÍTULO 9. EL «ESTADO MUERTO» Y EL FIN TERMODINÁMICO DE LA TIERRA. *Antonio Valero* 179

CAPÍTULO 10. LA ENTROPÍA DE MEZCLA Y EL «TOTUM REVOLUTUM». *Antonio Valero* 185

CAPÍTULO 11. EL COSTE, EL PRECIO Y EL VALOR. *Antonio Valero* 191

CAPÍTULO 12. COSTE TERMODINÁMICO O EXERGÍA. *Antonio Valero* 193

CAPÍTULO 13. EL COSTE EXERGÉTICO O FÍSICO. *Antonio Valero* 197

CAPÍTULO 14. PRECISIONES METODOLÓGICAS SOBRE EL COSTE EXERGÉTICO. *Antonio Valero* 201

CAPÍTULO 15. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA. *Antonio Valero* 207

CAPÍTULO 16. EL ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL «CICLO DE VIDA» Y EL «COSTE ECOLÓGICO». *Antonio Valero* 211

CAPÍTULO 17. EL «COSTE ECOLÓGICO» DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA. UN EJEMPLO DE CÁLCULO. *Antonio Valero* 219

CAPÍTULO 18. BASES PARA UNA METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL «COSTE ECOLÓGICO». *Antonio Valero* 223

CAPÍTULO 19. EL COSTE TERMODINÁMICO DE LOS RECURSOS MINERALES. *Lidia Ranz* 225
- 19.1. Introducción 226
- 19.2. Metodología 227
- 19.3. Aplicación de la metodología a una selección de minerales 237

CAPÍTULO 20. EL COSTE EXERGÉTICO DE REPOSICIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES. *Antonio Valero y Lidia Ranz* 243

CAPÍTULO 21. DEFINICIÓN CUANTITATIVA DEL CONFLICTO ENTRE EFICACIA Y SOSTENIBILIDAD EN LA ACTUAL CIVILIZACIÓN: UTILIZAR LA POTENCIA ACUMULADA EN EL CAPITAL MINERAL DE LA TIERRA O RECURRIR AL FLUJO SOLAR Y SUS DERIVADOS. *José Manuel Naredo y Antonio Valero* 255
- 21.1. Propuestas 255
- 21.2. Contexto y utilidad de las propuestas 263

APÉNDICES

APÉNDICE I. SOBRE LOS RECURSOS MINERALES. *Lidia Ranz* 267

APÉNDICE II. SOBRE LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE LA RADIACIÓN SOLAR. *Antonio Valero* 277

Tercera parte

COSTE FÍSICO Y VALORACIÓN MONETARIA

CAPÍTULO 22. LA CONEXIÓN ENTRE ECONOMÍA Y TERMODINÁMICA. *José Manuel Naredo y Antonio Valero* 287
22.1. Introducción 287
22.2. Formulaciones 289
22.3. Conexión formal entre ambos enfoques 291
22.4. Consecuencias lógicas: diferencias y convergencias entre ambos enfoques 292
22.5. Finalidades utilitarias y costes físicos 298

CAPÍTULO 23. LA EVOLUCIÓN CONJUNTA DEL COSTE FÍSICO Y DEL VALOR MONETARIO EN EL CURSO DEL PROCESO ECONÓMICO: LA «REGLA DEL NOTARIO» Y SUS CONSECUENCIAS. *José Manuel Naredo y Antonio Valero* 301

CAPÍTULO 24. EJEMPLIFICACIÓN DE LA «REGLA DEL NOTARIO» EN ALGUNOS PROCESOS REALES. *Vicente Subiela, Lidia Ranz y Antonio Valero* 311
24.1. Metodología de cálculo del coste físico 312
24.2. Aplicación de la metodología 315
24.3. Asimetría entre los costes físicos y los monetarios 322

CAPÍTULO 25. FLUJOS FÍSICOS Y VALORACIÓN MONETARIA EN EL COMERCIO MUNDIAL: EL «EFECTO NOTARIO» EN EL REPARTO DE LOS FRUTOS DEL COMERCIO A NIVEL INTERNACIONAL. *Óscar Carpintero, Sara Echeverría y José Manuel Naredo* 325
25.1. Introducción 325
25.2. Libre comercio y medio ambiente: insuficiencias económico-ecológicas de la Teoría Pura del Comercio Internacional 326
25.3. Crecimiento del comercio y mundialización de la economía 333
25.4. Flujos físicos y valoración monetaria del comercio mundial: el desequilibrio «Norte-Sur». Análisis por grupos de productos y grupos de países 337
25.5. Comercio y desmaterialización 346

CAPÍTULO 26. RIQUEZA REAL Y RIQUEZA FINANCIERA: EL PAPEL DE LOS FLUJOS FINANCIEROS EN LA GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LA CAPACIDAD DE COMPRA SOBRE EL MUNDO. *Óscar Carpintero, Sara Echeverría y José Manuel Naredo* 349
26.1. Introducción 349
26.2. El papel de los flujos de capital en el equilibrio de las balanzas de pagos de los países 351
26.3. Evolución e implicaciones de la inversión extranjera directa 357
26.4. La expansión de la inversión en cartera y el movimiento de los capitales «a corto» 363
26.5. La «burbuja financiera» mundial 369
26.6. Reflexiones finales sobre las nuevas dimensiones que alcanza el juego económico y su incidencia sobre el proceso de explotación y deterioro de los recursos planetarios 374

EPÍLOGO. *José Manuel Naredo y Antonio Valero* 383

EQUIPO DE TRABAJO Y APOYO INSTITUCIONAL

La investigación, cuyos resultados divulga la presente publicación, se ha desarrollado en el marco del Programa «Economía y Naturaleza» de la Fundación Argentaria, bajo la dirección y el impulso de José Manuel Naredo y de Antonio Valero. Ha contado con el apoyo de las instituciones en las que ambos trabajan, la Fundación Argentaria y el CIRCE (Centro de Investigación sobre el Rendimiento de las Centrales Eléctricas) de la Universidad de Zaragoza, que pusieron los medios necesarios para sacarla adelante. El proyecto contó así, en principio, con la colaboración de dos ayudantes de investigación, Sara Echeverría (economista de la Fundación Argentaria) y Vicente Subiela (ingeniero industrial), incorporándose más adelante Óscar Carpintero (economista) y Lidia Ranz (física). También se encargaron a expertos dos investigaciones destinadas a cuantificar la evolución espacial y temporal de las producciones derivadas de la fotosíntesis y de las extracciones de la corteza terrestre a escala planetaria. La ingeniera agrónoma Dolores Romano y el ingeniero de minas Antonio Ortiz elaboraron estas estimaciones y comentaron su evolución en los correspondientes apartados del capítulo 6 (6.3 y 6.4). Antonio Ortiz nos asesoró también sobre las actividades extractivas en relación con temas tratados en otros capítulos. Miguel Ángel Díaz Mier y Antonio M.ª Ávila nos ayudaron a revisar los capítulos 25 y 26. Por último, en la fase final de preparación del manuscrito y de corrección de pruebas de imprenta, se contó con el apoyo de Carmen de Diego, economista, becaria de la Fundación Argentaria, y de Dolores Cobo.

La investigación fue concebida y orientada por los dos directores de la misma, que figuran como tales en la portada de la publicación. Dada la amplitud del equipo investigador y la muy distinta contribución de sus integrantes, para dar cuenta de ella se ha optado por precisar, en el índice y en la cabecera de los capítulos o apartados, los nombres de las personas que participaron en ellos. Aunque, como es evidente, los directores revisaron la elaboración de todos los capítulos y apartados, se decidió no incluir sus nombres en la cabecera de aquellos que no redactaron directamente, indicando el orden de aparición de los nombres la mayor o menor contribución de los participantes y siguiendo el orden alfabético cuando ésta era difícil de evaluar.

Madrid, octubre de 1998
José Manuel Naredo y Antonio Valero

SOBRE EL PROPÓSITO Y EL INTERÉS DE ESTE ESTUDIO

José Manuel Naredo

En los últimos tiempos, la preocupación por los aspectos ecológicos o ambientales ha ganado en extensión e intensidad. Y, a la vez que esta preocupación aumentaba, se ha observado también un desplazamiento de su centro de gravedad desde un conservacionismo originariamente apoyado en consideraciones éticas y estéticas hacia posiciones más pragmáticas y vinculadas con la gestión económica. De esta manera, las administraciones nacionales e internacionales con competencias económicas se han visto obligadas a tomar cartas en el asunto. Organismos como la OCDE, el Banco Mundial, la FAO e incluso el FMI dedican su atención a estos temas en publicaciones y líneas de trabajo.

Sin embargo, la mayor y más generalizada preocupación por la salud del medio ambiente planetario y por el empeño declarado de incluir las consideraciones ecológico-ambientales en la gestión económica no han dado todavía frutos significativamente capaces de enderezar la situación global. Esta carencia se acusa tanto en el terreno de las realizaciones como en el de los enfoques y teorías, salvo contadas excepciones a las que haremos referencia más adelante sin pretensiones de exhaustividad. Se produce, así, una tensión creciente entre las preocupaciones globales enunciadas y la falta de planteamientos y acuerdos igualmente globales capaces de solucionarlas. En efecto, el consensuado dramatismo que destilan documentos que van desde el *Manifiesto para la supervivencia*, elaborado por Goldsmith y otros en 1972 y suscrito por una larga lista de científicos prestigiosos, el *Global 2000*, encargado en 1981 por Carter desde la presidencia de los Estados Unidos, hasta *Nuestro futuro común*, coordinado por Helen Brudlandt en 1987, pasando por los sucesivos Informes del Club de Roma, explican que el organizador de la Cumbre de Río de 1992, Maurice Strong, pudiera presentar el encuentro como «la última oportunidad para salvar el planeta». Pero esta «última oportunidad» tampoco originó acciones correctoras globalmente eficaces de las tendencias al deterioro planetario que unánimemente se reconocían, como tampoco estableció esquemas

teóricos generalmente aceptados capaces de guiar tales acciones en un futuro, sentando nuevos criterios para reorientar la gestión y los patrones de vida y de comportamiento característicos de la civilización industrial. Resumiendo, que se acepta con generalidad que el comportamiento de la civilización industrial apunta hacia un horizonte de *insostenibilidad* ecológica, pero no existen medios claros y generalmente asumidos capaces de reorientarlo hacia metas *sostenibles.*

Ciertamente, los economistas proponen gravar la contaminación, para desincentivarla, y revalorizar los recursos naturales, para favorecer un uso más eficiente de los mismos. Sintetizando los deterioros ocasionados en el medio por el doble manejo de recursos y residuos, Solow[1] señaló que el objetivo de la *sostenibilidad* para un economista ha de pasar por una revalorización del «patrimonio natural» que facilite su mantenimiento e incluso su mejora, incluyendo dicho patrimonio en la categoría de *capital.* Recordemos que la noción de *capital* monetario habitualmente manejada por los economistas corresponde sólo a un *stock de capital* físico que, al ser producido por el hombre en forma de instalaciones, inmuebles o infraestructuras diversas, resulta directamente valorable, bien por su coste (monetario) de producción o por el de reposición en una fecha posterior. Sin embargo, la extensión de dicha noción de *capital* (monetizable) al conjunto de los recursos naturales y el medio ambiente planetario, genera serios problemas de valoración, al incluir tanto flujos, como *stocks* y «bienes fondo» muy diversos que, por definición, no habían sido producidos por el hombre y que, para colmo, se relacionan entre sí formando estructuras y sistemas muy complejos, con los que la especie humana está llamada a coevolucionar. Por ello, este autor, galardonado con el premio Nobel en 1987, advertía que para traducir con éxito la idea de *sostenibilidad* al universo de la economía estándar hace falta «valorar el *stock* de capital (incluyendo el "capital natural") con unos precios sombra adecuados» que deben ser asumidos por la colectividad. Siendo clave el establecimiento de una conciencia social y de un marco institucional que hagan operativos la revalorización y el mantenimiento de ese patrimonio.

Haciendo abstracción, por el momento, de hasta qué punto resulta razonable, útil y viable valorar todo el «capital natural», cabe preguntarse ¿cuáles han de ser los «precios sombra adecuados» que cabe atribuirle? Desde luego no los derivados de imputaciones más o menos apoyadas en la «disposición a pagar» de algunas personas: esto puede informar más sobre un *statu quo* a modificar que sobre esos «precios sombra adecuados». Pensamos que tales precios «adecuados» no pueden surgir ni de razonamientos teóricos meramente monetarios, ni de las opiniones de una

[1] SOLOW, R. (1991), «Sustainability: An Economist's Perspective», en R. Dorfman y N. S. Dorfman (eds.), *Economics of the Environment,* 3.ª ed. Nueva York.

población desinformada. Para diseñar bien los instrumentos económicos que inciden sobre la valoración, es requisito previo desbrozar el contenido de ese «capital natural». Nos encontramos aquí con una laguna teórica importante que este trabajo trata de suplir en parte, y que viene dada por la falta de orientaciones objetivas para ordenar con criterios económicos los elementos materiales y los sistemas que componen dicho «capital natural», con los que la especie humana ha de contar para construir sus elaboraciones e industrias. En los últimos tiempos, esta laguna se está haciendo sentir con más fuerza, a medida que se extiende la idea defendida por autores como Daly, El Serafy y otros[2] de que la escasez de «capital natural» está llamada a erigirse en el factor más limitante de la vida económica, cuya malversación se sugiere evitar, proponiendo incluso, como también hace Solow, invertir en «capital natural»[3]. El problema estriba en que, si bien el cálculo del coste físico y monetario de los bienes de capital producidos por el hombre puede realizarse por procedimientos generalmente aceptados, no ocurre lo mismo para el «capital natural». Por lo que el cálculo habitual de los costes físicos y monetarios en los que incurre el proceso económico suele permanecer incompleto, al apoyarse dicho proceso doblemente en ese «capital natural», que no entra en línea de cuenta, tomando de él los recursos y devolviéndole los residuos. De ahí que si no queremos que los buenos propósitos enunciados se sigan perdiendo en el muro de las lamentaciones, tendremos que apoyarlos en formulaciones teóricas solventes y operativas que permitan desbrozar el conglomerado de elementos y sistemas que se incluyen bajo la denominación de «capital natural», como primer paso para arbitrar procedimientos razonables que, con valoración o sin ella, faciliten su inclusión en el cálculo económico ordinario.

Las críticas a la extensión de la denominación ordinaria de *capital* al conjunto de los recursos naturales y ambientales, insisten sobre todo en los dos aspectos ya mencionados que los diferencia de esa denominación y que dificultan o hacen extremadamente arbitrario su cálculo agregado en términos monetarios: primero, normalmente estos recursos no se identifican con valores monetarios; segundo, no suelen ser reproductibles por la industria humana. De ahí que se estime escasamente operativo el afán de cifrar la *sostenibilidad* ecológica de los sistemas económicos en el requisito de que su «capital natural» no disminuya. Ante la dificultad de calcular series homogéneas del agregado monetario de «capital natural», algunos

---

[2] DALY, H. (1991), «Elements of Environmental Economics», y EL SERAFY, S. (1991), «The Environment as Capital», en R. Constanza (ed.), *Ecological Economics: the Science and Management of Sustainability*, Nueva York, Columbia University Press.

[3] Asimismo, «invertir en capital natural» (*Investing in Natural Capital. The Ecological Economics Approach to Sustainability)* fue la divisa de la Conferencia de la International Society for Ecological Economics, celebrada en 1992 en Estocolmo.

autores[4] han señalado «la necesidad de aplicar un enfoque pragmático alternativo», basado en el seguimiento de los flujos físicos en los que se apoyan los sistemas económicos, como instrumento más operativo de apreciar si la marcha de tales sistemas se dirige o no hacia una mayor *sostenibilidad*. En este trabajo proponemos la aplicación de un enfoque pragmático complementario a ambos planteamientos, el de los flujos físicos y el del capital natural. El enfoque propuesto permite calcular, a partir de un estado de referencia, el coste físico de reposición de los recursos minerales de la corteza terrestre, acercando así por vez primera el tratamiento económico de esta categoría de recursos a la del capital reproductible. De esta manera, creemos estar en disposición de proponer, si no unos «precios sombra adecuados», sí al menos unos «costes sombra» razonables, cuya aceptación generalizada podría informar el establecimiento de un sistema de precios algo más adecuado que el actual.

El presente trabajo trata de paliar así el vacío teórico antes apuntado ofreciendo nuevos criterios para trascender un grave escollo con el que se topa el análisis económico en el campo de los recursos naturales: el que plantea el hecho de que el análisis económico ordinario valore los *stocks* de recursos que nos ofrece la naturaleza atendiendo a su coste monetario de extracción (y manejo) y no al que exigiría su reposición. Con lo que se ha primado sistemáticamente la extracción frente a la recuperación y reciclaje (donde los costes de reposición se han de sufragar íntegramente). Este proceder acentúa tanto los problemas de escasez de recursos como los de exceso de residuos, a medida que el modelo de comportamiento propio de la civilización industrial se extiende y distancia cada vez más de aquel otro de la *biosfera*, que se caracteriza por cerrar los ciclos de materiales convirtiendo, con la ayuda de la energía solar, los residuos en recursos. De esta manera, calcular en toda su globalidad los costes físicos (es decir, incluyendo el coste de reposición de los recursos naturales), en los que incurren los procesos productivos propios de la civilización industrial, parece un paso obligado para enjuiciarlos económicamente y para manejar, con conocimiento de causa, los instrumentos que inciden sobre la valoración, a fin de reorientarlos hacia una mayor *sostenibilidad* global. Siendo la estimación del coste físico de reposición de los recursos minerales el primer paso para hacer que la analogía entre el «capital natural» y el fabricado por el hombre sea algo más que una metáfora vacía de contenido concreto. La segunda parte de este trabajo aborda los desarrollos teóricos necesarios

[4] HINTERBERGER, F., F. LUKS y F. SCHMIDT-BLEEK (1997), «Material Flows vs. "Natural Capital". What Makes an Economy Sustainable?», *Ecological Economics*, n.º 23, pp. 1-14. En el mismo sentido véase NAREDO, J. M. y S. RUEDA (1996), «Marco general de desarrollo sostenible aplicado a casos de buenas prácticas en medio urbano», *Primer catálogo español de buenas prácticas*, MOPTMA, vol. 1 (Documento presentado por la delegación española en la Conferencia de Naciones Unidas sobre Asentamientos Humanos (HABITAT, II), Estambul, junio de 1996).

para posibilitar ese cálculo. Desarrollos que derivan los enfoques termodinámicos habitualmente centrados sobre temas «energéticos», hacia el campo menos transitado de la termodinámica química, haciendo operativa su aplicación al mundo de los materiales. Se ofrece así una propuesta metodológica que responde a la preocupación enunciada por Georgescu-Roegen cuando señaló que las limitaciones o escaseces propias de nuestro entorno físico estaban llamadas a aflorar con más fuerza por el lado de los materiales que por el de la energía, habida cuenta los *stocks* limitados de aquellos contenidos en la Tierra, frente al *flujo* continuado de ésta que nos envía diariamente el Sol, a lo que se añade además el hecho de resultar mucho más fácil convertir materiales en energía que energía en materiales. Esta preocupación le hizo formular la por él denominada «cuarta ley de la termodinámica», que extendía la segunda, es decir, la *ley de la entropía*, al campo de los materiales[5], con ánimo de cerrar la puerta por la que el razonamiento de algunos economistas escapaba al dominio de esta ley para «librar» al proceso económico «de las limitaciones cuantitativas impuestas por el carácter de la corteza terrestre...»[6]. Incluso un economista tan sensible a los problemas ecológicos como Kenneth Boulding expresó la creencia de que «afortunadamente no hay ley del crecimiento de la entropía para los materiales»[7], lo que da pie a afirmar que «la idea de un posible agotamiento de la materia es ridícula. El planeta entero está compuesto de minerales»[8]. Se subraya, así, la existencia del primer principio, el de conservación, a la vez que se soslaya la vigencia en este campo del segundo, el de la entropía, del que precisamente se derivan los problemas de escasez en el mundo físico, para confundir las existencias de materiales en general, con las existencias accesibles o utilizables. Los desarrollos metodológicos que más adelante se ofrecen aclaran contundentemente estos extremos, al

---

[5] *Vid.* GEORGESCU-ROEGEN, N. (1977), «Matter Matters, Too», en K. D. Wilson, edit., *Prospects for Growth: Changing Expectations for the Future*, Nueva York, Praeger, pp. 293-313; (1980), «Matter: a Resource Ignored by Termodinamics», en St. Pierre, L. E. y G. R. Brown (eds.), *Future Sources of Organic Raw Materials*, Oxford, Chemrawn I.,Pergamon Press, pp. 79-87; y (1982), «La dégradation entropique et la destinée prométhéenne de la technologie humaine», en *Entropie*, n.º extraordinario sobre «Thermodynamique et sciences de l'homme», pp. 76-86 (texto reeditado en GEORGESCU-ROEGEN, N. (1995), *La décroissance. Entropie, Écologie, Économie*, J. Grinevald e Ivo Rens, eds., París, La Sang de la Terre).

[6] BARNETT, H. y Ch. MORSE (1963), *Scarcity and Growth*, Baltimore, John Hopkins Press, p. 11. Georgescu-Roegen se refiere a éstos y otros autores en su irónico y documentado texto «Energy and Economic Myths» (1972), recogido en GEORGESCU-ROEGEN, N. (1976), *Energy and Economic Myths. Institutional and Analytical Economic Essays*, Nueva York, Pergamon Press, pp. 3-36 (hay traducción en español en *El Trimestre Económico*, octubre-diciembre, 1975).

[7] BOULDING, K. (1966), «The Economics of the Coming Spaceship Earth», en *Environmental Quality in a Growing Economy*, Baltimore, John Hopkins Press, pp. 3-19, ref. Georgescu-Roegen en *ibidem*. (Hay edición en español del texto de Boulding antes citado en Daly, H., comp. (1989), *Economía, ecología, ética*, México, FCE, pp. 262-275.)

[8] BROOKS, D. B. y P. W. ANDREWS (1974), «Mineral Resources, Economic Growth, and the World Population», en *Science*, n.º 185, julio de 1974, pp. 13-19, ref. Georgescu-Roegen en *ibidem*.

aplicar la mencionada ley de la entropía al campo de los materiales sin necesidad de recurrir a la «cuarta ley» formulada por Georgescu-Roegen, que se revela así como una consecuencia de la segunda, tal y como habíamos sugerido ya hace tiempo[9]. La metodología y los primeros resultados cuantitativos de su aplicación, que más adelante se ofrecen, avanzan en la línea de investigación indicada, sentando bases objetivas para enjuiciar los distintos procesos y consensuar su posible reconversión, apoyando sobre ellas con este fin tanto medios económico-institucionales capaces de modificar los resultados monetarios de los procesos, como informaciones sobre sus implicaciones físicas capaces de alterar las preferencias y el comportamiento de la población.

En otras palabras, el propósito de este trabajo no es hacer ensayos de valoración monetaria del «capital natural» de la Tierra, sino ofrecer puntos de apoyo físicos para posibilitar un manejo solvente de los instrumentos económicos que inciden sobre dicha valoración. Lo cual, lejos de ser ajeno a la valoración misma, le otorga nuevas posibilidades al ligarla de modo instrumental a otros análisis económicos del mundo físico objeto de valoración, realizados a partir del aparato conceptual de las ciencias de la naturaleza. El análisis conjunto de la información sobre los costes físicos de reposición de las sustancias minerales que componen ese «capital natural», así como de la evolución del coste físico y la valoración monetaria en los procesos de producción (advirtiendo la «mochila» de deterioro ecológico que arrastra cada producto) es condición *sine qua non* para modificar las tendencias actuales y los modos de valoración y de gestión que las sostienen.

Desde esta perspectiva la valoración cobra una dimensión dinámica e instrumental: cambiar el *statu quo* económico que apunta hacia el deterioro ecológico, presupone modificar las bases sobre las que se practica la valoración actual, reorientando con nuevas informaciones y criterios el entramado mental y socioinstitucional que le había dado origen. Reconversión que no cabe esperar que surja en el mero campo del valor, sino que necesita disponer de sólidos apoyos cuantitativos referentes al mundo físico, para establecer puentes entre la coherencia parcial y socialmente condicionada propia del cálculo económico ordinario que acostumbra a guiar la gestión y aquella otra más global y objetiva que, desde las ciencias de la naturaleza, nos informa sobre el entorno físico en el que dicha gestión se desenvuelve. Lo cual cobra especial importancia en el caso de ciertos componentes de ese «capital natural» que, al no haber sido producidos para ser vendidos y utilizados, y al tratarse de *stocks* de recursos y no de *flujos* de «productos», no

---

[9] *Vid.* NAREDO, J. M. (1987), *La economía en evolución. Historia y perspectivas de las catergorías básicas del pensamiento económico*, Madrid, Siglo XXI, 2.ª edición actualizada de 1996, Cap. 26.V. «Perspectivas que se abren ante la crisis de la noción de materia». Apdo. sobre «Los excesos del energetismo y la cuarta ley de la termodinámica de Georgescu-Roegen», pp. 478-482.

cabe esperar que el mero juego de la oferta y la demanda vaya a resolver por sí mismo los problemas que su gestión plantea.

Contextualicemos la propuesta metodológica presentada en este trabajo. En primer lugar, como ya se ha indicado, se refiere sólo al «capital mineral» contenido en la corteza terrestre y no al conjunto del «capital natural». Es decir, se refiere sólo a un subconjunto de *elementos* que componen ese «capital natural», dejando de lado el resto de los *elementos* y *sistemas* que se engloban también bajo esa denominación[10], entre los que destacan los integrantes de la *biosfera*, cuyo tratamiento demandaría planteamientos metodológicos distintos. Pese a esta limitación, el trabajo tiene gran relevancia, al ser precisamente un rasgo distintivo de la civilización industrial el apoyar básicamente su intendencia en la extracción de rocas y minerales de la corteza terrestre, en vez de hacerlo en los derivados de la fotosíntesis como hacen el resto de las especies de la biosfera y como había hecho la especie humana a lo largo de su historia. En los capítulos que siguen se precisa este extremo, cuantificando el uso que hace la actual civilización tanto de la fotosíntesis, como de la extracción de rocas y minerales de la corteza terrestre. También se analiza su evolución reciente, viendo si la tendencia a la *desmaterialización* de las economías, anunciada por algunos autores[11], tiene globalmente lugar y si se está traduciendo de

---

[10] La distinción entre *elementos* y *sistemas* parece un primer paso obligado para poner un poco de orden en el contenido de ese «capital natural», que abarca tanto lo que se entiende por «recursos naturales» como por «medio ambiente». Por ejemplo, no debe confundirse el *elemento* madera con el *(eco)sistema* bosque, aunque aquélla sea el principal producto de éste en la Europa septentrional, pero no así en la mediterránea. Estos extremos han sido hasta ahora mejor y más tempranamente iluminados por los esfuerzos de administradores y contables encaminados a hacer «cuentas de los recursos naturales», que por los empeños teóricos y formalizadores procedentes del mundo académico. Sobre la distinción entre elementos y sistemas, véase WEBER, J. L. (1993), «Tener en cuenta(s) la naturaleza», en Naredo, J. M. y F. Parra, eds. (1993), *Hacia una ciencia de los recursos naturales*, Madrid, Siglo XXI, pp. 79-119. Razonando ya sobre los *elementos* que componen los *inputs* de materiales, en los trabajos del Wuppertal Institute aquí referenciados se subraya la conveniencia de distinguir al menos cinco categorías: materiales bióticos, materiales abióticos, agua, aire y movimientos de tierra.

[11] *Vid.* AYRES, R. U. (1996), «Theories of Economic Growth», INSEAD, septiembre, que sintetiza sus previsiones optimistas sobre la *desmaterialización* avanzadas en otros textos anteriores a base de extrapolar a escala global ejemplos locales de logros parciales. Igualmente, Tibbs extrapolaba a escala planetaria ejemplos del menor uso directo de ciertos materiales observado en algunos países ricos: TIBBS, H. B. C. (1992), «Industrial Ecology: An Environmental Agenda for Industry», *Whole Earth Review*, 4, pp. 4-16. Véanse ésta y otras referencias en BUNKER, S. (1996), «Materias primas y la economía global: olvidos y distorsiones de la ecología industrial», *Ecología Política*, n.º 12, pp. 81-89. El nuevo Informe del Club de Roma *Factor 4* (elaborado por Ernst Ulrich von Weizsäcker, Amory B. Lovins y L. Hunter Lovins [1997], *Factor 4. Duplicar el bienestar con la mitad de los recursos naturales*, Madrid, Galaxia Gutemberg y Círculo de Lectores) también presenta la posibilidad técnica de mejorar la eficiencia en el uso de los materiales y la energía como panacea capaz de solucionar los problemas de deterioro ecológico hacia el que nos arrastra la civilización industrial, sin necesidad de revisar los estilos de vida imperantes. El hecho de que las notabilísimas mejoras de eficiencia conseguidas desde la revolución industrial hasta nuestros días no lograran reducir sensiblemente todavía el uso de materiales y energía ni siquiera en los países «ricos», evidencia que no es sólo un problema de mejorar la eficiencia técnica, sino de modificar las metas y valores sociales imperantes.

verdad en una menor presión sobre los recursos planetarios. Anticipemos que el manejo de la información disponible muestra la irrealidad global de esa tendencia, al observarse que sigue aumentando el uso total e incluso per cápita de los recursos en el mundo (lo que no quita para que puedan disminuir las exigencias en materiales y energía por unidad de Producto o Renta Nacional, pero esto resulta ecológicamente irrelevante: lo significativo aquí es la exigencia global y per cápita, que siguen aumentando). Tampoco se observa que la *desmaterialización* esté teniendo lugar en los países más «desarrollados»: aunque la tendencia a desplazar fuera de sus fronteras las primeras fases de extracción y tratamiento de los recursos, unida a la mejora de la eficiencia observada en los procesos parciales que albergan, pueda disminuir su *Input Directo de Materiales* (DMI), la realidad es que en la mayoría de ellos sigue aumentando el *Requerimiento Total de Materiales* (TMR) per cápita. Con lo que se privilegia el medio ambiente *local* de los países ricos pero a costa de un mayor deterioro del medio ambiente *global* utilizado como fuente de recursos y sumidero de residuos. Coincidiendo con otros análisis recientes sobre el tema, podemos concluir que, al menos, «la *desmaterialización*, en el sentido de una reducción absoluta en el uso de recursos naturales, no está teniendo todavía lugar»[12] ni siquiera en los países ricos, y menos todavía en las llamadas «economías emergentes» o en las más o menos eufemísticamente calificadas como «en vías de desarrollo». Lo cual refuerza el interés de trabajar en el sentido en el que lo estamos haciendo. Porque la creencia en la *desmaterialización*, al sugerir el avance normal e inequívoco hacia un tipo de sociedad «post-industrial» cada vez menos dependiente de los recursos naturales, ha favorecido la despreocupación por conocer y mejorar el funcionamiento material de la sociedad, para hacerlo ganar en ahorro y eficiencia. En otras palabras, que el espejismo de la *desmaterialización*, al soslayar los aumentos en el Requerimiento Total de Materiales que de hecho se seguían produciendo, ha contribuido a eclipsar las preocupaciones que deberían de contribuir a que tal desmaterialización se produzca realmente con generalidad.

Así las cosas, la civilización industrial se ha caracterizado, y se sigue caracterizando, por utilizar masivamente como materias primas determinadas sustancias disponibles en la corteza terrestre en condiciones muy particulares de concentración, estructura y tonelaje. Los yacimientos minerales en explotación pueden considerarse, así, como rarezas de la corteza terrestre, ya que cuentan con unas leyes de contenido en las sustancias

---

[12] ADRIAANSE, A. *et al.* (1997), *Resource Flows: The Material Basis of Industrial Economies*, Washington: World Resources Institute (USA), Wuppertal Institute (Germany), Netherlands Ministry of Housing, Spacial Planning and Environment (Netherlands), National Institute for Environmental Studies (Japan).

deseadas y un nivel de estructura muy superiores a la media de la corteza terrestre, que la naturaleza se había encargado espontáneamente de configurar. Una vez utilizados estos recursos, suelen acabar dispersándose y originando los problemas de contaminación de todos conocidos, habida cuenta de que, como se ha indicado, las prácticas habituales de cálculo que orientan la gestión económica no acostumbran a favorecer la recuperación y el reciclaje. Y al tomar estos recursos como un don gratuito de la naturaleza se incentiva su extracción, no sólo frente a la recuperación y el reciclaje, sino también frente a otros posibles sustitutivos renovables fruto de la industria humana, que habría que producir y también facturar (por ejemplo, se incentiva no sólo sustituir la mula por el tractor, sino usar el petróleo extraído, frente al etanol obtenido de forma renovable a partir de la biomasa).

Habida cuenta que el proceder indicado está empujando al planeta Tierra hacia situaciones de creciente deterioro[13], la metodología que más adelante se expone permite ordenar económicamente los minerales de la corteza terrestre atendiendo al coste físico que supondría obtenerlos a partir de los materiales que contendría la Tierra si hubiera alcanzado ya el máximo nivel de deterioro hacia el que la estamos empujando (es decir, si los actuales yacimientos de rocas y minerales se hubieran mezclado y reaccionado con el resto de los componentes hasta formar una «sopa entrópica» en equilibrio químico). Expresando en unidades de energía el coste físico de obtener a partir de esa «sopa entrópica» los minerales hoy disponibles, podríamos llegar a calcular la potencia (*stock*) contenida en la corteza terrestre actual, que la especie humana puede explotar y dispersar con mayor o menor celeridad, por contraposición al *flujo* de energía emitido por el Sol y sus derivados renovables. Lo cual presenta en términos meridianamente cuantitativos el conflicto fáustico que plantea la elección entre eficacia parcial y sostenibilidad global en nuestra sociedad, o entre apoyar la economía sobre el deterioro de los *stocks* de recursos que nos brinda la naturaleza o recurrrir al *flujo* solar para hacer un uso reciclado y mejorante de los mismos. Elección en la que se ha venido optando hasta ahora por el logro de una eficacia puntual e inmediata obtenida a base de «echar a la caldera» determinados *stocks* de recursos sin reparar en la *insostenibilidad* global que tal proceder plantea. Hemos de aclarar aquí una confusión bastante extendida y mantenida incluso por autores de primera fila en el tratamiento de los flujos de materiales ligados a la actividad económica. Es la confusión que se deriva de postular que los *stocks* de recursos no renovables

[13] Directamente, por dispersión del «capital mineral» y contaminación del ambiente e, indirectamente, al posibilitar las cada vez mayores extracciones de la fotosíntesis y el transporte horizontal masivo de materiales y, con ello, el movimiento de tierras ocasionado por la construcción de edificios e infraestructuras, la erosión y contaminación de suelos y aguas, la pérdida de diversidad biológica, etc.

«no podrían utilizarse en absoluto si se adopta una interpretación estricta del objetivo de la sostenibilidad»[14]. El funcionamiento de la *biosfera* desmiente esta idea, al mostrar que su estricta sostenibilidad se ha venido construyendo desde el principio sobre el uso de los materiales no renovables contenidos en la corteza terrestre; la clave de esta sostenibilidad estriba en que, con el apoyo de la energía solar, ha podido cerrar los ciclos de materiales reconvirtiendo los residuos en recursos, cosa que no hace la sociedad industrial. Por tanto, la sostenibilidad de un sistema económico debe enjuiciarse atendiendo no tanto a la intensidad en el uso que hace de los *stocks* de recursos no renovables, como a su capacidad para cerrar los ciclos de materiales mediante la recuperación o el reciclaje, con ayuda de fuentes renovables.

Tras exponer la metodología propuesta para calcular los costes de reposición de las sustancias minerales contenidas en la corteza terrestre e ilustrar con resultados su aplicación a algunas de ellas, se continúa analizando la evolución conjunta de los costes físicos y de la valoración monetaria que se opera a lo largo del proceso económico, y formulando las leyes que gobiernan dicho comportamiento conjunto. Para lo cual se aplica un enfoque pluridimensional que acepta que un mismo proceso económico puede ser objeto de lecturas diferentes, realizadas a partir de enfoques diferentes, sujetos a axiomáticas diferentes, que trabajan con magnitudes diferentes, y que, por tanto, acaban arrojando no sólo resultados numéricos diferentes, sino que se expresan en unidades distintas e irreductibles entre sí (aunque se pueda, e incluso interese, analizar su evolución conjunta a lo largo de los procesos).

El presente trabajo clarifica estos extremos, relacionando las preocupaciones y enfoques de la economía ordinaria del valor, con los de esa «economía de la física» que es la termodinámica. Clarificación que resulta esencial para superar el confusionismo que impregna al razonamiento económico en este campo, inhabilitándolo para abordar seriamente la antinomia entre *desarrollo económico* y *deterioro ecológico*, como bien testimonian algunas de las afirmaciones anteriormente referenciadas. Cuestiones tan básicas como la de si es lícito que una economía *sostenible* utilice recursos no renovables, si la ley de la entropía rige o no para los materiales o si es o no necesario formular una nueva ley de la termodinámica para extenderla a este campo, deben de ser respondidas con claridad y asumidas con generalidad por las comunidades científicas preocupadas por utilizar su instrumental para enderezar los problemas ecológicos de nuestro tiempo. Por otra parte, conviene aclarar la importancia práctica inmediata de tales formulaciones. Porque, por ejemplo, preguntado sobre si, en su opinión, las

[14] HINTERBERGER, F., F. LUKS y SCHMIDT-BLEEK, F. en el artículo citado más arriba («Material Flows vs. "Natural Capital". What Makes an Economy Sustainable»), p. 3.

transformaciones materiales que precisa la actividad económica se encuentran limitadas por la ley de la entropía, Solow respondió reconociendo que «no cabe duda que todo está sometido a la ley de la entropía, pero –precisando que– tal cosa no es de importancia práctica inmediata para modelizar lo que en último término es un breve instante de tiempo en una pequeña esquina del universo»[15].

El confusionismo mencionado en el párrafo anterior viene, sin duda, alentado por la pretensión de cerrar el razonamiento económico desde enfoques unidimensionales, ya sean éstos los que se circunscriben al universo de los valores pecuniarios, propio de la economía estándar, o los que se desenvuelven en el mundo de la energía propios de la termodinámica. El problema estriba en que cada especialista trata habitualmente de solucionar los complejos problemas que la gestión plantea reduciéndolos a la medida de su propio enfoque, generalmente unidimensional y parcelario, y desautorizando o ignorando, para ello, los otros enfoques que tienen algo que decir sobre tales problemas. Reconocer la conveniencia de aplicar al campo de lo económico una pluralidad de enfoques y dimensiones, presupone abandonar los afanes imperialistas de cada uno de ellos y hacer un voto de humildad y apertura de los especialistas que los cultivan. Se trata, en suma, de tener la flexibilidad mental y la falta de dogmatismo suficientes como para reconocer la especificidad y el interés de varios enfoques, sin pretender invadir desde el propio el campo de los otros para sustituirlos. También se ha de reconocer le irreductibilidad que muchas veces se plantea entre ellos y las profundas divergencias a las que pueden conducir distintas interpretaciones de un mismo fenómeno. Siendo una de ellas la que se plantea entre el *desarrollo económico* y el *deterioro ecológico* que la economía estándar y las ciencias de la naturaleza se encargan de observar como procesos conjuntamente característicos de la civilización industrial. Estimamos que, para superar el confusionismo actual, hoy por hoy, resulta más prioritario subrayar la especificidad de cada enfoque y las asimetrías y divergencias a las que puedan llevar sus análisis, que forzar compromisos tan poco esclarecedores y tan escasamente operativos como el de hacer *sostenible* el *desarrollo* y de definir y resolver esta meta en el mero campo de los valores monetarios a base de imputar alegremente precios al sin número de elementos y sistemas que integran el llamado «capital natural»[16]. Sobre todo cuando este objetivo se formula sin especificar si el *desarrollo* presupone o no crecimiento continuado de variables físicas.

---

[15] *Cfr.* DALY, H. (1997), «¿Cuánto tiempo seguirán los economistas neoclásicos ignorando las aportaciones de Georgescu-Roegen?». Ponencia presentada a la Jornada sobre *Economía y Ciencias de la Naturaleza*, Madrid, Fundación Argentaria, 19 de noviembre, pp. 1-15.

[16] Un ejemplo que culmina este tipo de ejercicios de imputación viene dado por el trabajo de CONSTANZA, R. *et al.* (1997), «The Value of World's Ecosystem Services and Natural Capital», *Nature*, vol. 387, pp. 253-260.

Porque si ello es así, el desarrollo está abocado de antemano a la invariabilidad o *insostenibilidad*. Y si, por el contrario, identificamos el *desarrollo sostenible* con *desarrollo sin crecimiento* permanente de variables físicas, hay que precisarlo bien, ya que tal definición contraviene la acepción ordinaria del término. Tiempo habrá de establecer soluciones integradoras sobre bases más firmes, una vez aclarados todos estos extremos.

El confusionismo objeto de estos comentarios se deriva en buena parte de que todos hablan del sistema o del proceso económico, pero unos se aproximan a él desde el instrumental analítico del valor propio de la economía estándar y otros lo hacen desde el punto de vista energético de la termodinámica. Y es la pretensión más o menos velada que aflora entre los economistas de hacer que el enfoque de la economía estándar abarque por sí mismo toda la problemática de la gestión, la que explica su reticencia a admitir la existencia de otros enfoques que compiten con el suyo, interfiriendo, limitando o corrigiendo la pretendida universalidad de sus conclusiones. Sin esta pretensión resulta francamente difícil entender el empeño de autores como los antes citados de minimizar, e incluso negar, la importancia de la ley de la entropía sobre los procesos relacionados con la gestión económica, cuando cualquier persona mínimamente informada sabe que explica el devenir de los fenómenos del mundo físico en todos los rincones del universo. Sin tales presupuestos tampoco resultaría comprensible el hecho de que algunos economistas se encontraran en la obligación de introducir «la energía», o «los recursos naturales», en la función de producción agregada[17], como respuesta a las críticas que relativizaban el valor explicativo de sus enfoques al dejar fuera aspectos tan importantes: es el afán de seguir manteniendo intacto el monopolio explicativo de sus enfoques el que, probablemente, les indujo a completarlos de esta manera a costa de empañar la coherencia de los mismos. Porque resulta bastante problemático llevar el razonamiento sobre estos aspectos «externos» al edificio conceptual de la economía estándar, sin modificar la axiomática que lo informa. Es normal que, cuando surgen problemas difíciles de encajar en una estructura conceptual, se generen situaciones de transición fértiles en ambigüedades y compromisos poco esclarecedores. Así ocurrió cuando el sistema ecléctico de Tycho Brahe (que postulaba que los planetas giraban alrededor del Sol, pero que éste lo hacía alrededor de la Tierra) sustituyó durante largas décadas al de Tolomeo, abriendo camino hacia la aceptación de la nueva cosmología de Copérnico, Kepler y Galileo, hoy también relativizada. En el caso que nos ocupa, lo que está en discusión es si, para resolver las nuevas preocupaciones «ambientales», el razonamiento económico ha de seguir girando en torno al núcleo de los valores mercan-

[17] *Vid.* referencias en *ibidem.*

tiles o si, por el contrario, debe desplazar su centro de reflexión hacia los condicionantes del universo físico e institucional que lo envuelven (que son analizados por disciplinas que trabajan desde presupuestos diferentes). Se trata de reconocer que, en esa encrucijada de saberes que plantea la gestión, no hay un único e inmutable *sistema* de razonamiento capaz de explicarlo todo, sino una encrucijada de *sistemas*. Lo cual exige desplazar el razonamiento económico desde el *sistema* que se adjetiva como tal hacia una *economía de sistemas*.

Una vez roto, en el propio campo de la física, el monopolio del conocimiento que en su día ejerció *el sistema del mundo* ideado por Newton, no tiene sentido imaginar hoy a los practicantes de la mecánica clásica tratando de ingeniárselas para hacer que su sistema siga siendo la única guía adecuada del conocimiento para investigar tanto los espacios siderales como los ultramicroscópicos, o las situaciones de irreversibilidad, de discontinuidad, de no linealidad, de permanente desequilibrio, etc., característicos de la vida, sobre los que razonan otras ramas de la física a partir de axiomas diferentes. Y si la comunidad científica acepta ya de buen grado la posibilidad, y la conveniencia, de utilizar distintos sistemas de razonamiento para analizar el mismo mundo físico, más aún debería de aceptarse para el mundo de la gestión económica. Hoy no tiene sentido que los practicantes de la mecánica clásica se sientan avergonzados por no tener en cuenta el segundo principio de la termodinámica y que traten, por ello, de quitarle la importancia que tiene para analizar los fenómenos de la vida cotidiana, o busquen ingenuamente el modo de incorporarlo dentro de un sistema que por definición lo excluye. Como tampoco lo tendría que los economistas se avergonzaran de que sus razonamientos sobre el valor no tienen en cuenta este principio, si su disciplina hubiera alcanzado un grado de madurez comparable al de la física. Antes al contrario, deberían subrayar lo que de diferencial tienen sus análisis: recaen sobre la revalorización que acompaña los cambios cualitativos con finalidad utilitaria que constituyen la razón de ser de los procesos llamados de producción, cambios que la termodinámica es incapaz de apreciar, sin que sus cultivadores tengan, tampoco, que avergonzarse de ello. Cuando, a su vez, la termodinámica se ocupa de registrar directamente las pérdidas o costes físicos de los procesos que la economía estándar sólo puede apreciar parcial e indirectamente, en tanto que sean objeto de valoración monetaria. Concluyendo, que las reflexiones sobre el valor de cambio de la economía estándar y las del coste físico de la termodinámica no son sustitutivas, sino complementarias: en este trabajo mantendremos ambas, en paralelo, como dos lecturas de aspectos diferentes del proceso económico que deben completar nuestro conocimiento del mismo y nuestra capacidad para reorientarlo en un sentido globalmente más económico, tal y como hemos apuntado anteriormente.

Las propuestas metodológicas y las elaboraciones teóricas contenidas en este trabajo van acompañadas de aplicaciones a distintos niveles de agregación que ilustran el interés de los diferentes enfoques utilizados. Así, tras formular cómo la generación de valores «añadidos» característica de los procesos económicos reposa sobre una profunda asimetría entre la evolución del coste físico y la valoración monetaria que se observa a lo largo de los mismos, esta formulación se ilustra con el análisis de varios procesos. Con lo cual, la reflexión general se conecta con aquella otra que razona a nivel microeconómico sobre la «ecología industrial» y los «ecobalances» de las instalaciones y los procesos o sobre la «calidad total», el «ciclo de vida» y las «mochilas» (de deterioro) de los productos. El presente trabajo también extiende el tratamiento conjunto de los flujos físicos y sus valores monetarios al análisis del comercio internacional, viendo cómo se proyecta sobre ellos la citada asimetría, con la consiguiente incidencia territorial. A la vez que los procesos de extracción y las primeras fases de elaboración se distancian cada vez más, geográficamente, de los principales centros utilizadores, acentuando los desequilibrios económico-territoriales de todos conocidos. Desequilibrios que se plasman tanto en el conflicto «Norte-Sur», como en el más general que se observa entre núcleos de acumulación de capitales y productos y áreas de extracción y vertido.

Por último, el trabajo presentado analiza la forma en la que se resuelven los equilibrios de las balanzas de pagos de los países a escala planetaria, recayendo obligadamente sobre los aspectos financieros. Ya que lo que resulta hoy determinante en tales equilibrios no es la *balanza de mercancías*, sobre la que venían razonando tradicionalmente los manuales de economía, ni la de *servicios*, ni siquiera la *balanza corriente*, sino la *balanza de capital* y, dentro de ésta, muy particularmente las operaciones de *capital a corto*, que mueven diariamente los mercados financieros. Para facilitar estos análisis se han saldado las balanzas de pagos por grupos de países, viendo la distinta manera de resolver sus equilibrios que se observa entre ellos. Porque en la era de la «globalización» económica, no es posible analizar, ni corregir, en toda su magnitud, los problemas ecológicos sin preocuparse de cómo se genera y distribuye la *capacidad de compra sobre el mundo* que los origina. En este sentido me temo que esté en lo cierto Margalef[18], cuando opina «que el poco éxito de los intentos de conectar de modo fructífero las ciencias de la economía y la ecología, procede en gran parte de la dificultad, más inconsciente que consciente, de alcanzar un consenso común acerca de la definición, no sólo económica, sino también biológica, de esa convención social, que es el dinero» (y los activos financieros líqui-

[18] MARGALEF, R. (1996), *Una ecología renovada a la medida de nuestros problemas*, Lanzarote, Fundación César Manrique (la edición trilingüe en español, inglés y alemán), pp. 35-36 de la versión española.

dos, en general, así como de la capacidad de las entidades públicas y privadas de crearlos y beneficiarse de ellos, añadimos nosotros). En este sentido, este autor establece una analogía entre el afán de acumulación y «el instinto territorial de muchos animales, que es respetado por otros individuos de su especie, como resultado de cierto consenso colectivo, generalmente específico, pero que a veces se extiende entre especies próximas [...] que tienen mucho interés en el estudio del comportamiento y de la regulación de las poblaciones en las especies implicadas [...] Lo cierto es que el dinero es una convención estrechamente relacionada con los aspectos comentados acerca de la generación de diferencias individuales en el uso de los recursos, en la capacidad de maniobra en el propio uso de los recursos que da el dinero [...] que contribuye mucho más a la desigualdad (y al deterioro ambiental) que a la regulación de los flujos naturales en un mundo considerablemente humanizado».

El tipo de elaboraciones que estamos presentando ofrece un marco de información objetiva útil para revisar, en foros internacionales, la actual asimetría que se observa, a lo largo del proceso económico, entre los costes físicos de reposición de los recursos naturales y sus derivados y la valoración monetaria de que son objeto, así como los mecanismos que informan la generación y la distribución de la capacidad de compra sobre el mundo, que condiciona los procesos de valoración. Procesos que son a la vez fuente de deterioro ambiental y de desigualdad social, que se plasman en conflictos como los anteriormente mencionados. La discusión internacional de un marco como el indicado constituiría un sólido punto de apoyo para conseguir los cambios éticos e institucionales necesarios para inclinar los procesos de valoración y los criterios de gestión hacia la consecución de una sociedad más sostenible y solidaria.

Bibliografía

ADRIAANSE, A. *et al.* (1997), *Resource Flows: The Material Basis of Industrial Economies*, Washington: World Resources Institute (USA), Wuppertal Institute (Germany), Netherlands Ministry of Housing, Spacial Planning and Environment (Netherlands), National Institute for Environmental Studies (Japan).

AYRES, R. U. (1996), «Theories of Economic Growth», *INSEAD,* septiembre.

BARNETT, H. y Ch. MORSE (1963), *Scarcity and Growth*, Baltimore, John Hopkins Press, p. 11.

BOULDING, K. (1966), «The Economics of the Coming Spaceship Earth», en *Environmental Quality in a Growing Economy*, Baltimore, John Hopkins Press, pp. 3-19.

BROOKS, D. B. y P. W. ANDREWS (1974), «Mineral Resources, Economic Growth, and the World Population», en *Science*, n.º 185, julio de 1974, pp. 13-19.

BUNKER, S. (1996), «Materias primas y la economía global: olvidos y distorsiones de la ecología industrial», *Ecología Política*, n.º 12, pp. 81-89.

CONSTANZA, R. *et al.* (1997), «The Value of World's Ecosystem Services and Natural Capital», *Nature*, Vol. 387, pp. 253-260.

DALY, H. (1991), «Elements of Environmental Economics», y EL SERAFY, S. (1991), «The Environment as Capital», en R. Constanza, ed., *Ecological Economics: the Science and Management of Sustainability*, Nueva York, Columbia University Press.

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1976), *Energy and Economic Myths. Institutional and Analytical Economic Essays*, Nueva York, Pergamon Press, pp. 3-36.

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1977), «Matter Matters, Too», en K. D. Wilson, edit., *Prospects for Growth: Changing Expectations for the Future*, Nueva York, Praeger, pp. 293-313.

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1980), «Matter: a Resource Ignored by Termodinamics», en St. Pierre, L. E. y G. R. Brown (eds.), *Future Sources of Organic Raw Materials*, Oxford, Chemrawn I., Pergamon Press, pp. 79-87

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1982), «La dégradation entropique et la destinée prométhéenne de la technologie humaine», en *Entropie*, n.º extraordinario sobre «Thermodynamique et sciences de l'homme», pp. 76-86 (texto reeditado en GEORGESCU-ROEGEN, N. [1995], *La décroissance. Entropie, Écologie, Économie*, J. Grinevald e Ivo Rens, eds., París, La Sang de la Terre).

HINTERBERGER, F., F. LUKS y F. SCHMIDT-BLEEK (1997), «Material Flows vs. "Natural Capital". What Makes an Economy Sustainable?», *Ecological Economics*, n.º 23, pp. 1-14.

MARGALEF, R. (1996), *Una ecología renovada a la medida de nuestros problemas*, Lanzarote, Fundación César Manrique.

NAREDO, J. M. (1987), *La economía en evolución. Historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico*, Madrid, Siglo XXI, 2.ª edición actualizada de 1996, Cap. 26.V.

NAREDO, J. M. y S. RUEDA (1996), «Marco general de desarrollo sostenible aplicado a casos de buenas prácticas en medio urbano», *Primer catálogo español de buenas prácticas*, MOPTMA, Vol. 1.

SOLOW, R. (1991), «Sustainability: An Economist's Perspective», en R. Dorfman y N. S. Dorfman (eds.), *Economics of the Environment*, 3.ª ed. Nueva York.

TIBBS, H. B. C. (1992), «Industrial Ecology: An Environmental Agenda for Industry», *Whole Earth Review*, 4, pp. 4-16.

ULRICH VON WEIZSÄCKER, E., A. B. LOVINS y L. HUNTER LOVINS (1997), *Factor 4. Duplicar el bienestar con la mitad de los recursos naturales*, Informe del Club de Roma, Madrid: Galaxia Gutemberg y Círculo de Lectores.

WEBER, J. L. (1993), «Tener en cuenta(s) la naturaleza», en Naredo, J. M. y F. Parra, eds. (1993), *Hacia una ciencia de los recursos naturales*, Madrid, Siglo XXI, pp. 79-119.

Primera parte

SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA CIVILIZACIÓN INDUSTRIAL Y LAS LIMITACIONES DE LOS ENFOQUES ECONÓMICOS ORDINARIOS PARA ANALIZARLO

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

José Manuel Naredo

En contraste con las «revoluciones científicas» ocurridas en otras disciplinas, más de un autor ha señalado el hecho curioso de que la forma de ver el mundo de un economista ha permanecido, en lo esencial, invariable desde Adam Smith. Es más, en la pasada década de los ochenta hemos asistido a un reforzamiento de esta forma de ver el mundo, auspiciado por el doble efecto de la euforia económica que vivieron las metrópolis del capitalismo y la fe renovada en el carácter benéfico del *mercado* que acompañó al desplome de los llamados regímenes socialistas del Este europeo.

Sin embargo, merece la pena subrayar la siguiente paradoja: cuando más extendida se encuentra esta forma de ver el mundo, cifrada por los sistemas de cuentas nacionales, menos explicativa resulta de la «naturaleza y causas de la riqueza de las naciones» que Smith pretendía investigar en su obra cumbre, hace ya más de dos siglos. En efecto, los enfoques macroeconómicos ordinarios, apoyados en los «agregados», cuentas e indicadores habituales de flujos, registran los avances en los niveles de renta y de consumo propios del «desarrollo económico», pero se revelan poco operativos para informar acerca de los procesos de deterioro ecológico sobre los que se asienta ese desarrollo, y para explicar los mecanismos que gobiernan la generación y el reparto de la creciente capacidad de compra sobre el mundo que alimentan las actuales tendencias de insostenibilidad ecológica y polarización social.

Cuando se empieza a apreciar que una red teórica deja escapar aspectos del objeto de estudio que se estiman relevantes, caben dos posibilidades: una, remendar y ampliar la red teórica en cuestión para volver a lanzarla de nuevo sobre ellos y, otra, recurrir a nuevas redes, con diseño más apropiado para retenerlos. Sopesar bien las posibilidades y limitaciones de la red teórica actual es condición necesaria para avanzar con conocimiento de causa por los caminos indicados, relativizando y aprovechando conjuntamente, sin exclusiones ni dogmatismos, los caminos analíticos que se brin-

dan. Por ello nos detendremos primero sobre la configuración de esta red teórica, para ocuparnos después del **medio ambiente** inestudiado que se genera y del modo de abordarlo. Le seguirán después ciertas reflexiones sobre la sostenibilidad de los sistemas y cuantificaciones relativas al comportamiento de la civilización industrial, para recaer, finalmente, sobre las propuestas metodológicas y las aplicaciones y análisis contenidos en la segunda y tercera parte de este trabajo.

CAPÍTULO 2
LA IDEA USUAL DE SISTEMA ECONÓMICO (PLASMADA EN LOS SISTEMAS DE CUENTAS NACIONALES)Y SUS LIMITACIONES

José Manuel Naredo

La génesis de la red teórica que toma cuerpo en los actuales sistemas de cuentas nacionales y orienta el modo de pensar de los macroeconomistas, data del siglo XVIII, tal y como se expuso en *La economía en evolución* (1987, reed. 1996)[1]. Recordemos ahora que, antes de esa fecha, los autores llamados «mercantilistas» veían el intercambio comercial como un juego de suma cero, en el que las ganancias de determinadas personas, empresas o países venían sufragadas por las pérdidas de otros. De ahí que todavía Montesquieu considerara la economía como la ciencia de la *adquisición* de la riqueza. Y de ahí que los españoles que colonizaban América, cuando ofrecían a los aborígenes espejitos y cuentas de vidrio a cambio de oro y piedras preciosas, tuvieran plena conciencia de estar practicando con ellos un intercambio desigual, hasta el extremo de que entonces se hizo popular la expresión «tratar como a indios» como sinónimo de engañar. Sin embargo, cuando hoy se siguen obteniendo los recursos naturales del «tercer mundo» a cambio, pongamos por caso, de productos informáticos... o financieros, no se tiene en absoluto esa conciencia. El afianzamiento de la economía que desde entonces se produjo como rama del conocimiento que se ocupa, no ya de la *adquisición*, sino de la *producción* de riqueza, explica este desplazamiento en la forma de ver las cosas.

Hubo que esperar a las elaboraciones de los economistas franceses del siglo XVIII, hoy denominados fisiócratas, para que se estableciera la noción de *producción* como centro de la versión moderna de *sistema económico*. La extensión de la idea de *producción* se apoyó en la antigua visión organicista

[1] NAREDO, J. M. (1987), *La economía en evolución. Historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico*, Madrid, Siglo XXI. 2.ª reedición actualizada de 1996.

del mundo, que atribuía a la Madre-Tierra la capacidad de generar riquezas que, se suponía, el hombre podría acrecentar con la ayuda de la nueva ciencia experimental. Así lo acreditaba la naciente agronomía, que trataba de orientar las técnicas para obtener mayores rendimientos, al igual que disciplinas que se ocupaban de las otras actividades consideradas *productivas* en la cabecera del famoso *Tableau économique* (1758) de Quesnay, el autor más representativo de la escuela fisiocrática. Actividades que incluían tanto la agricultura, la pesca, la silvicultura..., como la minería. Pues la visión organicista del mundo hasta entonces dominante atribuía procesos de generación y perfeccionamiento material no sólo a los reinos animal y vegetal, sino también al mineral. Lo que a escala agregada se traducía en la idea de que los continentes extendían sus límites, tal y como postulaba por aquellos tiempos Linneo –el padre de la botánica moderna–, en su *Discurso sobre el crecimiento de la tierra habitable* (1744)[2]. Se trataba, pues, de orientar y gestionar ese crecimiento físico para construir sobre él un crecimiento de la población y sus consumos que se empezaba a proponer como objetivo deseable, desde un utilitarismo coherente con la visión arcaica del mundo antes mencionada.

Con lo cual, al decir de Quesnay, *producir* no era simplemente revender con beneficio, sino que utilizaba el término *producción* para designar aquellos procesos de creación física de «riquezas renacientes» que suponía asociados a las capacidades generadoras de la Madre-Tierra. El propósito declarado de la naciente ciencia económica fue así el de acrecentar la *producción* de «riquezas renacientes» sin menoscabo de los «bienes fondo». Y el crecimiento de esa *producción* se consideraba expresable en términos monetarios multiplicando las cantidades de productos por sus precios, al igual que el excedente o *producto neto* originado después de deducir todos los gastos ligados al proceso. Quede claro que, desde la perspectiva indicada, lo primero era el crecimiento del producto y el excedente físico que quedaba tras reponer todos los *inputs*, que podían traducirse en ingresos y excedentes o márgenes monetarios. Es decir, que se estimaba que era el aumento físico de objetos económicos originado por la *producción* el que debería apoyar el aumento de las rentas monetarias (por ejemplo, al plantar un grano y al obtener muchos en forma de espiga se podía no sólo alimentar a la mano de obra, sino obtener un excedente físico expresable en términos monetarios). Esa *producción* física de *riquezas renacientes* hizo las veces de motor de la idea de *sistema económico* que se afianzó con estos autores.

Sin embargo, una vez establecida la idea de *sistema económico*, con su carrusel de la *producción* y del *consumo*, y aceptada como una meta desea-

[2] LINNEO (1744), *Oratio de Telluris habitabilis incremento*. Reedición francesa en Linné, C. (1972), *L'équilibre de la nature*, París, Librairie Philosophique Vrin. Ref. NAREDO, J. M. (1987, Reed. 1996), *La economía en evolución*.

ble su continua expansión o crecimiento, se operó un desplazamiento de este *sistema* ideal desde el contexto físico en el que inicialmente se había formulado, hasta el universo de los valores venales o pecuniarios. Tal desplazamiento se produjo a la vez que los desarrollos de las ciencias de la naturaleza invalidaban la visión arcaica del mundo antes mencionada y el afán de gobernar el crecimiento físico subyacente.

En efecto, cuando la mineralogía, apoyada en los conocimientos de la química moderna, refutó las antiguas creencias en el crecimiento y perfeccionamiento de los minerales en el seno de la Tierra y cuando la geodesia misma obtuvo mediciones generalmente aceptadas del arco del meridiano terrestre, sobre las que se apoyó la definición de *metro* como patrón invariable de medida de longitud, las ideas de *producción* y de *crecimiento* de los agregados del *sistema económico* se distanciaron del mundo físico hasta recluirse por completo en el universo autosuficiente del valor, con los economistas llamados neoclásicos de finales del siglo XIX. Estos autores acabaron de cortar el cordón umbilical que todavía unía la idea de *sistema económico* al mundo físico circundante a través de la noción de *tierra* ricardiana, con su incómodo horizonte de «estado estacionario»: se estimó que la *tierra* (con todos sus recursos), lo mismo que el *trabajo*, era sustituible por *capital*. Y siendo éste el factor limitativo último, el razonamiento económico pudo cerrarse sobre sí mismo sin problemas en el campo aislado del valor.

De esta manera *producir* acabó haciendo referencia a la simple producción de valor y el *producto neto* o *renta* terminó significando simplemente, en contra de lo que pretendía Quesnay, revender con beneficio. El agregado central de los actuales sistemas de cuentas nacionales, el agregado de **Producto** o **Renta Nacional,** es así, por definición, un simple saldo de «valor añadido» fruto de restar al valor de las ventas el importe de lo gastado en su obtención. Todo ello haciendo abstracción del significado de los procesos físicos sobre los que se apoya la susodicha producción de valor. Lo cual acaba de dar remate contable agregado a las ideas vertidas por Adam Smith en *La investigación de la naturaleza y causas de la riqueza de la naciones* (1776) de que si «cualquier persona se encuentra espoleada desde la cuna hasta la tumba por el deseo de hacer fortuna» (a través del intercambio) todo el mundo «viene a ser en cierta medida mercader, y toda sociedad una compañía mercante o comercial»[3].

En consecuencia, los agregados monetarios de **Producto** o **Renta Nacional** ensancharon notablemente el campo de la producción, englobando los «valores añadidos» de un sinnúmero de actividades antes reputadas de improductivas, pero a la vez mantuvieron ciertas reminiscencias

[3] Ref. NAREDO, J. M. (1987, 2.ª ed. 1996), *La economía en evolución*, p. 136.

creacionistas, desterrando al limbo de las «plusvalías» otras operaciones de reventa con beneficio (de inmuebles, acciones, patentes...) que se presuponía más o menos arbitrariamente que no añadían nada físico a los objetos económicos negociados. Así, el modelo de aplicación usual de *sistema económico* que han venido cifrando los sistemas de Cuentas Nacionales, constituye un **híbrido** que, por una parte, **ignora las implicaciones físicas** de los procesos cuyos «valores añadidos» contabiliza, y, por otra, **desatiende las operaciones financieras** y otras, cuyos ingresos y beneficios no acostumbra a contabilizar entre los «valores añadidos» del sistema[4].

El problema estriba en que, una vez admitido que el propósito del proceso económico es acrecentar, tanto a nivel individual como agregado o social, los «valores añadidos» o márgenes pecuniarios obtenidos, hemos de admitir también que tal finalidad está llamada no sólo a *producir* valor, sino también «externalidades» negativas a una escala sin precedentes. Pues individuos, empresas y Estados tratan de mejorar la eficiencia y la rentabilidad de los procesos parciales en los que se encuentran interesados, recurriendo al camino más fácil de cargar sobre terceros o sobre esa tierra de nadie de los «bienes libres» la mayor parte posible de los costes relacionados con dichos procesos. De esta manera, junto a los saldos positivos deseables de «valores añadidos» y beneficios pecuniarios que los economistas trataban de acrecentar, aparecían otros de deterioros o pérdidas físicamente apreciables que permanecían ajenos a los procedimientos contables ordinarios y que hoy acostumbran a calificarse de «externalidades» negativas.

---

[4] El nuevo Sistema de Cuentas Nacionales (SCN 1993) acordado en el marco de las Naciones Unidas, con el consenso de los principales organismos internacionales con competencias económicas, propone establecer cuentas financieras y cuentas de patrimonio por grupos de agentes económicos, lo que permitiría iluminar el «agujero negro» descrito. No obstante, este sistema, que se irá implantando en el futuro, aunque abre la puerta al análisis de la *adquisición* de riqueza fruto de actividades financieras y de revalorizaciones patrimoniales, mantiene todavía ciertas reminiscencias fisiocráticas al no considerar el grueso de estas actividades como productoras de «valor añadido», teniendo que rebuscar los resultados de estas actividades en el cajón de sastre de unas «plusvalías» que se suponen fruto de revalorizaciones erráticas u ocasionales. Así, con el nuevo SCN 1993 culmina la representación contable de la idea usual de *sistema económico*. Pero el remate lógico-contable de tal representación acabará resaltando paradojas y fisuras inherentes a esa idea, como las anteriormente expuestas. Entre las que resalta la tendencia de los activos financieros y patrimoniales a expandirse a tasas superiores a las de los agregados de «producto» de la «economía real», y la asimetría que se observa entre el incesante aumento de la riqueza pecuniaria registrada y el progresivo deterioro de los recursos naturales y el medio ambiente planetario. Asimetría cuya representación no tuvo cabida en el núcleo duro del sistema, quedando relegada al campo abierto de las «cuentas satélite» pendientes de definir.

La discusión sobre el modo de abordar la «problemática ambiental» que tuvo lugar durante la elaboración del SCN 1993, no permitió alcanzar ningún consenso en las propuestas de retocar los agregados para obtener un «producto verde» o desarrollar macroindicadores alternativos. Sin embargo, este consenso se logró para hacer una propuesta de conexión del SCN 1993, con sistemas de cuentas de los recursos naturales o ambientales desarrollados a modo de cuentas satélite. Esta propuesta se plasmó en el manual de Naciones Unidas titulado *Integrated Environmental and Economic Accounting*, publicado en 1993, cuyos planteamientos genéricos le otorgan más el carácter de propuesta orientativa de compromiso que de manual operativo.

En relación con el tema que ahora nos ocupa, anticipemos que los países «ricos», cuna de la revolución industrial, acostumbran a llevar una parte creciente de las «externalidades» negativas que generan más allá de sus propios territorios, cargándolas sobre el resto del Planeta. Tema este que hace referencia a la profunda asimetría que se observa entre valoración monetaria y coste físico a lo largo del proceso económico en general, dando pie a la desigualdad física, en cuanto al coste, que subyace bajo la igualdad monetaria de los intercambios en el propio comercio mundial. Desigualdad que, como veremos más adelante, ofrece nuevos apoyos empíricos a la vieja idea de *adquisición* de riqueza a investigar por los economistas, que se vio eclipsada por el dominio de ideología de la *producción*. Aparecen así las ideas de estimar la «mochila» (*rucksack*) de deterioro ecológico que arrastran los productos a lo largo del proceso económico, o la «huella» (*footprint*) territorial de este deterioro, que pueden alcanzar zonas muy alejadas de las instalaciones y sistemas locales que los procesan o utilizan[5].

Pero no es sólo la propia naturaleza de la valoración y de la especialización que se operan en el comercio mundial la que origina el desarrollo económico y el deterioro ecológico observados a escala planetaria, sino también la naturaleza del propio sistema financiero internacional, que ofrece a ciertos países «ricos» unas posibilidades de *adquirir* riquezas materiales sin necesidad de *producirlas* que no tienen el resto de los países. Posibilidades estas que no pueden ser estudiadas desde el «cuadro macroeconómico» y las contabilidades nacionales de flujos que han venido acaparando hasta ahora la atención de los macroeconomistas. Sin embargo (como también veremos más adelante), la capacidad que tienen las entidades de los países «ricos» de controlar los activos financieros mundiales cuya tasa de expansión en dólares ha venido triplicando en las dos últimas décadas a la de los agregados de *producto* o *renta* nacionales, es algo indispensable a la hora de explicar la dominación económica que se acusa a nivel mundial, al ampliar la capacidad de compra de estos países, sede de empresas transnacionales, sobre el resto del Planeta, a la vez que acentúa la penuria de capital propia de los países «pobres» y del capitalismo local. La inadvertencia de esta problemática en los análisis

[5] La idea de «mochila» de deteriro ecológico (*ecological rucksack*) aparece básicamente vinculada a Friedrich Schmidt-Bleek, director del Departamento de Flujos de Materiales y Cambio Estructural del Instituto Wuppertal de Alemania. La idea de «huella» de deterioro ecológico (*ecological footprint*) se vincula a Wackernagel, M. y Rees, W., de la University of British Columbia, de Vancuover, Canadá, sobre todo a partir de su libro antes citado. A un concepto similar llegan, en los Países Bajos, Opschoor, H., Buitenkamp, M. y Wams, T. y otros, cuando hablan de «espacio ambiental» (*environmetal space*) para referirse al espacio que los seres humanos (con un determinado estilo de vida) pueden utilizar en el medio natural sin ocasionar el deterioro progresivo de éste (añadiendo las exigencias de diversidad y estabilidad ecológicas a la idea más restringida de «capacidad de carga» (*carrying capacity*) de un territorio).

económicos (y ecológicos) habituales, es la que nos llevaría a hablar de un «medio ambiente financiero» que permanece inestudiado al igual que aquel físico al que hicimos referencia, aunque se tenga menos conciencia de ello.

Surgen así dos niveles de economía pecuniaria que interaccionan entre ellos y con los flujos físicos sobre los que se apoya la intendencia de nuestras sociedades. Un primer nivel es el del *sistema económico* ordinario que, a través del comercio de mercancías, moviliza los flujos físicos y tiende a inclinarlos hacia el deterioro ecológico para acrecentar sus saldos de *valores añadidos* y *beneficios*. Otro es el de la economía financiera, que emite e intercambia derechos relacionados con el dinero, generando y distribuyendo la capacidad de compra sobre el mundo, con la consiguiente incidencia sobre los otros dos niveles mencionados.

CAPÍTULO 3
SOBRE LAS «EXTERNALIDADES» QUE GENERA LA IDEA USUAL DE SISTEMA ECONÓMICO Y EL MODO DE ABORDARLAS

José Manuel Naredo

Las recientes preocupaciones por la salud del planeta Tierra han llevado a los economistas a interesarse por el lado más oscuro y pernicioso del proceso económico que quedaba al margen de sus prácticas analíticas y contables habituales: mientras éstas se centraban en los saldos positivos que mostraba la versión monetaria del proceso, esa economía de la física que es la termodinámica, se afanaba en registrar las pérdidas o irreversibilidades inherentes a todo proceso físico, a la vez que esa economía de la naturaleza que es la ecología advertía que la productividad de los sistemas orgánicos ligados al proceso de fotosíntesis corre normalmente pareja a su inestabilidad.

Existen dos posibilidades de hacer que la gestión económica considere esa parte oscura de los procesos. Una, tratando de iluminar los elementos que la componen mediante prácticas de valoración que permitan aplicar sobre ellos el instrumental analítico habitual de los economistas que razona en términos de precios, costes y beneficios monetarios efectivos o simulados. Otra, adaptando a las exigencias de la gestión el aparato analítico de disciplinas que, como la ecología o la termodinámica, se preocupaban ya de aclarar lo ocurrido en esa parte oscura del proceso económico. El primer camino es el adoptado por la comúnmente llamada *economía ambiental* (*environmental economics*). El segundo es el que sigue la llamada *economía ecológica* (*ecological economics*).

Los dos enfoques indicados deberían complementarse para que la discusión económica pueda integrar los problemas que comporta la consecución de objetivos a plazos temporales, escalas y niveles de agregación distintos. Éste sería el objetivo del enfoque denominado «ecointegrador» propuesto en el capítulo 27 del libro *La economía en evolución* (Naredo, J. M., 1987, 2.ª ed. 1996). Enfoque que apuntaría a evitar la habitual diso-

ciación entre planteamientos económicos y ecológicos «reconciliando en una misma raíz **eco** la utilidad propugnada por aquéllos y la estabilidad analizada por éstos». Este propósito lo suscriben explícitamente algunos cultivadores de la llamada *economía ecológica*[6] (que incluye en su denominación los dos extremos a conciliar, a costa de incurrir en una redundancia manifiesta, al elevar al cuadrado la misma raíz *eco* y al subrayar quizá en exceso el peso de la ecología, en la transdisciplinariedad propia de los nuevos enfoques propuestos). Asimismo, este propósito aparece suscrito explícitamente desde las filas de la *economía ambiental*[7] (cuya denominación también resulta chocante, al afirmar ahora la voluntad de abarcar el «medio ambiente» que la propia economía había generado, cuando se consolidó como disciplina autónoma a costa de circunscribir su ámbito de reflexión al campo de los valores pecuniarios, dejando de lado el mundo físico). Tal propósito es fruto de un doble y obvio reconocimiento. Por una parte, que difícilmente se pueden abordar seriamente los problemas ecológicos o ambientales que la gestión diaria plantea, tratándolos en el mero campo de los valores pecuniarios, sin tener un conocimiento físico-territorial ajustado de los mismos. Al igual que, por otra parte, sería pueril tratar de resolverlos preocupándose sólo de sus dimensiones físicas, sin tener en cuenta los condicionantes monetarios e institucionales que la originan. Sin embargo, aunque creo que, en principio, la inmensa mayoría de los economistas tanto «ambientales» como «ecológicos» suscribiría esta propuesta, por desgracia, el *statu quo* sigue propiciando los enfoques sectoriales y unidimensionales, y haciendo que en la práctica diaria continúe predominando la incomunicación entre planteamientos y disciplinas que se acercan a lo económico desde perspectivas diferentes.

No parece oportuno detallar aquí los rasgos metodológicos propios del enfoque *ecointegrador*, por contraposición a los de la economía estándar, dado que ya se hizo en el libro antes citado (Naredo, J. M., 1987, 2.ª ed. 1996). Pero resulta imprescindible recordar que los fundamentos del enfoque *ecointegrador* propuesto afectarían al método, al instrumental... e incluso al propio

---

[6] Véase, por ejemplo, el texto introductorio de CONSTANZA, R., DALY, H. y BARTHOLOMEW, J. A., «Goals, Agenda and Policy Recomendations for Ecological Economics» publicado en la selección, a la que antes se hizo referencia, editada por CONSTANZA, R. (1991), bajo el significativo título de *Ecological Economics: the Science and Management of Sustainability.*

[7] Véase, por ejemplo, AZQUETA, D. (1994), «Economía, medio ambiente y economía ambiental», *Revista Española de Economía*, monográfico sobre «Recursos Naturales y Medio Ambiente». Tras advertir que la *economía ecológica* trabaja estableciendo «restricciones» y resolviendo problemas en los que no suele caber elección, y que la *economía ambiental* busca, por el contrario, aquel campo en el que los grados de libertad son mayores y la valoración económica adquiere sentido, este autor señala que «trascendiendo este terreno, en el que ambas proporcionan un aporte complementario, vuelven a converger en el campo de la política ambiental, en el que ambas recomiendan una combinación de medidas de intervención estatal y de instrumentos de mercado. Valga pues decir, que [...] ambas tienen mucho más de complementario que de competitivo».

estatuto de la economía, al sacarla del universo aislado de los valores de cambio en el que hoy se desenvuelve para hacer de ella una disciplina obligadamente transdisciplinar. Con lo cual el razonamiento económico dejaría de alimentar el oscurantismo de un conocimiento parcelario para contribuir a la reunificación del saber en torno a la problemática horizontal que la gestión plantea en las sociedades de hoy. Pero la ampliación y mayor relevancia del campo de lo económico demandan a su vez una mayor flexibilidad de enfoques: el enfoque económico estándar perdería así su pretendida generalidad, junto con la de los «equilibrios» y «óptimos» de él derivados, que pasarían a considerarse frutos particulares de los posibles escenarios físicos e institucionales que ahora serían objeto explícito de reflexión económica, en vez de seguir siendo tomados como algo ajeno a ésta.

La consecuencia lógica de este modo de razonar es que el mercado deja de ser la panacea que, se suponía, debería garantizar por sí sola el «óptimo económico», para convertirse en un instrumento a utilizar sobre bases controladas para conseguir soluciones que se adapten a determinados objetivos o estándares socialmente acordados. Lo que empuja a abrir el universo hasta ahora aislado de lo económico a la realidad física, a sus modelos predictivos, a las opciones tecnológicas y a los procesos de negociación social, trasladando el centro de discusión económica desde el interior del mercado hacia informaciones e instituciones exteriores al mismo, con el consiguiente cambio de estatuto de la propia economía. La noción misma de **sistema económico** perdería el carácter absoluto que hasta ahora se le ha venido atribuyendo, para dar paso a planteamientos más modestos y flexibles: ya no se trata de describir y completar *el sistema* que –se suponía– rige en cada uno de esos mundos separados –físico, económico, etc.– sino de estudiar el comportamiento y la conexión entre los diversos sistemas que podrían representarlos para utilizar aquellos que resulten más adecuados a los contextos y finalidades en que se enmarque su aplicación. No se trataría así de rechazar o de «falsear» la idea al uso de sistema económico, sino de relativizarla conectándola con los otros sistemas que informan sobre aspectos relevantes del proceso económico (incluido su lado oscuro antes mencionado). Lo cual nos llevaría a dejar de hablar de EL SISTEMA ECONÓMICO, en el sentido absoluto que lo hacen los manuales, para razonar más bien sobre una ECONOMÍA DE LOS SISTEMAS que ampliaría su objeto de estudio y desplazaría el centro de gravedad de sus preocupaciones, desde el sistema de los valores mercantiles hacia los condicionantes del universo físico e institucional que lo envuelven.

CAPÍTULO 4
EL ENFOQUE «ECOINTEGRADOR» Y SU SISTEMA DE RAZONAMIENTO

José Manuel Naredo

Parece obligado aclarar las diferencias en el objeto de estudio y la idea de sistema que separan al enfoque *ecointegrador* de aquel propio de la economía estándar reproduciendo para ello dos gráficos tomados del libro *La economía en evolución*, antes citado.

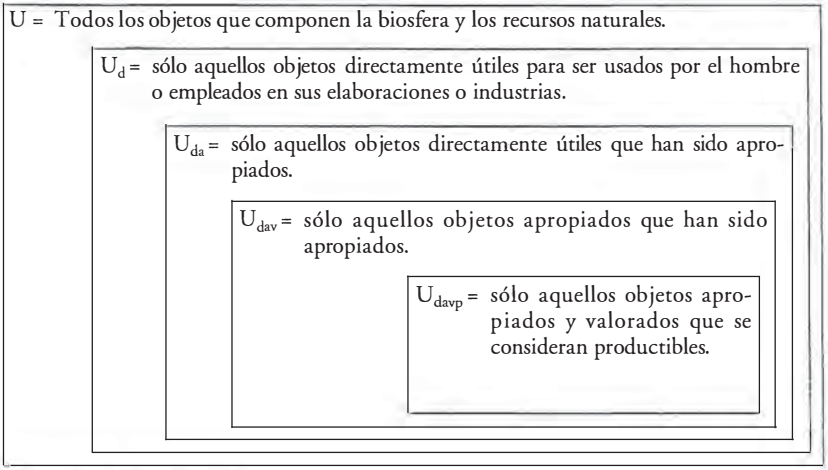
El gráfico 4.1 muestra que aunque ambos enfoques económicos afirmen ocuparse de la gestión de lo útil y lo escaso, el primero de ellos considera que toda la biosfera y los recursos puedan ser a la vez escasos y de alguna manera (más o menos inmediata) útiles, tomando el conjunto U como objeto de estudio: la cadena sin fin de relaciones que registran los ecosistemas apoya la opinión de los practicantes de esa «economía de la naturaleza» del siglo XVIII cuando pensaban que desde la modesta lombriz de tierra, tan ponderada por Linneo, hasta el insecto más humilde no carecían de utilidad, aunque también pudieran resultar molestos para el hombre.

Sin embargo, la economía estándar –como habían precisado sus formalizadores neoclásicos (Jevons, Walras, etc.)– sólo se ocupa de aquello que, siendo de utilidad directa para los hombres, resulte además apropiable, valorable y productible, tomando así como objeto de estudio el subconjunto Udavp. Lo cual explica el diálogo de sordos que muchas veces se produce entre economistas y ecologistas: mientras que los primeros circunscriben su razonamiento al *oikos* más restringido de los valores de cambio, los segundos razonan sobre aquel otro más amplio de la biosfera y los recursos, con independencia de que sean o no valorados.

Es evidente que el conjunto de los valores de cambio se puede ampliar a costa de los otros conjuntos, a base de valorar los bienes «libres» que carecían de valor. Y ello se consigue atribuyendo a alguien la propiedad sobre esos bienes (Uda) para que comercie con ellos y los haga adquirir un valor de cambio (Udav). El hecho de que la propiedad inequívocamente definida sobre un bien sea la puerta de acceso a su valoración mediante la puja mercantil y, con ello, a su entrada en el

Gráfico 4.1

LOS OBJETOS ÚTILES Y SU RELACIÓN CON LA IDEA USUAL DE SISTEMA ECONÓMICO



$U_{davp} \subset U_{dav} \subset U_{da} \subset U_d \subset U$

Fuente: NAREDO, J. M. (1987), *La economía en evolución. Historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico,* Madrid, Siglo XXI, 2.ª edición actualizada de 1996, p. 421.

reino de la teoría económica estándar, es algo que ya habían precisado autores como Senior y Walras hace más de un siglo y que al parecer han tenido que redescubrir los economistas contemporáneos de la mano de Coase, para dar lugar a una *economía institucional* que diga cuándo se debe abrir esa puerta y en qué condiciones para que la valoración tenga efectos previamente definidos como favorables sobre los recursos (y residuos) a gestionar.

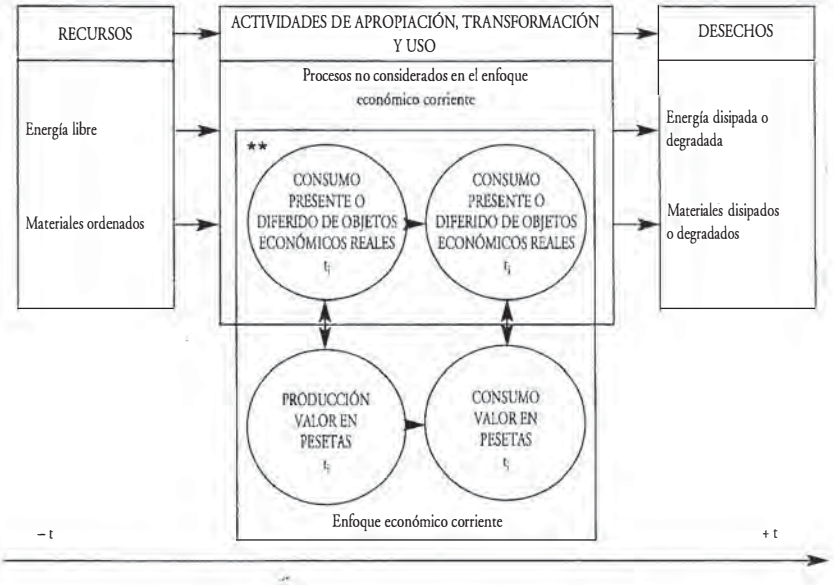
La llamada *economía ambiental*, para aplicar la lógica coste-beneficio a los bienes «libres» que integran ese medio ambiente, tiene que empezar por valorarlos, ya sea implantando la propiedad y el mercado sobre ellos o simulando dicho mercado para imputarles valores teóricos apoyados sobre el cálculo de «costes de oportunidad», «precios sombra», valores más o menos «contingentes», etc. Sin embargo, la *economía ecológica* ha de preocuparse, en primer lugar, de la naturaleza física de los bienes a gestionar y de la lógica de los sistemas que los envuelven, considerando desde la escasez objetiva y la renovabilidad de los recursos empleados, hasta la nocividad y el posible reciclaje de los residuos generados. El enfoque *ecointegra-*

dor debe considerar tales informaciones físicas y socioeconómicas como prerrequisitos necesarios para orientar con conocimiento de causa el marco institucional, y diseñar los instrumentos económicos, para alcanzar ciertas soluciones y no otras en costes, precios y cantidades de recursos utilizados, de productos obtenidos y de residuos emitidos. Por ejemplo, para orientar de modo eficiente y «sostenible» la gestión del agua en un territorio, el enfoque *ecointegrador* exigiría información acerca del ciclo hidrológico y de los habitantes de ese territorio (sobre sus actividades, sus puntos de vista, etc.) para extraer después las recomendaciones oportunas sobre los derechos de propiedad y la normativa de uso del recurso, que afectarán a la parte del mismo sujeta a venta o facturación y a los precios, tasas, cánones o multas que se hayan de cobrar por el uso y deterioro del recurso. El enfoque *ecointegrador* ha de promover, así, la reflexión interactiva entre los cambios del marco institucional y su influencia sobre las propias funciones de oferta y demanda de agua, consustanciales a su vez a determinados estilos de vida y usos del territorio, cuyo mantenimiento reclama un marco institucional adecuado.

A la luz de lo anterior, el gráfico 4.2 presenta otra versión de ese objeto de estudio más amplio propio de la *economía ecológica* y, por ende, del enfoque *ecointegrador*, en la que se muestra que el proceso económico recorre todos los conjuntos representados en el gráfico 4.1, alcanzando desde la existencia física de los objetos económicos en forma de *recursos*, antes de que hubieran sido valorados, hasta su existencia posterior en forma de *residuos*, cuando, por definición, hayan perdido su valor de cambio. Desde esta perspectiva física, el proceso de producción ha de representarse a través de sistemas abiertos y dependientes de la energía y materiales que intercambian con su medio ambiente. Al igual que los procesos vitales a sus diversos niveles de agregación (la célula, el organismo, el ecosistema o la biosfera), este sistema de representación del proceso económico se caracteriza por su desequilibrio permanente y su irreversibilidad respecto al tiempo. En Naredo, J. M. 1987, 2.ª ed. 1996 se analizan las diferencias que separan a este tipo de sistema de aquel otro aislado y permanentemente equilibrado sobre el que razona la economía estándar, en cuyo interior nacen los objetos económicos cuando la «producción» les infunde valor, y se extinguen cuando desaparece su valor mediante el «consumo». Este proceso de valoración recae sobre una parte del proceso físico antes mencionado. Así, en el ejemplo del agua al que antes se hizo referencia, sólo parte del ciclo hidrológico es objeto de tarificación y cobros monetarios. Sin embargo, el ciclo hidrológico constituye una unidad en sí mismo, cuyo comportamiento físico puede ser estudiado y modelizado. Lo mismo podría decirse de los bosques u otros derivados de la fotosíntesis, de la pesca, etc.

Gráfico 4.2

OBJETO DE ESTUDIO DEL ENFOQUE ECOINTEGRADOR Y SU RELACIÓN CON EL ENFOQUE ECONÓMICO CORRIENTE*



* Los materiales y la energía están sujetos a una ley de conservación, pero también a la ley de la entropía que contempla su degradación cualitativa e irreversible. El sistema de representación es desequilibrado y abierto.

** Los objetos económicos reales aparecen y desaparecen en el sistema en tanto que lo hacen sus correspondientes valores de cambio. El sistema se rige por una ley de conservación del valor, según la cual Valor de Producción = Valor de Consumo (presente o diferido).

Fuente: NAREDO, J. M. (1987), *La economía en evolución. Historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico,* Madrid, Siglo XXI, 2.ª edición actualizada de 1996, p. 507.

El gráfico 4.2 recoge este solapamiento entre la versión física y monetaria del proceso de producción, en el que las actividades de apropiación, transformación y uso de los recursos naturales van revalorizando los productos, mediante la «producción» y desvalorizándolos mediante el «consumo» intermedio o final. La clave del enfoque *ecointegrador* pasa por analizar conjuntamente las versiones físicas y monetarias de los procesos económicos, asumiendo que tras la *creación* de valor monetario registrada en los procesos llamados de *producción* se esconden siempre ciertos *deterioros* físicos. Lo mismo que tras la *destrucción* de valor ocasionada en los procesos llamados de *consumo* se esconde la pervivencia física de los *residuos.*

El gráfico 4.3 muestra cuál sería la información necesaria para hacer operativo el enfoque *ecointegrador* en un determinado territorio: haría falta información inventarial sobre las dotaciones de recursos, sobre el comportamiento de los sistemas utilizadores de esos recursos y sobre los residuos generados, detallando la forma en que se acumulan, dispersan o reciclan, incidiendo de nuevo sobre los recursos. La modelización de los flujos físicos de los sistemas utilizadores conectaría con la información relativa a sus contrapartidas monetarias, recogidas en las estadísticas económicas corrientes, agregadas en las contabilidades nacionales, tal y como aparece en el gráfico 4.3.

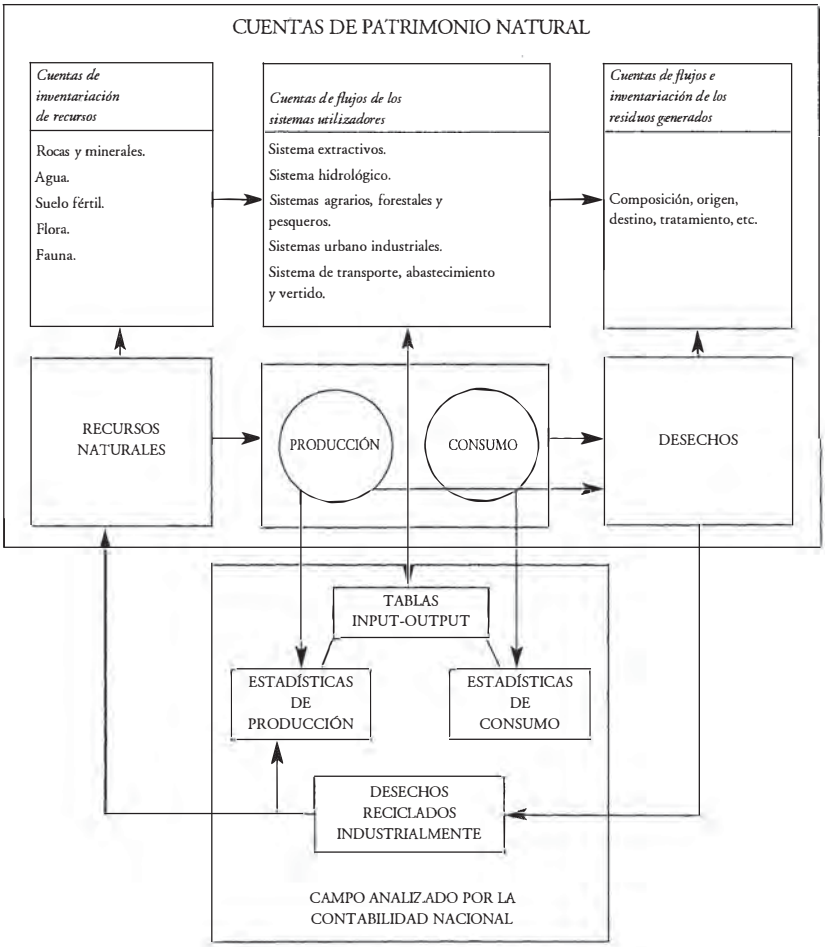
La extensión del registro patrimonial a recursos no reproductibles lleva a mostrar la insuficiencia de considerar el proceso económico desde el prisma exclusivo de la *producción* (de valor) si queremos asegurar que los *valores añadidos* o rentas que se obtienen como saldo puedan destinarse íntegramente al consumo sin que ello entrañe un empobrecimiento de sus titulares, tal y como sugirió Hicks hace tiempo[8]. Junto a la noción al uso de *producción*, que ignora el origen físico de los procesos, la noción de *amortización* aparece también como único mecanismo para evitar la degradación del patrimonio de los agentes económicos: éstos deben establecer unas reservas monetarias que compensen el coste del desgaste de sus activos físicos para asegurar su reposición cuando lleguen al final de su vida útil. El problema estriba en que muchos de los recursos patrimoniales que los fisiócratas incluían, en parte bajo la denominación de bienes fondo, no son renovables o productibles, no pudiendo por tanto reponerse.

En el caso particular de una empresa, este problema se resuelve asegurando, en su contabilidad privada, que la venta de sus productos le permita amortizar el valor monetario de los bienes fondo adquiridos. Una vez consumidos estos bienes fondo no reproductibles, la empresa podrá trasladar así su actividad a otros recursos, sin quebranto de su patrimonio medido en términos monetarios. Sin embargo, si se amplía la escala del razonamiento al nivel estatal o incluso planetario, los límites objetivos que comportan las dotaciones de bienes fondo disponibles hacen inadecuados los principios que inspiraban el razonamiento y el registro contable propios de la empresa privada. La noción de amortización pierde su sentido para atajar procesos de degradación patrimonial que se muestran globalmente irreversibles. En estos casos, el destino de los bienes fondo a registrar debe apuntar más bien a su conservación y mejora y no hacia su consumo. Tal sería el caso del suelo fértil o de cualesquiera otros elementos constitutivos de los ciclos de materiales que mantienen la vida en la Tierra. Asimismo, sólo cabe paliar globalmente la pérdida patrimonial que supone

[8] HICKS, J. R. (1946), *Value and Capital*, Oxford, Oxford University Press.

Gráfico 4.3

ESTADÍSTICAS REQUERIDAS POR EL ENFOQUE ECOINTEGRADOR Y SU RELACIÓN CON LAS ESTADÍSTICAS ECONÓMICAS USUALES



Fuente: NAREDO, J. M. (1987), *La economía en evolución. Historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico,* Madrid, Siglo XXI, 2.ª edición actualizada de 1996, p. 508.

la extracción y el uso de sustancias metálicas, o de cualquier otro *stock* no renovable, desarrollando su conservación y reciclaje, y no mediante su simple amortización en dinero. Es decir, que sólo completando los ciclos de materiales hasta asegurar que los residuos se conviertan en recursos, se puede evitar la profunda asimetría que acusa un *sistema económico* que registra flujos de renta supuestamente renovables apoyados en el consumo o deterioro físico de *stocks* no renovables. De ahí que, además del objetivo de lograr un uso eficiente de los mismos, debe también de atenderse el objetivo de desplazar este uso hacia recursos que, pese a no ser renovables en la naturaleza, sean fácilmente recuperables por la industria humana: anticipemos que la facilidad y el bajo coste físico del reciclado constituye, así, un requisito de primer orden para guiar la selección de materiales a utilizar en una economía que se pretenda sostenible.

En resumen, que el enfoque *ecointegrador* propone abrir la reflexión económica hacia el mundo físico en el que se inserta y con el que interacciona, echando mano de los conocimientos de las ciencias de la naturaleza que se ocupan de él. Para ello se ha de partir de un conocimiento mínimo de los *stocks* y de los bienes fondo que componen los llamados recursos naturales y de los ecosistemas de los que forman parte, así como de las actividades de extracción, elaboración y uso de que son objeto y de los residuos y deterioros que ocasionan. Todo ello en conexión con los procesos de *producción*, *distribución* y *consumo* de valor, objeto de los enfoques económicos ordinarios, ya que dichos procesos son los que actualmente mueven, y en gran medida determinan, la relación de nuestras sociedades con el entorno físico.

Por otra parte, el enfoque ecointegrador, además de abrir la reflexión económica hacia el mundo físico, debe ampliarla hacia el campo de lo financiero para analizar todos los procesos de generación de valor y no sólo los que las contabilidades nacionales acostumbran a registrar como producción. Pues ya anticipamos que, si bien el sistema económico-mercantil condiciona el comportamiento físico del proceso económico, el sistema financiero condiciona a su vez a ese sistema económico-mercantil.

Como ya se puso de manifiesto en la introducción, los enfoques que estamos proponiendo y las aplicaciones que se desarrollan a continuación, convergen con la mayor preocupación por investigar el funcionamiento físico de los sistemas y actividades económicas que hizo eclosión durante el último decenio en los principales países desarrollados. Esta preocupación surge desde perspectivas y problemas diferentes que se acaban conectando al adoptar enfoques sistémicos. Por una parte, está el análisis de la contaminación que, al asumir posiciones preventivas haciendo «auditorías ambientales», tuvo que recaer sobre el funcionamiento integrado de los procesos y razonar sobre el conjunto de los flujos de energía y materiales que los integran. Por otra, los análisis de

«ciclo de vida» (y de «calidad total»[9]) de los productos, que acaban también razonando en términos de «ecobalances» referidos al conjunto de los flujos físicos movilizados. Estos análisis conectan también con los que directamente apuntan hacia la «ecología industrial»[10], como reza el título del libro de Ayres, R. U. y L. W. (1996)[11], y hacia el análisis de los flujos de energía y materiales, entre los cuales destacan los trabajos del Instituto Wuppertal[12].

A su vez estos análisis encajan en una tradición mucho más antigua, cuyos orígenes cabría fechar en el siglo XVIII, con los trabajos de François Quesnay y los economistas hoy llamados «fisiócratas». Sin embargo, como es sabido, la voluntad de estos autores de orientar la reflexión atendiendo a la realidad física de los procesos económicos, cayó entonces en saco roto, porque no contaban ni con el apoyo ideológico e institucional ni con el aparato conceptual necesarios (recordemos que la termodinámica y la ecología todavía no existían) para que tal enfoque pudiera prosperar. Pero desde que, a lo largo de siglo XIX, Carnot, Clausius y Thompson sentaran las bases de esa economía de la física que es la Termodinámica, y Haeckel divulgara el término «ecología» como base de una nueva disciplina no han faltado autores que trabajaron en modelizar, de acuerdo ya con las modernas ciencias de la naturaleza, los flujos de energía y materiales vinculados a los sistemas intervenidos por el hombre, con el ánimo de hacer más económico su funcionamiento[13]. Valga recordar, como ejemplo, que Patrick Geddes había propuesto ya en 1885 «aplicar al estudio de los procesos eco-

---

[9] TAGUCHI, G., ELSAYED, A. y T. H. SIANG (1988), *Quality Engineering in Production Systems*, Nueva York, Mac Graw Hill Books Co.; y ARIMANY, L. (1992), «La función de calidad de Taguchi y el consumo de energía», V Jornadas sobre la Calidad de la Industria Energética, Córdoba.

[10] Sobre la convergencia de estas líneas de trabajo, véase ALLEN, D. T y K. S. ROSSELOT (1994), «Pollution Prevention at the Macro Scale: Flows of Wastes, Industrial Ecology and Life Cycle Analysis», *Waste Management*, vol. 14, nos. 3-4, pp. 178-189. Véase la acertada síntesis de ERKMAN, S. (1998), *Vers une écologie industrielle*, París, Charles Léopold Mayer Eds., 147 pp.

[11] AYRES, R. U. y L. W. AYRES (1996), *Industrial Ecology. Owards Closing the Materials Cycle*, Cheltenham (RU) y Northampton (EE UU), Edward Elgar Publishing, 416 pp.

[12] Además de las publicaciones ya citadas del Wuppertal Institute y del World Resources Institute (de Washington), entre otros, con estudios referentes a Alemania, Holanda, Estados Unidos y Japón, merece especial interés en esta línea el trabajo de FISCHER-KOWALSKI, M. y H. HABERL (1997), «Tons, Joules, and Money: Modes of Production and Their Sustainability Problems», *Society & Natural Resources*, n.º 10, pp. 61-85, referido a Austria.

[13] El lector interesado puede encontrar referencias a este colectivo de autores que abordaron los problemas económicos desde las ciencias de la naturaleza sin que pasaran a los anales de la historia oficial del pensamiento económico, en MARTÍNEZ ALIER, J. y K. SCHLÜPMANN, (1991), *La ecología y la economía*, México, FCE; y en NAREDO, J. M. (1987), *La economía en evolución*, Madrid, Siglo XXI (2.ª ed. actualizada 1996). A su vez, la serie Textos Básicos, de la colección «Economía y Naturaleza», que la Fundación Argentaria coedita con Visor Dis., contribuye a rememorar los textos hasta ahora dispersos y poco accesibles de toda una serie de autores que desde hace tiempo han venido tendiendo puentes entre economía y ciencias de la naturaleza, sin que la comunidad científica de los economistas les otorgara el reconocimiento que se merecen. Hoy día esta corriente de autores tiende a agruparse en torno a la denominada *economía ecológica* (*ecological economics*) con la asociación y la revista que llevan este nombre.

nómicos, los conceptos cuantitativos de la física –las nuevas formas de medir la materia y la energía–» [... precisando en cada caso que] «tal o cual cantidad de materia es explotada en tantas unidades; se pierde tanto en cada proceso de producción; permanece tanto en el producto final; y, después del consumo, tanto puede volver a ser explotado como producto reciclado. Se explotan tantas unidades de energía; los procesos de explotación, transporte, etc., cuestan tantas unidades, lo que queda es la energía disponible». Proponiendo, en suma, sistematizar el cómputo de la energía y los materiales empleados y de los residuos generados por unidad de producto[14]. No es cosa de relatar ahora los muy diversos empeños que desde entonces se produjeron en este sentido, que culminan en los más recientes arriba mencionados, de los que forma parte el presente trabajo. Pero sí de recordar, al menos, que estos enfoques alcanzaron un desarrollo notable en la década de los setenta, al calor de la entonces llamada «crisis energética» que trajo consigo el encarecimiento del petróleo y de las materias primas en general. No obstante, el interés por tales enfoques decayó, junto con el desplome de los precios del petróleo y de las materias primas que siguió a la citada «crisis», desplazándose la atención de los economistas desde los recursos naturales hacia el deterioro ambiental ocasionado por la emisión de contaminantes. Tras este golpe de péndulo, y pese a que todavía seguimos en una fase prolongada de bajos precios relativos de los combustibles fósiles y de las materias primas en general, acabó restableciéndose nuevamente el interés por modelizar el funcionamiento físico de los sistemas, contabilizando conjuntamente sus exigencias de energía y materiales y sus vertidos de residuos, como lo atestiguan los trabajos ya mencionados. Trabajos que están dando así un nuevo golpe de tuerca a la definición y divulgación de conceptos tales como el «requerimiento total de materiales» (diferenciándolo del requerimiento directo) de las actividades económicas y los países, o de las «mochilas» y «huellas» de deterioro ecológico que arrastran tras de sí los productos y los asentamientos humanos. Pero que sería improcedente presentarlos como novedades descontextualizadas. Por ejemplo, sorprende que la editorial Edward Elgar, especializada en estos temas, subraye el interés del nuevo libro de Robert U. Ayres *Accounting for Resources*, previsto para el mes de junio de 1998, alegando, entre otras cosas, que «introduce por vez primera la exergía como medida sintética común para evaluar y comparar los flujos físicos de los procesos y sectores entre períodos de tiempo, regiones y países»[15], cuando la exergía, o energía

---

[14] GEDDES, P. (1885), *An Analysis of the Principles of Economics*, Edimburgo, Williams and Norgate. Referencia a la traducción española del texto publicada en MARTÍNEZ ALIER, J. (1995), ed., *Los principios de la economía ecológica*, textos de P. Geddes, S. A. Podolinsky y F. Soddy, Madrid, Fundación Argentaria y Visor Dis., pp. 23-61.

[15] *Cfr.* Catálogo de Edward Elgar Publishing Limited, *Environment & Ecology*, Backlist and New Titles 1997/1998, p. 34.

disponible, ya se venía utilizando durante decenios para describir sintéticamente el funcionamiento físico de sistemas agrarios, industriales y urbanos[16]. El presente trabajo avanza en este sentido desarrollando y aplicando propuestas metodológicas anteriormente esbozadas[17] en el sentido que más adelante se expone.

[16] Se sale de las pretensiones de este trabajo reseñar la larga serie de estudios que enjuiciaron los procesos y sistemas analizando sus flujos de energía y materiales, debidos a autores como B. Commoner, H. T. y E. P. Odum, D. Pimentel, M. Slesser, G. Leach, etc., en otro tiempo de referencia obligada. Entre ellos encajan aplicaciones a los sistemas agrarios y urbanoindustriales españoles realizadas por los autores del presente libro, tales como NAREDO, J. M. y P. CAMPOS (1980), «Los balances energéticos de la agricultura española», *Agricultura y Sociedad*, n.º 15, pp. 161-255; NAREDO, J. M. y J. FRÍAS (1988), *Los flujos de energía, agua, materiales e información en la Comunidad de Madrid*, Madrid, Consejería de Economía de la CAM; ... LÓPEZ-GÁLVEZ, J. y J. M. NAREDO (1996), *Sistemas de producción e incidencia ambiental del cultivo enarenado y en sustratos*, Madrid, Fundación Argentaria y Visor Dis. S.A.

[17] Cabe mencionar, entre los antecedentes, VALERO, A., M. A. LOZANO y M. MUÑOZ, (1986), *A General Theory of Exergy Saving*, I, II y III, ASME Book, n.º 40341C, WAM-186, AES 2-3, pp. 1-8, 9-17 y 17-21 (galardonado con el premio «Edward F.Obert», concedido por el Comité de Sistemas Energéticos Avanzados (AES) de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) que constituye el foro internacional más prestigioso en esta materia); y NAREDO, J. M. y A. VALERO, (1989), «Sobre la conexión entre termodinámica y economía convencional», *Información Comercial Española*, jun.-jul., pp. 7-16.

CAPÍTULO 5
SOBRE LA «SOSTENIBILIDAD» DE LOS SISTEMAS

José Manuel Naredo

5.1. Introducción

Tras la aparición del Informe sobre *Nuestro futuro común* (1987-1988[18]) coordinado por Gro Harlem Brundtland en el marco de las Naciones Unidas, se fue poniendo de moda el objetivo del «desarrollo sostenible», entendiendo por tal aquel que permite «satisfacer nuestras necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas». A la vez que se extendía la preocupación por la «sostenibilidad», se subrayaba implícitamente, con ello, la *insostenibilidad* del modelo económico hacia el que nos ha conducido la civilización industrial.

5.2. Sobre el origen y el uso del término «sostenible»

La aceptación generalizada del propósito de hacer más «sostenible» el desarrollo económico es, sin duda, ambivalente. Por una parte evidencia una mayor preocupación por la salud de los ecosistemas que mantienen la vida en la Tierra, desplazando esta preocupación hacia el campo de la gestión económica. Por otra, la grave indefinición con la que se maneja este término empuja a hacer que las buenas intenciones que lo informan se queden en meros gestos en el vacío, sin que apenas contribuyan a reconvertir la sociedad industrial sobre bases más sostenibles. Reflexionemos sobre el origen de este término, para hacerlo luego sobre su contenido.

El extendido uso del epíteto «sostenible» en la literatura económico-ambiental se inscribe en la inflación que acusan las ciencias sociales de tér-

[18] BRUNDTLAND, G. H. (1987), *Our Common Future*, Oxford, Oxford University Press. (Trad. en castellano, *Nuestro futuro común*, Madrid, Alianza, 1988.)

minos de moda cuya ambigüedad induce a utilizarlos más como conjuros que como conceptos útiles para comprender y solucionar los problemas del mundo real. Como ya había advertido tempranamente Malthus en sus *Definiciones en economía política*[19], el éxito en el empleo de nuevos términos viene especialmente marcado, en las ciencias sociales, por su conexión con el propio *statu quo* mental, institucional... y terminológico ya establecidos en la sociedad en la que han de tomar cuerpo. El éxito del término «sostenible» no es ajeno a esta regla, sobre todo teniendo en cuenta que nació acompañando a aquel otro de «desarrollo» para hablar así de «desarrollo sostenible». Recordemos las circunstancias concretas que propiciaron el éxito de este término y que enterraron aquel otro de «ecodesarrollo» que se empezaba a usar en los inicios de los setenta.

Cuando a principios de la década de los setenta el Primer Informe del Club de Roma sobre *Los límites del crecimiento*, junto con otras publicaciones y acontecimientos, pusieron en tela de juicio la viabilidad del crecimiento como objetivo económico planetario, Ignacy Sachs (consultor de Naciones Unidas para temas de medioambiente y desarrollo) propuso la palabra «ecodesarrollo» como término de compromiso que buscaba conciliar el aumento de la producción, que tan perentoriamente reclamaban los países del Tercer Mundo, con el respeto a los ecosistemas necesario para mantener las condiciones de habitabilidad de la tierra. Este término empezó a utilizarse en los círculos internacionales relacionados con el «medio ambiente» y el «desarrollo», dando lugar a un episodio que vaticinó su suerte. Se trata de la declaración en su día llamada de Cocoyoc, por haberse elaborado en un seminario promovido por Naciones Unidas al más alto nivel, con la participación de Sachs, que tuvo lugar en 1974 en el lujoso hotel de ese nombre, cerca de Cuernavaca, en México. El propio presidente de México, Echeverría, suscribió y presentó a la prensa las resoluciones de Cocoyoc, que hacían suyo el término «ecodesarrollo». Unos días más tarde, según recuerda Sachs en una reciente entrevista[20], Henry Kissinger manifestó, como jefe de la diplomacia norteamericana, su desaprobación del texto en un telegrama enviado al presidente del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente: había que retocar el vocabulario y, más concretamente, el término «ecodesarrollo» que quedó así vetado en estos foros. Lo sustituyó más tarde aquel otro del «desarrollo sostenible», que los economistas más convencionales podían aceptar sin recelo, al confundirse con el «desarrollo autosostenido» (*self sustained growth*) introducido tiempo atrás por Rostow y barajado profusamente por los economistas

[19] MALTHUS, T. R. (1827), *Definitions in Political Economy. Preceded by an Inquiry into the Rules wich Ought to Guide Political Economists in the Deviation from the Rules in their Writings*, Londres. (Ref. NAREDO, J. M. (1987), *La economía en evolución. Historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico*, Madrid, Siglo XXI.)

[20] SACHS, I. (1994), entrevista en *Science, Nature, Societé*, vol. 2, n.º 3.

que se ocupaban del desarrollo. Sostenido (*sustained*) o sostenible (*sustainable*), se trataba de seguir promoviendo el desarrollo tal y como lo venía entendiendo la comunidad de los economistas. Poco importa que algún autor como Daly matizara que para él «desarrollo sostenible» es «desarrollo sin crecimiento», contradiciendo la acepción común de desarrollo que figura en los diccionarios estrechamente vinculada al crecimiento.

Predominó así la función retórica del término «desarrollo sostenible» subrayada por algunos autores[21], que explica su aceptación generalizada: «la sostenibilidad parece ser aceptada como un término mediador diseñado para tender un puente sobre el golfo que separa a los "desarrollistas" de los "ambientalistas". La engañosa simplicidad del término y su significado aparentemente manifiesto ayudaron a extender una cortina de humo sobre su inherente ambigüedad»[22]. En fin, que parece que lo que más contribuyó a sostener la nueva idea de la «sostenibilidad» fueron las viejas ideas del «crecimiento» y el «desarrollo» económico, que tras la avalancha crítica de los setenta necesitaban ser apuntaladas.

De esta manera, veinte años después de que el I Informe del Club de Roma preparado por Meadows sobre *Los límites del crecimiento* (1971) pusiera en entredicho las nociones de crecimiento y desarrollo utilizadas en economía, estamos asistiendo ahora a un renovado afán de hacerlas «sostenibles» asumiendo acríticamente esas nociones que se habían afianzado abandonando las preocupaciones que originariamente las vinculaban al medio físico en el que se encuadraban. La forma en la que se ha redactado y presentado en 1992 un nuevo *Informe Meadows*, titulado *Más allá de los límites*[23], constituye un buen exponente de la fuerza con la que soplan los vientos del conformismo conceptual en el discurso económico. El deterioro planetario y las perspectivas de enderezarlo son bastante peores que las de hace veinte años, pero los autores, para evitar que se les tilde de catastrofistas, se sienten obligados a estas alturas a escudarse en la confusa distinción entre crecimiento y desarrollo económico, para advertir que, «pese a existir límites al crecimiento, no tiene por qué haberlos al desarrollo»[24], y a incluir el prólogo de un economista tan consagrado como es Tinbergen, y galardonado además con el premio Nobel, en el que se indica que el libro es útil porque «clarifica las condiciones bajo las cuales el

---

[21] DIXON, J. A. y L. A FALLON (1991), «El concepto de sustentabilidad: sus orígenes, alcance y utilidad en la formulación de políticas», Vidad, J. (comp.) *Desarrollo y medio ambiente*, Santiago de Chile, CIEPLAN (la versión original en inglés apareció en *Society and Natural Resources*, vol. 2, 1989). Vease también GUIMARÃES, R. P. (1994), «El desarrollo sustentable: ¿propuesta alternativa o retórica neoliberal?», *Revista EURE*, vol. XX, n.º 61.

[22] O'RIORDAN, T. (1988), «The Politics of Sustainability» en R. K. Turner (ed.), *Sustainable Management: Principle and Practice*, Londres, Turner y Boulder, Belhaven Press y Westview Press.

[23] MEADOWS, D. H. y D. L. (1991), *Beyond the Limits*. (Hay traducción en castellano de El País & Aguilar, Madrid, 1992.)

[24] *Ibidem*, p. 25.

crecimiento sostenido, un medio ambiente limpio e ingresos equitativos pueden ser organizados». Se trata, en suma, de oscurecer el hecho de que si por desarrollo se entiende algo que entraña «una aceleración sostenida por una fuerza constante, es seguro que no puede ser viable. Por tanto, la frase *desarrollo sostenible* sería lo que los anglosajones llaman un *oximoron*, o combinación de términos contradictorios o incongruentes [...]»[25], tal y como el Primer Informe Meadows del Club de Roma sobre *Los límites del crecimiento* se había encargado de subrayar hace un cuarto de siglo.

Sin embargo, a la vez que se extendió la utilización banalmente retórica del término «desarrollo sostenible», se consiguió también hacer que la idea misma de «sostenibilidad» cobrara vida propia y que la reflexión sobre la viabilidad a largo plazo de los sistemas agrarios, industriales... o urbanos tuviera cabida en las reuniones y proyectos de administraciones y universidades, dando lugar a textos como el que estamos elaborando que pretenden avanzar en la clarificación y aplicación de esta idea.

5.3. Sobre el contenido del término «sostenible»

Para reconvertir la sociedad actual hacia bases más sostenibles o físicamente viables, habría que empezar por romper ese «cajón de sastre» de la *producción* de valor, para enjuiciar el comportamiento físico de las actividades que contribuyen a ella. Esto es lo que con poca fortuna pretendieron los autores hoy llamados fisiócratas cuando, hace más de dos siglos, proponían aumentar la producción de riquezas «renacientes» (hoy diríamos renovables) sin detrimento de los «bienes fondo» o de los *stocks* de riquezas preexistentes, siendo descalificados en este empeño por los economistas posteriores, que erigieron el mencionado «cajón de sastre» del valor como centro de la ciencia económica, separándolo del contexto físico y social en el que se desenvolvía. Vemos, pues, que no se trata tanto de «redescubrir la pólvora» de la sostenibilidad como de desandar críticamente el camino andado, volviendo a conectar lo físico con lo monetario y la economía con las ciencias de la naturaleza.

La mayor parte de la indefinición actual procede del empeño de conciliar el crecimiento (o desarrollo) económico con la idea de sostenibilidad, cuando cada uno de estos dos conceptos se refieren a niveles de abstracción y sistemas de razonamiento diferentes: las nociones de crecimiento (y de desarrollo) económico encuentran su definición en los agregados monetarios homogéneos de «producción» y sus derivados que segrega la idea usual de sistema económico, mientras que la preocupación por la sostenibilidad recae sobre procesos físicos singulares y heterogéneos. En efecto, la idea de crecimiento (o desarrollo) económico con la que hoy tra-

[25] MARGALEF, R. (1996), *Una ecología renovada a la medida de nuestros problemas*, *op. cit.*, p. 34.

bajan los economistas, se encuentra desvinculada del mundo físico y no tiene ya otro significado concreto y susceptible de medirse que el referido al aumento de los agregados de Renta o Producto Nacional. Es decir, de agregados monetarios que, por definición, hacen abstracción de la naturaleza física heterogénea de los procesos que los generan, careciendo por tanto de información y de criterios para enjuiciar la sostenibilidad de estos últimos: para ello habría, como se ha indicado, que romper la homogeneidad de ese «cajón de sastre» de la producción de valores pecuniarios para analizar la realidad física subyacente.

En primer lugar hay que advertir que la ambigüedad conceptual de fondo no puede resolverse mediante simples retoques terminológicos o definiciones descriptivas o enumerativas más completas de lo que ha de entenderse por sostenibilidad (al igual que ocurre con las nociones de producción o de desarrollo, que encuentran implícitamente su definición en la propia idea de sistema económico): a la hora de la verdad, el contenido de este concepto no es fruto de definiciones explícitas, sino del sistema de razonamiento que apliquemos para acercarnos a él. Evidentemente si, como a menudo ocurre, no se aplica ningún sistema en el que el término sostenibilidad concrete su significado, éste se seguirá manteniendo en los niveles de brumosa generalidad en los que suele moverse. Sin que las brumas se disipen por mucho que se intente matizarlo con definiciones explícitas y se discuta si interesa más traducir el término inglés originario *sustainability* por sostenibilidad, durabilidad... o sustentabilidad.

Por tanto, clarificar la situación exige, en primer lugar, identificar cuál es la interpretación del objetivo de la sostenibilidad que se puede hacer desde la noción usual de *sistema económico*, cuáles son las recomendaciones para atenderlo que se extraen dentro de este *sistema* de razonamiento y cuáles son las limitaciones de este planteamiento. Afortunadamente estas cuestiones han sido ya respondidas por un economista tan altamente cualificado para ello como es Robert M. Solow. Este autor, que había sido galardonado con el premio Nobel en 1987 precisamente en razón de sus trabajos sobre el crecimiento económico, se tomó la molestia de definir la sostenibilidad «desde la perspectiva de un economista»[26] y en hacer las oportunas recomendaciones al respecto[27].

Solow señala que si queremos que la sostenibilidad signifique algo más que un vago compromiso emocional, debemos precisar lo que se quiere conservar, concretando en algo el genérico enunciado del Informe de la Comisión Brundtland arriba mencionado. Para Solow lo que debe ser con-

---

[26] SOLOW, R. (1991), «Sustainability: An Economist's Perspective», Dorfman, R. y Dorfman, N. S. (eds.), *Economics of the Environment*, 3.ª ed., Nueva York.

[27] SOLOW, R. (1992), «An Almost Practical Step towards Sustainability», Conferencia pronunciada con motivo del 40 aniversario de Resources for the Future, 8-10-1991.

servado es el valor del *stock* de capital (incluyendo el capital natural) con el que cuenta la sociedad, que es lo que, según este autor, otorgaría a las generaciones futuras la posibilidad de seguir produciendo bienestar económico en igual situación que la actual. Para Solow el problema estriba, por una parte, en lograr una valoración que se estime adecuadamente completa y acertada del *stock* de capital y del deterioro ocasionado en el mismo, por otra, en asegurar que el valor de la inversión que engrosa anualmente ese *stock* cubra, al menos, la valoración anual de su deterioro. «El compromiso de la sostenibilidad se concreta así en el compromiso de mantener un determinado montante de inversión productiva», pues, según este autor, «el pecado capital no es la extracción minera, sino el consumo de las rentas obtenidas de la minería»[28]. El tratamiento del tema de la sostenibilidad en términos de inversión explica que se haya extendido entre los economistas la idea de que el problema ambiental encontrará solución más fácil cuando la producción y la renta se sitúen por encima de ciertos niveles que permitan aumentar sensiblemente las inversiones en mejoras ambientales. Como explica también la recomendación a los países pobres de anteponer el crecimiento económico a las preocupaciones ambientales, para lograr cuanto antes los niveles de renta que, se supone, les permitirán resolver mejor su problemática ambiental.

Como no podía ser de otra manera, vemos que la lectura del objetivo de la sostenibilidad que se puede hacer desde la idea usual de sistema económico, es una lectura que se circunscribe lógicamente al campo de lo monetario. Pero, como el propio Solow precisa, ello no quiere decir que el problema así planteado pueda encontrar solución en el universo aislado de los valores pecuniarios o de cambio, a base de que los economistas especializados descubran nuevas técnicas de valoración de los recursos naturales y ambientales y practiquen los oportunos retoques en las estimaciones del *stock* de capital y de los agregados, obteniendo así el «verdadero» Producto Neto que puede ser consumido sin que se empobrezcan las generaciones futuras. Solow reconoce que los precios ordinarios de transacción no aportan una respuesta adecuada y advierte que «francamente, en gran medida, mi razonamiento depende de la obtención de unos precios-sombra aproximadamente correctos» para lo cual, concluye, «estamos abocados a depender de indicadores físicos para poder juzgar la actuación de la economía con respecto al uso de los recursos ambientales. Así, el marco conceptual propuesto debería ayudar también a clarificar el pensamiento en el propio campo del medio ambiente»[29]. Con independencia de la fe que se tenga en las posibilidades que brinda el camino sugerido por Solow de corregir los agregados económicos habituales, subrayemos, como él mismo hace, que

[28] *Ibidem.*
[29] *Ibidem.*

su propuesta no está reñida con, sino que necesita apoyarse en, el buen conocimiento de la interacción de los procesos económicos con el medio ambiente en el que se desenvuelven, restableciendo la conexión entre el universo aislado del valor en el que venían razonando los economistas y el medio físico circundante o, con palabras diferentes, abriendo el «cajón de sastre» de la producción de valor para analizar los procesos físicos subyacentes. El presente trabajo aporta metodología e información relevante para estimar en términos de coste físico el «capital mineral» de la Tierra y enjuiciar la actuación de la economía con respecto a los recursos naturales.

Con todo, hay que advertir que el tratamiento de las cuestiones ambientales (y, por ende, de la propia idea de sostenibilidad) ha escindido hoy las filas de los economistas. En efecto, por una parte, se han magnificado las posibilidades del enfoque monetario mencionado sin subrayar su dependencia de la información física sobre los recursos y los procesos. Por otra, toda una serie de autores más o menos vinculados a la corriente agrupada en torno a la revista y la asociación «Ecological Economics», advierten que el tratamiento de las cuestiones ambientales, y de la propia idea de sostenibilidad, requieren no sólo retocar, sino ampliar y reformular la idea usual de sistema económico. La principal limitación que estos autores advierten en la interpretación que se hace de la sostenibilidad desde la noción usual de sistema económico, proviene de que los objetos que componen esa versión ampliada del *stock* de capital no son ni homogéneos ni necesariamente sustituibles. Es más, se postula que los elementos y sistemas que componen el «capital natural» se caracterizan más bien por ser complementarios que sustitutivos con respecto al capital producido por el hombre[30], como ya indicamos en apartados anteriores. Esta limitación se entrecruza con aquella otra que impone la irreversibilidad propia de los principales procesos de deterioro (destrucción de ecosistemas, suelo fértil, extinción de especies, agotamiento de depósitos minerales, cambios climáticos, etc.). Ehrlich apunta que el flujo circular en el que la inversión corrige el deterioro ocasionado por el propio sistema que la produce, es inviable en el mundo físico: «es el simple diagrama de una máquina de movimiento perpetuo, que no puede existir más que en la mente de los economistas»[31]. Por eso sólo cabe representar el funcionamiento de organismos, poblaciones o ecosistemas en términos de sistemas abiertos, es decir, que necesitan degradar energía y materiales para mantenerse en vida. La clave de la sostenibilidad de la biosfera está en que tal degradación se articula sobre la energía que diariamente recibe del Sol y que en cualquier

[30] DALY, H. E. (1990), «Toward Some Operational Principles of Sustainable Development», *Ecological Economics*, vol. 2, n.º 1, pp.1-6.

[31] EHRLICH, P. R. (1989), «The Limits to Substitution: Meta Resource Depletion and New Economic-Ecological Paradigm», *Ecological Economics*, vol. 1, n.º 1, p. 10.

caso se iba a degradar (y no en que la biosfera sea capaz de reparar tal degradación).

La imposibilidad física de un sistema que arregle internamente el deterioro ocasionado por su propio funcionamiento, invalida también la posibilidad de extender a escala planetaria la idea de que la calidad del medio ambiente esté llamada a mejorar a partir de ciertos niveles de producción y de renta que permitan invertir más en mejoras ambientales. Estas mejoras pueden lograrse ciertamente a escala local o regional, pero el ejemplo que globalmente ofrece el mundo industrial no resulta hasta ahora muy recomendable, ya que se ha venido saldando con una creciente importación de materias primas y energía de otros territorios y con la exportación hacia éstos de residuos y procesos contaminantes. Lo cual viene a ejemplificar la posibilidad común en el mundo físico de mantener e incluso mejorar la calidad interna de un sistema a base de utilizar recursos de fuera y de enviar residuos fuera. La otra posibilidad supondría rediseñar el sistema para conseguir que utilice más eficientemente los recursos y, en consecuencia, genere menos pérdidas ya sea en forma de residuos o de pérdidas de calidad interna. Y, sobre todo, hacer que el funcionamiento del sistema cierre los ciclos de materiales apoyándose para ello en el uso de la energía solar y sus derivados renovables. El problema estriba en que una diferencia cualitativa tan capital como la indicada no tiene un reflejo claro en el universo homogéneo del valor, como tampoco lo tiene en general la casuística de los procesos físicos, de los recursos que utilizan y los residuos que emiten, que se ocultan bajo el velo monetario de la producción agregada de valor.

Viendo las limitaciones que ofrece la aproximación al tema de la sostenibilidad que se practica desde el aparato conceptual de la economía estándar, la mencionada corriente de autores trata de analizar directamente las condiciones de sostenibilidad de los procesos y sistemas del mundo físico sobre los que se apoya la vida de los hombres. Se llega así, según Norton[32], a dos tipos de nociones de sostenibilidad diferentes que responden a dos paradigmas diferentes: una sostenibilidad *débil* (formulada desde la racionalidad propia de la economía estándar) y otra *fuerte* (formulada desde la racionalidad de esa economía de la física que es la temodinámica y de esa economía de la naturaleza que es la ecología). La sostenibilidad «débil» razonaría así sobre el conjunto del *stock* de capital (presuponiendo la sustituibilidad del «capital natural» por el producido por el hombre)[33]. Mien-

[32] NORTON, B. G. (1992), «Sustainabiliy, Human Welfare and Ecosystem Health», *Ecological Economics*, vol. 14, n.º 2, pp. 113-127.

[33] El hecho de que Japón haya aparecido, dada su elevada propensión al ahorro, como el país más «sostenible» del mundo aplicando un indicador de sostenibilidad «débil», denota la versatilidad de este enfoque, y por tanto su escasa utilidad para responder a los problemas de sostenibilidad físico-ambiental que hoy preocupan. Sobre el cálculo del mencionado indicador de sostenibilidad débil, véase PEARCE, D. W. y G. D. ATKINSON (1993), «Capital Theory and the Measurement of Sustainable Development: An Indicator of «Weak» Sustainability», *Ecological Economics*, 2, pp. 103-108.

tras que la sostenibilidad «fuerte» parte de reconocer que el «capital natural» no es generalmente sustituible por el fabricado, por lo que habría que evitar su deterioro. En lo que sigue nos ocuparemos de esta sostenibilidad *fuerte*, que se preocupa directamente de la salud de los ecosistemas en los que se inserta la vida y la economía de los hombres, pero sin ignorar la incidencia que sobre los procesos del mundo físico tiene el razonamiento monetario.

El segundo paso para superar el estadio de indefinición actual se centra así en la sostenibilidad de procesos y sistemas físicos, separadamente de las preocupaciones económicas ordinarias sobre el crecimiento de los agregados monetarios. Reflexionemos, pues, sobre la noción de sostenibilidad *fuerte* para disipar sus propias ambigüedades, dejando ya de lado el tema del «desarrollo». Para ello, lo primero que tenemos que hacer es identificar los sistemas cuya viabilidad o sostenibilidad pretendemos enjuiciar, así como precisar el ámbito espacial (con la consiguiente disponibilidad de recursos y de sumideros de residuos) atribuido a los sistemas y el horizonte temporal para el que se cifra su viabilidad. Si nos referimos a los sistemas físicos sobre los que se organiza la vida de los hombres (sistemas agrarios, industriales... o urbanos) podemos afirmar que la sostenibilidad de tales sistemas dependerá de la posibilidad que tienen de abastecerse de recursos y de deshacerse de residuos, así como de su capacidad para controlar las pérdidas de calidad (tanto interna como «ambiental») que afectan a su funcionamiento. Aspectos estos que, como es obvio, dependen de la configuración y el comportamiento de los sistemas sociales que los organizan y mantienen. Por tanto, la clarificación del objetivo de la sostenibilidad es condición necesaria pero no suficiente para su efectiva puesta en práctica. La conservación de determinados elementos o sistemas integrantes del patrimonio natural no sólo necesita ser asumida por la población, sino que requiere de instituciones que velen por la conservación y transmisión de ese patrimonio a las generaciones futuras, tema este sobre el que ha insistido Norgaard[34].

Es justamente la indicación del ámbito espacio-temporal de referencia la que da mayor o menor amplitud a la noción de sostenibilidad (*fuerte*) de un proyecto o sistema: cualquier experimento de laboratorio o cualquier proyecto de industria o de ciudad puede ser sostenible a plazos muy dilatados si se ponen a su servicio todos los recursos de la Tierra, sin embargo muy pocos lo serían si su aplicación se extendiera a escala planetaria. Cabe hablar, así, de *sostenibilidad global*, cuando se razona sobre la

---

[34] NORGAARD, R. B. (1994), *Development Betrayed. The End of Progress and a Coevolutionary Revisioning of the Future*, Londres y Nueva York, Routledge, p. 22, y NORGAARD, R. B. (1996), «Globalization and Unsustainability», *International Conference on Technology, Sustainable Development an Imbalance*, Tarrasa, España.

extensión a escala planetaria de los sistemas considerados, tomando la Tierra como escala de referencia y de *sostenibilidad local* cuando nos referimos a sistemas o procesos más parciales o limitados en el espacio y en el tiempo. Asimismo, cabe hablar de sostenibilidad *parcial* cuando se refiere sólo a algún aspecto, subsistema o elemento determinado (por ejemplo, al manejo de agua, de algún tipo de energía o material, del territorio) y no al conjunto del sistema o proceso estudiado con todas sus implicaciones. Evidentemente, a muy largo plazo tanto la *sostenibilidad local* como la *parcial* están llamadas a converger con la *global*. Sin embargo, la diferencia entre *sostenibilidad local (o parcial)* y la *global* cobra importancia cuando, como es habitual, se razona a corto o medio plazo.

El enfoque analítico-parcelario aplicado a la solución de problemas y a la búsqueda de rentabilidades a corto plazo, predominante en la civilización industrial, ha sido una fuente inagotable de «externalidades» no deseadas y de sistemas cuya generalización territorial resultaba insostenible en el tiempo, siendo paradigmático el caso de los sistemas urbanos. Ya que las mejoras obtenidas en la *productividad* agrícola e industrial o en las condiciones de *salubridad* y *habitabilidad* de las ciudades que posibilitaron su enorme crecimiento, se consiguieron generalmente a costa de acentuar la explotación y el deterioro de otros territorios. El problema estriba en que este crecimiento no sólo se revela globalmente insostenible, sino que pone también en peligro los logros en salubridad y habitabilidad, por lo que los tres aspectos deben de tratarse conjuntamente. El *Libro verde del medio ambiente urbano* (1990) de la Unión Europea (UE) superó los planteamientos parcelarios habituales, al preocuparse no sólo de las condiciones de vida en las ciudades, sino también de su incidencia sobre el resto del territorio. Este planteamiento coincide con la sostenibilidad *global* antes indicada y se mantiene en documentos posteriores: en particular el Informe final del Grupo de Expertos sobre Medio Ambiente Urbano de la UE, titulado *Ciudades europeas sostenibles* (1995) señala que «el desafío de la sostenibilidad urbana apunta a resolver tanto los problemas experimentados en el seno de las ciudades como los problemas causados por las ciudades». Sin embargo, todavía no se ha constituido ni el aparato conceptual ni los instrumentos de medida necesarios para aplicarlo con pleno conocimiento de causa y establecer su seguimiento. Así por ejemplo, si queremos enjuiciar la sostenibilidad de las actividades y los asentamientos humanos, en el sentido *global* antes mencionado, hemos de preocuparnos no sólo de las actividades que en ellas tienen lugar, sino también de aquellas otras de las que dependen aunque se operen e incidan en territorios alejados. Desde esta perspectiva, enjuiciar la sostenibilidad de las ciudades nos conduce por fuerza a enjuiciar la sostenibilidad (o más bien la insostenibilidad) del núcleo principal del comportamiento de la civilización industrial. Es decir, incluyendo la propia agricultura y las actividades extractivas e

industriales que abastecen a las ciudades y a los procesos que en ellas tienen lugar. Ya que el principal problema reside en que el logro de la sostenibilidad *local* de los sistemas urbanos, industriales e incluso agrarios se ha venido apoyando en una creciente insostenibilidad *global* de los procesos de apropiación, elaboración y vertido de los que dependen. De ahí que hayan surgido análisis como los ya citados tendentes a estimar la «huella ecológica» de las grandes concentraciones de población y de los estilos de vida que en ellas tienen lugar.

5.4. Claves para la sostenibilidad de los sistemas físicos

La «sostenibilidad» o viabilidad en el tiempo de un sistema físico viene marcada por sus intercambios con el entorno, que como hemos visto escapan a la red analítica usual de los economistas. Precisamente por eso la reciente preocupación por la *sostenibilidad* hace que la economía trate de extender ahora su objeto de reflexión –y de valoración– hacia aquellas partes del proceso físico de «producción» (y gasto) que no eran tenidos en cuenta.

Una gestión que además de ser económica pretenda ser «sostenible» ha de preservar el sistema considerado de estados críticos derivados tanto de falta de recursos como de exceso de residuos. Ello teniendo en cuenta que los residuos generados dependen de los recursos utilizados en los procesos, por lo que la preocupación por la viabilidad de un sistema debe abordar conjuntamente ambos extremos.

El hecho de que la Tierra sea un sistema abierto en energía, pero cerrado en materiales –salvo el fenómeno afortunadamente poco importante de los meteoritos– unido a que, por lo general, resulta bastante más fácil convertir materiales en energía, que energía en materiales, hacen que la gestión de éstos sea a largo plazo el problema económico más delicado tanto desde el punto de vista de los recursos como de los residuos. Aunque, como más adelante se expone, la mayor entropía o desorden referente a los materiales está relacionada (a través de la fórmula de Gouy-Stodola) con el aumento de la temperatura ambiente originado por la contaminación térmica que trae consigo el uso de los combustibles fósiles disponibles en la corteza terrestre, de modo que se puede paliar una a costa de la otra. Siendo el «calentamiento global» y el «agujero» en la capa de ozono las expresiones del deterioro de la habitabilidad del planeta relacionadas con las dos caras más divulgadas de la irreversibilidad antes mencionadas. Expresiones que se contraponen al deterioro menos aireado y globalmente estudiado que se observa en el terreno de los materiales que componen la litosfera y de los sistemas que integran la biosfera planetaria, deterioro que resulta mucho más fácil de medir y de controlar.

Habida cuenta que los organismos, en general, y los hombres muy particularmente, necesitan degradar energía y materiales para mantenerse en vida, el único modo de evitar que ello redunde en un deterioro entrópico de la Tierra, pasa por articular esa degradación sobre el único flujo de energía renovable que se recibe, el procedente del Sol y sus derivados, manteniendo un reciclaje completo de los ciclos de materiales, tal y como ha ejemplificado ese fenómeno tan singular de la fotosíntesis que permitió el desarrollo de la biosfera y de la especie humana. En efecto, las plantas verdes utilizan la energía irradiada por el Sol para complicar la estructura de materiales ya existentes, convirtiendo, pudiéramos decir, aquella energía luminosa en energía de enlace de sistemas más complejos. Cuatro hechos hacen especialmente interesante y ejemplar desde el ángulo de la gestión de recursos la transformación de materiales y energía que se opera en el caso de la fotosíntesis. Uno es que la energía necesaria para añadir complejidad a los enlaces que ligan a los elementos disponibles, procede de una fuente que a escala humana puede considerarse inagotable, asegurando así la continuidad del proceso. A la vez que tal utilización no supone un aumento adicional de la entropía en la Tierra, sino la desviación hacia los circuitos de la vida de una energía que de todas maneras iba a degradarse. Otro, no menos importante, es que los convertidores que permiten la transformación de la energía solar en energía de enlace –las plantas verdes– se reproducen utilizando para ello esa misma fuente renovable, sin necesidad de recurrir a energías derivadas de desorganizar los *stocks* de materiales existentes en la Tierra y originar problemas de contaminación. El tercero es que los desechos vegetales, tras un proceso de descomposición natural, se convierten en recursos fuente de fertilidad, al incorporarse al suelo en forma de humus, cerrándose así el ciclo de materiales vinculado al proceso. Y el cuarto, que el proceso utiliza materiales que, por lo general, abundan en nuestro planeta.

Lo anterior nos sitúa en condiciones de responder a la pregunta de si puede una economía «sostenible» usar «recursos no renovables» y, en caso afirmativo, cómo tendría que usarlos. Si por «recursos no renovables» se entienden los *stocks* de materiales existentes en la corteza terrestre, la respuesta sería inequívocamente afirmativa. Respecto al «cómo» usarlos, el ejemplo de la biosfera indica que un sistema puede desarrollarse a largo plazo utilizando los materiales existentes en la corteza terrestre: la clave de este funcionamiento viene sintetizada por Margalef, cuando indica que el flujo de energía solar mueve los ciclos de materiales lo mismo que la corriente de agua hace girar la rueda del molino. Así, la vida humana, al igual que la de los otros organismos que componen la biosfera, ha de apoyarse, por fuerza, en los materiales existentes en la corteza terrestre. La cuestión estriba en que la economía de los hombres sepa aprovecharse de la energía solar y sus derivados renovables para cerrar los ciclos de materia-

les, posibilitando que los residuos se conviertan otra vez en recursos y evitando el progresivo deterioro de la corteza terrestre que actualmente se opera por dispersión de recursos y contaminación de residuos.

5.5. Hacia una revalorización del patrimonio natural

La deriva hacia la insostenibilidad global propia de la civilización industrial es el fruto combinado del despliegue sin precedentes de una racionalidad científica parcelaria y de una ética individualista insolidaria, que alcanzan su síntesis en las visiones atomistas de la sociedad y en las divisiones profesionales y administrativas de todos conocidas. Por lo que la meta de la sostenibilidad global exigiría no sólo romper con el oscurantismo de las especialidades, sino también modificar el actual sistema de valores éticos, hedónicos y económicos. A esto espera contribuir el presente trabajo proponiendo metodologías que permiten calcular el coste de reposición de los recursos minerales utilizados, desvelando desde la base la asimetría que comúnmente se observa entre coste físico y valoración monetaria de los materiales y productos en las distintas fases del proceso económico.

En efecto, recordemos una vez más que el cálculo económico ordinario valora los bienes que nos ofrece la naturaleza por su coste de extracción y no por el de reposición. Por ello, insistimos, se ha primado sistemáticamente la extracción frente a la recuperación y el reciclaje (cuyos costes se han de sufragar íntegramente) y distanciado enormemente el comportamiento de la civilización industrial del modelo de sostenibilidad que nos ofrece la biosfera, que se caracteriza por lo contrario. Es más, a medida que avanza el proceso económico hacia la terminación de los productos y hacia los servicios de comercialización y gestión a ellos vinculados, nos encontramos con que sistemáticamente la valoración monetaria por unidad de producto crece en mucha mayor proporción que el coste físico y monetario de los procesos, siendo la ordenación del territorio en zonas de acumulación de capitales y productos y áreas de apropiación y vertido el corolario que se desprende de la especialización territorial de tareas sujetas a la asimetría entre valoración económica y coste físico antes apuntada. Subrayemos que precisamente el objetivo de la sostenibilidad global exige quebrar conjuntamente las mencionadas tendencias valorativas y especializadoras que han venido ordenando el territorio en núcleos más densos en población e información, que acumulan y manejan capitales y recursos, y áreas de apropiación de recursos y sumidero de residuos, que a escala planetaria se refleja en el conflicto Norte-Sur.

Como veremos más adelante, la corrección de esta segregación territorial reflejo de la insostenibilidad global de los procesos y sistemas que en ella se desenvuelven, pasa no sólo por paliar dicha asimetría, sino en apo-

yarla sobre el flujo solar y sus derivados renovables. Poner coto a la presente malversación del *patrimonio* natural exigiría una revalorización del mismo que induzca a recurrir más al *flujo* solar y sus derivados. Hay que destacar la coincidencia que sobre la revalorización del «capital natural» se observa entre el planteamiento de la sostenibilidad *fuerte* y global desde el que estamos razonando y el de la sostenibilidad *débil*. Para lo cual habría que establecer el marco institucional y la conciencia social necesarios para invertir la situación actual, a fin de primar el reciclaje y la producción renovable, frente a la extracción y el transporte horizontal a larga distancia de recursos y residuos y de favorecer procesos de gestión que cierren mejor los ciclos de materiales.

CAPÍTULO 6
ESTIMACIONES DEL REQUERIMIENTO TOTAL DE MATERIALES DE LA CIVILIZACIÓN INDUSTRIAL

6.1. **Introducción.** José Manuel Naredo

Hasta el advenimiento de la «revolución industrial», la especie humana, al igual que las otras especies de la biosfera, vivió utilizando los recursos «bióticos» que le brindaba la fotosíntesis y los demás materiales de su entorno próximo. Sin embargo, esta tendencia se quebró cuando se empezaron a usar masivamente los combustibles fósiles para acelerar las extracciones de la corteza terrestre y a extender el transporte horizontal en gran escala por todo el territorio. Utilizar el hierro y el carbón para fabricar y abastecer máquinas de vapor que aplicaban su fuerza mecánica para extraer, transportar y procesar más hierro y más carbón, con los que obtener más máquinas de vapor, anunció la espiral de crecimiento explosivo característico de la actual civilización al acelerar, con la energía y los materiales derivados de estas extracciones, no sólo los procesos industriales a ellas vinculados, sino todos los otros procesos de explotación del agua, de la atmósfera y de los recursos «bióticos» del planeta, favoreciendo también el crecimiento exponencial de la población. Esta espiral de crecimiento, al apoyarse en el manejo en gran escala de los *stocks* de determinados materiales contenidos en la corteza terrestre, sin devolverlos a su calidad originaria de recursos, estaba abocada a acentuar el deterioro del «patrimonio natural», tanto por la extracción de recursos, como por el vertido de residuos.

La masiva extracción de minerales de la corteza terrestre, pese a ser el rasgo fundamental que distingue el comportamiento económico de la civilización industrial de aquellas que la precedieron y la principal fuente de problemas ecológico-ambientales, permanece cuantitativamente indefinida: no existen series completas y homogéneas del conjunto de las extracciones de la corteza terrestre, ni del movimiento de tierras a ellas vinculado y su incidencia territorial, ni menos aún de la energía, el agua y demás

recursos aplicados a esta actividad. En el presente capítulo supliremos ese vacío estadístico con estimaciones propias apoyadas en todas las fuentes dispersas de datos que hemos podido manejar. Evidentemente, estas estimaciones no suplen la falta de estadísticas de base completas, debidamente coordinadas y solventes, que los organismos internacionales deben promover, pero permiten avanzar datos que señalan unos órdenes de magnitud, que aunque estén algo infraestimados, resultan altamente reveladores para cifrar desde la propia base el Requerimiento Total de Materiales de la civilización industrial y sus tendencias y hablar con conocimiento de causa de si éstas apuntan o no hacia el horizonte de «desmaterialización» que la *economía ecológica* propone. A la vez que se observa el peso del reciclaje en el abastecimiento de determinadas sustancias, se ve si éste tiende o no a aumentar, y si el modelo de funcionamiento material de la actual civilización se acerca o no al correspondiente a la biosfera y, por ende, hacia una mayor *sostenibilidad global*.

Para mejor apreciar la importancia que tienen las extracciones de la corteza terrestre y completar la información sobre el Requerimiento Total de Materiales de la sociedad contemporánea, conviene relacionar la extracción de rocas y minerales con el manejo de la fotosíntesis que actualmente se hace a través de los sistemas agrarios y pesqueros, advirtiendo que estos sistemas no han permanecido ajenos a la espiral antes mencionada, al forzar sus rendimientos por unidad de superficie y de trabajo a base de inyectar, directa e indirectamente, energía fósil y otras sustancias extraídas de la corteza terrestre y de recurrir al transporte e impulsión en gran escala de agua y nutrientes (y de los propios productos agrarios). De esta manera los sistemas agrarios y pesqueros se artificializaron, aproximándose cada vez más a las actividades extractivas y los procesos industriales y comprometiendo así su *sostenibilidad global* originaria. Por ello, destinaremos también un apartado a cuantificar la incidencia de la especie humana en la fotosíntesis, apoyando esta cuantificación en información directa (recabada de las estadísticas de producción disponibles) que, pese a sus limitaciones, estimamos más fiable que las estimaciones indirectas que hasta ahora se vienen manejando en este campo (como la de Vitousek, P. M. y otros [1987] a la que nos referimos más adelante). Campo en el que cabe resaltar también la escasez de estudios de base que permitan construir verdaderas series estadísticas con datos globales completos homogéneos y solventes.

Por último, cabe recordar que la utilización del agua y del aire resulta esencial para la propia fotosíntesis y para la vida en general. La especie humana ha venido nutriéndose de estos recursos desde siempre, pero en los últimos tiempos la civilización industrial ha multiplicado también espectacularmente el uso de los mismos. Por lo que prolongaremos esta introducción dedicando al menos un apartado sumario a esta cuestión con el simple ánimo de sentar sus órdenes de magnitud.

6.2. **La utilización del agua y del aire.** José Manuel Naredo

La especie humana ha venido utilizando intensamente tanto el agua como el aire, al igual que el resto de las especies, para cubrir sus necesidades biológicas. Con sus 5.666 millones de habitantes en 1995, atribuyendo una media de 50 kg por habitante, vendría a suponer una biomasa total de unos 283 millones de tm (compuesta aproximadamente en un 70% de agua y el 30% restante de materia seca). Una persona adulta requiere el uso diario de unos 13 kilos de aire y entre 2 y 4 kilos (o litros) de agua. Por lo que podríamos cifrar las exigencias biológicas de la especie humana (con un total de 5.666 millones de habitantes en 1995) en unos 20 mil millones de tm anuales de aire y entre 4 y 7 mil millones de tm anuales de agua.

Como es sabido, la civilización industrial, con la quema de combustibles fósiles, ha acentuado el uso de la atmósfera mucho más allá de lo que requeriría el abastecimiento de las exigencias biológicas de nuestra especie. Detallemos primero las bases de nuestro cálculo anterior, indicando cómo funciona esa combustión que es el fenómeno de la respiración, para mostrar después la incidencia de aquella otra derivada del uso de los combustibles fósiles.

Las exigencias de aire antes apuntadas resultan de considerar que la respiración actúa realizando, por término medio, unos catorce ciclos por minuto de ventilación de los pulmones y que, por cada ciclo, nuestro organismo toma 500 cm^3 de aire, de los que extrae, a través de los alvéolos pulmonares, unos 20 cm^3 de oxígeno (O_2). A partir de los datos expuestos, se puede estimar[35] que el organismo humano medio reclamaría, así, diariamente unos 10 mil litros (o unos 13 kg[36]) de aire, captando de ellos diariamente unos 403,2 litros (o unos 576 gr[37]) de O_2. Si se tiene en cuenta que al reaccionar el oxígeno con los alimentos liberan en promedio 4.825 calorías por litro de oxígeno, no tenemos más que multiplicar por esta cantidad los 403,2 litros de O_2 que utiliza el organismo en su respiración diaria para obtener las 1.945 kilocalorías de dieta que requeriría dicho organismo para mantenerse en vida, quemando la energía ingerida en forma de alimentos con el oxígeno del aire. El hecho de que esta cifra se aproxime a la dieta media normal de unas 2.000 kilocalorías diarias, constituye la «prueba del nueve» de nuestras estimaciones anteriores.

---

[35] Agradezco a José María Gascó la ayuda que me ha prestado en estos cálculos, al facilitarme la información técnica requerida para realizarlos.

[36] La densidad media del aire es de 1,293 kg/m^3.

[37] Redondeando decimales, podemos decir que 1 litro de O_2 = 1,43 gramos y 1 litro de C = 0,54 gr (a una presión de una atmósfera y a 273,16 grados de la escala Kelvin).

Evidentemente el O_2 tomado del aire se combina en este proceso de combustión con el carbono (C) de los alimentos, generando anhídrido carbónico (CO_2) a razón de 1,38 gr de CO_2 por cada gramo de O_2 utilizado en el proceso. Por lo que se puede estimar que una persona media viene a emitir diariamente unos 795 gr de CO_2 a la atmósfera. Con lo que este individuo medio vendría a absorber anualmente unos 210 kg de O_2 y a emitir unos 277 kg de CO_2, con lo que puede estimarse que la especie humana, con sus niveles de población actuales, absorbería algo más de los mil millones de tm de O_2 y emitiría cerca de los 1.400 millones de tm de CO_2.

Los más de 3 mil millones de tm de petróleo que se vienen extrayendo anualmente en el mundo, los cerca de 4,5 mil millones de carbón y los más de 2 billones de m^3 de gas natural, superan ya ampliamente los 8 mil millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep). Con lo que, si tenemos en cuenta que un kilo de petróleo contiene algo más de diez mil kilocalorías[38], podemos concluir mediante un sencillo cálculo aritmético que el lector puede reproducir, que la energía de los combustibles fósiles utilizados multiplica ya por más de veinte a aquella que la especie humana ingiere en forma de alimentos. A su vez, si recordamos que por cada kilo de petróleo que se quema se emiten 3,14 kilos de CO_2, podemos estimar que la especie humana emite anualmente a la atmósfera cerca de 25 mil millones de tm por este concepto, frente a los poco más de mil emitidos por la respiración a los que antes hicimos referencia. Si a esto añadimos las emisiones originadas por la quema de madera y de residuos, sobre las que sólo cabría dar datos muy imprecisos, y si recordamos que el CO_2 sólo existe en la atmósfera en cantidades muy pequeñas (0,03%), no debe sorprendernos que la emisión tan masiva y crecientemente sostenida de este gas que se observa a partir de la revolución industrial, acabe alterando el contenido de la atmósfera, como por otra parte ya registran las mediciones disponibles[39], dando pie a las actuales preocupaciones sobre el cambio climático inducido por las intervenciones humanas.

Con todo, por muy grande que sea nuestra arrogancia como especie, hemos de reconocer que el clima es uno de las factores que resultan más difíciles de cambiar con nuestras intervenciones. Por ello, presentar el tema del posible cambio climático como el principal problema de deterioro ecológico o ambiental del Planeta al que se ha de poner coto, sólo resulta explicable como estrategia disuasoria para distraer la atención de los deterioros que diariamente se observan en el suelo, el agua, la vegetación y

---

[38] Más concretamente 1 kep = 10.318 kcal.

[39] *Cfr.* datos publicados en la obra de MEADOWS, D. H y D. L. (1991), *Beyond the Limits.*

los ecosistemas locales, a los que sería más fácil poner remedio. Deterioros que son el resultado conjunto de la espiral de actividades que se aceleran junto a los masivos procesos de extracción que las alimentan, siendo el agua uno de los recursos que más sufren las consecuencias.

La utilización actual del agua desborda ampliamente las exigencias meramente biológicas de la especie humana. Hoy el agua se usa a una escala sin precedentes, tanto para forzar la producción de los sistemas agrarios mediante el riego, como para servirse de ella en las propias actividades extractivas y en los sistemas urbano-industriales, utilizándola en todo caso como vehículo de dilución de residuos y deteriorando así con los vertidos cantidades de agua muy superiores a las realmente utilizadas. Con lo cual, siendo el agua un elemento superabundante en la Tierra (dos tercios de su superficie están cubiertos por los mares), no por ello deja de ser problemática su gestión tanto desde el punto de vista económico como ecológico.

En primer lugar, hay que matizar que esa aparente abundancia de dotaciones se desinfla bastante si nos referimos sólo a agua potable y fácilmente accesible. Pues casi el 98% del *stock* de agua de nuestro Planeta está compuesto por agua salada. Y los casquetes polares y glaciares contienen el 80% del ese relativamente escaso 2% de agua dulce disponible. La energía solar es la que renueva anualmente esta fracción de agua dulce, mediante evaporación-elevación-precipitación, dando lugar al denominado «ciclo hidrológico»[40], que mueve anualmente unos 110.000 km^3 de agua. Pero no todo este flujo anual de agua sería utilizable: aproximadamente dos tercios se evaporan o constituyen la reserva de humedad de los suelos y sólo el tercio restante (cifrado en unos 40.000 km^3) escurre hacia los mares originando los ríos y lagos que alegran nuestra vista. La ingeniería de embalses, bombeos y conducciones de agua ha tratado de ampliar la fracción accesible de este último tercio, consiguiendo que supere los 12 mil km^3.

El cuadro 6.2.1 informa sobre la evolución y la distribución geográfica del total de agua utilizada. Al final de la década de los noventa este total multiplicaba por cuatro el correspondiente a 1950, superando los 5 mil km^3 (es decir, los 5 billones [10^{12}] de m^3 o de tm, ya que 1 m^3 de agua pesa 1 tm). Esta cifra viene a multiplicar por cerca de mil el agua requerida por la población para cubrir sus exigencias biológicas, acercándose al 50% del agua accesible y, si se le añade una estimación moderada del agua contaminada por los vertidos, cabe concluir que la especie humana está utilizando

[40] En realidad, todo el *stock* de agua del Planeta se renueva, pero a tasas muy diferentes: por ejemplo, el agua de los glaciares polares tarda en renovarse casi diez mil años y más de mil la contenida en los glaciares de montaña y en ciertos acuíferos, mientras que la humedad atmosférica lo hace en poco más de una semana.

o contaminando ya más de la mitad del agua accesible, con la consiguiente incidencia en los ecosistemas dulceacuícolas. Dato este que se hace mucho más preocupante si se tiene en cuenta la desigualdad geográfica en las dotaciones de agua y su desacoplamiento con las poblaciones y actividades[41]. Los datos del cuadro 6.2.1 ponen de manifiesto este desacoplamiento al ofrecer por continentes, junto a la cantidad de agua utilizada, el flujo anual de agua con que cuentan los territorios, una vez descontadas la evaporación y la acumulación en los suelos de las entradas por precipitación. Se puede calcular así la presión del agua utilizada con respecto a la escorrentía anual de los territorios, presión que oscila desde el 22 y el 21% en Asia y Europa hasta el 2% en América del Sur. La acentuada presión de los usos hace que las captaciones actuales no sólo ocasionen serios deterioros en los ecosistemas locales, sino que vayan más allá de la fracción renovable del flujo de agua disponible, desencadenando procesos de sobreexplotación en gran escala de los *stocks* de aguas subterráneas que están presentes en los cinco continentes[42].

Cuadro 6.2.1

AGUA UTILIZADA POR CONTINENTES
(km^3 por año)

	Agua disponible	*1950*	*1960*	*1970*	*1980*	*1990*	*2000*	*% Anual 1950-2000*
África	4.320	56	86	116	168	232	317	3,5
América del Norte	6.200	286	411	556	663	724	796	2,1
América del Sur	10.420	59	63	85	111	150	216	2,6
Europa	3.240	94	185	294	435	554	673	4,0
Oceanía	1.970	10	17	23	29	38	47	3,1
Asia	14.550	855	1.220	1.520	1.920	2.440	3.140	2,6
TOTAL	40.700	1.360	1.982	2.594	3.316	4.138	5.189	2,7

Fuente: Michael Meybeck, Deborah Chapman y Richard Helmer, *Global Frewshwater Quality* (Oxford, Blackwell para UNEP y WHO, 1989) y elaboración propia.

[41] Véase CLARKE, R. (1993), *Water: The International Crisis*, Londres: Earthscan Publications Ltd.

[42] *Vid.* POSTEL, S. (1996), *Dividing the Waters: Food Security, Ecosystem Health, and New Politics of Scarcity*, Washington, Worldwatch Institute (hay traducción en castellano en Bilbao, Bakeaz).

Junto a la creciente presión de los usos, se observa la extensión de plantas desaladoras de las aguas salobres interiores y del propio agua del mar. Aunque el agua abastecida por este procedimiento sea todavía bastante testimonial (apenas representa una milésima del total de agua utilizada en el mundo), tiene el interés adicional de mostrar que no cabe suplir sin coste las funciones de desalación y elevación del agua que realiza gratuitamente la energía solar en la naturaleza, que el problema del abastecimiento de agua no es tanto un problema de escasez absoluta, como de coste físico, y tampoco lo es sólo de cantidad sino de calidad asociada a la cantidad. Lo que sobra es agua en el inmenso sumidero de los mares, el problema estriba en mejorar su calidad y su posición gravitatoria y para ello hay que aplicar exergía (o energía de calidad) que en la naturaleza otorga gratuitamente, querámoslo o no, el Sol. La civilización industrial ha venido utilizando hasta ahora criterios de valoración que hacen caso omiso de las contribuciones de la naturaleza propiciando, como ya hemos indicado, la extracción de nuevos recursos frente a la recuperación y el reciclaje de los mismos tras haber sido utilizados. El caso del agua no es diferente: se han venido aprovechando, a coste cero, los relativamente escasos yacimientos y fuentes más favorables en calidad y accesibilidad de ese mineral tan *sui generis* que es el agua. Para ello se ha invertido, básicamente, en embalses, bombeos y abastecimientos orientados a facilitar el uso (y el deterioro) del recurso, frente a otras posibles inversiones en conservación, depuración y desalación del propio recurso (cuyos costes había que facturar).

Para invertir este proceder habría que empezar por reconocer las contribuciones de la naturaleza, cuantificándolas e informando sobre ellas, para suscribir un pacto entre los hombres que acuerde utilizarlas más juiciosamente, evitando su progresivo esquilmo, modificando para ello las instituciones y los criterios de valoración actuales. En el caso que nos ocupa, tal reconocimiento exigiría partir de una interpretación inusualmente amplia de «ciclo hidrológico», viendo que éste no sólo responde a los balances que se derivan de una Ley de Conservación (Primer Principio de la Termodinámica) sino que, al igual que el resto de los procesos del mundo físico, aparece gobernado por la Ley de la Entropía (Segundo Principio de la Termodinámica), que dibuja el trasfondo físico de la escasez económica. En efecto, la Ley de la Entropía explica todos los cambios espontáneos que se operan a lo largo del «ciclo hidrológico»: cambios de estado (nieve, hielo, vapor o agua líquida), de calidad (con más o menos sales o materia orgánica en dilución, agua libre o absorbida) o de posición gravitatoria. Este conjunto de cambios configura un *campo de gradientes de potencial* ligados al agua que va disminuyendo, desde que ésta aparece en forma de precipitaciones, hasta que llega a los mares, donde alcanza su máximo nivel de *entropía*. La radiación solar va

invirtiendo el proceso al devolver al agua (mediante la evaporación, elevación y pérdida de solutos) su nivel originario de calidad asociada a la cantidad. Así, podemos decir que la energía solar mueve el «ciclo hidrológico» como el agua la rueda de un molino, y que el hombre puede acelerar (usando), retrasar (conservando) e incluso invertir (depurando, desalando y bombeando) las pérdidas de potencial que se observan a lo largo del mismo (aunque estas operaciones exijan siempre mayores costes energéticos que las ganancias de potencial logradas). Al presentar el «ciclo hidrológico» como un sistema abierto y desequilibrado en calidad asociada a la cantidad, cuantificable en unidades energéticas, se ensancha el horizonte con vistas a la gestión. «El corolario que para la gestión se deriva de este enfoque ya no puede limitarse a ver el modo más barato de aumentar las entradas al sistema de usos, sin atender a lo que ocurre dentro del mismo, sino que debe orientarse a reducir o retrasar las pérdidas en cantidad y calidad que se producen en su seno, buscando mejorar la eficiencia de los usos y penalizando y desalentando los más inadaptados y dispendiosos en aquellos territorios cuyas dotaciones así lo justifiquen. Y, en lo que concierne a los abastecimientos, este enfoque nos recuerda que la gestión del agua rara vez se enfrenta a problemas de escasez absoluta que induzcan a ampliar las captaciones y trasvases sin reparar en sus costes, sino que es precisamente la consideración de éstos la que debe ayudarnos a elegir entre las opciones técnicas disponibles. Desde esta perspectiva la gestión del agua cobra una dimensión claramente económica, al plantearse en términos de elección entre las distintas posibilidades técnicas y sociales de encarar el problema»[43]. Se trata, en suma, de recrear una cultura que gestione el agua en términos de escasez atendiendo no tanto a límites físicos como a costes económicos, entendiendo éstos en el sentido amplio que estamos razonando (que abarca tanto los costes físicos como los monetarios[44] y hace referencia a las consideraciones sociales y ambientales).

[43] NAREDO, J. M. (1977), «Problemática de la gestión del agua», en Naredo, J. M. (ed.), *La economía del agua en España*, Madrid, Fundación Argentaria y Visor Distrib.

[44] Cabe recordar que el coste monetario de las distintas opciones no es una variable independiente, ya que varía con el marco institucional y normativo de cada política hidráulica, que favorecerá ciertos cultivos y usos del territorio, instalaciones, prácticas de gestión, etc., y penalizará otros.

6.3. **Cuantificación de la fotosíntesis intervenida por los sistemas agrarios y pesqueros.** Dolores Romano

6.3.1. Producción primaria

La vida en la Tierra está basada en la capacidad de los organismos fotosintetizadores de aprovechar las radiaciones luminosas del Sol para asimilar carbono atmosférico y convertirlo en biomasa a la vez que producen oxígeno. Esta biomasa es metabolizada o degradada por estos organismos o por otros que dependen de ellos para llevar a cabo sus procesos de síntesis, liberando de nuevo el carbono. La vida en la tierra es, por tanto, una superposición de dos ciclos, un ciclo de la materia, cerrado, y un ciclo de la energía, abierto, que impulsa al primero.

Esta capacidad de los organismos fotosintetizadores de asimilar el carbono en forma de biomasa, aprovechando la energía del Sol, se conoce como producción primaria. Los productores primarios necesitan una parte de la energía que asimilan para asegurar su propia supervivencia, poniendo el resto, conocido como producción primaria neta (PPN), a disposición de los siguientes niveles tróficos. Los organismos cuyos procesos de síntesis no dependen directamente de la energía solar, sino de otros organismos, se conocen como productores secundarios.

Los productores primarios, entre los que se encuentran las plantas, el fitoplancton y organismos unicelulares fotosintetizadores, sustentan al resto de los seres vivos, produciendo el oxígeno necesario para su respiración y constituyendo la fuente de alimentos del planeta.

Sin embargo, los organismos fotosintetizadores solamente aprovechan una milésima parte de la energía luminosa que llega al planeta. Por tanto, la producción primaria no está limitada por la energía a disposición de los seres vivos, sino por la capacidad de éstos de captar esta energía. Esto depende de las características de cada especie, de los elementos químicos presentes en el medio (concentración y disponibilidad de elementos y de su vehículo, el agua) y de la temperatura del medio en el que se encuentran.

La producción primaria, por ser el sustento de la biosfera, puede servir de nivel de referencia para valorar el uso que el ser humano está haciendo de la biomasa, un recurso, en principio renovable, del planeta. Además, al consistir en la conversión de energía luminosa (solar) en energía química (biomasa), podemos estimar la producción primaria y el uso humano de la biomasa en términos energéticos (1 gramo de carbono asimilado supone una energía de 12 kcal) (Margalef, 1986).

Diversos autores han calculado la producción primaria del planeta extrapolando la productividad estimada para distintos ecosistemas. Margalef (1986) calculaba la PPN del planeta en unos 145.000 millones de toneladas anuales de materia seca. Sin embargo, revisiones y cálculos basa-

dos en trabajos posteriores a los recopilados por este autor (ver cuadro 6.3.1), elevan la producción primaria en el planeta a 232.500 millones de toneladas anuales (Vitousek, 1986; Pauly y Christensen, 1995).

En la actualidad estas cifras también se cuestionan y algunos estudios consideran que la producción primaria acuática es algo más elevada, ya que hasta el momento no se había tenido en cuenta la actividad fotosintética de organismos de tamaño inferior a una micra, a los que se puede atribuir en ecosistemas tropicales del Océano Pacífico entre el 25 y el 90% de la biomasa y la fijación del 20 al 80% del carbono (Li *et al.,* 1983).

En este trabajo vamos a considerar como nivel de referencia la producción de biomasa reflejada en el cuadro 6.3.1, por constituir las estimaciones más recientes, siendo conscientes de que serán revisadas en los próximos años.

Ecosistemas más y menos productivos

Ecosistemas terrestres

Tal como refleja el cuadro 6.3.1, los ecosistemas terrestres más productivos son los chaparrales, las turberas, las ciénagas y los bosques, con una productividad media a escala planetaria superior a los 4 gramos de materia seca por metro cuadrado y día. Las praderas y pastos son los siguientes ecosistemas más productivos, seguidos por las tierras cultivadas. El cuadro 6.3.2 presenta la gran variación existente en la PPN de distintos cultivos, que puede llegar a los 8,6 g MS/m^2 día en el caso del maíz, caña de azúcar o remolacha, que constituyen los cultivos más productivos que se conocen.

Cuando se degrada un ecosistema primitivo, el que lo sustituye suele tener una productividad inferior. Así, en una serie de vegetación, el bosque representa la mayor productividad, que va disminuyendo según se degrada en matorrales, zonas de pastos o de cultivo y por último en zonas desérticas.

Ecosistemas acuáticos

La elevada producción primaria de los océanos reflejada en el cuadro 6.3.1, se debe a su enorme superficie (3/4 partes de la superficie planetaria, pero su productividad media [0,75 g MS m^2/día] es muy inferior a la terrestre [2,46 g MS m^2/día]).

Sin embargo, existen ecosistemas acuáticos mucho más productivos que muchos ecosistemas terrestres. Éste es el caso de los arrecifes o los afloramientos que, tal como refleja el cuadro 6.3.3, tienen una productividad de 890 y 973 g C m^2 y año, comparable a la de los cultivos más productivos.

Cuadro 6.3.1

PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA (PPN) Y PRODUCTIVIDAD DE DISTINTAS ZONAS DEL PLANETA SEGÚN VARIOS AUTORES

Zonas	*Superficie ($x10^6 km^2$)*	*Producción primaria neta (10^9 toneladas)* *Materia seca*[a]	*Peso fresco*[b]	*Productividad media* *g MS/m² día*
Bosques	31	48,7	80,8	4,30
Praderas, pastos y matorrales.	37	52,1	130,25	3,85
Desiertos	30	3,1	7,75	0,28
Ártico, zonas alpinas	25	2,1	5,25	0,23
Tierras cultivadas	16	15,0	37,5	2,56
Áreas humanas	2	0,4	1,0	0,54
Chaparrales, marismas, turberas y ciénagas	6	10,7	26,7	4,80
Subtotal terrestre	147	132,1	289,3	2,46
Lagos y ríos	2	1,27	12,7	1,74
Océanos	361	99,56	995,6	0,75
Subtotal acuático	363	100,84	1008,4	0,75
Total planetario	510	232,94	1297,7	1,24

[a] 1 g materia seca (MS) = 2,2 g de carbono.

[b] Peso fresco (PF): se ha considerado una humedad media del 90% para la biomasa procedente de los ecosistemas acuáticos, del 40% para la forestal y del 60% para el resto terrestre.

Fuente: Para ecosistemas terrestres Vitousek, (1986); para ecosistemas acuáticos Pauly y Christensen (1995).

Cuadro 6.3.2

PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA DE ALGUNOS CULTIVOS

	g C/m² año	*g MS/m² día*
Prados sin abonar	259-500	1,22-2,35
Prados abonados	536-861	2,52-4,06
Cereales excepto maíz	551-876	2,59-4,13
Zanahoria, patata	606-847	2,85-3,99
Maíz, caña de azúcar, remolacha	1412-1825	6,65-8,6
Chopos, pinos	547-876	2,58-4,13

Fuente: Margalef, 1986.

Cuadro 6.3.3

PRODUCTIVIDAD DE DISTINTOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

Tipo de ecosistema	*g C/m²*año
Océano abierto	103
Afloramientos	973
Plataformas tropicales	310
Plataformas no tropicales	310
Arrecifes y sistemas costeros	890
Ríos y lagos	290
Media	126

Fuente: Pauly y Christensen, 1995.

Cuadro 6.3.4

APROVECHAMIENTO DE TIERRAS
(10^3 Ha)

	1977	*1982*	*1987*	*1992*
Superficie terrestre[a]	13.082.172	13.082.062	13.081.972	13.116.321
Tierras de labranza y cultivos permanentes	1.400.117	1.421.106	1.435.847	1.443.999
Praderas y pastos permanentes	3.253.490	3.294.585	3.358.823	3.424.323
Terrenos forestales y montes abiertos	4.239.985	4.103.966	4.081.904	3.879.796
Otras tierras[b]	4.188.580	4.262.405	4.205.398	4.368.203

[a] Superficie total menos la superficie que ocupan las aguas interiores.
[b] Comprende cualquier superficie no mencionada en los párrafos anteriores, como superficies edificadas, carreteras, terrenos baldíos, etc., para los que no se dispone de datos concretos.
Fuente: FAO ,1993.

6.3.2. Producción primaria agraria y forestal. Producción pesquera

La producción primaria de los cultivos y los bosques sería según la estimación anterior de 37.500 y 80.800 millones de toneladas (PF) anuales respectivamente.

Según los datos de productividad media de distintas zonas recogidos en el cuadro 6.3.1 y los datos de aprovechamiento de tierras en el planeta (cuadro 6.3.4), podemos estimar la evolución de la producción primaria agraria y forestal entre los años 1977 y 1992 (cuadro 6.3.5).

Cuadro 6.3.5

EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA AGROFORESTAL ENTRE 1977 Y 1992
10^9 toneladas/año Peso Fresco (PF)

	1977	*1982*	*1987*	*1992*
Tierras de labranza y cultivos permanentes	21	21,3	21,5	21,65
Terrenos forestales y montes abiertos	93,27	90,28	89,8	83,35
Praderas y pastos	73,2	74,12	75,57	77,04
Total	187,47	185,7	186,37	182,04

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de los cuadros 6.3.1 y 6.3.4.

PPN forestal

La evolución de los datos de aprovechamiento de tierras a lo largo de estos 15 años, muestra como principales puntos destacables, la disminución de los terrenos forestales en un 8,5% y el aumento de las tierras dedicadas a pastos (+5%) y a terrenos de labranza y cultivos permanentes (+3%).

Esta pérdida de terrenos forestales va acompañada de una disminución de la productividad global, tal como muestra el cuadro 6.3.5. La producción de pastos y cultivos no compensa la pérdida de terrenos forestales, más productivos en términos medios que los anteriores.

Los datos de terrenos forestales y montes abiertos de la FAO, a partir de los cuales hemos elaborado el cuadro 6.3.5, incluyen bosques, terrenos reforestados y plantaciones forestales. Sin embargo, los bosques, al disponer de varios estratos de vegetación, son más productivos que las plantaciones forestales y los terrenos reforestados. Los datos de la FAO, por tanto, enmascaran la pérdida de zonas boscosas que se está produciendo en el planeta por talas abusivas, al incluir en el mismo grupo las zonas que se utilizan para cultivos forestales y reforestaciones que, además de ser menos productivos, implican una pérdida de la biodiversidad natural.

La estimación de la productividad de los terrenos forestales es con toda seguridad muy superior a la real y, por consiguiente, la pérdida de productividad de los ecosistemas terrestres en el período 1977-1992 debe ser mucho más intensa que la reflejada en el cuadro 6.3.5.

Las posibilidades de incrementar la productividad de las zonas forestales pasan por la conservación de las zonas boscosas, esto es, por una gestión más sostenible de los bosques del planeta, junto a la recuperación de la productividad de las zonas degradadas, mediante la reforestación.

La producción primaria neta de los sistemas agrarios es en general inferior a la de los sistemas naturales que desplazan, principalmente por la sustitución de plantas perennes por cultivos agrarios anuales. Cultivos perennes o mixtos, aportes nutritivos y en particular el riego pueden disminuir esta diferencia en algunas zonas, pero los cultivos agrarios tradicionales casi siempre son menos productivos que los sistemas naturales (Vitousek, 1986).

La gran variación de la productividad de las distintas especies cultivadas queda reflejada en el cuadro 6.3.2. Así, la PPN de los cereales varía entre 2,59 y 4,13 g MS/m^2 día y la PPN de cultivos como maíz, caña de azúcar o remolacha puede superar los 8 g MS/m^2 día. Además de la especie, la PPN de los cultivos está determinada por la disponibilidad de elementos químicos y de su medio de transporte, el agua. Por ello, la PPN depende de los sistemas de cultivo empleados, que se pueden dividir, a escala planetaria, en tres grandes grupos: sistemas industrializados, sistemas adoptados durante la revolución verde y diversos sistemas marginales (Pretty, 1995).

Se considera sistemas industrializados a los sistemas de cultivo utilizados en los países desarrollados (OCDE y EE). Se estima que 1.200 millones de personas viven de lo que producen estos sistemas. Dependen en gran medida de *inputs* energéticos y materiales externos y de las tecnologías de producción modernas. Son sistemas muy productivos pero que implican una gran degradación del medio ambiente.

Los sistemas pertenecientes a la Revolución Verde son también utilizados en los países «en vías de desarrollo». De ellos dependen entre 2.300 y 2.600 millones de personas. Se caracterizan por el uso de nuevas variedades que proporcionan rendimientos elevados cuando son cultivadas con fertilizantes y pesticidas modernos, en zonas con suelos de calidad, con acceso a agua e infraestructuras para abastecerse de los *inputs* necesarios y comercializar los productos. Para mantener la productividad de estos sistemas es necesario el paquete de medidas completo. Si falla uno de los elementos: la distribución de semillas, los fertilizantes llegan tarde, no hay suficiente agua de riego, etc., los rendimientos bajan a los niveles de las variedades tradicionales.

Los sistemas marginales están localizados en las áreas más pobres de los «países en vías de desarrollo», como zonas húmedas, montañosas o terrenos de secano con pluviometría variable e incierta. De ellos dependen entre 1.900 y 2.200 millones de personas. En general desconocen las tecnologías modernas, no disponen de capacidad para adquirir *inputs* externos y se encuentran alejados de carreteras y servicios. Incluyen una gran diversidad de sistemas complejos, que producen entre 1/5 y 1/10 de lo que producen los sistemas de la Revolución Verde.

La utilización de los dos tipos de sistemas industrializados ha supuesto un incremento de un 7% en la producción de alimentos a escala global

desde mediados de los años sesenta, con los mayores incrementos en Asia, donde han llegado al 40%. Se considera que entre el 70 y el 90% de este incremento en la producción se ha debido a incrementos en los rendimientos en lugar de a incrementos de las superficies cultivadas.

Las posibilidades de aumentar la productividad de cada uno de estos sistemas es muy diferente. Así, según Pretty (1995), existen pocas posibilidades de incrementar la productividad de los dos primeros sistemas. Existe una evidencia creciente de que los elevados rendimientos de cereales de estos sistemas no pueden mantenerse a sus niveles actuales, y de hecho es posible que comiencen a disminuir. Las razones no se han clarificado, aunque la progresiva incidencia de plagas, enfermedades, toxicidad química, la pérdida de los ratios carbono/nitrógeno de los suelos y deficiencias químicas son posibles explicaciones.

Los sistemas marginales, sin embargo, tienen un potencial de doblar e incluso triplicar su productividad, según este autor, con la utilización de prácticas de cultivo orgánicas. La aplicación de estas prácticas en los cultivos industrializados implicaría una pequeña reducción de la producción de los sistemas altamente industrializados, pero, sin embargo, mantendría la producción de los sistemas de la Revolución Verde.

Otros factores que afectan a la producción primaria tanto agraria como forestal son las inclemencias del tiempo (heladas, sequías, inundaciones, etc.), la pérdida o empobrecimiento de los suelos, la contaminación atmosférica (lluvias ácidas), incendios forestales, etc., que conllevan pérdidas de cosechas y destrucción o empobrecimiento de las masas boscosas.

La tendencia es que estos problemas se van a incrementar, según advierten los expertos en cambio climático, debido al sobrecalentamiento de la atmósfera ocasionado por los gases invernadero emitidos durante la utilización de combustibles fósiles.

Por todo ello, es de esperar que la disminución de la PPN de los ecosistemas terrestres observada en el período 1977-1992 continúe en el futuro.

Capacidad de producción pesquera

La estimación de la producción primaria de los océanos según Pauly y Christensen (1995), recogida en el cuadro 6.3.1, es de unas 900 mil millones de toneladas anuales (peso fresco) de fitoplancton y de plantas marinas.

La producción pesquera que esta producción primaria puede mantener se ha estimado de dos formas. Weber (1995) calcula que la biomasa disminuye aproximadamente en un factor de diez de un estrato de la cadena alimentaria al siguiente. El siguiente nivel en la cadena alimentaria estaría compuesto por zooplancton, bacterias y virus. Después le siguen los peces pequeños, los peces grandes y así sucesivamente. Como la mayoría de las

especies marinas que se capturan para consumo humano se encuentran en el tercer o cuarto nivel de la cadena alimentaria, el volumen de producción pesquera será de una milésima a una diezmilésima de la producción primaria. Esto es, la producción pesquera de los océanos sería de 90 a 900 millones de toneladas anuales. Esta producción la comparten las personas con los predadores marinos, desde cetáceos a aves.

Diversas estimaciones consideran como dato orientativo del potencial de pesca de las especies marinas comercialmente viables 100 millones de toneladas anuales (Weber, 1995; Pauly y Christensen, 1995). La producción primaria necesaria para mantener esta capacidad pesquera representa un 8% de la PPN oceánica. Aunque esta cifra pueda parecer moderada, las posibilidades de incrementar la capacidad pesquera son escasas.

Así, según Pauly y Christensen (1995) el 75% de la PPN de los océanos se halla en alta mar. De ella, entre un 20 y un 25% se encuentra a disposición de los niveles tróficos superiores, dominados por predadores como el atún, que deben vagar por océanos desiertos en busca de manchas dispersas de comida. El 8% de la PPN oceánica se encuentra en los bancos costeros, sometidos ya a una sobreexplotación. En las plataformas oceánicas, una mayor explotación pesquera supondría hambrunas para los predadores de la cima de la cadena alimentaria, como los mamíferos y aves marinas.

Pescar especies que se encuentren a un nivel más bajo en la cadena alimentaria tampoco es una alternativa posible. En alta mar esto no es económicamente viable y en los bancos costeros ya se hace, aunque podría mejorarse su gestión. La pesca de arrastre está causando la destrucción de los fondos marinos costeros y, con ello, cambios masivos en la estructura de las comunidades, entre los que se encuentra la sustitución de peces grandes por organismos de corta vida (pequeños peces pelágicos, cefalópodos, medusas, etc.). Esto se ve agravado por el hecho de que la inmensa mayoría de las plataformas han sido afectadas por las prácticas pesqueras de arrastre, quedando muy pocos «santuarios» de elevada biomasa y biodiversidad.

Otro factor que afecta a la productiviad de los ecosistemas marinos es la contaminación.

El elevado aporte al mar de materia orgánica y sustancias químicas, provenientes de aguas residuales de distinto origen (urbano, industrial, agrícola), ha venido acompañada del aumento de la turbidez del agua, causada por la eutrofización. Este factor reduce la profundidad a la cual las comunidades fóticas pueden realizar la fotosíntesis, causando la regresión del límite más profundo de las praderas de fanerógamas marinas, como las de *Posidonia oceánica* en el mar Mediterráneo. El aumento de la tasa de sedimentación del fondo marino, superior en ocasiones al del crecimiento de estas plantas, ocasiona lesiones e incluso enterramiento de las mismas.

La producción de pigmentos fotosintéticos en Posidonia también disminuye en aguas contaminadas y se han investigado los efectos tóxicos que algunos compuestos químicos, como detergentes o metales pesados, tienen sobre las plantas de Posidonia (Greenpeace, 1992).

Las infraestructuras costeras, como puertos deportivos, paseos marítimos o la regeneración de playas, contribuyen también a la destrucción de fondos, ya sea directamente por la obra en sí, o indirectamente por la sedimentación que ocasionan.

Las posibilidades de incrementar la productividad de los océanos pasan por detener la destrucción de las zonas productivas. Intervenir directamente para aumentar la productividad de una zona, como ya han sugerido algunas compañías químicas, vertiendo elementos químicos al mar como nutrientes, originaría un grave desequilibrio en los ecosistemas y no aumentaría la producción de las especies utilizadas por el ser humano (Mackenzie, D., 1996).

6.3.3. Utilización humana de la biomasa

Algunos autores que hemos mencionado anteriormente, como Vitousek o Pauly y Christensen, han estimado la utilización que los seres humanos hacemos de la biomasa, ya sea directamente, mediante el consumo de productos agrarios, ganaderos, forestales, caza o pesca, o indirectamente, por los efectos que las actividades humanas ocasionan sobre la producción de biomasa.

En los años ochenta, Vitousek calculó mediante un método indirecto la «apropiación de los seres humanos de los productos de la fotosíntesis». Realizó varias estimaciones, en función de los distintos usos humanos de la biomasa. En la estimación más baja, asumía que una población humana de 5.000 millones de personas, con unas necesidades energéticas medias de 2.500 kcal/persona día, consumiría 910 millones de toneladas de materia seca. Como un 17% de las calorías que consumimos los seres humanos proceden de productos animales, calculaba que los humanos consumimos directamente 760 millones de toneladas de materia seca vegetal. Estimó también que un 34% de las cosechas se pierden ya sea por plagas y enfermedades o por constituir residuos de las cosechas. De forma similar, calculó la PPN consumida por los animales domésticos y el consumo de productos forestales y pesqueros, llegando a la conclusión de que los seres humanos, en la estimación más baja, consumían 7.200 millones de toneladas anuales de materia seca. Esto representaba según sus cálculos un 3,2% de la Producción Primaria Neta global. Sin embargo, al incluir los usos humanos indirectos de la biomasa, como pérdidas de las cosechas, pérdidas causadas durante la explotación forestal, desertificación,

contaminación, conversión de sistemas naturales en áreas de uso humano, etc., estimó que el ser humano podría estar utilizando un 40% de la PPN global.

Pauly y Christensen utilizaron un método más directo para calcular el uso humano de la Producción Primaria Neta de los océanos. Utilizando las estadísticas de capturas pesqueras, calcularon la PPN necesaria para sostener las capturas de cada especie, llegando a la conclusión de que un 8% de la PPN de los océanos es capturada por las pesquerías. Esta cifra puede parecer moderada en contraste con los sistemas terrestres, pero en realidad representa el límite de PP disponible, tal como refleja el cuadro 6.3.A del anexo, la media de capturas entre 1988 y 1990 fue de 98 millones de toneladas, que representa la práctica totalidad de la capacidad productiva de los océanos. En 1991, al capturarse 101 millones de toneladas, ya se habría superado el límite de sustentabilidad.

En este trabajo hemos utilizado un método similar para calcular el uso humano de la PPN agraria y forestal. Así, partiendo de las estadísticas de la FAO de producción agraria y forestal, hemos calculado la cantidad mínima de estos productos que utiliza el ser humano. Sumando todos los productos agrarios, sin incluir los ganaderos, la producción agraria global mínima sería, a principios de los años noventa de 3.600 millones de toneladas (peso fresco). La suma de productos forestales utilizados directamente por el hombre sería como mínimo de 6.200 millones de toneladas (peso fresco).

Teniendo en cuenta que la productividad de los ecosistemas terrestres se estima en unos 290.000 millones de toneladas anuales, de las cuales los bosques aportarían 80.800 millones de toneladas (cuadro 6.3.1), el ser humano estaría utilizando como mínimo directamente en forma de fibras y alimentos vegetales el 1,24% de la PPN terrestre y un 7,67% de la PPN de los bosques.

Estas 10.600 millones de toneladas suponen únicamente la biomasa recogida por los anuarios de comercio de la FAO de productos agrícolas y forestales, y son por tanto el valor mínimo a partir del cual podemos elaborar una estimación más real del uso humano de los productos de la fotosíntesis.

Productos agrarios

En primer lugar habría que señalar que las estadísticas de producción y comercio agrario de la FAO recogen únicamente los principales cultivos, dejando sin incluir muchos cultivos dedicados a consumo humano, cultivos ornamentales y otros. Estas estadísticas están elaboradas a partir de los datos suministrados por cada país, que no incluyen en muchos casos los productos alimentarios para autoconsumo o los producidos en

zonas marginales de los países en vías de desarrollo que, como comentamos en el capítulo anterior, proporcionan alimento a 2.000 millones de personas.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que, como media, una tercera parte de la biomasa total de los cultivos lo constituyen los residuos agrarios y las pérdidas de producción por plagas y enfermedades. Siguiendo con una estimación muy conservadora, sumando estas pérdidas a los 3.600 millones de toneladas registradas por la FAO, supondría un uso humano de 5.400 millones de toneladas anuales.

Durante el aclareo o el cultivo de tierras agrícolas, también se destruye una cantidad muy importante de materia orgánica que, sumada a las pérdidas comentadas anteriormente y a los datos no incluidos en las estadísticas, pueden resultar fácilmente en los 20.000 millones de toneladas anuales de biomasa que recogíamos como potencial de producción primaria global de las tierras de cultivo.

En cualquier caso, las tierras destinadas a cultivos son utilizadas por el ser humano, ya sea directamente mediante las cosechas o indirectamente al sustituir los ecosistemas naturales por ecosistemas agrarios, en general menos productivos.

Productos ganaderos

Según las estadísticas de la FAO, la producción ganadera en el mundo en 1993 fue de 688 millones de toneladas. Al igual que los datos de producción agraria, seguramente estos datos son inferiores a la realidad al no contar con la producción de los pequeños granjeros.

Esta producción ganadera se obtiene a partir de productos agrarios, que ya hemos incluido en el apartado anterior, y a partir del consumo de pastos por parte de los animales. En los años setenta, se estimaba que el 75% de la materia orgánica (peso seco) consumida por el ganado provenía de los pastos y el 25% restante de los productos agrícolas derivados hacia la alimentación animal. Desde entonces, además de aumentar la producción ganadera a nivel global, se ha incrementado la cantidad de productos agrarios derivados a alimentación animal.

Además, debemos incluir en nuestra estimación la biomasa destruida durante la creación de pastos a partir de terrenos forestales, fuegos en sabanas o en pastizales.

Siguiendo con una estimación conservadora, tomamos los datos recogidos por Vitousek (1986) según los cuales el consumo de pastos supondría al menos 10.600 millones de toneladas de materia seca, de las que 800 millones procederían del consumo de pastos naturales.

Productos forestales

La producción forestal mundial registrada por la FAO en 1991 fue de 6.200 millones de toneladas, lo que representa aproximadamente un 8% de la producción primaria neta forestal del planeta, estimada en unos 80.000 millones de toneladas anuales.

De nuevo estos datos recogidos por la FAO pueden considerarse un mínimo a partir del cual podemos estimar el uso real de la biomasa forestal.

Así, tenemos que tener en cuenta la explotación forestal no registrada por las estadísticas, que tampoco recogen las especies forestales destruidas, biomasa de los árboles no aprovechada y terrenos aclarados durante la extracción de la madera de los bosques.

La fracción comercial aprovechable de un árbol puede suponer, según la especie, únicamente entre un 30 y un 50% de la biomasa total del árbol (Margalef, 1986). Esto implicaría que los 6.200 millones de toneladas de productos forestales inventariados por la FAO en 1991, suponen en realidad un uso humano del doble de la biomasa, 12.400 millones de toneladas.

Pero a esta cifra habría que añadir la biomasa de los bosques y plantaciones forestales que se destruye durante la extracción, ya sea por el arrastre de otros árboles y matorrales al caer los troncos cortados, o por las talas a matarrasa con maquinaria pesada practicadas en muchos países, como Canadá, EE UU, Chile y Amazonia. Según el tipo de bosque o plantación, los árboles pueden representar entre el 30 y el 90% de la biomasa total. Considerando que como media representasen el 70%, y basando nuestras estimaciones en los datos FAO, la biomasa utilizada sería de 16.000 millones de toneladas anuales, que representarían un 20% de la PPN forestal global.

Si añadimos la pérdida de productividad global que supone la permanente conversión de bosques en pastizales y que la FAO sobreestima la extensión de terrenos forestales al incluir plantaciones y terrenos de monte degradados, el porcentaje de PPN forestal utilizado por los seres humanos es alarmante.

Otros usos humanos de la biomasa terrestre

Por último, debemos incluir entre los usos humanos de la biomasa las pérdidas ocasionadas como consecuencia de las actividades humanas:

* Pérdida de masas forestales por lluvia ácida, erosión del suelo, reducción de la productividad pesquera por contaminación marina y destrucción de fondos, etc.
* Desertificación.

* Conversión de sistemas naturales en áreas de uso humano, como áreas urbanas, carreteras, embalses, canalización de ríos, construcción de puertos, etc. Es de destacar la destrucción de los ecosistemas de los litorales por las modificaciones de cuencas hidrológicas, modificación del litoral por construcción de puertos, playas, paseos marítimos y otras infraestructuras, que raramente tienen en consideración los efectos sobre la productividad marina.

Total

Vitousek, incluyendo en sus cálculos parte de los usos indirectos que hemos mencionado, estimaba que el ser humano se apropiaba del 40% de la biomasa terrestre producida anualmente en el planeta

Según nuestras estimaciones, el uso humano mínimo de biomasa, considerando únicamente usos agrarios, forestales y ganaderos directos e indirectos, supondría 37.000 millones de toneladas de biomasa, que representan el 12,75% de la PPN global terrestre (290.000 millones de toneladas). A esta cifra habría que añadirle los otros usos que se han comentado, por lo que la cifra presentada por Vitousek (40%) podría quedarse corta y una sola especie animal del planeta, el ser humano, estaría apropiándose de los recursos globales, por encima de niveles sostenibles, y forzando además al resto de las especies a vivir de los restos que ésta deja.

Recapitulación

El cuadro 6.3.6 sintetiza, para 1991, nuestras estimaciones de la utilización anual que la especie humana hace de la biomasa terrestre. Aunque estas estimaciones están sesgadas a la baja, superan a las que hasta ahora se venían manejando.

La biomasa constituye la principal fuente de recursos renovables del planeta y el sustento de millones de especies de seres vivos, incluido el ser humano. Como recurso renovable cabría pensar que ofrece al ser humano una capacidad de aprovechamiento casi infinita, sin embargo, en los apartados 6.3.2 y 6.3.3 hemos visto que esta afirmación queda muy lejos de la realidad.

En primer lugar, en el apartado 6.3.2 hemos destacado cómo la capacidad de producción de biomasa (la productividad) en el planeta disminuye cada año como consecuencia del deterioro de los distintos ecosistemas ocasionados por las actividades humanas. En los ecosistemas terrestres, tiene especial relevancia la destrucción de las áreas más productivas, los bosques, ya sea para explotar directamente sus recursos o para

Cuadro 6.3.6

RESUMEN DE ESTIMACIÓN MODERADA DE USOS HUMANOS DIRECTOS E INDIRECTOS DE BIOMASA

	Producción 1991		*Producción más pérdidas directas*		*Producción más pérdidas directas e indirectas*	
	10^9 tm	*kcal*[c]	*10^9 tm*	*kcal*[c]	*10^9 tm*	*kcal*[c]
Agrícola	3,6	38,01	5,4	57,02	20	211,1
Forestal	6,2	98,2	12,4	196,4	16	253,4
Ganadera	0,7	3,7	–		1	5,28
Pesca	0,1	0,26	0,12[a]	0,31	0,15[b]	0,39
Total	10,6	140,7	17,92		37,15	470,07

[a] Se estiman unas pérdidas directas por descartes de un 25% de las capturas totales pesqueras.

[b] Se estiman unas pérdidas indirectas por muerte de animales marinos que no llegan a subir a bordo de un 25%.

[c] 1 g materia seca (MS) = 2,2 g de carbono= 26,4 kcal. Se ha considerado una humedad media del 90% para la biomasa procedente de los ecosistemas acuáticos, del 40% para la forestal y del 60% para el resto terrestre.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la FAO.

convertirlos en pastos y tierras agrícolas con menor productividad. En los ecosistemas marinos, la pesca de arrastre está destruyendo los fondos marinos costeros y, con ello, los principales «santuarios» marinos de elevada biomasa y biodiversidad.

La contaminación, la erosión, el cambio climático, la desertificación, las infraestructuras terrestres y marinas, etc., al destruir o deteriorar los distintos ecosistemas, conllevan la disminución de la productividad global.

Las actividades humanas, en definitiva, están ocasionando un serio deterioro de los distintos ecosistemas a escala global y con ello de su productividad, en gran medida de forma irreversible y a un ritmo cada vez mayor. Esto es, estamos afectando gravemente, si no destruyendo, la capacidad de renovación de la biomasa y con ello su carácter de recurso renovable.

Debemos recordar que la disminución de la productividad en términos de biomasa lleva consigo una disminución en la producción de oxígeno y cambios en los ciclos del agua, del nitrógeno y del carbono, entre otros. Esto es, cambios que están afectando la estabilidad de la biosfera.

Algunos autores, como Giampietro y Pimentel, estiman que el consumo humano de la biomasa se encuentra por encima de la capacidad productiva del planeta y señalan la dificultad de estimar los límites de degradación de los ecosistemas que pueden afectar irremediablemente la estabilidad de la biosfera, apreciando que un 33% de los ecosistemas terrestres deberían preservarse para asegurar esta estabilidad.

Sin embargo, el uso de la biomasa por parte de los seres humanos, ya sea directa o indirectamete, aumenta cada año, tal como muestran las tablas de producción forestal, agraria, ganadera y pesquera que presentamos en el cuadro 6.3.A del anexo.

Las estimaciones que hemos realizado (cuadro 6.3.6), indican que estamos utilizando más de un 13% de la producción de biomasa terrestre, y más de un 8% de la biomasa marina, obligando a las demás especies animales a vivir de los restos que dejamos y en ocasiones condenándolas a hambrunas. Pero más preocupante que el nivel alcanzado por estos porcentajes resulta la tendencia antes mencionada. Combinar un incremento del uso de la biomasa con una disminución de su capacidad de producción y renovación, nos lleva a una situación insostenible.

Por otra parte, el hecho de que, en las sociedades industrializadas, la biomasa terrestre utilizada directamente por el ser humano no se reintroduce en el suelo, cerrando el ciclo de materiales, sino que acaba en su amplia mayoría depositada en vertederos, contaminando ríos y mares o quemada en incineradoras de residuos, agudiza esta situación.

Todo ello nos debería hacer reflexionar sobre la necesidad de tomar medidas serias y urgentes para frenar esta degradación y utilizar de forma más sostenible los recursos que sustentan la vida de este planeta.

6.3.4. Comercio mundial de biomasa

El cuadro 6.3.A resume los datos de producción y comercio mundial de biomasa procedentes de la producción agraria, ganadera, forestal y pesquera. Estos datos los hemos elaborado a partir de estadísticas de la FAO.

En toneladas, los países ricos arrojan una exportación neta positiva de productos agrarios hacia el resto de los países del mundo, mientras que los países pobres exportan hacia los países desarrollados recursos forestales y pesqueros.

Recursos agrarios y ganaderos

Si nos detenemos en los tipos de productos agrarios que exportan los países más ricos del planeta (ver anexo), nos encontramos que se trata de productos básicos, principalmente cereales, que con 112.707.200 toneladas supusieron de hecho, en 1991, el grueso de las exportaciones hacia los países pobres y el causante del gran desequilibrio comercial de productos agrarios vegetales entre los dos mundos.

Los países más pobres no sólo exportan productos que no se pueden cultivar en las latitudes y climas templados de la mayoría de los países ricos, como caucho, té, café, tabaco o bananas, entre otros, sino también legumbres, frutas o verduras que también pueden cultivarse en países ricos y materias básicas para la fabricación de piensos, como soja y tortas y harinas oleaginosas.

En cuanto a los productos ganaderos, también son deficitarios los países más pobres, quienes a pesar de ser grandes exportadores de ganado vacuno, importan leche y productos lácteos, junto a carne fresca y ganado ovino y caprino.

Es remarcable que estos países estén exportando alimentos para ganado de los países ricos cuyos productos vuelven a importar posteriormente. Destaca también el hecho de que tengan que importar alimentos básicos, mientras dedican sus tierras a cultivar productos destinados exclusivamente a la exportación.

Un ejemplo concreto de esta situación es Egipto, donde se han incrementado los porcentajes de malnutrición (un 83% de los niños menores de 5 años están malnutridos y el 90% de las mujeres embarazadas presentan anemia) a pesar de que en los años ochenta y noventa la producción agraria y las importaciones de alimentos han aumentado en porcentajes muy superiores al aumento de población.

El problema se encuentra en que, en el mencionado país, la producción local agraria ha pasado de dedicarse a cultivos para consumo local humano, a dedicarse a cultivos para la alimentación de ganado. El consumo humano de maíz y sorgo descendió del 53% de la producción doméstica en 1966 al 6% en 1988 y la producción agraria aumentó entre 1980 y 1987 un 10%, mientras que la ganadera lo hizo en un 50%.

Los productos ganaderos, excesivamente caros para la amplia mayoría de la población y por supuesto insuficientes para alimentar a todo el país, son consumidos por una pequeña minoría.

La necesidad de alimentos para la población ha disparado las importaciones de cereales (desde 1974, Egipto se convirtió en el tercer importador mundial de cereales tras Japón y China), agravando con ello la deuda externa y la necesidad de divisas, que a su vez está forzando al cultivo de productos para la exportación.

La producción de un kilo de carne roja requiere 10 kg de cereales. Egipto es un claro ejemplo de cómo los datos de disponibilidad de alimentos no reflejan la nutrición real de la población y de cómo el incremento del consumo cárnico de una minoría de la población fuerza a la mayoría a la malnutrición.

El cuadro 6.3.B del anexo nos muestra también una reducción de la disponibilidad de los productos agrarios y ganaderos a escala mundial a lo largo de estos años, pasando de los 661,52 kg/persona en el año 1991, a

los 625,15 kg/persona en el año 1993. Los habitantes de los países ricos disponen prácticamente del doble de productos agrarios y cinco veces más productos ganaderos, que los habitantes de los países pobres.

Recursos pesqueros

En cuanto a productos pesqueros, se observa una exportación neta positiva desde países más pobres, quienes ceden sus recursos pesqueros y alimentarios. No olvidemos que la disponibilidad de pescado en los países en vías de desarrollo es de 9,3 kg por habitante y año, frente a los 25,8 de los países desarrollados o los 38 kg/habitante y año consumidos en España, quien tras Japón y Portugal es el país desarrollado que más pescado consume (no tenemos en cuenta Islandia y las islas Feroe que consumen pescado propio).

Las capturas pesqueras para exportación las realizan grandes flotas industriales, quienes además de sobreexplotar los recursos de los países más pobres, causan un grave deterioro de los ecosistemas en los que faenan, por agotar las especies objetivo de su faena y por el gran volumen de capturas accidentales y descartes realizados por estos pesqueros. Se estima que 27 millones de toneladas de animales muertos o dañados por los aparejos de pesca son arrojados nuevamente al mar por los buques pesqueros, por tratarse de animales protegidos, especies sin valor o con bajo valor comercial, o por no tener el tamaño mínimo permitido por la legislación (FAO, 1995).

La misma FAO, basándose en datos de 1989, indica que sería precisa la eliminación del 23% del tonelaje de registro bruto (TRB) total de las flotas mundiales para restablecer los niveles de abundancia de los *stocks* y las capturas existentes en 1970. Este organismo ha cuantificado las pérdidas anuales del sector pesquero a nivel mundial en más de 54.000 millones de dólares.

Estas flotas industriales copan los caladeros, desplazando las flotas artesanales de los países más pobres y dando lugar a graves conflictos pesqueros. Muestra de esta situación fue la manifestación de más de 7,5 millones de pescadores hindúes en su país, en 1995, para pedir la limitación de buques extranjeros en las aguas tradicionalmente explotadas por los pescadores artesanales, la «guerra del bonito» en las costas cantábricas o los conflictos que enfrentan actualmente a pescadores artesanales chilenos con las flotas industriales de capital español y japonés en aguas chilenas.

Las flotas artesanales, además de capturar para autoconsumo y para suplir mercados locales, son mucho más respetuosas con los ecosistemas marinos, por capturar volúmenes menores y por utilizar artes de pesca más selectivas.

Recursos forestales

Los recursos forestales de los países «en vías de desarrollo» también son exportados en gran medida hacia los países más ricos, a pesar de la gran producción forestal de éstos (EE UU, Canadá, Suecia, Finlandia, Noruega, etc.).

La disponibilidad de recursos forestales de los países desarrollados (1.660 kg/persona) cuadruplica la de los países «en vías de desarrollo» (406 kg/persona). Los países más pobres consumen una gran cantidad de leña y carbón vegetal propio (más de 1.000 millones de toneladas), ya que es la principal, y para la mayor parte de la población única, fuente energética. Los países ricos, sin embargo, utilizan los recursos forestales principalmente para fabricar papel y como material de construcción.

Comercio mundial de biomasa en términos energéticos

Los sistemas altamente industrializados, utilizados en los países desarrollados, requieren una gran cantidad de *inputs* energéticos externos. Los sistemas de cultivo de los países en vías de desarrollo son de dos tipos, por una parte, las tierras más ricas han adoptado sistemas introducidos durante la «Revolución verde», dependientes también en gran medida de *inputs* externos y, por otra, en las tierras marginales se utilizan sistemas de producción agrarios con muy bajos o nulos *inputs* externos. Por último, existen sistemas de producción agrarios orgánicos, que dependen básicamente de *inputs* locales, cuyo balance energético *input/output* es muy positivo.

Así, tal como aparece en el cuadro 6.3.7, la producción de 1 kg de arroz, con un contenido energético de 3,4 kcal/kg (14 MJ/kg) puede requerir 0,65 MJ si se cultiva en China mediante un sistema orgánico u 11,11 MJ si se cultiva en EE UU mediante un sistema altamente industrializado. En este último caso, la energía contenida en el producto (14 MJ/k) apenas recupera la energía invertida en su proceso de producción (11,11 MJ/k).

Con los datos de consumo energético para producir cereales y arroz según los diferentes sistemas de producción que se empleen, podemos hacer un ejercicio para mostrar compensación en la balanza comercial entre los países ricos y el resto, cuando se introduce un factor de corrección energético.

En el cuadro 6.3.B del anexo incluimos los balances energéticos de cereales de invierno, maíz y arroz.

Cuadro 6.3.7

CANTIDAD DE CEREAL PRODUCIDO (KG) POR MEGAJULIO (MJ) DE *INPUT* ENERGÉTICO INVERTIDO EN DIFERENTES SISTEMAS AGRARIOS

Lugar	*Sistema de producción*	*kg/MJ*	*MJ/kg*
Japón	Arroz irrigado, elevados *inputs*	0,30	3,33
China	Arroz orgánico	1,53	0,65
Filipinas	Arroz irrigado, elevados *inputs*	0,22-0,36	4,54-2,77
	Arroz irrigado, con Azolla e *inputs* bajos	0,79	1,26
	Arroz cultivado con agua de lluvia en terrazas de montaña	0,72-0,88	1,38-1,13
Latinoamérica	Arroz cultivado en terrazas de montaña con bajos *inputs*	1,94	0,5
Bangladesh	Arroz bajos *inputs*	2,64	0,37
EE UU	Arroz irrigado, *inputs* elevados	0,09	11,11
EE UU	Maíz *inputs* elevados	0,25	4
EE UU	Maíz bajos *inputs,* rotación de cultivos	0,67	1,49
RU	Trigo *inputs* muy elevados	0,45	2,22
RU	Trigo bajos *inputs*	1,09	0,91

Fuente: Pretty (1995).

Cuadro 6.3.8

EXPORTACIONES NETAS DE DISTINTOS CULTIVOS CORREGIDAS EN FUNCIÓN DE SU CONSUMO ENERGÉTICO (10^6 toneladas)

		Exportaciones sin corregir			*Exportaciones corregidas*		
Cultivo	*Países*	*1991*	*1992*	*1993*	*1991*	*1992*	*1993*
Cereales	Ricos	+124	+123,5	+114,5	+74,4	+74,1	+68,7
Arroz	Ricos	+134	+181	+174	+29,48	+39,82	+38,28

Fuente: Elaboración propia (véase cuadro 6.3.B del anexo).

Suponiendo que los países ricos utilizan sistemas altamente industrializados y que el resto de los países utilizan sistemas de producción con menores requerimientos energéticos, hemos calculado el factor de corrección que habría que aplicar a las exportaciones de cada grupo de países para que reflejaran la producción neta en términos energéticos.

En el caso de los cereales, hemos supuesto que los países ricos utilizan los sistemas altamente industrializados de EE UU, y el factor de corrección a emplear sería 0,6. Suponiendo que el resto de los países utilizaran sistemas de cultivo que requieren menores consumos energéticos, como los empleados en México, Filipinas o Guatemala, hemos calculado un factor de corrección de 0,8.

En el caso del arroz, corregimos las exportaciones netas de los países ricos con un factor de 0,21, al suponer que utilizan los sistemas altamente industrializados empleados en EE UU y las exportaciones de los países más pobres las corregimos con un factor de 0,81, al considerar que utilizan sistemas similares a los filipinos, parcialmente industrializados.

El cuadro 6.3.8 muestra cómo se reduciría el saldo exportador neto de los países ricos en el caso del comercio de cereales, se observa la compensación de la negativa balanza comercial, pero es más destacable en el caso del arroz, donde los países más pobres reducirían en un 80% su deuda comercial.

Este ejercicio sólo pretende mostrar el distinto significado físico que subyace a las producciones agrarias de los países del «Norte» y del «Sur». Así los excedentes agrarios de los países ricos se consiguen gracias a un uso intensivo de energía, que apenas recupera la energía que invierte en el proceso de producción y que, además, procede en muchos casos de países que luego importarán esos cultivos para alimentar a su población.

Cuadro 6.3.A

RESUMEN DE LA PRODUCCIÓN Y EL COMERCIO MUNDIAL DE BIOMASA

Año/Países	*Producción 10^6 toneladas*	*Exportación neta 10^6 toneladas*	*Consumo 10^6 toneladas*	*Población millones personas*	*Disponibilidades[a] (kg/persona)*
			AGRARIO		
1991 mundo	3.559			5.387,2	661,5
ricos	921	+87	834	846,8	984,8
resto	2.638	-83	2.721	4.540,4	599,3
1992 mundo	3.694			5.480,1	674,0
ricos	998	+88	910	853,4	1.070,5
resto	2.695	-88	2.783	4.626,6	605,0
1993 mundo	3.634			5.572,3	625,1
ricos	902	+84	816	858,4	960,0
resto	2.732	-80	2.812	4.713,9	597,0
			GANADERO		
1991 mundo	692			5.387,2	128,4
ricos	324	+4,9	319,1	846,8	379,8
resto	368	-4,5	372,5	4.540,4	82,0
1992 mundo	686			5.480,1	125,1
ricos	326	+5,6	320,4	853,4	400,5
resto	359	-5,5	364,5	4.626,6	78,8
1993 mundo	688			5.572,3	123,4
ricos	326	+8,8	317,2	858,4	369,5
resto	361	-6	367	4.713,9	77,8
			FORESTAL (1991)		
Mundo	6.203			5.387,2	697,6
Ricos	2.968	-17	2094	1.261,5	1.659,9
Resto	3.235	+13	1676	4.125,7	406,2
			PESQUERA (Promedio 1988-1990)		
Mundo	98,95		64,99[a]	5.203,8	13,3
Ricos	43,68	-3,1	32,13	1.244,7	25,8
Resto	55,27	+2,1	36,85	3.959,1	9,3

[a] Se considera el dato de suministro alimentario que se obtiene al restar los usos no alimentarios de las capturas (producción).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la FAO.

Cuadro 6.3.B

BALANCES ENERGÉTICOS DE DISTINTOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

CEREALES
(10^3 kcal/ha/año)

Lugar	*Cosecha (1)*	*Inputs (2)*	*Producción neta (3)=(1)-(2)*	*Factor de corrección (3)/(1)*	*Eficiencia (1)/(2)*
EE UU 1970	18.381	7.134	11.247	0,61	2,58
EE UU 1945	7.705	3.812	3.893	0,5	2,02
Filipinas	3.465	669	2.796	0,8	5,07
Guatemala	3.836	960	2.876	0,74	3,95
Mexico	3.836	694	3.142	0,81	4,87

Fuente: G. Leach (1981).

EXPORTACIONES NETAS DE CEREALES
(10^6 toneladas)

	Exportaciones sin corregir			*Exportaciones corregidas*		
Países	*1991*	*1992*	*1993*	*1991*	*1992*	*1993*
Ricos[a]	124	123	114,5	74,4	74,1	68,7

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de FAO, 1994, y G. Leach (1986).

[a] Se considera que en los países ricos los cereales se cultivan con sistemas altamente industrializados, como los utilizados en EE UU. Se corrigen las cantidades exportadas multiplicándolas por 0,6. Se considera que el resto utiliza sistemas de cultivo que requieren menores aportes energéticos, como México, Filipinas o Guatemala. Se corrigen las cantidades exportadas con un factor 0,8.

BALANCES ENERGÉTICOS DE DISTINTOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

ARROZ (10^3 kcal/ha/año)

Lugar	*Cosecha (1)*	*Inputs (2)*	*Producción neta (3)=(1)-(2)*	*Factor de corrección (3)/(1)*	*Eficiencia (1)/(2)*
Filipinas	5.469	992	4.477	0,81	5,51
Surinam	12.297	9.825	2.477	0,2	1,25
EE UU	20.090	15.641	4.449	0,22	1,29

Fuente: G. Leach (1981).

EXPORTACIONES NETAS DE ARROZ (10^6 toneladas)

	Exportaciones sin corregir			*Exportaciones corregidas*		
Países	*1991*	*1992*	*1993*	*1991*	*1992*	*1993*
Ricos[a]	134	181,8	174	26,8	36,3	34,8

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de FAO, 1994, y G. Leach (1986).

[a] Se ha corregido suponiendo que los países ricos utilizan sistemas de cultivo de arroz altamente industrializados similares a los de EE UU y que el resto de los países utilizan sistemas de cultivo de arroz con bajos aportes energéticos, similares a los de Filipinas.

MAÍZ (10^3 kcal/ha/año)

Lugar-año	*Cosecha (1)*	*Inputs (2)*	*Producción neta (3)=(1)-(2)*	*Eficiencia (1)/(2)*
EE UU 1700[a]	7.250	716	6.534	10,5
EE UU 1910[a]	7.250	1.301	5.949	5,8
EE UU 1950[a]	9.532	3.107	6.425	3,1
EE UU 1964[a]	17.060	5.596	11.464	3,0
EE UU 1970[a]	20.320	7.544	12.776	2,7
EE UU 1980[a]	26.000	10.384	15.616	2,5
EE UU 1983[a]	26.000	10.537	15.463	2,5
RU (1973-1974)[b]	14.746	6.302	8.444	2,34
África (subsistencia)[b]	3.209	86	3.123	37,7

Fuente:
[a] (D. Pimentel y W. Dazhong, 1990).
[b] (G. Leach, 1981).

6.4. Cuantificación de la extracción de rocas y minerales de la corteza terrestre. Antonio Ortiz

6.4.1. Situación actual

La ineludible participación de los recursos minerales en todas las actividades humanas destinadas a mejorar las condiciones de vida de los individuos, a favorecer el desarrollo de las distintas comunidades y la comunicación entre ellas –desde la construcción de viviendas a la fabricación de utensilios y armas, etc., pasando por la construcción de vías de transporte, de lugares de atraque y acogida para sus naves, de canalizaciones de agua, etc.–, hace que la extracción de recursos minerales para su empleo directo o transformado acompañe al hombre a través de su historia

La relativa modestia de las operaciones mineras hasta un cierto momento, que se podría situar en los principios del siglo XIX, y la falta de datos fiables sobre la cuantía de estas extracciones, hacen que no se tengan en consideración más que muy parcialmente en este trabajo que, por otra parte, sólo pretende establecer unas cifras mínimas de valoración de lo que ha supuesto, supone y puede suponer en el futuro la actividad minera como perturbación del medio físico en que se asienta.

Operaciones mineras y de cantería como las que desarrollaron los romanos en Europa, los españoles en América, los mineros centroeuropeos en el Erzgebirge o las que debieron llevarse a cabo en Asia deben excluirse forzosamente de nuestros cálculos al no contar con datos suficientes para poderlas cuantificar con un mínimo de rigor.

Para iniciar el viaje retrospectivo se puede comenzar por la visión de la situación actual que puede proporcionar un cuadro con las cifras más importantes de la producción minera relativa a 1995.

La particularidad de este cuadro (cuadro 6.4.1) estriba en que se han incluido datos complementarios de los que normalmente facilitan las estadísticas que aparecen en las publicaciones especializadas que se reducen a los contenidos en metal de la producción minera mundial. Así, se añaden dos columnas más: una, con estimaciones sobre la cantidad de menas extraídas para obtener esos contenidos metálicos, basadas en las leyes medias que suelen considerarse comerciales en los yacimientos de esas sustancias, y otra, todavía más imprecisa, que podría tomarse como cifra media mínima de la cantidad de estériles que es necesario arrancar y remover para acceder a las menas reseñadas en la columna anterior.

Que las estimaciones empleadas en el cuadro 6.4.1 son conservadoras lo prueban las cifras que se han considerado en el cuadro 6.4.2, que se incluye a continuación, y que proviene del documento «Environmental degradation from mining and mineral processing in developing countries: corporate responses and national policies» escrito por Alyson Warhurst y publicado por la OCDE en 1994.

Cuadro 6.4.1

EXTRACCIÓN MUNDIAL ESTIMADA DE MINERALES EN 1995
(millones de tm)

		Sustancia útil	*Extracción mena*	*Estériles/ recubrimiento*
Metales				
Mineral de hierro		1.018	2.036	4.000
Bauxita		114,6	229	450
Cobre		10,01	400	2.000
Manganeso		7,7	31	100
Cinc		6,7	80	400
Cromita		12,4	50	150
Plomo		2,7	54	250
Níquel		1,01	61	300
Estaño		0,19	38	100
Molibdeno		0,12	2	10
Titanio (Rutilo)		0,35	7	20
Titanio (Ilmenita)		5,55	56	100
Plata		0,015	*	–
Mercurio		0,03	3	10
Platínidos		0,0002	100	500
Oro		0,0027	675	3.500
Pirita (S cont.)		8,24	30	100
No metálicos				
Piedra	n.d.			
Arena y grava	n.d.	20.500	20.500	–
Arcilla	n.d.			–
Sílice	n.d.			–
Sal		185	200	200
Roca fosfórica		138	500	1.500
Yeso		98	200	400
Potasa		24	100	300
Caolín		23	100	300
Magnesita cruda		10	40	150
Bentonita		8	25	50
Talco		7	30	100
Feldespato		7	30	100
Tierra de Fuller		5	20	50
Fluorita		4	20	60

Cuadro 6.4.1 *(continuación)*

EXTRACCIÓN MUNDIAL ESTIMADA DE MINERALES EN 1995
(millones de tm)

	Sustancia útil	*Extracción mena*	*Estériles/ recubrimiento*
No metálicos			
Boratos	3	10	30
Sulfato sódico	2,5	2,5	5
Asbestos	2,5	2,5	10
Diatomitas	1,5	6	12
Roca ornamental	43	200	300
Carbones			
Turba	135	200	400
Lignito	915	1.000	4.000
Hulla y antracita	3.613	4.000	10.000
Hidrocarburos			
Petróleo	3.266	3.500	–
Gas natural (en tep**)	1.790	1.790	–
Tonelaje total	**31.968**	**36.328**	**29.957**

* Obtenido como subproducto de otras minerías.
** 1 tep = 1.189 m³.

En lo que se refiere a las escasas estimaciones que es posible encontrar sobre las cifras de producción mundial de rocas para balastro y rellenos, de arenas y grava, de arenas silíceas y de arcillas, la revista *Industrial Minerals* en su edición de agosto de 1997 arriesga para el año 1995 las que se recogen en el cuadro 6.4.3.

Según estas estimaciones el tonelaje total extraído diferiría notablemente del considerado en el cuadro 6.4.1, al situarse por debajo de los 10.000 millones de toneladas contra los 20.500 supuestos en ésta solamente para los materiales de construcción considerados en el cuadro.

En la actualidad, la minería mueve anualmente cerca de 70.000 millones de toneladas lo que lleva a pensar que a lo largo de la historia se hayan podido remover cifras del orden de cuatro o cinco billones de toneladas de tierras y rocas.

Cuadro 6.4.2

MINERALES MÁS IMPORTANTES: EXTRACCIÓN ESTIMADA DE MENAS, CONTENIDOS MEDIOS, GENERACIÓN DE ESTÉRIL (1991)

Mineral	*Mena (10^6tm)*	*Ley (%)*	*Estéril (10^6tm)*
Cobre	1.000	0,91	990
Oro	620	0,00033	620
Hierro	906	40	540
Fosfato	160	9,3	140
Potasa	160	17	130
Plomo	135	2,5	130
Bauxita	109	23	84
Níquel	38	2,5	37
Estaño	21	1	21
Manganeso	22	30	16
Wolframio	15	0,25	15
Cromita	13	30	9
Total	3.200		2.700

Fuente: OCDE, 1994.

Cuadro 6.4.3

EXTRACCIÓN DE ROCAS INDUSTRIALES 1995
(*10^3tm*)

	Europa	*Mundo*
Rocas trituradas	**1.376.290**	**4.000.000**
Rocas ornamentales	17.000	36.000
Yeso	24.950	100.000
Pizarras	947	4.000
Arena y grava	**1.148.000**	**4.000.000**
Arenas de sílice	**36.537**	**119.000**
Arcillas	**108.650**	**400.000**

Fuente: *Industrial Minerals*, agosto de 1997.

Normalmente, los datos sobre un gran número de sustancias, las de mayor valor unitario, extraídas mediante operaciones de carácter minero, es decir, con la ejecución y empleo de pozos, galerías, túneles y excavaciones a cielo abierto, se encuentran perfectamente cuantificados y recogidos en estadísticas de alcance local, nacional o internacional.

No obstante, las cifras que se publican en las estadísticas se refieren a metal contenido y no dan los tonelajes de mena que, extraídos de la mina, se llevan a la planta para su tratamiento y que, como ejemplo, en los casos de cobre, cinc y plomo pueden contener solamente entre el 1 y el 10% de ley en metal.

A su vez, para alcanzar la extracción de esta mena hay que arrancar y separar en las escombreras de la mina cantidades de materiales estériles y de recubrimiento que pueden suponer volúmenes cinco, diez y hasta cincuenta veces superiores a la parte utilizable.

De este modo, cien mil toneladas de cobre contenido obtenido de una mina a cielo abierto con un 1% de metal y un ratio 10 de explotación puede suponer la extracción de cien millones de toneladas de roca.

Estas cifras, sin embargo, no se recogen más que en las contabilidades de las propias empresas mineras por lo que resulta difícil conocer la verdadera cuantía de las movilizaciones de tierras de la minería tradicional.

En este sentido, se ha juzgado conveniente, para aproximarse un poco a la realidad, introducir esa columna en la que se añade una estimación del tonelaje que resulta necesario mover para obtener la cifra de metal contenido que, como se ha hecho notar, es la única que se contempla normalmente en las estadísticas.

Por otra parte, hay diversas sustancias que, resultando imprescindibles para el desarrollo de la construcción y de las infraestructuras, no son objeto de comercio internacional por su escaso valor unitario, pero que requieren el movimiento de inmensas cantidades de tierras. Al ser casi exclusivamente de consumo doméstico no se ejerce un riguroso control sobre su producción y, en consecuencia, se carece de datos ciertos sobre las extracciones de estos materiales, tales como piedra, arcillas, arenas, gravas, e incluso sílice y carbonato cálcico. Dado que estas cifras no se conocen con rigor a niveles nacionales y mucho menos mundiales, es inevitable el establecimiento de estimaciones que normalmente valoran por defecto las cantidades reales.

6.4.2. Tendencias

En general, la consulta de largas series históricas de producción minera no resulta fácil, en parte porque sólo se encuentran disponibles para algunas sustancias metálicas y, además, porque hay que recurrir a diversas fuentes heterogéneas para completar los períodos de interés.

La documentación consultada ha comprendido publicaciones estadísticas específicas de Estados Unidos, Alemania, Reino Unido y España, tales como *Mineral Commodity Summaries, Mineral Statistics, Metal Statistics, Panorama Minero, Minerals Yearbook, Metallstatistik,* etc., que se citan aquí globalmente ya que las series que se presentan están elaboradas en casi todos los casos componiendo los datos de varias de éstas.

La fuente principal empleada para los datos anteriores a 1900 ha sido la publicación titulada *World non Ferrous Metal Production and Prices 1700-1976,* de C. J. Schmitz.

Para plomo, cinc, cobre, estaño, níquel y bauxita se han obtenido datos de producción cuando menos desde 1900 de una manera continua, y de épocas anteriores por períodos de 25 años. Sobre el mineral de hierro se cuenta con datos desde 1850 y para el carbón (antracita, hulla, lignito) y el petróleo desde 1950.

Con la cantidad acumulada en estas series se obtiene prácticamente un orden de cifras de lo que se ha extraído a lo largo de la historia ya que la parte no registrada, salvo en el caso del carbón, en general tendría escasa significación.

Para algunas otras sustancias minerales de empleo tradicional como sal y yeso, no es fácil encontrar series suficientemente largas e incluso las cifras facilitadas en la actualidad no siempre resultan de total fiabilidad.

Del mismo modo, para otras sustancias cuyo empleo en cantidades apreciables es mucho más moderno, como fosfatos, potasa, fluorita, barita, feldespatos, etc., sólo se recoge una selección de datos de producción a partir del año 1950, plazo suficiente para analizar la tendencia.

Sustancias de minería emergente pueden considerarse el titanio, el cobalto, el berilio, el litio... entre los metales y otras relacionadas con las industrias química, cerámica, de las pinturas, etc., que como celestita, wollastonita, sulfato sódico y carbonato sódico están experimentando un notable incremento de consumo.

Un análisis de las tablas de producción minera de que se dispone permite establecer como conclusión general aplicable a carbón, hierro, cobre, cinc, bauxita, níquel y oro el aumento de extracción anual en el transcurso del tiempo apenas interrumpida ocasionalmente en cortos períodos por causas generalmente interpretables con facilidad (crisis económicas, conflictos bélicos, etc.).

Verdaderas caídas de producción sólo se registran en los casos del mercurio y del plomo, en ambos casos debido a su calificación de contaminantes y en el del segundo, además, por la incidencia que ocasiona en la demanda la disponibilidad de metal reciclado.

Freno en la pendiente de crecimiento se puede comprobar en los casos del carbón y quizá también en los del hierro y el estaño.

En el carbón, en los últimos tiempos se aprecia una cierta caída en la extracción mundial debido sobre todo al descenso de la de lignito, sector en el que se está produciendo un serio retroceso fundamentalmente porque a su menor poder calorífico une una significativa capacidad de contaminación atmosférica a la hora de su combustión en las centrales térmicas.

El estaño, desde la crisis del «Tin Council» en 1984, no sólo no se ha recuperado en sus cotizaciones sino que tampoco lo ha hecho en la demanda lo que ha llevado a una producción minera claramente estancada por debajo de las 200.000 tm anuales, a pesar de la entrada en escena de nuevos grandes productores como Brasil, Perú, Portugal, China, etc., que compensan las caídas de los tradicionales como Bolivia, Thailandia, Malasia, etc.

Una mayor eficiencia en los procesos siderúrgicos y la especialización de los grandes países industriales en las acerías especiales, dejando en parte las nuevas siderurgias integrales en manos de los países «en vías de desarrollo» han producido un aplanamiento en la curva ascendente de la extracción mundial de minerales de hierro.

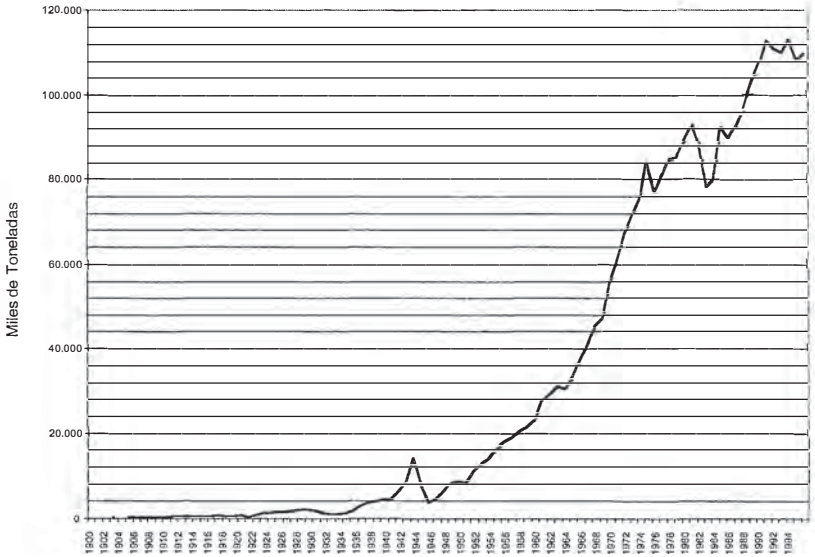
Por el contrario, entre los metales base fundamentales, el aluminio, el cobre y el cinc continúan con crecientes extracciones.

El oro, a pesar de los frecuentes disgustos que proporciona a sus productores, se encuentra de nuevo en una situación próxima a la de fiebre buscadora, particularmente en Sudamérica y Sudeste asiático. Aun cuando la extracción de oro de placeres es una actividad casi consustancial al hombre que comenzó en los ríos de Asia Menor y de África, existen vestigios de minería de interior desarrollada en la zona comprendida entre el Nilo y el mar Rojo desde 2000 años antes de Cristo. Los romanos en los primeros siglos de nuestra Era, particularmente en España y en el norte de África, desarrollaron una intensa actividad minera. Tras la caída del Imperio, exceptuando la minería del centro de Europa, la principal fuente de oro es la que España y Portugal aportan desde América. La actividad despierta, ya en el siglo XVIII, en Rusia primero y con particular virulencia a mediados del siglo XIX con las «fiebres del oro» de California y Australia. No obstante, la auténtica minería moderna del oro puede considerarse que comienza en los yacimientos de África del Sur a partir de 1880. Se trata de una minería a gran escala que emplea nuevas tecnologías y requiere financiaciones muy elevadas. La imparable evolución tecnológica lleva a hacer viables en los últimos tiempos explotaciones mineras con leyes en oro del orden de un gramo por tonelada. Estos planteamientos convierten a la minería del oro, pese a las relativamente pequeñas cifras de extracción, en una de las más agresivas al medio ambiente no sólo por su capacidad de contaminación de los cursos fluviales, sino ya también por el movimiento de los grandes tonelajes que requiere la moderna minería de bajas leyes.

Gráfico 6.4.1

BAUXITA

Extracción minera de bauxita



Extracción acumulada de bauxita

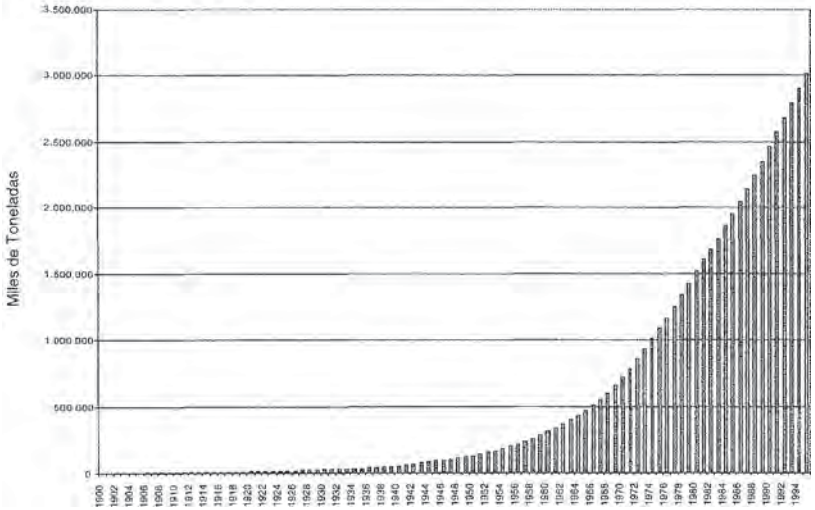
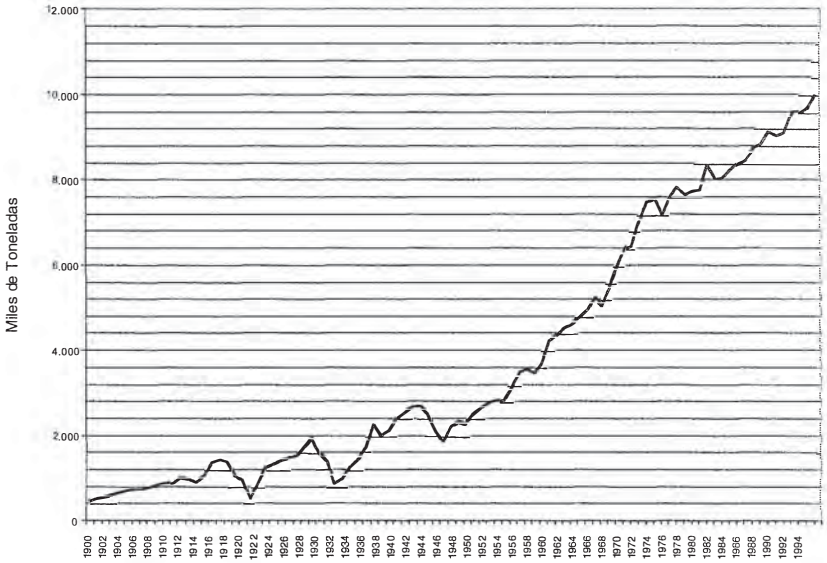


Gráfico 6.4.2

COBRE

Extracción minera de cobre



Extracción acumulada de cobre

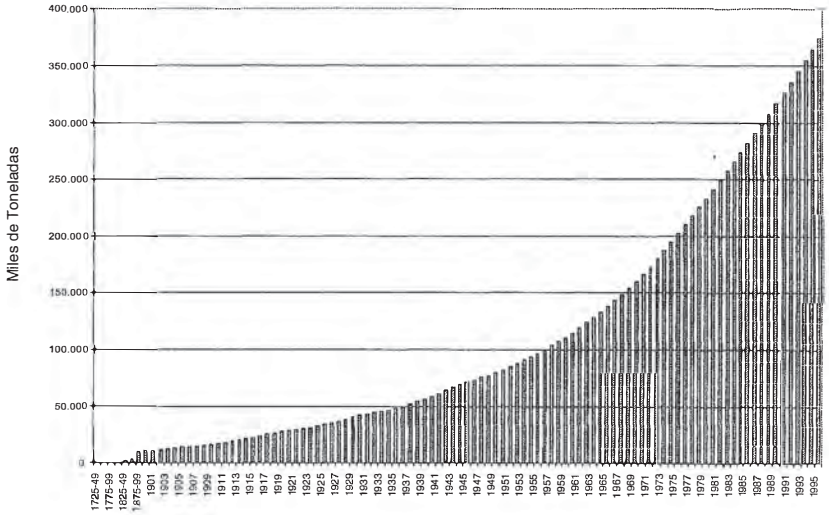
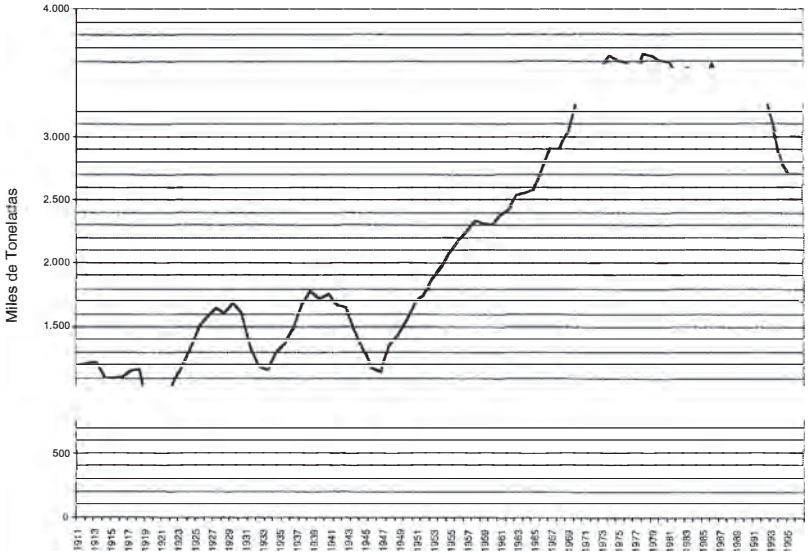


Gráfico 6.4.3

PLOMO

Extracción minera de plomo



Extracción acumulada de plomo

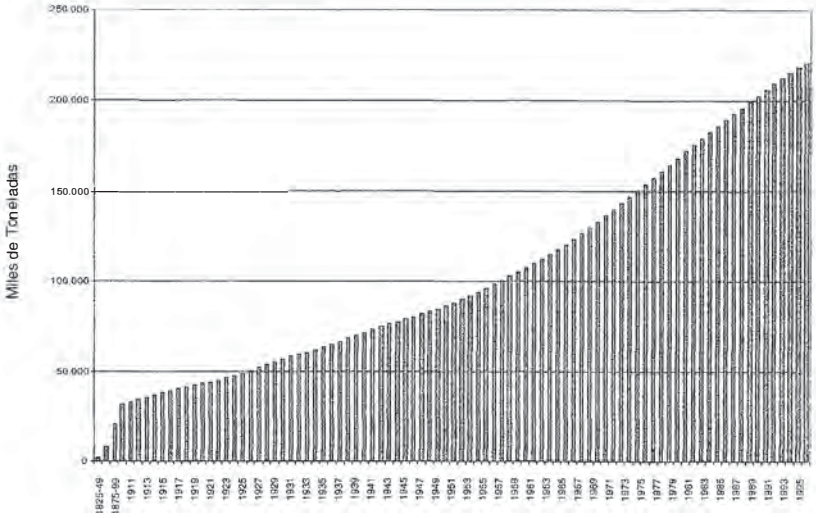
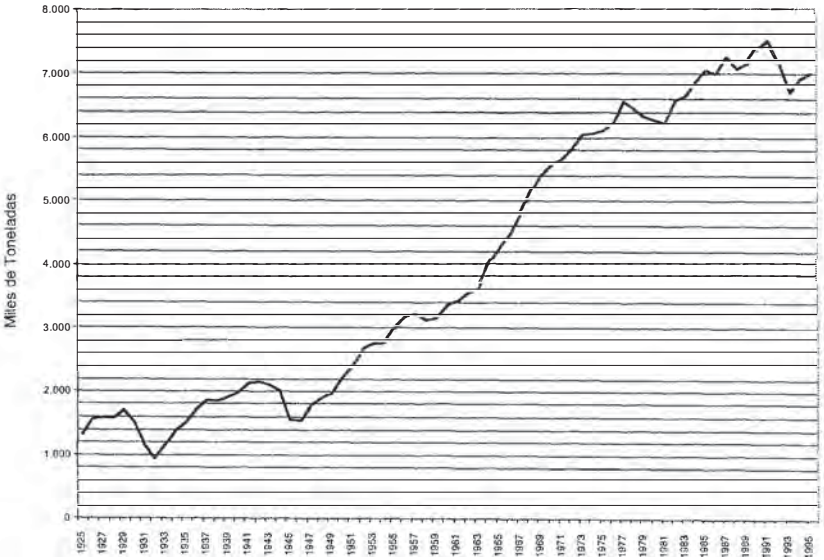


Gráfico 6.4.4

CINC

Extracción minera de cinc



Extracción acumulada de cinc

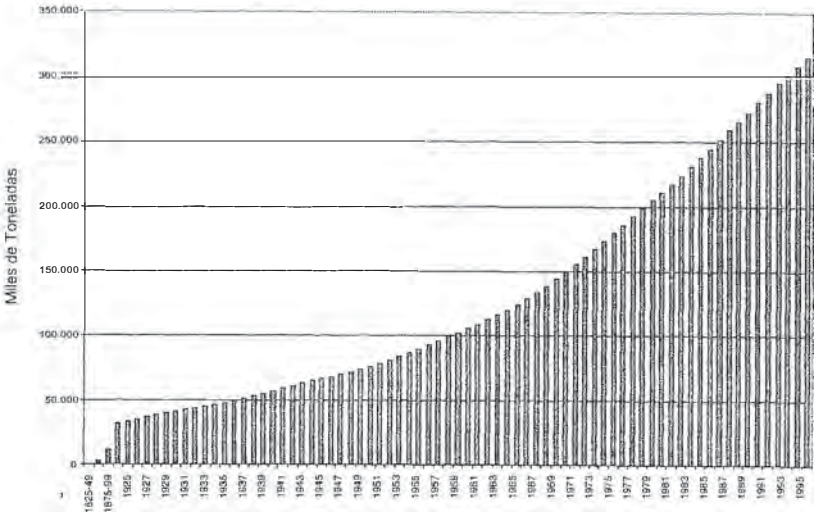
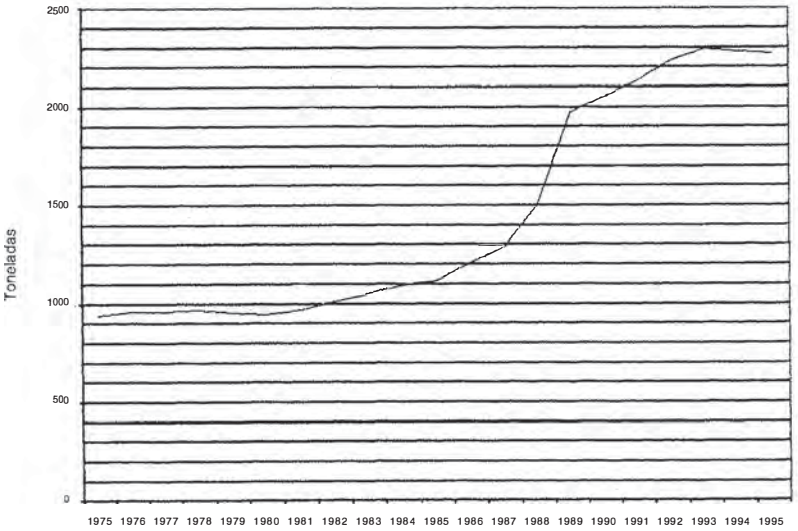


Gráfico 6.4.5

ORO

Extracción minera de oro



Extracción acumulada de oro

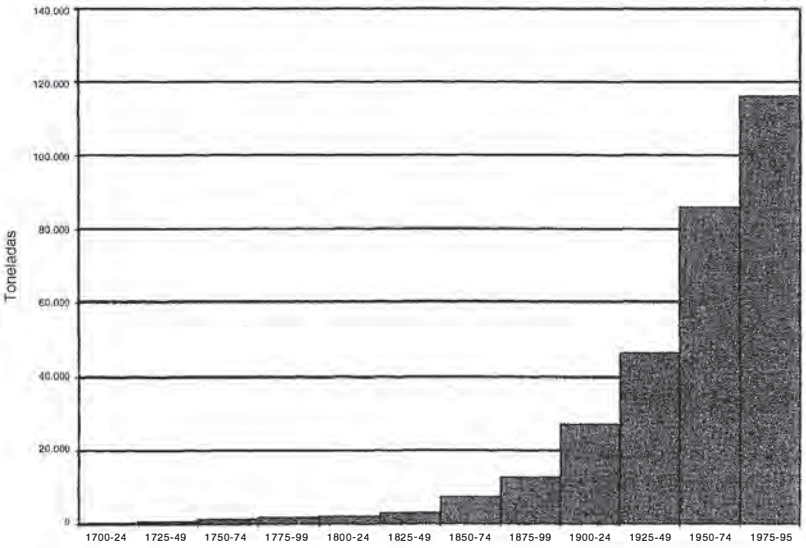
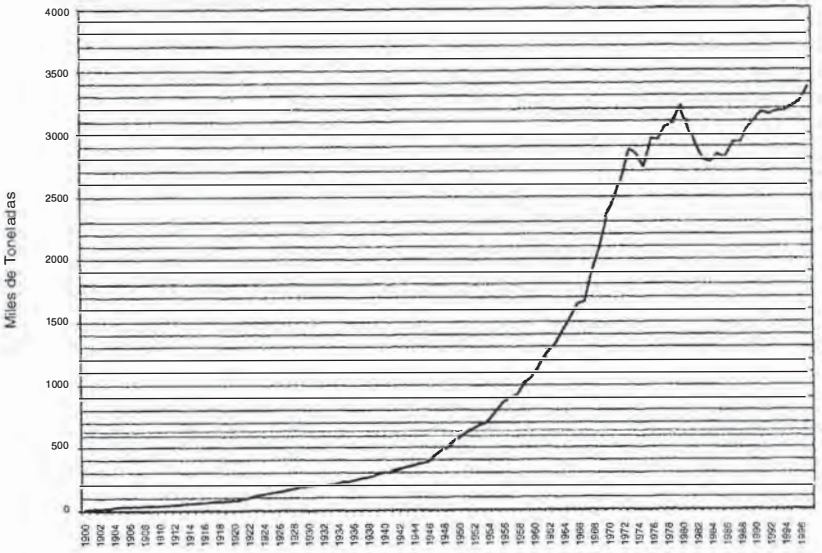


Gráfico 6.4.6

PETRÓLEO

Extracción de petróleo



Extracción acumulada de petróleo

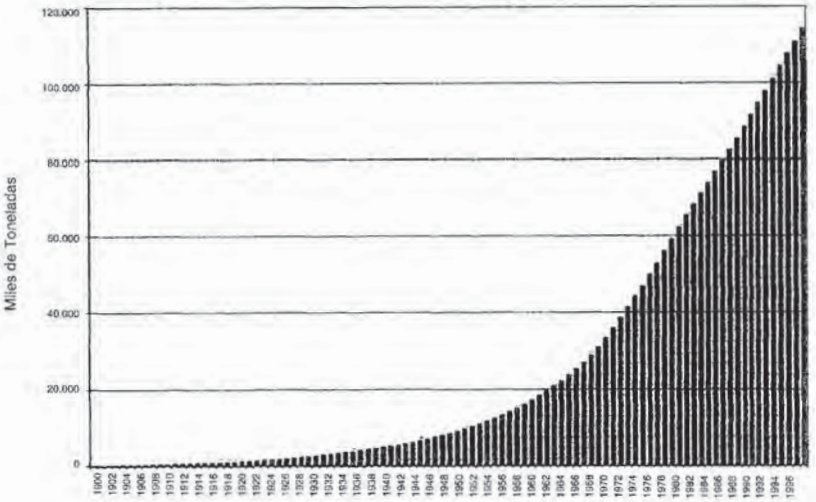
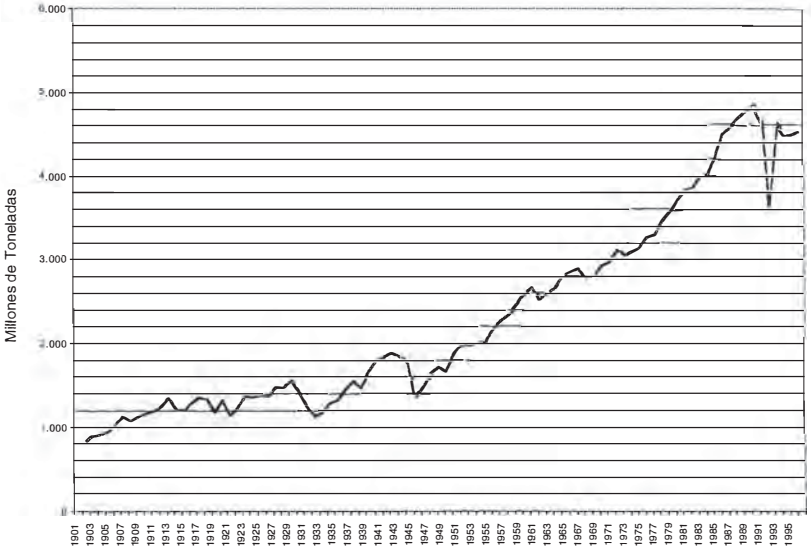


Gráfico 6.4.7

CARBÓN

Extracción minera de carbón



Extracción acumulada de carbón

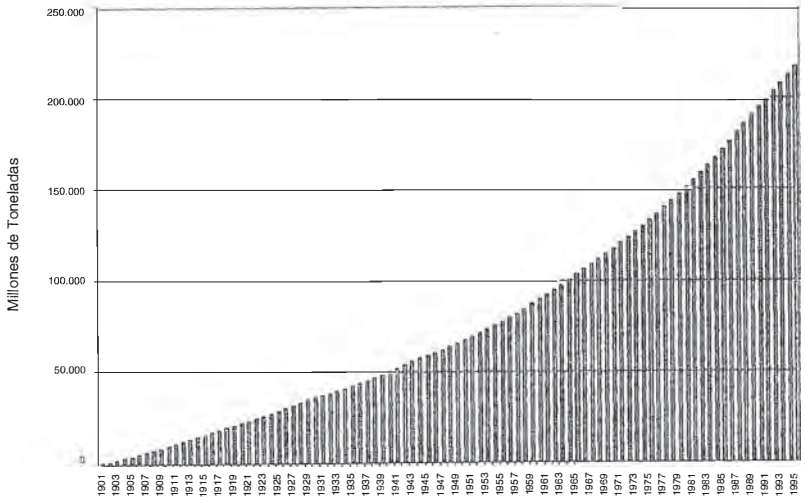
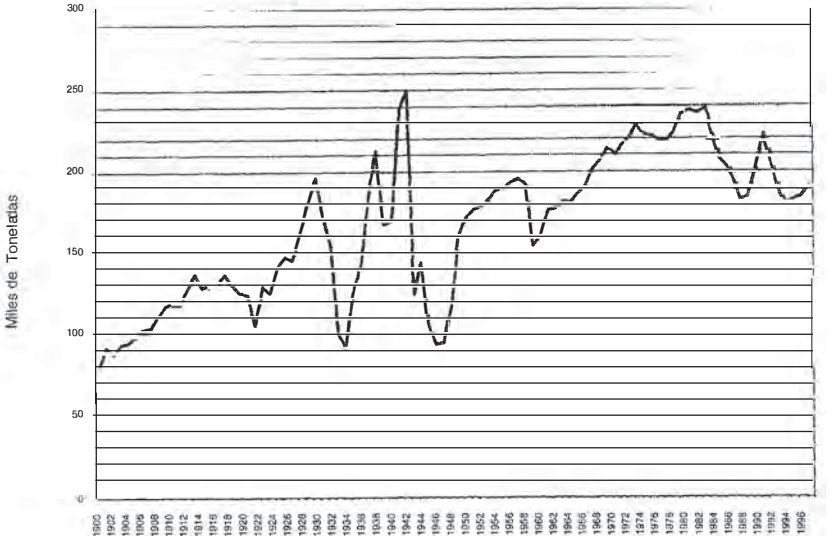


Gráfico 6.4.8

ESTAÑO

Extracción minera de estaño



Extracción acumulada de estaño

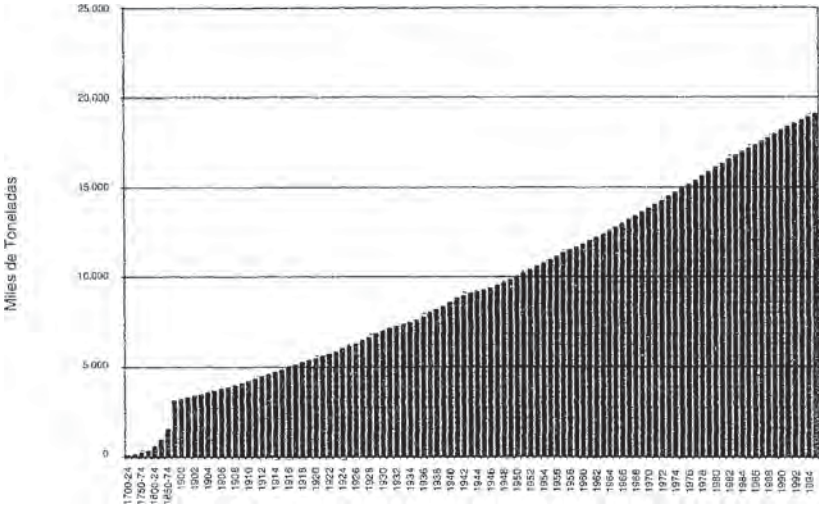
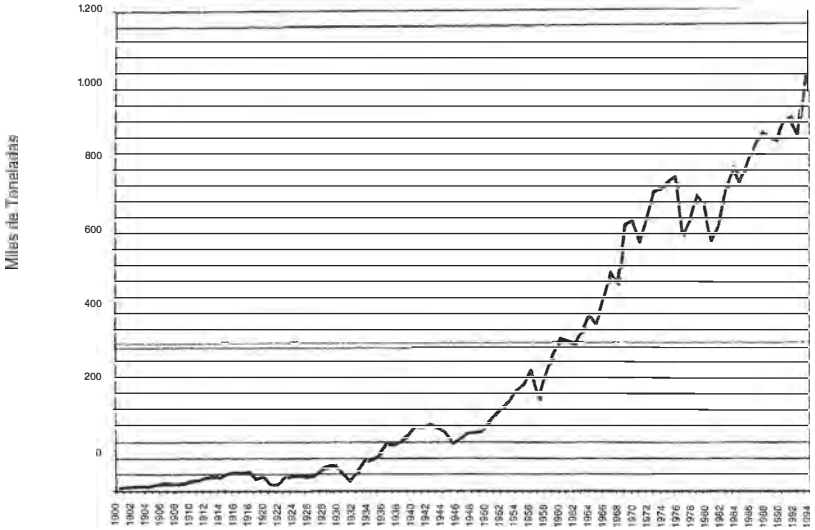


Gráfico 6.4.9

NÍQUEL

Extracción minera de níquel



Extracción acumulada de níquel

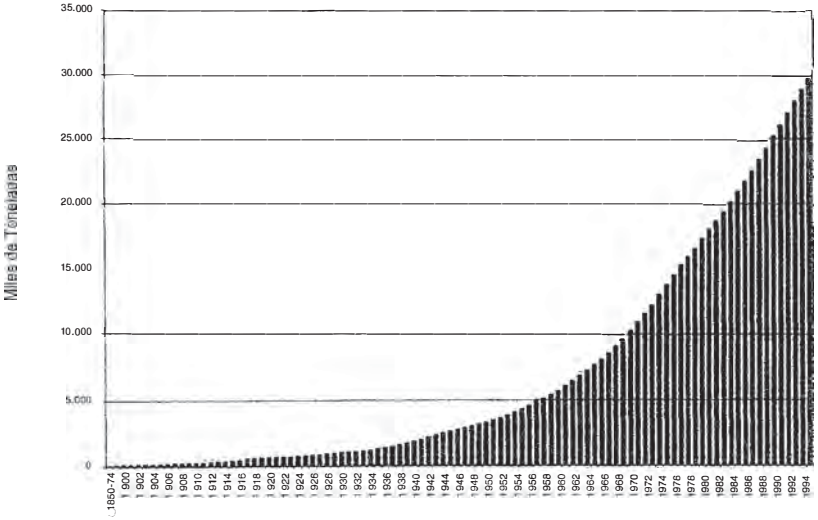
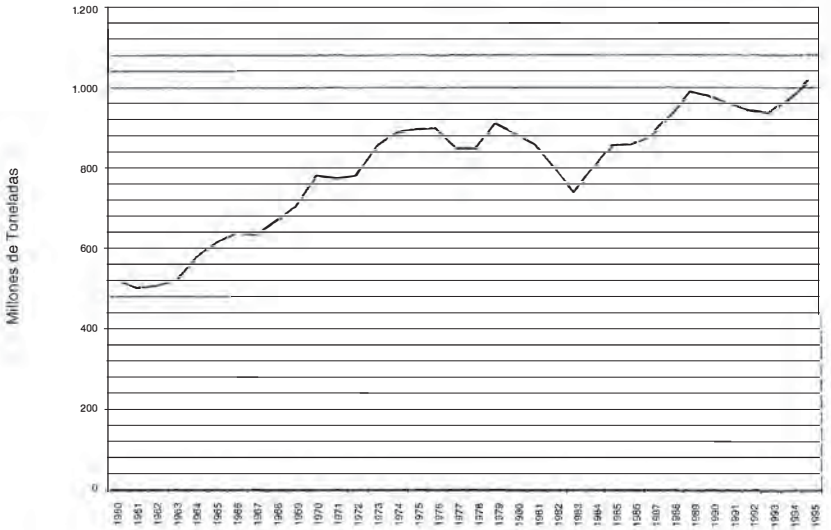


Gráfico 6.4.10

HIERRO

Extracción minera de hierro



Extracción acumulada de hierro

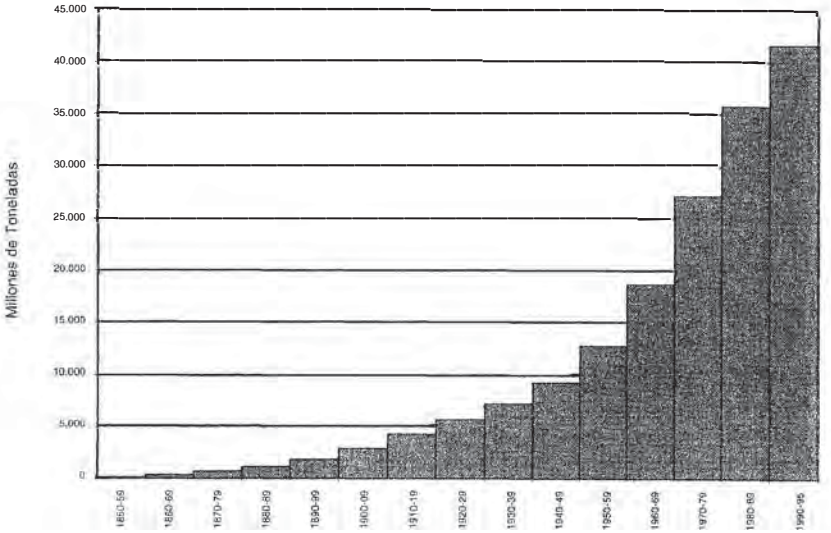


Gráfico 6.4.11

FOSFATO, POTASA, SAL

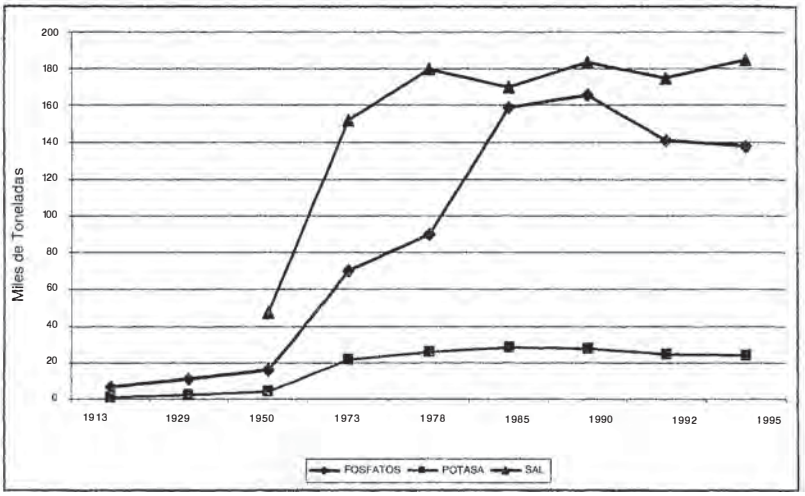
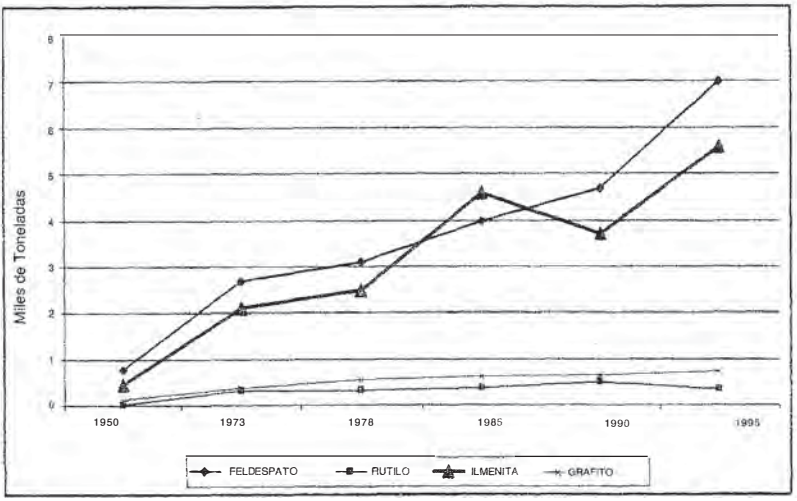


Gráfico 6.4.12

FELDESPATO, RUTILO, ILMENITA, GRAFITO



Las industrias de la construcción y las obras de ingeniería civil en todos los países reclaman cada año volúmenes mayores de piedra, gravas, áridos, rocas ornamentales, yeso, etc., obtenidos cada vez con mayores dificultades y alzas de costes debido a las trabas que las medidas de protección medioambiental, poco a poco, van imponiendo en todas las latitudes.

En el caso de los hidrocarburos, la tendencia al incremento de la extracción a lo largo de la segunda mitad del siglo XX sólo ha sido frenada tras la crisis de la OPEP en 1973 y las dificultades económicas generalizadas de los países industrializados de principios de la década de los ochenta.

En resumen, el crecimiento imparable de la población en el mundo y los procesos de desarrollo industrial de todos los países, cualquiera que sea su ritmo, llevan a una inexorable situación de aumento de la demanda de recursos minerales.

No resultan suficientes hasta el momento los esfuerzos tecnológicos para mejorar los rendimientos específicos en toda clase de procesos industriales, ni la ampliación de la capacidad de reciclado de los metales, para cambiar el signo del incremento de las producciones mineras que, como se ha podido comprobar con las series productivas de distintos minerales, resulta espectacular en los últimos treinta o cuarenta años.

El abaratamiento relativo que observan la mayoría de los minerales durante el último cuarto de siglo, no contribuyó a incentivar las mejoras en la eficiencia de su utilización ni en su reciclaje. Los gráficos 6.4.14 a 6.4.25 (incluidos al final de este apartado) recogen la evolución de las cotizaciones (en dólares corrientes y constantes) de los principales minerales, confirmando el citado abaratamiento que sigue primando la extracción frente al ahorro y al reciclaje de las sustancias.

6.4.3. Flujos comerciales de minerales

El comercio internacional de minerales, en especial con itinerarios transoceánicos, no alcanza verdadera importancia hasta el siglo XIX con el desarrollo de la industria metalúrgica en general y de la siderúrgica en particular.

Con anterioridad sería reseñable, entre otros, el tráfico entre España y sus colonias americanas, mantenido entre los siglos XVI y XVIII, para el transporte de metales preciosos, pero, en general, las necesidades de la industria eran pequeñas y fáciles de satisfacer con los recursos domésticos.

El mineral de hierro, las menas de metales básicos y el carbón siderúrgico fueron en un principio las sustancias minerales más viajeras en cantidades importantes.

En la actualidad, a estas sustancias se han sumado los minerales energéticos, hidrocarburos y carbón térmico, y otra serie de materiales cuyo tráfico es cada vez más significativo: manganeso, bauxita, fosfatos, potasas, sal, yeso, rocas ornamentales, etc.

Estos tráficos oceánicos han alcanzado tanta importancia estratégica que hace de vital importancia el control de los mares para poder garantizar el mantenimiento de la industria en casos de conflicto bélico, aun cuando la disgregación de la Unión Soviética y el final de la «guerra fría», momentáneamente, hayan rebajado esta importancia.

Efectivamente, los centros de consumo más relevantes y por tanto los importadores máximos son Estados Unidos, Japón y la Unión Europea. Por otra parte, los mayores exportadores, contra lo que pudiera pensarse, son Canadá, Australia, Sudáfrica y los propios Estados Unidos. En determinadas sustancias minerales como hierro, cobre, manganeso, bauxita, aparecen otros países con papeles relevantes como exportadores: Chile, México, Perú, Zambia, Papúa-Nueva Guinea, para el cobre; Rusia, Gabón, Brasil, para el manganeso; Guinea, Jamaica, Brasil, para la bauxita, etc.

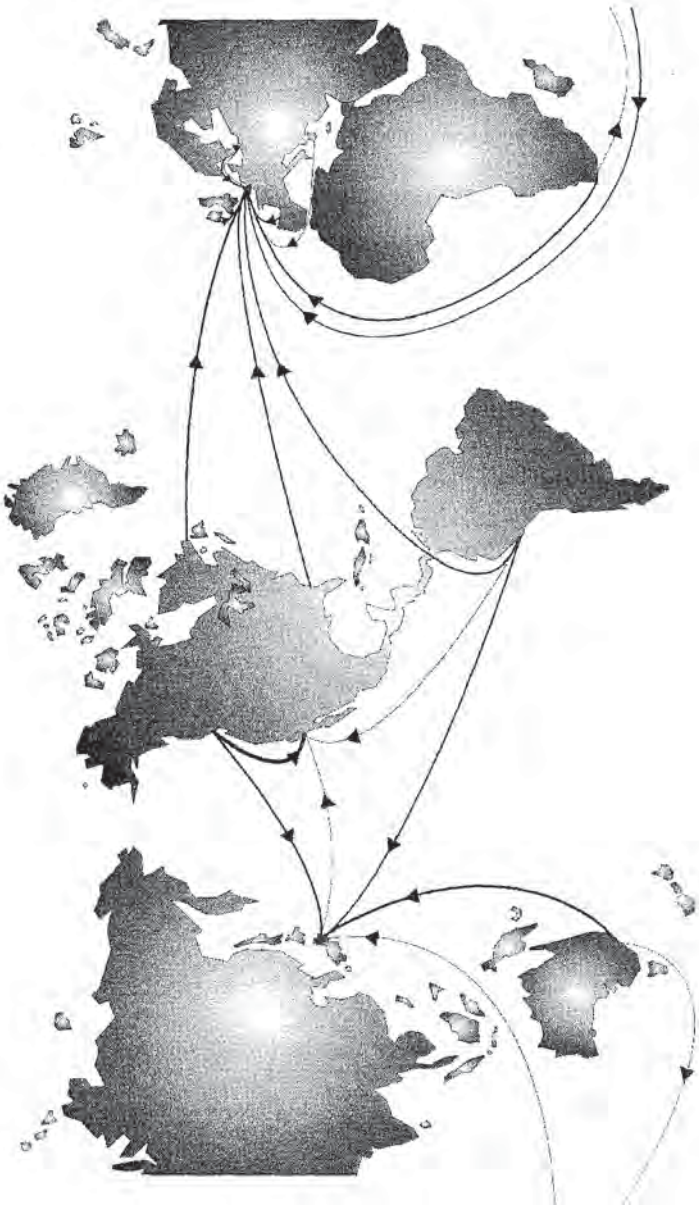
No obstante, tras la reseñada desaparición de la Unión Soviética, de una cierta apertura comercial de China y la irrupción de algunas economías «emergentes» como Corea, el panorama del comercio exterior de minerales puede adoptar una nueva configuración en pocos años.

Existen algunas sustancias minerales que, aun cuando los tonelajes que se comercializan son relativamente modestos, por su carácter estratégico, escasez y gran concentración de la extracción en muy pocos países, resultan particularmente sensibles. Se trata de los minerales de cobalto, cromo y del grupo de los platínidos de los que solamente disfrutan de capacidad de exportación: Zaire, Zambia, Canadá, Rusia, Australia y Cuba en el caso del cobalto; Rusia y R. Sudafricana en platínidos y Kazajstán y R. Sudafricana, a los que se unen modestamente Zimbabwe, Turquía, India y Brasil en minerales de cromo.

Los mapas que se presentan en las páginas 123-127 dan cuenta de los principales movimientos que se operan en el comercio internacional de minerales.

Mapa 6.4.1

PRINCIPALES EXPORTACIONES DE PLOMO (1991)

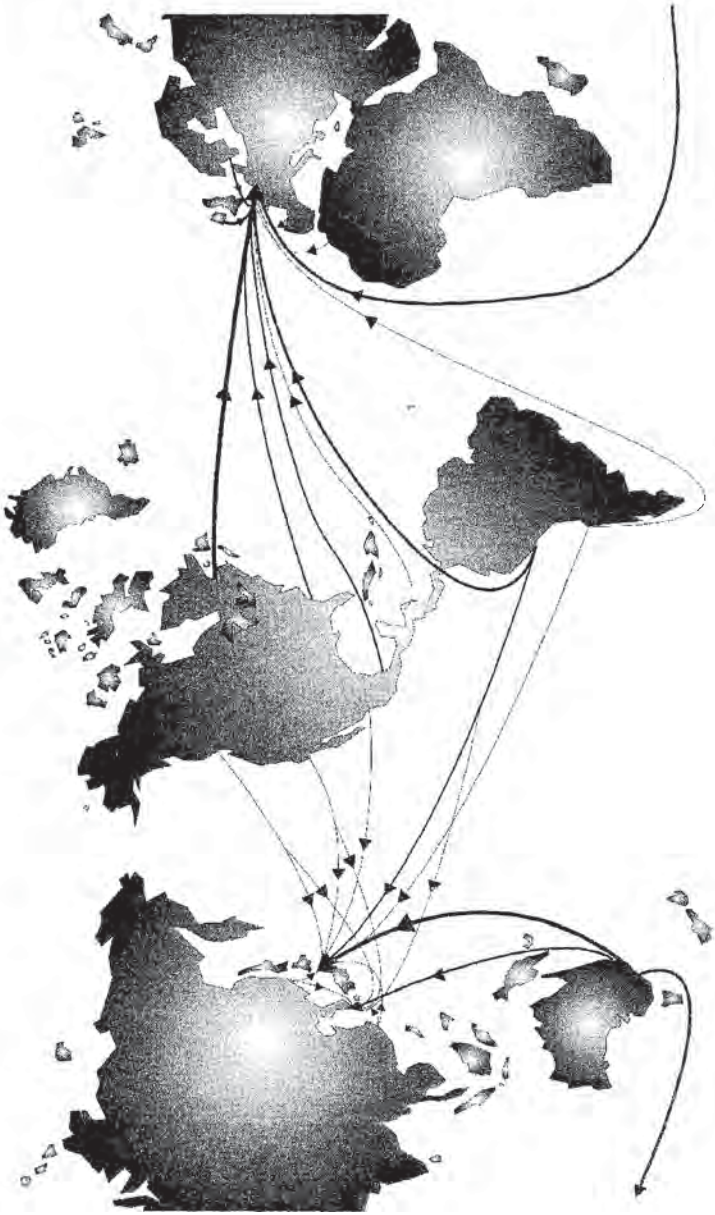


Mapa 6.4.2

PRINCIPALES EXPORTACIONES DE COBRE (1991)

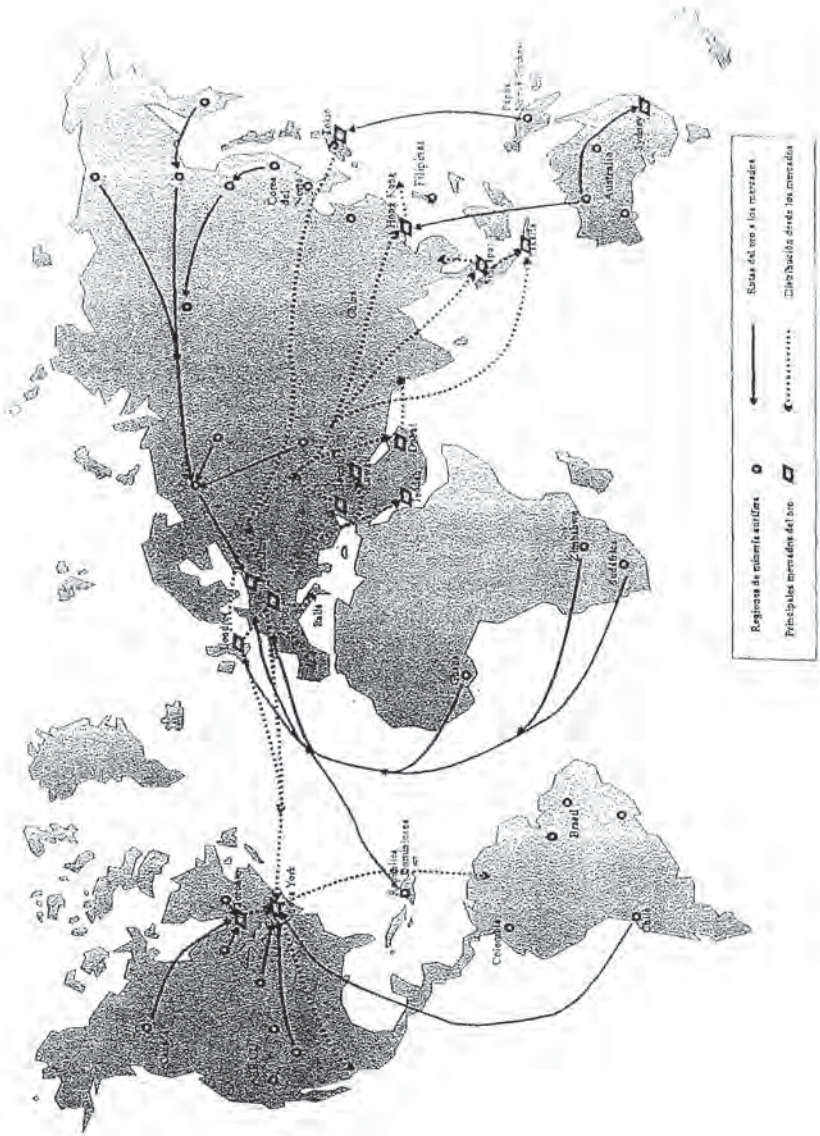
Mapa 6.4.3

PRINCIPALES EXPORTACIONES DE CINC (1991)



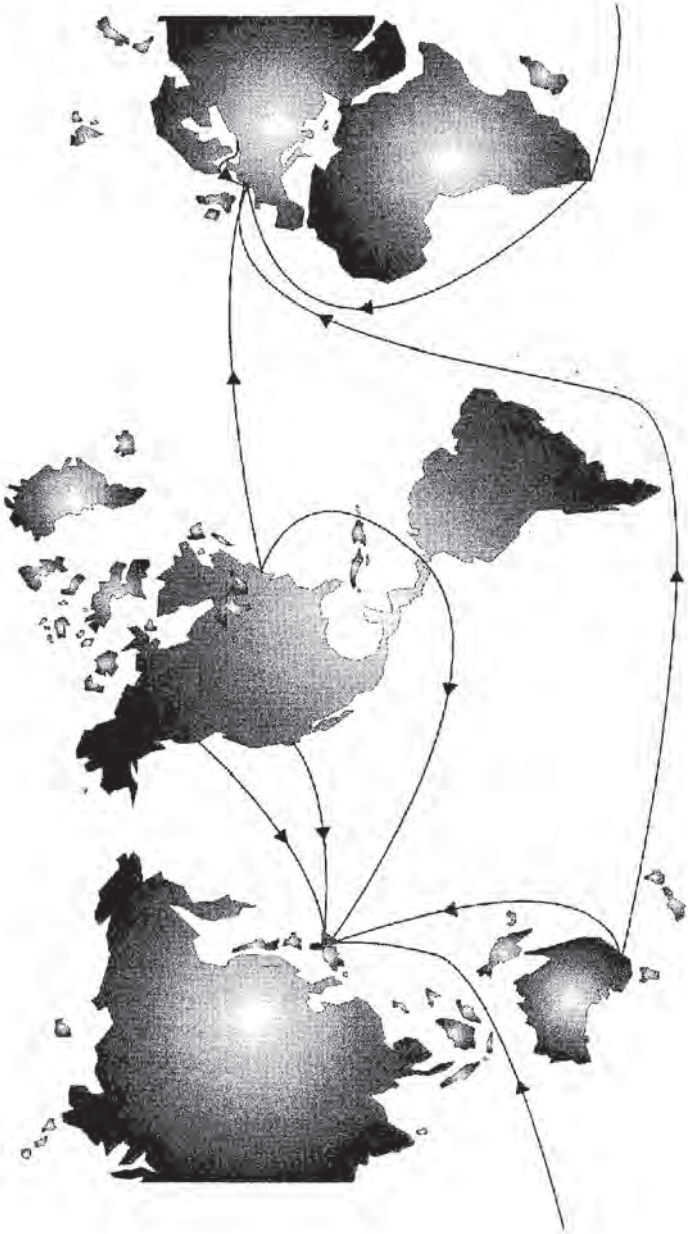
Mapa 6.4.4

REGIONES DE PRODUCCIÓN MINERA Y FLUJO MUNDIAL DEL ORO HACIA/DESDE LOS MERCADOS



Mapa 6.4.5

PRINCIPALES EXPORTACIONES DE CARBÓN (1991)



6.4.4. Reciclado

La cada vez más abundante acumulación de desechos y chatarras metálicas, las predicciones catastrofistas de los estudios del Club de Roma sobre el agotamiento de los recursos minerales y también, cada vez con más fuerza, la aparición de un cierto sentimiento ecologista, impulsaron en las últimas décadas la puesta a punto de procesos industriales de recuperación y reciclado, así como la apertura de mercados para los productos de «segunda fusión».

Los metales base, cobre, plomo, cinc, aluminio y estaño, figuran entre aquellos en los que durante los últimos tiempos se han volcado mayores esfuerzos en conseguir su reciclado mediante la aplicación de tecnologías cuyos costes energéticos y medioambientales lo hagan no sólo factible sino deseable. En este sentido, como puede comprobarse en el cuadro 6.4.4, tras la realización de un esfuerzo considerable en la puesta a punto de tecnologías de recuperación y de construcción de plantas operacionales, se está alcanzando un nivel estable de los porcentajes de reciclado. Estos porcentajes están próximos al 45% en los casos de cobre y plomo, se situaban entre el 25 y el 30% para el aluminio y el cinc, hasta el aumento de consumo de este último sin modificación de la capacidad de reciclado y apenas sobrepasan el 15% en el caso del estaño.

Sin embargo, el abaratamiento relativo de las sustancias trae consigo la reducción o el estancamiento de los porcentajes de reciclado en los últimos años, tal y como se observa en el cuadro 6.4.4. y en el gráfico 6.4.13.

En el caso del oro se calcula que, de toda la producción histórica próxima a las 120.000 toneladas, sólo se ha disipado en usos industriales una cifra del orden del 15%, es decir, unas 18.000 toneladas. Del resto conservado, un 35% corresponde al almacenado en *stocks* oficiales por los Bancos Centrales y el 65% restante está en manos privadas como monedas, joyas, etc. *(Mineral Commodity Summaries 1995.)*

Otro de los metales tradicionalmente reciclado es el hierro y compuestos de hierro que bajo el concepto genérico de «chatarra» se recoge y comercializa como materia prima para la fabricación del acero. Su importancia en estos procesos se aprecia en el gráfico 6.4.13. Estas chatarras férricas son a su vez una parte importante de las «menas secundarias» de otros metales tales como cobre, aluminio, etc.

En cuanto a las posibilidades que pueden ofrecer los recursos secundarios como fuente de materias primas metálicas hacia el futuro resultan ilustrativos los datos que se aportan en el cuadro 6.4.5 de los que puede deducirse que, entre los metales reciclados, la posible aportación a largo plazo de los secundarios en los casos de aluminio y manganeso puede considerarse muy poco significativa, escasa para níquel y molibdeno y bastante importante para cobre, plomo y cinc.

Cuadro 6.4.4

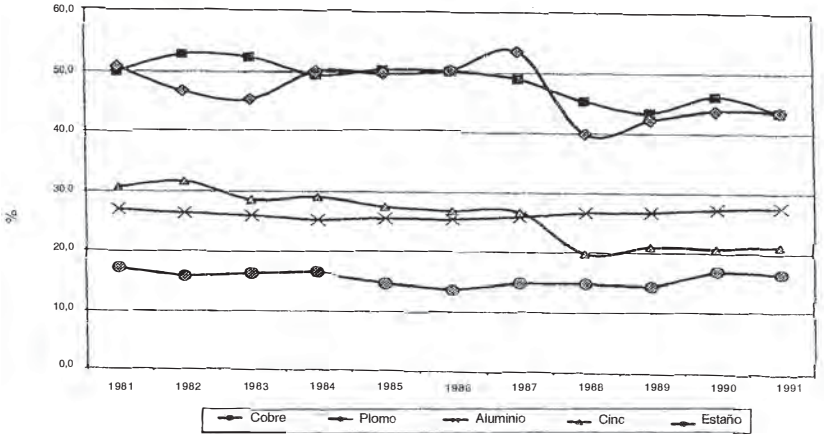
RECUPERACIÓN DE CHATARRA DE ALGUNOS METALES NO FÉRREOS EN PAÍSES INDUSTRIALIZADOS (miles de toneladas)

	1981	*1982*	*1983*	*1984*	*1985*	*1986*	*1987*	*1988*	*1989*	*1990*	*1991*
Cobre											
Reciclado	3.736,6	3.620,4	3.692,7	3.760,4	3.788,8	3.862,2	3.937,6	4.779,2	4.781,3	4.744,3	4.669,4
Consumo	7.479,0	6.845,2	7.048,6	7.594,6	7.521,7	7.696,1	8.041,7	10.548,6	11.032,4	10.284,7	10.754,6
%	50,0	52,9	52,4	49,5	50,4	50,2	49,0	45,3	43,3	46,1	43,4
Plomo											
Reciclado	1.950,0	1.763,0	1.731,5	1.982,0	1.999,4	2.072,6	2.237,3	2.305,8	2.465,3	2.450,6	2.356,2
Consumo	3.844,3	3.772,1	3.819,4	3.959,2	4.013,1	4.118,2	4.182,0	5.781,0	5.850,5	5.605,0	5.413,9
%	50,7	46,7	45,3	50,1	49,8	50,3	53,5	39,9	42,1	43,7	43,5
Aluminio											
Reciclado	4.078,2	3.849,3	4.136,6	4.254,6	4.355,2	4.470,4	4.823,6	5.303,5	5.430,5	5.768,3	5.915,9
Consumo	15.120,4	14.577,2	15.934,7	16.834,3	17.016,5	17.546,3	18.579,8	19.862,7	20.233,8	21.121,5	21.403,9
%	27,0	26,4	26,0	25,3	25,6	25,5	26,0	26,7	26,8	27,3	27,6
Cinc											
Reciclado	1.337,9	1.322,1	1.295,0	1.358,2	1.300,9	1.308,1	1.337,4	1.409,1	1.469,1	1.441,5	1.454,8
Consumo	4.367,2	4.170,5	4.529,0	4.675,7	4.714,1	4.854,1	4.994,2	7.159,7	7.033,0	6.963,4	6.888,0
%	30,6	31,7	28,6	29,0	27,6	26,9	26,8	19,7	20,9	20,7	21,1
Estaño											
Reciclado	35,3	31	32,4	34,8	31,8	30,9	34	35,3	35	39,7	36,8
Consumo	210,5	199,7	202,2	212,7	214,3	224,7	226,9	236,4	241,5	232,4	221,9
%	16,77	15,52	16,02	16,36	14,84	13,75	14,98	14,93	14,49	17,08	16,58

Fuente: *Metallstatistik, 1981-91,* Metallgesellschaft AG, Frankfurt am Maine, 1992 (Excluidas la antigua URSS y Europa del Este).

Gráfico 6.4.13

EVOLUCIÓN DEL PORCENTAJE RECICLADO



En el cuadro 6.4.6 se presenta una estimación bastante detallada de los tipos de menas metálicas secundarias, de los metales que pueden proporcionar, de las leyes de metal útil que aportan y de los objetos, equipos o materiales de los que proceden.

Cuadro 6.4.5

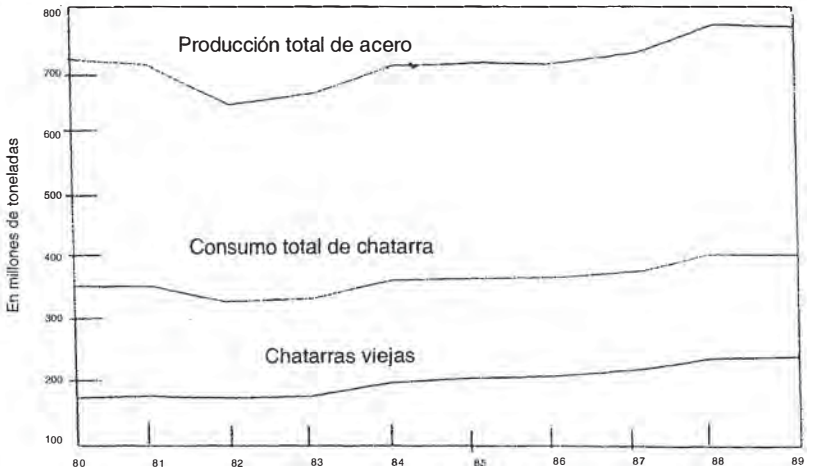
RECURSOS METALÍFEROS (en Mt)

	Naturales			*Secundarios*		
Metal	*Reserva*	*Base reservas*	*Explotables*	*%*	*Potenciales*	*%*
Aluminio	4.000	4.500	22	0,55	161	4,03
Cobre	350	510	71	20,29	143	40,86
Cinc	168	290	48	28,57	75	44,64
Plomo	100	145	10	10,00	30	30,00
Manganeso	800	850	16	2,00	43	5,38
Níquel	60	70	0,5	0,83	6	10,00
Molibdeno	8,5	10	0,07	0,82	0,85	10,00
Cromo	1,7	2	1,1	64,71	–	–

Fuente: Francisco Román *(Industria Minera).*

Gráfico 6.4.14

PRODUCCIÓN DE ACERO Y CONSUMO DE CHATARRAS



Cuadro 6.4.6

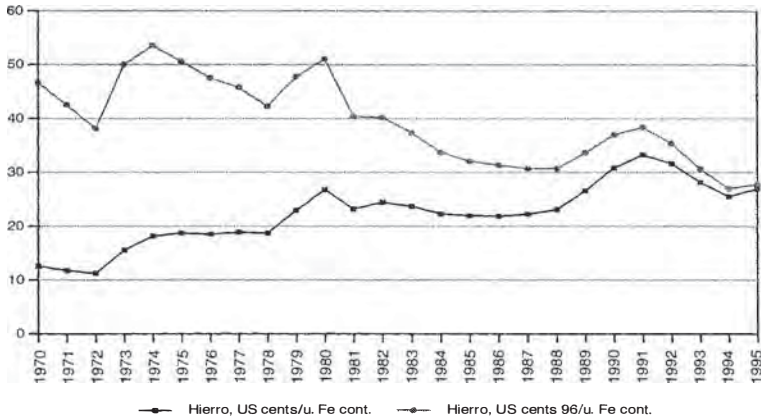
MENAS SECUNDARIAS PRINCIPALES

Tipo de mena	*Metal útil contenido*	*Ley en metal útil*	*Procedencia u origen de la mena*
MONOMETÁLICAS SIMPLES	Al	95%	Conductores eléctricos, cubiertas, carpintería metálica, estructuras, envases...
	Cu	95%	Conductores eléctricos, tuberías, cubiertas, radiadores...
	Pb	95%	Tuberías, edificaciones, techumbres...
	Zn	95%	Cubiertas, edificaciones...
MONOMETÁLICAS COMPLEJAS	Al	90%	Utensilios varios, menajes
	Cu	50%	Maquinaria y equipos eléctricos
	Pb	70%	Industria Química
	Zn	1%	Aceros galvanizados
POLIMETÁLICAS SIMPLES	Cu-Zn	95%	Latones
	Cu-Sn	95%	Bronces
	Cu-Zn Zn-Mn Pb		Latones Especiales
	PB-Sb-Cd	55%	Baterías y Acumuladores
POLIMETÁLICAS COMPLEJAS Matriz férrica	Al Cu Pb Zn	10%	Automóviles, máquinas herramientas, material de transporte
	Mn Si	2%	Chatarras de aceros comunes
	Ni Cr Mn	35%	Chatarras de aceros especiales
Matriz orgánica y no metálica	Al Cu Pb Zn	5%	Residuos sólidos urbanos
POLIMETALÍFEROS COMPLEJOS	Zn Pb Cd	50%	Polvos de acería eléctrica (acero común)
	Cr Ni Mo	20%	Polvos de acería eléctrica (a. inoxidables)
	Zn	95%	Matas de galvanización
	Zn	50%	Cenizas de galvanización
	Al	50%	Escorias de fusión

Fuente: Francisco Román *(Industria Minera).*

Gráfico 6.4.15

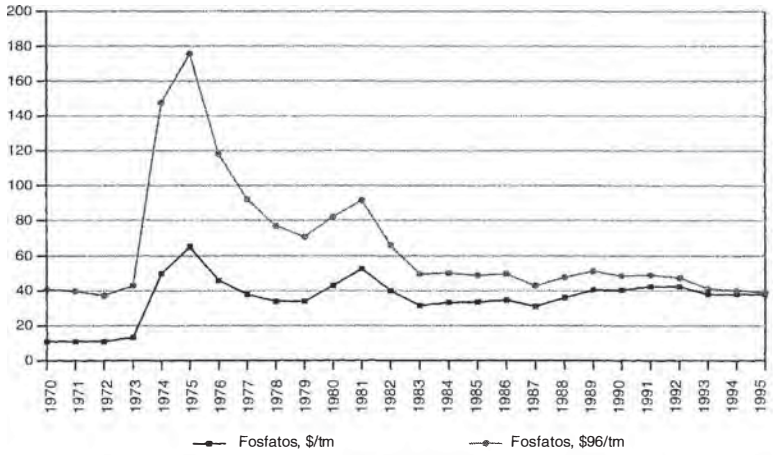
COTIZACIÓN DEL MINERAL DE HIERRO
(64,5%, Fe, fob Brasil)



Hasta 1985, Hierro: Liberia, Bong Rance, C. 61% FE, C.I.F. NORTH SEA PORTS.
Desde 1985, Hierro: Brasil a Europa, 64,5% Fe, FOB, UNCTAD

Gráfico 6.4.16

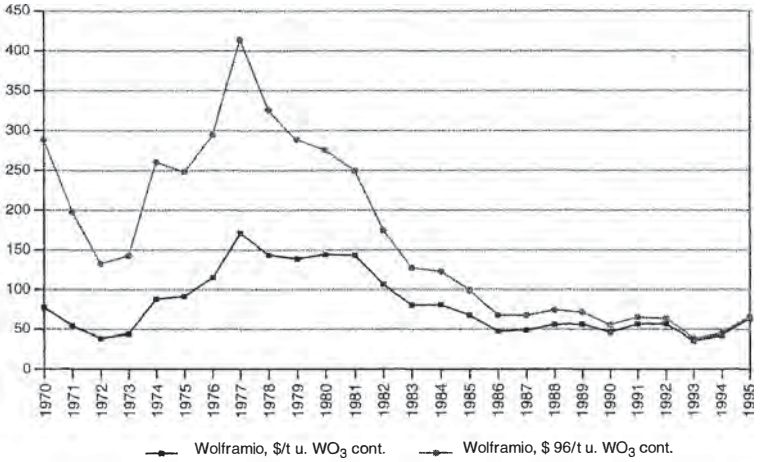
COTIZACIÓN DEL MINERAL DE FOSFATO



Fosfato: Khouribga, 70% BPL, FAS Casablanca, UNCTAD.

Gráfico 6.4.17

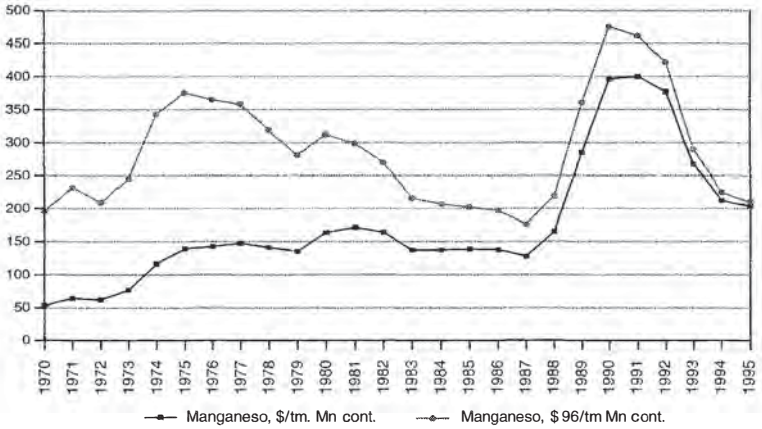
COTIZACIÓN DEL MINERAL DE WOLFRAMIO



Wolframio: CIF Reino Unido, min, 65% WO_3, MB

Gráfico 6.4.18

COTIZACIÓN DEL MINERAL DE MANGANESO



Manganeso: CIF Londres, UNCTA

Gráfico 6.4.19

COTIZACIÓN Al EN $ CORR. Y CONST. 96

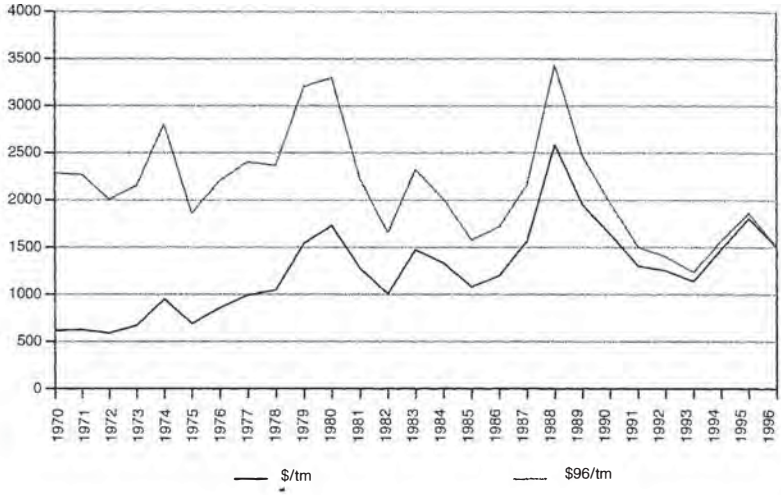


Gráfico 6.4.20

COTIZACIÓN Zn EN $ CORR. Y CONST. 96

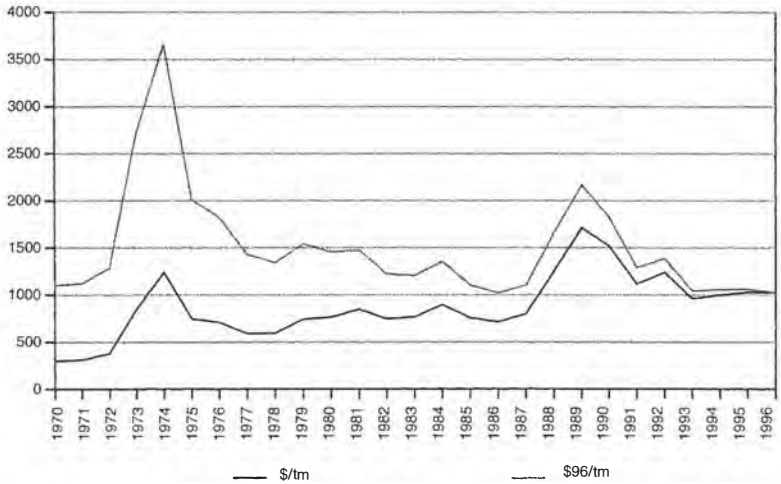


Gráfico 6.4.21

COTIZACIÓN Sn EN CORR. Y CONST. 96

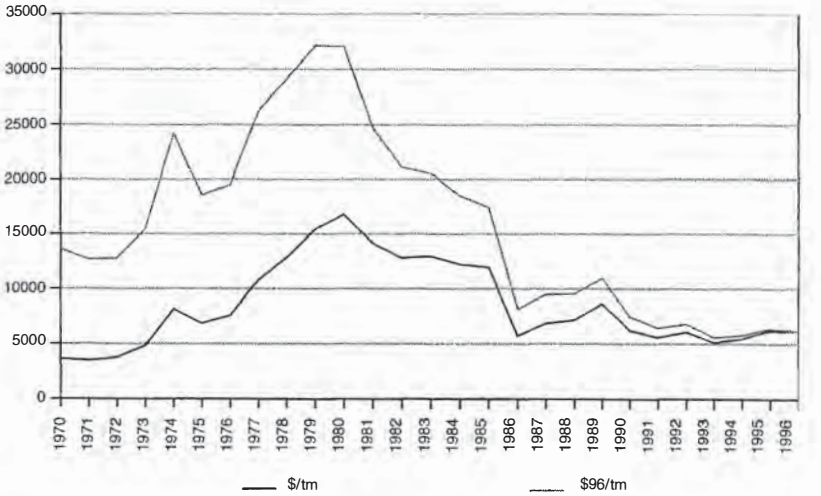


Gráfico 6.4.22

COTIZACIÓN Cu EN $ CORR. Y CONST. 96

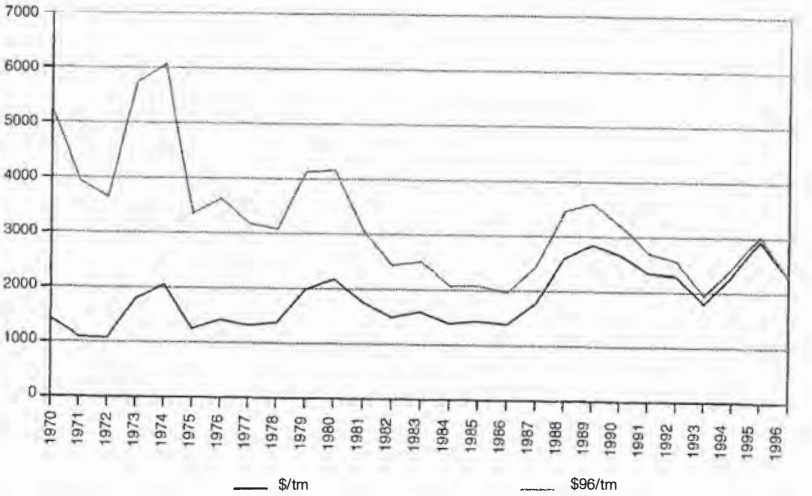


Gráfico 6.4.23

COTIZACIÓN Au EN $ CORR. Y CONST. 96

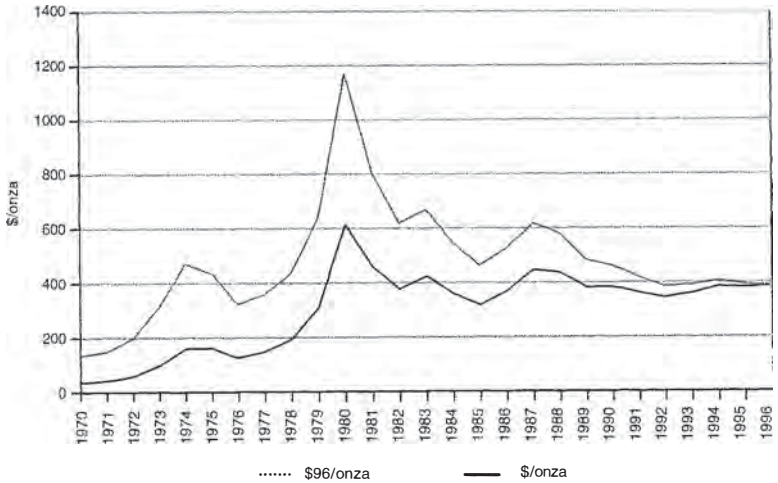
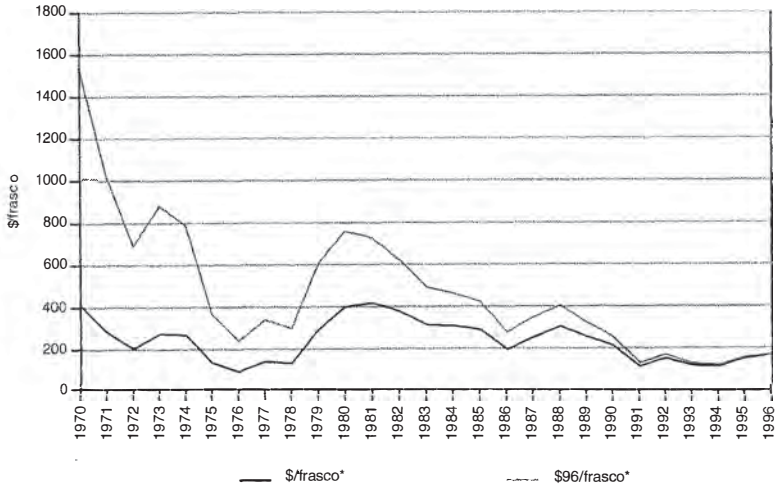


Gráfico 6.4.24

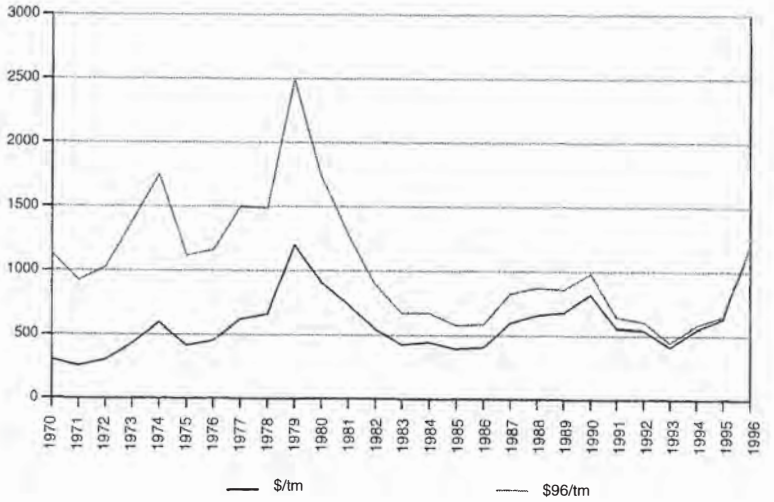
COTIZACIÓN Hg en $ CORR. Y CONST. 96



* 1 frasco = 34,5 kg de mercurio.

Gráfico 6.4.25

COTIZACIÓN Pb en $ CORR. Y CONST. 96



6.5. Síntesis de la intervención de la especie humana sobre la Tierra. José Manuel Naredo

Los apartados anteriores de este capítulo enjuician y tratan de mejorar las sorprendentemente escasas e imprecisas estimaciones disponibles de la utilización que está haciendo la especie humana del aire, del agua, de la fotosíntesis y de los *stocks* de rocas y minerales contenidos en la corteza terrestre. Decimos sorprendentemente porque la escasez e imprecisión de estas estimaciones globales se muestra en flagrante contradicción con la extendida preocupación por los «problemas ambientales» y sus implicaciones planetarias de que hacen gala tanto la opinión pública como las organizaciones internacionales: parece como si no se supiera que las contaminaciones y deterioros que se dicen combatir son el resultado lógico y globalmente inevitable de la creciente presión sobre los recursos que ha venido ejerciendo la civilización industrial. El cuadro 6.5.1 pone de relieve la importancia actual en tonelaje, para los grandes grupos de productos primarios, de la extracción de recursos sobre la que se sostiene la economía planetaria.

Una primera observación salta a la vista: la extracción de rocas y minerales de la corteza terrestre alcanza un tonelaje que triplica a la de los productos derivados de la fotosíntesis. Lo cual subraya la radical diferencia que separa el comportamiento económico de la actual civilización del practicado por la especie humana a lo largo de toda su historia: ésta había vivido fundamentalmente, al igual que las otras especies que componen la biosfera, de la fotosíntesis y sus derivados, mientras que ahora se apoya sobre todo en la extracción de *stocks* de la corteza terrestre. Con el agravante de que los materiales extraídos se utilizan primero y se devuelven después al medio como residuos, sin preocuparse de hacerlos retornar a su condición originaria de recursos, con consecuencias negativas para el conjunto de la biosfera. Es más, el abaratamiento relativo observado en el comercio mundial de productos primarios durante la última década ha contribuido lógicamente a reducir o estancar la fracción de los mismos que se recicla, tal y como se constató en el apartado anterior, para varias sustancias.

Por otra parte, la simple extracción de combustibles fósiles se aproxima en tonelaje al de la extracción de todos los derivados de la fotosíntesis. Habida cuenta de que el contenido exergético de los combustibles fósiles por unidad de peso es varias veces superior al de la materia vegetal fresca, nos encontramos con que la especie humana utiliza solamente a partir de esta fuente fósil una exergía muy superior a la derivada de la fotosíntesis, que se orienta a acrecentar el resto de las extracciones de la biosfera y la corteza terrestre, a transportarlas y a elaborarlas, forzando también una utilización cada vez más masiva del agua y del aire, como recursos y como sumideros, analizada en el segundo apartado de este capítulo. Recordemos ahora que las cantidades de agua y aire utilizados en la Tierra se cifran en

billones (10^{12}) de toneladas, mientras que las extracciones producto de la fotosíntesis y de la corteza terrestre se cifran en miles de millones (10^{9}) de toneladas. En la parte inferior del cuadro 6.5.1 se incluye la estimación de la cantidad de agua utilizada, que se acerca ya a la mitad del flujo anual de agua accesible y que, al ser en buena parte devuelta en forma de contaminación, invalida una proporción todavía superior.

En los procesos de extracción, elaboración y manejo de materiales en gran escala, la especie humana se ve obligada a movilizar un tonelaje de tierras y de materia vegetal crecientemente superiores a los directamente utilizados, acentuando con ello el deterioro ocasionado en el medio (que se sumaría al provocado por los residuos). En el cuadro 6.5.1 se resume el movimiento total de materiales ocasionado por las actividades agrarias y extractivas, estimado en los apartados anteriores. La diferencia entre las sustancias comerciales extraídas y el movimiento de tierras necesario para conseguirlas culmina en el caso de los metales: la ganga y los estériles movilizados multiplican en este grupo por más de 10 el tonelaje de los minerales metálicos comercializados, siendo este ratio muchísimo mayor para sustancias como el oro y el cobre, cuya obtención y beneficio comporta además un manejo masivo de agua, energía y contaminación.

En suma, que la intervención humana sobre la corteza terrestre, orientada a la obtención de rocas y minerales, supera en importancia a la de cualquier agente geológico. Los movimientos anuales de tierras ligados a las actividades extractivas se acercan ya a los cien mil millones de toneladas, multiplicando por cinco o seis las toneladas de sedimento que se estima arrastran anualmente todos los ríos del mundo (unos 16.500 millones de toneladas) y empequeñeciendo la importancia de los ciclos vitales de carbono y materia seca que moviliza la fotosíntesis (podemos cifrar la «producción primaria» de materia seca de las tierras emergidas en unos 132 mil millones de toneladas). De ahí que, con la civilización industrial, la Tierra se vaya convirtiendo cada vez más en una *gran mina*, como reza el título de la monografía incluida sobre el tema en uno de los informes sobre «la situación del mundo» promovidos por el World Wacht Institute de Washington[45]. Todo lo cual justifica la necesidad de dar un tratamiento económico prioritario al uso que nuestra civilización está haciendo del «capital mineral» de la Tierra, como proponemos en el presente libro.

Vemos que la civilización industrial ha exacerbado el hecho singular que observa que la especie humana utiliza una energía exosomática muy superior a la injerida en forma de alimentos. Es precisamente, insistimos, ese uso exosomático de la energía el que le ha permitido acrecentar hasta

[45] YOUNG, J. E. (1992), «La Tierra convertida en una gran mina», en L. Brown (ed.), *La situación del mundo en 1992*, Washington, World Wacht Institute (hay traducción española de Eds. Apóstrofe, Barcelona).

Cuadro 6.5.1

TONELAJE LIGADO A LA EXTRACCIÓN DE BIOMASA Y RECURSOS MINERALES EN 1995 (Total planetario en 10^9 tm)

	Productos
Agrícola	3,6
Forestal	6,2
Ganadería	0,7
Pesca	0,1
TOTAL AGRARIO	10,6 + pérdidas directas (17) + pérdidas indirectas (37)
Combustibles fósiles	10,0 Mena (11) + estériles (15) = 26
Minerales metálicos	1,2 Mena (4) + estériles (12) = 16
Rocas y minerales no metálicos	21,0 Mena (22) + estériles (3) = 25
TOTAL ROCAS Y MINERALES	32,2 Mena (37) + estériles (30) = 67
Pro memoria:	Agua utilizada (10^{12} tm) en 1995
Riego	4,1
Otros usos	0,7
TOTAL	4,8

Fuente: Elaboración propia a partir de datos tomados de los apartados 6.2, 6.3 y 6.4.

los niveles antes mencionados la extracción y el transporte horizontal de materiales, rompiendo con los esquemas de funcionamiento de los ecosistemas naturales (en los que predomina el transporte vertical) y originando los problemas de contaminación de todos conocidos (al decir de Margalef, la contaminación es una enfermedad originada por ese transporte horizontal). Subrayemos ahora que, al forzar mediante el manejo de esta energía exosomática la recolección de productos derivados de la fotosíntesis a través de la agricultura, la pesca y la explotación forestal modernas, se están deteriorando los recursos naturales que habían posibilitado originariamente el desarrollo de la fotosíntesis. La sostenibilidad de la agricultura tradicional se explica porque compatibilizaba sus extracciones con las posibilidades de recuperación de los ecosistemas locales, adaptando los cultivos y aprovechamientos a las vocaciones productivas de los territorios. Sin embargo, la agricultura moderna acostumbra a forzar las extracciones, a base de inyectar agua y fertilizantes, desacoplando para ello los cultivos y los aprovechamientos de las posibilidades que ofrece el mantenimiento estable de los recursos naturales en los territorios y ocasionando el progresivo deterioro en éstos: pérdida de fertilidad de los suelos, de diversidad biológica, descenso de los niveles freáticos..., etc. De esta manera, tras haber erigido la noción de producción en centro de la ciencia económica,

la civilización industrial está convirtiendo también en no renovables e insostenibles (al apoyarse en el deterioro conjunto de *stocks* minerales y de recursos bióticos) las únicas producciones que habían sido tradicionalmente renovables y sostenibles, a saber, las producciones de la agricultura, de las pesquerías y de los bosques.

La explotación y el uso del que han venido siendo objeto la biosfera, la corteza terrrestre, la hidrosfera y la atmósfera han dejado huellas evidentes de deterioro sobre el territorio (reducción de la superficie de bosques y otros ecosistemas naturales con gran diversidad biológica e interés paisajístico, avance de la erosión y pérdida de la cubierta vegetal, ocupación para usos extractivos, urbano-industriales e implantación de infraestructuras, de los suelos de mejor calidad agronómica, etc.). Pues los mayores requerimientos de agua, energía y materiales obtenidos de (vertidos en) la Tierra se traducen en mayores requerimientos e incidencias territoriales[46]. Aunque el estudio de estos requerimientos e incidencias territoriales sería un complemento de gran interés para el análisis de flujos físicos que estamos abordando, nos vemos obligados a dejarlo fuera de este estudio. Subrayemos que el sugerente propósito de analizar «El papel del hombre en la transformación de la faz de la Tierra», planteado en el Simposio que se realizó bajo este mismo título en Princeton en 1955[47] cayó en saco roto, pese a que las crecientes preocupaciones por el medio ambiente planetario y la insostenibilidad de la actual civilización parecían, a primera vista, ofrecer un terreno más propicio para que tales preocupaciones pudieran prosperar. La realidad es que la geografía más histórica y cultural desarrollada por Carl O. Sauer, Clarence J. Glacken y otros promotores y animadores de dicho Simposio, se vio desplazada por la emergencia de otra geografía de corte más positivista. Curiosamente, cuando las imágenes de los satélites artificiales brindaron posibilidades sin precedentes para responder con datos en la mano a esa preocupación, la moderna geografía, pese a autodenominarse cuantitativa, perdía la globalidad de enfoques necesaria para decidirse a cifrar el seguimiento de las transformaciones infrin-

---

[46] Por ejemplo, en el caso de Madrid se ha podido comprobar que entre 1957 y 1980 se había duplicado el requerimiento total de suelo por habitante (excluyendo el suelo de uso agrícola) a la vez que aumentaron las exigencias de energía, agua y materiales. La mayor ocupación de suelo por habitante se debe básicamente al aumento de la segunda residencia y de los usos indirectos (embalses, vertederos, actividades extractivas, viario, etc.). En 1957 estos usos indirectos suponían sólo el 10% del territorio de la región de Madrid ocupado para fines no agrarios, mientras que en 1980 pasó a representar el 32%. Es decir, que el nuevo modelo de asentamiento poblacional se revela mucho más consumidor de suelo que el antiguo, ya que por cada dos hectáreas de ocupación urbana directa requiere otra de ocupación indirecta. (Datos tomados de GARCÍA ZALDÍVAR, R., J. M GASCÓ, J. LÓPEZ LINAGE y J. M. NAREDO (1983), *Evaluación de la pérdida de suelo agrícola debido al proceso de urbanización en la Comunidad de Madrid*, Madrid, Dirección General de Acción Territorial y Urbanismo, MOPU.) Así, cada modelo de utilización de flujos físicos deja una *huella* territorial diferente.

[47] Las ponencias de este Simposio organizado por William L. Thomas, Jr., realizado en junio de 1955, vieron la luz posteriormente en: THOMAS, WILLIAM L. Jr. (ed.) (1956), *Man's Role in Changing the Face of th Earth*, Chicago: University Chicago Press.

gidas por el hombre en la faz de la tierra. Es más, recordando el diagrama triangular que relaciona en los libros de ecología suelo, vegetación y clima, hoy se centra la reflexión sobre los discutibles cambios que la intervención humana puede originar en este último, que es el más difícil de modificar, a la vez que se cierran los ojos a los cambios que diariamente se infringen sobre el suelo y la vegetación, mucho más fáciles de cuantificar y de controlar.

El apartado anterior ofreció datos sobre la evolución de las extracciones de las principales sustancias de la corteza terrestre, mostrando el espectacular crecimiento que acusó durante los últimos treinta o cuarenta años, sin que en los últimos tiempos apunte al estancamiento o disminución, salvo excepciones como el plomo y el estaño arriba indicadas. Los esfuerzos por mejorar la eficiencia de los procesos no se han traducido, así, en una reducción generalizada de las extracciones, todo lo más han contribuido a moderar este crecimiento en algunas sustancias, aparte de las excepciones a las que acabamos de referirnos motivadas por razones tecnológicas y cambios de normativa. En suma, como atestiguan los datos no cabe hablar de «desmaterialización» generalizada de nuestras sociedades, sino todo lo contrario, al aumentar su requerimiento total de materiales incluso en las sociedades más «avanzadas» y, con mayor motivo, a escala planetaria (*vid.* Introducción). Por otra parte, la evolución de los precios de las materias primas minerales observada en el último decenio no ha incentivado el ahorro y reciclaje de las mismas. En efecto, el apartado anterior informa del abaratamiento relativo de la mayoría de las sustancias, que incide sobre el estancamiento o la reducción que tiene lugar en los últimos tiempos en el porcentaje de la demanda que se abastece a partir del reciclaje, por contraposición al aumento observado al calor del encarecimiento generalizado de las mismas que acompañó a la llamada «crisis energética». Vemos pues que justo ahora que se habla de la «desmaterialización» y del «desarrollo sostenible», la realidad apunta en sentido contrario, ya que no sólo aumenta el requerimiento total de materiales, sino que se abastece a base de aumentar las extracciones y los residuos, y no favoreciendo del reciclaje del *stock* de materiales en uso.

Por último, hay que subrayar el desigual reparto que se observa a escala mundial en el uso de los materiales y la energía extraídos, que fuerza el enorme trasiego de éstos a lo largo y a lo ancho del planeta. Conviene advertir que el desequilibrio entre los recursos naturales requeridos por los países ricos y las dotaciones de sus territorios se acentuó enormemente a partir de la segunda guerra mundial. En efecto, durante el capitalismo carbonífero, la explotación de los principales minerales utilizados (carbón y hierro) se realizaba básicamente en los países cuna de la revolución industrial. El cuadro 6.5.3, tomado de un libro de la preguerra[48] sobre los recur-

[48] Peyret, H. (1994), *La guerre des matières premières*, París, Presses Universitaires de France.

sos naturales, denota que los principales productores de carbón eran los principales países consumidores. Asimismo, en esa época, sólo el 7% del hierro utilizado en los países ricos era importado de fuera de sus territorios. Incluso en recursos peor distribuidos en el mundo, como la bauxita y el petróleo, en los países ricos la importación sólo abastecía el 21 y el 25%, respectivamente, de sus demandas. En el caso del petróleo Estados Unidos era el primer país consumidor, pero, también, el primer país productor, que se autoabastecía sin problemas. Sin embargo, el consumo de carbón y de petróleo en estos países se multiplicó desde entonces por cinco y por diez, respectivamente, originando un desacoplamiento mucho mayor entre los requerimientos y las disponibilidades de sus territorios. Lo mismo ocurrió con la mayoría de los minerales, para los que estos países son generalmente importadores netos, mostrando que sus economías se mantienen poniendo a su servicio el resto del Planeta, como fuente de recursos y como sumidero de residuos. De todas maneras hay que distinguir, al menos, el caso de Estados Unidos del de Japón y la Unión Europea. El primero es un país que cuenta con un gran territorio y con amplísimas dotaciones minerales. Lo cual, unido al mantenimiento de una política minera activa, hace que cuente con tasas de autoabastecimiento importantes e incluso que sea exportador neto en algunas sustancias (como se vio en los mapas presentados en el apartado 6.4), pese a lo elevado de sus demandas. Lo contrario ocurre con Japón y la Unión Europea, cuyas mucho más reducidas dotaciones, unidas a políticas desincentivadoras de la minería, hacen de ellos países fuertemente deficitarios. Con estas matizaciones, los mapas de los flujos mundiales de petróleo y de gas natural que a continuación se presentan, son reveladores de la situación actual, al reflejar los principales núcleos utilizadores del «capital mineral» de la Tierra. El mapa referido al petróleo añade a los centros receptores netos de Estados Unidos, Japón y la Unión Europea, el de los «dragones» del sudeste asiático, denotando que su «emergencia» económica no es ajena a la implantación de industrias muy exigentes en energía y contaminación. Sin embargo, en el mapa del gas natural estos «dragones» no figuran ya entre los grandes centros receptores, ya que se trata de un combustible más «limpio» cuyo consumo está reservado a los países ricos, más preocupados por la contaminación atmosférica.

El cuadro 6.5.2 presenta el requerimiento directo (RDM) y el requerimiento total de materiales (RTM) medio per cápita en el mundo y en los cuatro países para los que se disponía de información comparable. Los datos mundiales per cápita resultan de dividir por las cifras de población las extracciones de productos bióticos y abióticos (y su incidencia total en tonelaje movilizado), estimadas en los apartados anteriores (sintetizados en el cuadro 6.5.1). Los datos de los cuatro países proceden del estudio publicado por el World Resources Institute (1997) de Washington sobre

Cuadro 6.5.2

REQUERIMIENTO DIRECTO (RDM) Y REQUERIMIENTO TOTAL DE MATERIALES (RTM) EN TM PER CÁPITA. MUNDO 1995. PAÍSES SELECCIONADOS 1991 (SE EXCLUYE AIRE Y AGUA)

	Mundo	*EE UU*	*Japón*	*Alemania*	*Holanda*
RDM	7	20	17	22	38
RTM	18	84	46	86	84
RTM importados	–	5	25	31	62
RTM propios	–	79	21	55	22

Fuente: Mundo: elaboración propia a partir del cuadro 6.5.1.
Países: World Resources Institute *et al.* (1997), *Resources Flows: The Material Basis of Industrial Economies*, Washington.

Resources Flows: The Basis of Industrial Economies, al que ya hicimos referencia[49]. La comparación de los datos medios mundiales con los de los países considerados resulta interesante, aunque sólo cabe tomarla a título indicativo, habida cuenta las diferentes metodologías y fuentes utilizadas, así como los distintos años de referencia (la estimación mundial se centra en 1995, mientras que las de los países lo hacen en 1991). En efecto, la imprecisión de los datos no puede oscurecer diferencias de tal magnitud que resultan altamente reveladoras de una situación extremadamente desigual. El RDM medio de 7 toneladas per cápita en el mundo asciende a 17 en Japón, a 20 en EE UU, a 22 en Alemania y a 38 en Holanda. A la vez que el RTM pasa de 18 tm per cápita para la media mundial a 46, 84, 86 y 84, respectivamente, en estos países. Si mantenemos la hipótesis de que el RDM per cápita de los países ricos (con el 16% de la población mundial) multiplica por 4 la media mundial que acabamos de estimar, situándose en las 20 tm per cápita, el RDM del 84% de la población restante alcanzaría las 3 tm per cápita. Las diferencias son todavía más acentuadas en lo que concierne al RTM: si a la vista de lo observado en los casos arriba indicados, mantenemos la hipótesis moderada de que el RTM per cápita de los países ricos multiplica por 4 la media mundial, alcanzando las 75 tm per cápita, el correspondiente al resto del mundo se situaría en las 7 tm per cápita.

Valgan las anteriores conjeturas para subrayar el vacío de estadísticas de base sobre el tema y reclamar su puesta en marcha, posibilitando así la ela-

[49] World Resources Institute, Wuppertal Institute, *et al.* (1997), *Resources Flows: The Material Basis of Industrial Economies*, Washington: World Resources Institut VI + 66 pp.

boración de indicadores agregados más solventes de los arriba presentados. Sorprende, insistimos, que en la copiosa literatura académica sobre temas económico-ambientales, apenas se levanten voces advirtiendo que difícilmente cabe gestionar algo cuyo funcionamiento y evolución no se conoce bien, a los distintos niveles de agregación. Sorprende también que se suscriba la *sostenibilidad* como meta generalmente admitida, a la vez que se desatiende la información necesaria para advertir los avances o retrocesos que produzcan con relación a la misma: la disponibilidad de series temporales elaboradas con criterios homogéneos sobre las exigencias en recursos (y en residuos), se muestra imprescindible para ver hasta qué punto el comportamiento ***económico*** de nuestras sociedades avanza o no hacia una mayor «sostenibilidad» ***ecológica***[50]. Sorprende, por último, que se haya llegado a estimar a nivel planetario (como vimos en la Introducción) el valor monetario de los «servicios ambientales» que nos ofrece la naturaleza, sin que se disponga todavía de datos solventes y homogéneos que nos informen de la relación entre los sistemas económicos y el entorno físico planetario o entre *el Hombre y la Biosfera* (ajustándonos al título del Programa *MaB* (*Man and Biosphere*) que la Unesco mantiene desde hace ya un cuarto de siglo). La polvareda crítica que levantó la estimación de dicho valor monetario por Constanza y otros[51], ha venido a ocultar la información posiblemente más interesante que se desprende de tal ejercicio valorativo: el valor que se atribuye a los «servicios ambientales» que nos brinda el Planeta resulta ya bastante pequeño con relación a los agregados económicos ordinarios. En efecto, en el trabajo citado se cifra el valor de dichos servicios en una horquilla que iría entre los 16 y los 54 billones (10^{12}) de dólares, con una media de 33 billones, mientras que el agregado planetario de Renta o Producto Nacional alcanzaba en 1995 los 28 billones(10^{12}) de dólares y los activos financieros los 78 billones, como se verá más adelante en el capítulo 25. En el mismo trabajo citado, los autores se congratulan de que su estimación del valor de estos servicios se aproxime al de otra estimación realizada para 1970, a la que hacen referencia, en la que se alcanza una valoración actualizada de 34 billones de $ de 1994, mientras que el agregado de Renta o Producto Nacional se cifraba en 1970 en 14 billones de $ (de 1994). De esta manera, a poco que estos agregados monetarios sigan creciendo a tasas acumulativas próximas a las que lo han venido haciendo en los últimos decenios, acabarán arrojando una capacidad de compra muy superior al valor que pueda atribuirse a nuestro pla-

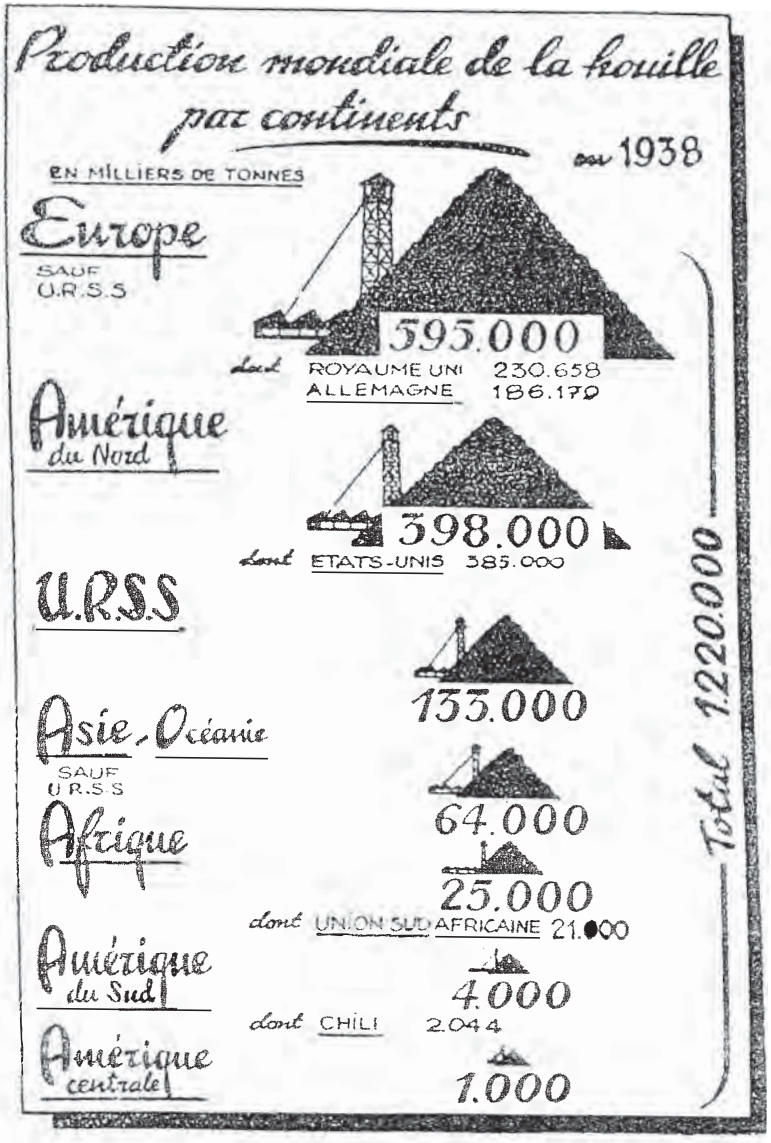
[50] La literatura académica ha girado más en torno a esa «cuadratura del círculo» que es el logro de un «desarrollo sostenible», que al seguimiento de las variables que informan sobre si mejora o empeora la sostenibilidad global y a largo plazo de los sistemas y procesos económicos.

[51] CONSTANZA, R. *et al.* (1997), «The Value of World's Ecosystems Services and Natural Capital», *Nature*, vol. 387, pp. 253-260.

neta. Esta expansión continuada de los «valores virtuales» que propicia el actual marco institucional, podría acabar poniendo en manos de alguna empresa o consorcio de ellas capacidad de compra sobrada para adquirir toda la biosfera y los recursos del planeta, anteponiendo a ese horizonte de individuos libres e iguales que proponía la utopía liberal, la expansión y concentración (en manos de esas entidades jerárquicas y centralizadas que son las empresas) del poder de compra sobre el mundo. Lo cual empequeñece cada vez más el valor relativo del «inmovilizado fijo» natural de la Tierra, con todos sus ecosistemas y elementos. La evidente relación entre los mecanismos financieros que otorgan y redistribuyen la capacidad de compra sobre el planeta, que se ejerce a través del comercio, y las consecuencias que tienen sobre el manejo del territorio y los recursos planetarios, hace que destinemos la tercera parte de este libro a discutir, aunque sólo sea sumariamente, la incidencia de los criterios de valoración y del funcionamiento comercial y financiero en la ecología planetaria.

Cuadro 6.5.3

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE HULLA POR CONTINENTES



Fuente: PEYRET, H. (1994), *La guerre des matières premières*, París, PUF.

Mapa 6.5.1

PRINCIPALES FLUJOS COMERCIALES DE PETRÓLEO

Fuente: BP BULLETIN, 1997.

Mapa 6.5.2

PRINCIPALES FLUJOS COMERCIALES DE GAS NATURAL

Fuente: BP BULLETIN, 1997.

Bibliografía

ALLEN, D. T y K. S. ROSSELOT (1994), «Pollution Prevention at the Macro Scale: Flows of Wastes, Industrial Ecology and Life Cycle Analysis», *Waste Management*, vol. 14, nos. 3-4, pp. 178-189.

ARIMANY, L. (1992), «La función de calidad de Taguchi y el consumo de energía», V Jornadas sobre la Calidad de la Industria Energética, Córdoba.

AYRES, R. U. y L. W. AYRES (1996), *Industrial Ecology. Owards Closing the Materials Cycle*, Cheltenham (RU) y Northampton (EE UU), Edward Elgar Publishing Ltd, 416 pp.

AZQUETA, D. (1994), «Economía, medio ambiente y economía ambiental», *Revista Española de Economía*, Monográfico sobre «Recursos Naturales y Medio Ambiente».

BAIROCH, P. (1994), *Mythes et paradoxes de l'histoire économique*, París, La Découverte, pp. 87-103.

BRUNDTLAND, G. H. (1987), *Our Common Future*, Oxford, Oxford University Press. (*Nuestro futuro común*, Madrid, Alianza, 1988.)

Catálogo de Edward Elgar Publishing Limited, *Environment & Ecology*, Backlist and New Titles 1997/1998, p. 34.

CLARKE, R. (1993), *Water: The International Crisis*, Londres, Earthscan Publications Ltd.

CONSTANZA, R. *et al.* (1997) «The Value of World's Ecosystems Services and Natural Capital», *Nature*, vol. 387, pp. 253-260.

CONSTANZA, R., H. DALY y J. A. BARTHOLOMEW (1991), «Goals, Agenda and Policy Recomendations for Ecological Economics» en R. Constanza, ed., *Ecological Economics: the Science and Management of Sustainability*, Nueva York y Oxford, Columbia University Press.

DALY, H. E. (1990), «Toward Some Operational Principles of Sustainable Development», *Ecological Economics*, vol. 2, n.º 1, pp. 1-6.

DIXON, J. A. y L. A. FALLON (1991), «El concepto de sustentabilidad: sus orígenes, alcance y utilidad en la formulación de políticas», Vidad, J. (comp.) *Desarrollo y medio ambiente*, Santiago de Chile, CIEPLAN.

EHRLICH, P. R. (1989), «The Limits to Substitution: Meta Resource Depletion and New Economic-Ecological Paradigm», *Ecological Economics*, vol. 1, n.º 1, p.10.

ERKMAN, S. (1998), *Vers une écologie industrielle*, París, Eds. Charles Léopold Mayer, 147 pp.

FISCHER-KOWALSKI, M. y H. HABERL (1997), «Tons, Joules, and Money: Modes of Production and Their Sustainability Problems», *Society & Natural Resources*, n.º 10, pp. 61-85.

GARCÍA ZALDÍVAR, R., J. M GASCÓ, J. LÓPEZ LINAGE y J. M. NAREDO (1983), *Evaluación de la pérdida de suelo agrícola debido al proceso de*

urbanización en la Comunidad de Madrid, Madrid, Dirección General de Acción Territorial y Urbanismo, MOPU.

GEDDES, P. (1885), *An Analysis of the Principles of Economics*, Edimburgo, Williams and Norgate. Referencia a la traducción española del texto publicada en MARTÍNEZ ALIER, J. ed. (1995), *Los principios de la economía ecológica*, Textos de P. Geddes, S. A. Podolinsky y F. Soddy, Madrid, Fundación Argentaria y Visor Dis., pp. 23-61.

GIAMPIETRO, M. y D. PIMENTEL (1990), «Energy Analysis Models to Study the Biophysical Limits for Human Exploitation of Natural Processes», en C. Rossi y E. Tiezzi, eds., *Ecological Physical Chemistry. Proceedings of an International Workshop*, 8-12 nov. 1990, Siena, Italia.

Greenpeace (1992), *Posidonia oceánica: El bosque sumergido*, Madrid, Greenpeace.

GUIMÂRES, R. P. (1994), «El desarrollo sustentable: ¿propuesta alternativa o retórica neoliberal?», *Revista EURE*, vol. XX, n.º 61.

HICKS, J. R. (1946), *Value and Capital*, Oxford University Press.

LEACH, G. (1981), *Energía y producción de alimentos*, Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca.

LI, W. K. W. *et al.* (1983), *Science*, n.º 219, pp. 292-295.

LINNEO (1744), *Oratio de Telluris habitabilis incremento*. Reedición francesa en Linné, C. (1972), *L'équilibre de la nature*, París, Librairie Philosophique Vrin. Ref. NAREDO, J. M. (1987, Reed. 1996), *La economía en evolución*.

LÓPEZ-GÁLVEZ, J. y J. M. NAREDO, (1996), *Sistemas de producción e incidencia ambiental del cultivo enarenado y en sustratos*, Madrid, Fundación Argentaria y Visor Distrib.

MACKENZIE, D. (1996), «Norways Fish Plan "a Recipe for Disaster"», *New Scientist*, enero de 1996, n.º 4.

MALTHUS, T. R.(1827), *Definitions in Political Economy. Preceded by an Inquiry into the Rules wich Ought to Guide Political Economists in the Deviation from the Rules in their Writings*, Londres (Ref. NAREDO, J. M. [1987], *La economía en evolución. Historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico*, Madrid, Siglo XXI).

MARGALEF, (1986), *Ecología*, Madrid, Omega.

MARGALEF, R. (1996), *Una ecología renovada a la medida de nuestros problemas*, Lanzarote, Fundación César Manrique, 115 pp.

MARTÍNEZ ALIER, J. y K. SHLÜPMANN, (1991), *La ecología y la economía*, México, FCE.

MEADOWS, D. H. y D. L. (1991), *Beyond the Limits*. (Traducción en castellano de El País & Aguilar, Madrid, 1992.)

MITCHELL, T. (1996), *The Ecologist*, n.º 26,1, pp. 19-26.

NAREDO, J. M. (1977), «Problemática de la gestión del agua» en J. M. Naredo, ed., *La economía del agua en España*, Madrid, Fundación Argentaria y Visor Distrib.

NAREDO, J. M. (1987), *La economía en evolución. Historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico*, Madrid, Siglo XXI. 2.ª reedición actualizada de 1996.

NAREDO, J. M. y P. CAMPOS (1980), «Los balances energéticos de la agricultura española», *Agricultura y Sociedad*, n.º 15, pp. 161-255.

NAREDO, J. M. y J. FRÍAS (1988), *Los flujos de energía, agua, materiales e información en la Comunidad de Madrid*, Madrid, Consejería de Economía de la CAM.

NAREDO, J. M. y A. VALERO (1989), «Sobre la conexión entre termodinámica y economía convencional», *Información Comercial Española*, n.º jun.-jul. pp. 7-16.

NORGAARD, R. B. (1994), *Development Betrayed. The End of Progress and a Coevolutionary Revisioning of the Future*, Londres y Nueva York, Routledge, p. 22.

NORGAARD, R. B. (1996), «Globalization and Unsustainability», *International Conference on Technology, Sustainable Development an Imbalance*, Tarrasa, España.

NORTON, B. G. (1992), «Sustainabiliy, Human Welfare and Ecosystem Health», *Ecological Economics*, vol. 14, n.º 2, pp. 113-127.

O'RIORDAN, T. (1988), «The Politics of Sustainability», en R. K. Turner (ed.), *Sustainable Management: Principle and Practice*, Londres, Belhaven Press y Westview Press.

PAULY, D. y V. CHRISTENSEN (1995), *Nature*, n.º 374, pp. 255-257.

PEARCE, D. W. y G. D. ATKINSON (1993), «Capital Theory and the Measurement of Sustainable Development: an Indicator of «Weak» Sustainability», *Ecological Economics*, n.º 2, pp. 103-108.

PEYRET, H. (1944), *La guerre des matières premières*, París, PUF.

PIMENTEL, D. y W. DAZHONG (1990), «Technological Changes in Energy Use in U. S. Agricultural Production», en C. R.Carroll, J. H. Vandermeer y P. M. Rosset, *Agroecology*, NuevaYork, McGraw Hill, pp. 147-164.

POSTEL, S. (1996), *Dividing the Waters: Food Security, Ecosystem Health, and New Politics of Scarcity*, Washington, Worldwatch Institute. (Traducción en castellano en Bilbao, Bakeaz.)

PRETTY, J. (1995), *Regenerating Agriculture. Policies and Practices for Sustainability and Self Reliance*, Washington: Joseph Henry Press.

SACHS, I. (1994), entrevista en *Science, Nature, Societé*, vol. 2, n.º 3.

SOLOW, R. (1991), «Sustainability: An Economist's Perspective», en Dorfman, R. y N. S. Dorfman, eds., *Economics of the Environment*, 3.ª ed., Nueva York.

SOLOW, R. (1992), «An Almost Practical Step towards Sustainability», Conferencia pronunciada con motivo del 40 aniversario de *Resources for the Future*, 8-10-1991.

TAGUCHI, G., A ELSAYED y T. H. SIANG (1988), *Quality Engineering in Production Systems*, Nueva York, Mac Graw Hill Books Co.

THOMAS, WILLIAM, L. Jr., ed. (1956), *Man's Role in Changing the Face of the Earth*, Chicago, University Chicago Press.

VALERO, A., LOZANO, M. A. y M. MUÑOZ (1986), *A General Theory of Exergy Saving*, I, II y III, ASME Book, n.º 40341C, WAM-186, AES 2-3, pp. 1-8, 9-17 y 17-21.

VITOUSEK, P. *et al.* (1986), «Human Appropriation of the Products of Photosynthesis», *Bioscience,* 36, pp. 368-370.

WEBER, P. (1995), *Pérdidas netas. Pesca, empleo y medio ambiente marino,* Bilbao, Bakeaz.

World Resources Institute, Wuppertal Institute, *et al.* (1997), *Resources Flows: The Material Basis of Industrial Economies*, Washington, World Resources Institute, VI + 66 pp.

YOUNG, J. E. (1992), «La Tierra convertida en una gran mina», en Brown, L. (ed.), *La situación del mundo en 1992*, Washington, World Wacht Institute. (Traducción española de Eds. Apóstrofe, Barcelona.)

Segunda parte

BASES PARA UNA TEORÍA GENERAL DEL COSTE FÍSICO DE LOS PROCESOS ECONÓMICOS. ECONOMÍA Y TERMODINÁMICA

CAPÍTULO 7
INTRODUCCIÓN: LA TERMODINÁMICA, ESA ECONOMÍA DE LA FÍSICA

Antonio Valero y José Manuel Naredo

7.1. Termodinámica

La Termodinámica es la rama de la Física que se ocupa de estudiar los fenómenos relacionados con la energía. Pero, a su vez, la energía es «una abstracción matemática que no tiene existencia aparte de su relación funcional con otras variables o coordenadas que tienen una interpretación física y pueden medirse», Abbot y Van Ness (1989). Así, las distintas manifestaciones de la energía tienen en común que pueden medirse con los «patrones» del Sistema Internacional (SI) de unidades sobre los que se apoya la Física, y su valor siempre puede calcularse como un múltiplo de la acción de una fuerza que desplazará un metro la masa de un kilogramo llevando una aceleración de un metro por segundo al cuadrado *[Julio]* = *[kilogramo] [metro]*^{2}*/[segundo]*^{2}. La relación entre éstas y otras unidades derivadas permite medir la cantidad de energía disponible o desarrollada por un sistema en forma de trabajo, calor, electricidad, magnetismo, radiación, etc., y establecer la conexión formal entre tales manifestaciones de la energía. Hay que subrayar así que, como ocurre en otras ramas de la Física, el objeto de estudio de la Termodinámica resulta de su propia estructura conceptual y no como históricamente se asoció a una sola de las manifestaciones de la energía, como es el calor. Aunque la Termodinámica ha experimentado desde que nació muchos tipos de formulaciones conceptuales, su estructura descansa sobre dos principios fundamentales:

- El Primer Principio, ley de conservación de la energía, postula que la energía no se crea ni se destruye, sino que solamente se transforma. Principio que permite recurrir a la técnica del balance para comprobar con la estimación de saldos las mediciones directas en el seguimiento de las transformaciones de la energía.
- El Segundo Principio, o ley de la entropía que señala el sentido hacia el que fluye la energía, indicando que todas sus transformaciones conlle-

van pérdidas de calidad: la cantidad de energía se conserva en sus transformaciones, pero la energía utilizable con respecto a algún referente, llamada también exergía, tiende siempre a disminuir. Este principio nos sitúa ante el problema insalvable de la escasez económica, a menos que basáramos todas las actividades humanas sobre una fuente continua e inagotable, como la energía solar, que compensara nuestras continuas e irreversibles degradaciones de los recursos energéticos, minerales y medioambientales de la Tierra. Este principio niega la posibilidad del movimiento perpetuo y otras quimeras que ofrecían la esperanza, e incluso la fe, en que los logros tecnocientíficos por sí solos podrían algún día desterrar el fantasma de la escasez económica.

7.2. Sus implicaciones filosóficas

La Termodinámica es la rama de la Física más próxima al ser humano, cuestiones como el ser, el no ser, el destino, la muerte, son tratados por esta ciencia con una absoluta familiaridad y falta del respeto que toda persona siente ante ellas. Medir, describir y darle lógica a la destrucción de la Naturaleza resulta cuando menos aterrador, y, sin embargo, es necesario si queremos comprender nuestro mundo, y más aún, gestionarlo razonablemente.

Mientras el hombre ha contado poco frente a las fuerzas naturales, el mito de que más es mejor ha sido una idea subyacente en todo el pensamiento occidental, y por extensión de la humanidad, porque –como dijo Marx– la opinión dominante siempre ha sido la de los dominadores. Si Grecia nos dio la palabra «política» para expresar las cosas que se discuten en la «polis», ciudad, ¿cuántas imágenes nos llegan a la mente con la palabra «civilizar» que nos aportó Roma para separar la barbarie de aquellos que vivían en la *civis,* es decir, en la ciudad? No obstante, uno de los mensajes más arraigados en el pensamiento occidental es la consigna cristiana del «creced y multiplicaos». ¿Hasta cuando?, ¿contra quién? Grecia, Roma y el pensamiento judeo-cristiano-islámico han impuesto su filosofía vital en la mente de los humanos. La Naturaleza es el enemigo final a vencer, a dominar. Ni la Tierra, ni los otros seres vivos, exceptuando al hombre, tienen alma, y sólo nos pueden servir. Los animales y las cosas se convierten en útiles o inútiles, y la utilidad deviene como el origen filosófico del respeto a los seres. A los que reconocemos su utilidad, simplemente los gestionamos, y a aquellos a los que no se la reconocemos, los respetamos más o menos por un principio de precaución, no sea que alguna vez nos sirvan.

No es, pues, de extrañar que la Economía –hija del interés y de la utilidad– se convierta en el pensamiento dominante del siglo XX. Una vez rechazado el animismo como sistema filosófico-religioso y adoptado el

contractualismo utilitario como centro de la economía y la política, la evolución lógica del pensamiento en el devenir de los siglos nos conduce irremediablemente al mercado, donde todo se intercambia y las cosas «valen» en función de lo que los seres humanos son capaces de pagar por ellas. El capitalismo no ha necesitado grandes ideólogos para imponer la lógica contable de la partida doble. El capitalismo trata de convertir a la Naturaleza en capital monetario. Es la más terrible, la más insultante de las reducciones, con ello se olvida que en última instancia la riqueza de las naciones no viene del mercado, sino de los recursos naturales, las materias primas que, una vez elaboradas, ponemos en él. Sin embargo, somos tan arrogantes que olvidamos que todo el inmenso poder de la finanzas actuales que es capaz de enriquecer o arruinar a los países no es suficiente ni para reconstruir la complejidad de una ameba.

Pero la especie humana, como dijo Aldous Huxley (1959), se ha convertido en la primera fuerza geológica del planeta. Ni el aire ni las aguas ni las tierras se han escapado a su acción. Miles de millones de toneladas se remueven anualmente para extraer minerales y rocas o para construir carreteras y ampliar ciudades. Dominamos los ríos con embalses, modificamos las costas y desalamos el agua del mar, y para hacerlo consumimos recursos fósiles que varían la composición química del aire hasta modificar posiblemente el clima. La huella del hombre sobre la Tierra ya no se borra con el tiempo, simplemente se hace más y más profunda e irreversible.

¿Cuál es el coste de reponer el daño? ¿Quién paga a la Naturaleza por ello? ¿Cuánto habría que pagarle? ¿Cómo?

Existe un concepto de Termodinámica muy interesante, es el de foco o reservorio térmico. Es aquel en el que por mucho calor que le introduzcamos o le extraigamos su temperatura no se modifica. El mismo concepto se aplica al reservorio de masa en el que no varía su composición química al extraerle o añadirle materiales. Es una idealización, pero es muy necesaria para comprender cuál es el límite del comportamiento de la materia. Pues bien, el hombre, al no percibir cambios apreciables sobre la Naturaleza, siempre la ha considerado como un reservorio inagotable. La sensación de infinitud ha animado a la depredación. Pero la Tierra es un sistema cerrado y estamos empezando a notar que ensuciamos nuestro propio nido. Que no hay más que un nido y que el todo es el nido. Aunque sólo sea por nuestro egoísmo o lo cuidamos o nos intoxicamos. Hay que reponer, y para ello no falta energía solar. Hacen falta herramientas de gestión y voluntad para llevarla a cabo.

Estas herramientas necesitan una base teórico-filosófica que la Termodinámica suministra de forma natural. Para un termodinámico esto es tan evidente que cuesta trabajo y una cierta incredulidad ver que nadie antes había planteado la teoría. La utilización sistemática del Segundo Principio a través del concepto de exergía y del ambiente de referencia permite avanzar

en algo más que palabras. Se pueden convertir los conceptos en números, y éstos en índices objetivos y universales de destrucción del planeta por el hombre. Aunque lo presentado aquí sea más bien un esbozo, unos primeros pasos teóricos, aquí están todos los conceptos ordenados lógicamente.

Sería muy fácil dar en esta introducción muchos argumentos sobre la lógica y la necesidad de la teoría que se expone. Hasta sería fácil caer en la reverencia a un neoenergeticismo o, si se quiere, exergeticismo como solución a los problemas ecológicos. Una cosa es el valor del conocimiento y otra es un sistema de creencias que excluya cualquier otra fuente de conocimientos por el hecho de no pertenecer al sistema. Creer en el Segundo Principio y en la Termodinámica como ciencia que aporta respuestas no es excluir la riqueza y complejidad de otras visiones de la realidad[1].

Para explicar las cosas de una forma simple, valorar las cosas con la exergía es tanto como decir que un templo oriental de madera vale la cantidad de combustible que puede proporcionarnos para calefacción. Podremos alegar que la exergía es un primer paso objetivo y que lo que importa es saber el coste exergético de las cosas, es decir, la cantidad de exergía que ha sido necesaria para construir algo. Si este nuevo concepto fuera la fuente del valor, sería tanto como decir que las obras de Picasso valen el esfuerzo que le costaron. No obstante, no debemos olvidar que todos los días comemos carne o vegetales y no pedimos perdón a la Naturaleza por destruir esos monumentos del ADN que ningún artista humano podrá jamás reproducir.

Cuando destruimos algo, convertimos en nada su información contenida y para reponerlo no sólo necesitamos exergía, sino conocimiento para saber cómo se fabrica, y tiempo para fabricarlo. Exergía, información y tiempo contenidos es lo que destruimos y cuando reponemos necesitamos más exergía, más información y más tiempo. El coste físico de reposición tiene otros componentes además del exergético. Es evidente que se necesita una teoría más fundamental que ligue estos conceptos analizando sus equivalencias, analogías y diferencias, por lo que queda demostrada la insuficiencia teórica de nuestro desarrollo. Sin embargo, se necesita una teoría física del coste y éste es el camino, no la solución.

Supongamos, no obstante, que ya tuviéramos desarrollada la teoría física del coste que incluyera esa triple dimensión y pudiéramos asignarle a todas las cosas un coste de reposición energético, temporal e informacional. Y además dispusiéramos del tiempo, el conocimiento, los materiales y la exergía necesaria para reponerlos, aun en ese caso el conocimiento del coste sería una indicación útil para mejorar la gestión, pero no permitiría precisar cuáles han de ser las metas o finalidades de dicha gestión.

---

[1] No obstante, es interesante recordar aquí las palabras de Goodstein (1994): «En un mundo que experimenta una rápida desaparición de los combustibles fósiles, puede que el Segundo Principio se llegue a convertir en la verdad científica central del siglo XXI».

La irreversibilidad es la base conceptual del coste, es el Segundo Principio mismo. Pero la irreversibilidad no niega la vuelta atrás, sino que dice que el proceso de reposición de algún recurso costará más o en el más improbable de los casos lo mismo que la energía que se liberó en el momento de su destrucción.

La irrevocabilidad es algo más profundo. Si me muero, ya nadie ni nada podrá reponerme. La destrucción de un ser ocurre una única vez. El Segundo Principio nada dice de la irrevocabilidad. Junto al mensaje de la Termodinámica que dice «no destruyamos lo que no sabemos ni podemos reponer», aún hay otro más amplio que sugiere: «por respeto, destruye lo mínimo».

El origen filosófico del respeto no debe ser la utilidad, ni la escasez, ni el coste físico o económico, sino la irrevocabilidad de la destrucción. La bio-geo-culto-diversidad y el derecho a la existencia de las cosas que son, el conocimiento de las mismas, por el simple hecho de conocerlas, pueden ser la fuente del respeto, de la admiración y el placer de la sorpresa del descubrimiento de los mecanismos y estructuras que conforman los sistemas.

Hace falta un nuevo paradigma que imprima una reconversión mental y cultural tan profunda como la impronta que en su día dejó en la civilización occidental el pensamiento grecolatino y judeocristiano. Se trataría de establecer una nueva especie de «panteísmo» que restaurara el respeto por los sistemas complejos que componen la biosfera y los recursos planetarios, y agudizara la preocupación por poner coto a la creciente y masiva destrucción que en ellos infringe la sociedad actual. Un primer paso para tomar conciencia de ello pasaría por registrar esa superdestrucción termodinámica en términos de energía, información y tiempo contenidos en esos sistemas y de la dificultad y los costes que plantearía reconstruirlos.

7.3. Medida, caos e incertidumbre

Cournot (1861) (el padre de esa economía matemática que tanto desarrollo adquirió en el campo de los valores monetarios) supo apreciar hace más de un siglo el enorme interés que ofrecía el instrumental teórico de la Termodinámica para enjuiciar económicamente la gestión de los recursos naturales sobre la que obligadamente reposan las sociedades humanas.

La idea tempranamente asimilada por Cournot de que el uso de la «fuerza viva» (o energía disponible) constituye una realidad física que subyace a los procesos económicos y que, en última instancia, «es con fuerza viva con lo que se paga», le llevó a proponerla como unidad de medida extremadamente útil para orientar la gestión económica desde una perspectiva más amplia de la que ofrecían los valores monetarios. Señala así que «habría que ser muy poco versado en ciencia económica y desconocer la necesidad que el hombre tiene de medidas de todas las cosas para no ver

que, por esta razón, la fuerza viva tendría que convertirse en *patrón dinámico* (del análisis económico)».

Por desgracia, los economistas demostraron ser bastante «poco versados en economía» al desaprovechar este consejo y centrar sus elaboraciones en el campo exclusivo de los valores monetarios o de cambio. Sin embargo, las preocupaciones actuales por construir la relación de las sociedades humanas con su entorno físico sobre bases más «viables» o «sostenibles» que las actuales, demandan con más fuerza que nunca restablecer los vínculos entre lo económico y lo físico, rompiendo en este campo el oscurantismo en el que nos había sumido la especialización científica.

Si queremos corregir las situaciones de creciente insostenibilidad a las que han derivado las sociedades humanas, arrastradas por ese mundo supuestamente autosuficiente del valor en el que habitualmente razonan los economistas, no hay más remedio que abrirlo a los desarrollos de esa economía de la Física que es la Termodinámica, a fin de plantear una racionalidad económica más amplia. En este planteamiento, se insertan las elaboraciones que siguen y que apuntan a formular una teoría del coste económico (no del valor) sólidamente apoyada en informaciones objetivas del mundo físico al que pertenecemos. Lo cual brinda a los desarrollos de la economía cuantitativa un campo mil veces más consistente, abierto y sugerente que el ofrecido por la presente economía «neoclásica» (engañosamente llamada a veces «cuantitativa»).

El instrumental teórico utilizado para abordar dicho cálculo de costes resulta de la aplicación del Segundo Principio de la Termodinámica aplicado al campo de los compuestos químicos. Hay que advertir que este Segundo Principio de la Termodinámica, o Ley de la Entropía, introdujo una nueva dimensión en el razonamiento que, además de trascender los presupuestos de la Mecánica Clásica (que razonaba sólo con una ley de *conservación* que la Termodinámica asumió como Primer Principio), empañó la fe que se tenía en la marcha irrefrenable de la humanidad hacia el progreso. En efecto, como nos recuerda el *Juan de Mairena* de Machado en una de sus sentencias, la tendencia a la degradación que recoge la Ley de la Entropía ponía en entredicho «la fe en un mañana mejor» tan enraizada en nuestra civilización.

Sin embargo, frente a la búsqueda del equilibrio propia de la Mecánica Clásica o, también, frente al horizonte de máxima entropía hacia el que tienden los sistemas aislados según la Termodinámica clásica o termoestática, surgió la «Termodinámica de los procesos irreversibles en sistemas abiertos», para explicar la existencia de sistemas que permanecen en estados muy alejados del equilibrio o de reductos de «negaentropía» y orden que se manifiestan en forma de sistemas abiertos y permanentemente desequilibrados. Éste sería el ejemplo de los organismos o los ecosistemas más o menos artificializados por el *homo faber,* entre los que se incluyen los lla-

mados sistemas económicos. Las nuevas elaboraciones realizadas en este campo que se engloban bajo la denominación de la *Teoría del Caos* (entre las que ocupa un lugar central «la teoría de las estructuras disipativas» de Prigogine), surgen de tomar conciencia de que ni el principio de mínima energía potencial que definía el equilibrio estático de la Mecánica Clásica, ni el de mínima energía libre que caracteriza a los sistemas aislados en equilibrio termodinámico, permiten predecir a corto plazo la evolución particular de los sistemas que perviven en el mundo real a base de situarse lejos del equilibrio.

Aunque los trabajos de Prigogine y, en general, de la *Teoría del Caos,* den la puntilla al dogma mecanicista sobre el que se había construido la civilización industrial y la propia ciencia económica, se prestan también a interpretaciones espurias más acordes con la fe en el progreso y el *statu quo* de intereses hoy establecidos. En efecto, frente al mensaje agorero de la Ley de la Entropía, la Teoría del Caos abría la puerta al optimismo tecnológico y a la despreocupación por la «crisis ambiental». Al igual que la Teoría de la Relatividad de Einstein, dio pie a la conclusión banal de que todo era relativo, o el Principio de Indeterminación de Heisenberg a la de que todo observador estaba llamado a influir sobre lo observado, como si de constantes epistemológicas se trataran, la Teoría del Caos indujo a creer que el hábil manejo de la información permitiría soslayar la Ley de la Entropía y que detrás de cada crisis o turbulencia podría restablecerse milagrosa y espontáneamente el orden deseado. Interpretaciones que llevan a confundir la cruda situación actual con la de una sociedad «postindustrial» cuya alta tecnología va camino de minimizar el engorroso problema que acarrea la extracción de recursos y la emisión de residuos, aun cuando de hecho ambas sigan aumentando todos los años. Lo mismo podría decirse de las lecturas abusivas de que está siendo objeto la incertidumbre que acompaña a muchas de las consecuencias de la crisis ambiental. Presuponer que los problemas ambientales escapan al instrumental de medida de la ciencia cuantitativa sería un flaco servicio para el empeño de consolidar una nueva economía abierta y transdisciplinar, cuando la *Economía Estándar* dice estar haciendo ciencia cuantitativa. Al igual que la infundada creencia de que todo es relativo, indeterminado o incierto favorece el actual oscurantismo informativo en el que se propicia una inflación de seudomedidas, a la vez que se dificulta o niega la posibilidad de obtener verdaderas medidas relacionadas con los fenómenos objeto de estudio. Antes de insistir en la incertidumbre o inconmensurabilidad que rodea a la problemática ambiental, parece oportuno subrayar la imposibilidad de reducirla a una única unidad (pecuniaria u otra), o al menos al hacerlo de forma razonable y generalmente admitida. Es esta irreductibilidad de los problemas a ser expresados en una única unidad lo que los sitúa más allá de las técnicas de optimización propias de la economía estándar. Y ha de tenerse en cuenta que esta

irreductibilidad suele plantearse incluso cuando las variables o piezas del problema son inequívocamente medibles y están sujetas a rígidos determinismos. En este caso, la adecuada medición de las variables relacionadas con el problema constituyen un primer paso para iluminar su gestión, aunque su solución transcienda del razonamiento de la ciencia cuantitativa.

En el caso que nos ocupa hemos de matizar que las principales incertidumbres se observan por el lado de los resultados utilitarios y ambientales de los procesos, mientras que las posibilidades de cuantificación son mayores a la hora de precisar los costes en energía y materiales que alimentan a dichos procesos (que son fuente de contaminación). Lo mismo que la teoría de las «estructuras disipativas» contribuye a explicar el funcionamiento de los sistemas económicos, pero dice poco acerca de sus implicaciones y costes a escala planetaria. En las sociedades humanas son los núcleos con mayor nivel de organización (y densidad de información) los que utilizan el resto del territorio como fuente de recursos y sumidero de residuos, al igual que en ecología se observa un flujo unidireccional de energía y materiales desde la presa hacia el depredador, en virtud de la mayor información-estructura de éste. La creciente importancia de los mercados financieros y las redes multinacionales de gestión y comunicación, evidencia cómo la destreza en el manejo de la información pura, sin soporte físico alguno, desempeña un papel clave en la adquisición de poder y de riqueza.

Pero si los organismos, las empresas, las ciudades y los países funcionan como sistemas abiertos, no ocurre lo mismo con el planeta Tierra, que define un sistema cerrado (en materiales). Si queremos razonar a este nivel de degradación sobre los costes y deterioros físicos que infringen la actual civilización, hemos de utilizar el instrumental de la Termodinámica clásica en el sentido amplio más adelante indicado. Con todo, conviene recordar que ni la Teoría del Caos, en general, ni la de las «estructuras disipativas», en particular, ofrecen paradigmas llamados a sustituir de una vez por todas a los anteriores en la búsqueda de lo desconocido, sino que contribuyen a relativizar sus enseñanzas al abrir el objeto de estudio hacia aspectos que, al escapar a los antiguos modelos explicativos, eran reputados de «caóticos». El desplazamiento actual de las preocupaciones científicas hacia lo no lineal, lo discontinuo, lo aperiódico, lo desequilibrado, no significa que haya que dar la espalda a lo lineal, lo continuo, lo periódico, lo equilibrado..., o lo reversible. Lo mismo que el desarrollo de la Termodinámica de los procesos irreversibles en sistemas abiertos o Teoría de las estructuras disipativas no quitan para que la Termodinámica clásica siga siendo de utilidad para informar sobre los costes físicos de los procesos económicos y su posible agregación a escala planetaria (aunque no sobre la finalidad e interés de los mismos). Como tampoco el cálculo de estos costes tiene por qué negar la conveniencia de relacionarlos con el cálculo monetario que ha venido informando la toma de decisiones. En resumidas cuentas, que los

físicos, biólogos... o economistas que trabajan imbuidos por los nuevos paradigmas están abocados a la transdisciplinariedad y a la modestia en sus planteamientos, que contrasta con la tradicional compartimentación de la ciencia y la arrogante magnificación de sus capacidades predictivas. El problema estriba en que hay que tener la flexibilidad suficiente para admitir la pluralidad de enfoques y la conveniencia de articularlos, sin dejarse llevar por los viejos dogmatismos acostumbrados a privilegiar un único pensamiento o enfoque. En consecuencia con lo anterior, las elaboraciones que siguen sobre el coste físico y la valoración monetaria no tienen la pretensión de proponer un modelo capaz de orientar y «optimizar» la gestión, sino el instrumento elemental para mejorarla, informando al menos sobre sus costes en un contexto más amplio del habitual.

Capítulo 8
Y EN LOS PRINCIPIOS FUE LA TERMODINÁMICA

Antonio Valero

8.1. El Primer Principio

El equilibrio es la muerte. Y la Termo*dinámica* (clásica), aunque su nombre indique lo contrario, estudia sólo los estados de equilibrio de los sistemas. Para que un sistema[2] físico alcance un estado de equilibrio debe estar limitado por paredes o ligaduras. Una pared rígida impedirá que la presión cambie. Una pared adiabática mantendrá la temperatura constante y una pared impermeable hará que el sistema no reaccione con su entorno. Presión, temperatura y potencial químico son magnitudes intensivas –es decir, independientes de la cantidad de sistema que tratemos– que caracterizan establemente a los sistemas en equilibrio. Estas magnitudes permanecerán constantes en tanto no rompamos las paredes que las confinan.

Es importante pensar que aún hay más tipos de paredes, como eléctricas o magnéticas, entre otras. A cada tipo de pared se le asocia una propiedad intensiva, por ejemplo, al aislamiento eléctrico la fuerza electromotriz o al aislamiento magnético el campo magnético, etc., y, cuando una de estas ligaduras se rompe, una propiedad asociada a la cantidad de sistema se modifica.

En efecto, para sacar a los sistemas de su equilibrio alguien tiene que trabajar. En Física se define *trabajo* como una fuerza por un desplazamiento. Tanto la fuerza como el desplazamiento que provoca pueden ser generalizados. Así, a la presión mecánica se le asocia el volumen que cambia, a la fuerza electromotriz la carga y al campo magnético la imantación. Presión, fuerza electromotriz y campo magnético son propiedades intensivas y sus variables conjugadas, volumen, carga e imantación son propiedades extensivas o dependientes de la cantidad de sistema.

[2] En Termodinámica se entiende por sistema el objeto particular de estudio sobre el que centramos la atención. En este contexto debe entenderse la palabra «sistema».

$\delta W = Ydx$; $Y =$ *Fuerza generalizada,* $x =$ *Desplazamiento generalizado* (1)

La cantidad de trabajo ejercida por o sobre un sistema es fácilmente medible con simples experimentos o equipos de medida. Como se ve, pueden existir muchos tipos de trabajo.

Resulta fascinante comprobar un fenómeno que se da en todos los sistemas que se conocen: cuando éstos están rodeados de una cubierta aislante térmica, llamada también adiabática, la cantidad de trabajo adiabático necesario para llevarlos desde un estado de equilibrio a otro también definido es independiente de cómo y qué tipo de trabajo se haya realizado. Sólo depende de los estados inicial y final y no de la trayectoria seguida para modificar los estados intermedios por los que haya pasado el sistema. Este hecho es transcendental en Física y constituye el Primer Principio de la Termodinámica ya que si el trabajo realizado es independiente de la trayectoria, existe una propiedad que depende sólo del estado del sistema, que denominaremos *energía, U,* que sólo cambia si se modifica su estado de equilibrio, y tiene las mismas unidades que el trabajo.

$$U_i - U_f = W_{adb} \tag{2}$$

¿Qué ocurre si el trabajo se comunica al sistema no adiabáticamente? Entonces el trabajo ya no es igual a la variación de energía. Si llamamos Q a la diferencia:

$$Q = (U_i - U_f) - W \tag{3}$$

es evidente que Q es un tipo de energía, que al igual que el trabajo sólo se manifiesta mientras el sistema está en evolución, ya que en el estado de partida sólo existía U_i y en el de llegada sólo existe U_f. Además, se manifiesta siempre que rompemos la cubierta adiabática. Hemos visto también que la propiedad intensiva asociada a la pared adiabática es la temperatura, es decir, que la manipulación de Q está íntimamente ligada a los cambios de temperatura que aparecen en el sistema como consecuencia de que sus paredes no son suficientemente adiabáticas. Es evidente, por tanto, que Q coincide con nuestro concepto intuitivo de *calor.* Y lo más sorprendente, calor es aquella manifestación de energía en movimiento que no es trabajo, ni lógicamente masa desplazándose. Y ya no hay más tipos de energía en movimiento.

La energía de un sistema confinado por un conjunto de paredes que lo mantienen en equilibrio permanecerá constante en tanto en cuanto estas paredes o ligaduras no se rompan. Si lo hacen el sistema realizará trabajo, absorberá o cederá calor o se derramará o todos a la vez, hasta que alcance un nuevo estado de equilibro compatible con las nuevas paredes que lo confinen de nuevo y la nueva energía del sistema será la resultante de

sumar todos los trabajos, calores y variaciones de energía absorbidos o cedidos por el sistema, es decir

$$dU - \delta Q - \delta W = 0 \tag{4}$$

O sea, la energía ni se ha creado ni se ha modificado, sólo se ha transformado.

Éste es, en síntesis, el Principio de Conservación de la Energía o Primer Principio de la Termodinámica.

8.2. El Segundo Principio

De la misma forma que existe una relación entre trabajo, propiedad intensiva y propiedad extensiva conjugada *–por ejemplo, trabajo de expansión=presión por variación de volumen–* podemos preguntarnos si existe alguna relación entre calor, propiedad intensiva y propiedad extensiva conjugada. En efecto, la propiedad intensiva asociada hemos visto que era la temperatura, así que podemos definir una propiedad extensiva conjugada como

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \tag{5}$$

A falta de un nombre intuitivo más conocido, Clausius la denominó *entropía.*

La entropía no tendría nada de sorprendente si sólo cumpliera la función de ser la variable conjugada de la temperatura.

La Naturaleza no es propositiva, el hombre sí, por ello diseñó máquinas para domesticar sus fuerzas y convertirlas en efectos útiles. Vemos cómo los cuerpos calientes se enfrían espontáneamente, que para circular un fluido hay que bombearlo, que lo que está puro se contamina, que los bosques se queman irreversiblemente, y que nosotros envejecemos y morimos. Todo se degrada.

Si todo se degrada y la energía se conserva, debemos admitir que existen formas de energía más útiles, menos degradadas unas que otras. En efecto, vemos que al atornillar un tornillo éste se calienta y con el calor generado no es posible que el tornillo se desatornille por sí solo y la pared se restituya al estado inicial. Hemos intercambiado energía mecánica por energía térmica. Además, al cabo de un rato el tornillo se habrá enfriado contribuyendo en su pequeña medida a calentar el ambiente. Es decir, que la energía térmica de más alta temperatura se degrada en energía a la tem-

peratura ambiental. Pero no perdamos de vista que para que hayamos podido atornillar, hemos tenido que comer antes. Al final hemos convertido la energía química de los alimentos en un calentamiento inapreciable de la atmósfera, un clavo puesto en la pared y residuos.

Es un hecho constatado una y mil veces que todas las energías nobles terminan degradándose en forma de calor en la temperatura más baja posible. La energía térmica constituye un enorme sumidero donde todas las otras energías evolucionan terminando tarde o temprano. La Termodinámica no dice cuándo pero nos da la certeza del hecho.

Por eso, el Segundo Principio es tan terrible, nos anuncia con certeza la muerte. La Física funciona con modelos y construye teorías que ayudan a predecir el comportamiento de la materia. Nadie ha visto un átomo, ni un electrón, ni un quark, así que alguien puede tener dudas razonables de su existencia y no podemos decir con seguridad si no aparecerá alguna teoría que explique las cosas de otro modo. En cambio, con el Segundo Principio simplemente hay certeza empírica.

Expresar matemáticamente este principio es muy sencillo. Si el calor pasa espontáneamente de los cuerpos calientes *(T)* a los fríos *(T_0)* con $T > T_0$, entonces

$$\left(\frac{Q}{T_0}\right)_{final} > \left(\frac{Q}{T}\right)_{inicial} \tag{6}$$

o, en otras palabras, que en este proceso espontáneo, el cuerpo frío ha ganado más entropía que la que ha perdido el caliente y esta diferencia será tanto mayor cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas. Llamamos a esta diferencia de entropía, σ, entropía generada.

Dado que todos los cuerpos tienden a disipar irreversiblemente su energía en forma de calor a la más baja temperatura que los rodea, siempre generarán entropía y será tanto más cuanto mayor haya sido la degradación de la calidad energética. Sólo en el mejor de los casos posible, que llamamos proceso reversible, la generación de entropía es nula.

Así que la forma de expresar matemáticamente el Segundo Principio es decir que en todo proceso experimentado por un sistema su entropía junto con la del medio que lo rodea, crecerá o, en el mejor de los casos, permanecerá constante. Y se expresa como

$$\Delta S_{universo} > 0, \; con \; \Delta S_{universo} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{entorno} \tag{7}$$

La entropía como la energía son funciones de estado (de equilibrio), y pueden calcularse conociendo las propiedades intensivas del sistema, es decir, presión, temperatura y composición. Así que no debería darnos nin-

gún reparo su uso. Sin embargo, sus unidades resultan extrañas, energía dividida por temperatura, y es difícil acostumbrarse a ellas. Luego veremos una manera de solucionar este problema.

Es frecuente en la literatura económico-ecológica hablar cualitativamente de productos de baja entropía y de alta entropía. Ahora ya podemos comprender qué significa esto. Un producto de baja entropía es un combustible fósil, es un alimento, es la madera del bosque o es un lago de alta montaña o el propio Sol. Como se ve, todos los recursos no transformados. Un combustible fósil reacciona espontáneamente con el oxígeno del aire y al final toda su energía se transforma en calor que va a disiparse hasta la temperatura más baja que le rodea. El metabolismo de los alimentos es una reacción de combustión controlada que nos permite mantener la temperatura basal y movernos, al cabo de un tiempo esa energía se ha disipado calentando el ambiente. La madera, lo mismo que los anteriores. Observamos que podemos detener y controlar la degradación pero a largo plazo no podemos evitarla. Los combustibles fósiles, los alimentos y Biosfera en general son sustancias de baja entropía química cuya degradación convertirá su energía en calor que se disipará a la más baja temperatura posible, por tanto, en un plazo indeterminado todo se degradará a productos de la máxima entropía alcanzable. El ser humano tiene en sus manos acelerar o frenar este proceso irreversible e inevitable. Las sustancias químicas no degradadas tienen baja entropía específica, pero no sólo ellas. También como hemos dicho, un lago de alta montaña porque su derrame provoca la erosión del medio y al final toda su energía potencial se disipa en forma de calor a baja temperatura por los procesos de fricción asociados, igual que la energía cinética de un vehículo se convierte en calor cuando frenamos. Estas ideas nos invitan a la reflexión de que una cosa es la belleza de un río o una cascada y otra es el inexorable Segundo Principio. Conservar la Naturaleza como es, no implica necesariamente frenar la máquina del Segundo Principio. Poner una turbina hidráulica para evitar la degradación del medio puede ser útil pero no necesariamente bello.

Volviendo a las consideraciones físicas, observamos que existen muchas manifestaciones de la energía. Energía química, energías potencial y cinética o energía térmica –el calor del Sol es una forma de energía térmica radiante a unos *5.700 kelvins* de temperatura equivalente–. Todas estas energías se pueden transformar entre sí a través de procesos naturales o artificiales llamados máquinas. Como no son perfectos, al final aparecen las fricciones, mezclas o disipaciones térmicas que terminan provocando aumentos entrópicos.

Hacer consideraciones cualitativas ayuda a entender rápidamente los conceptos, pero la verdadera dimensión de sus implicaciones sólo se capta cuando se analizan algunos ejemplos numéricos. Vamos a poner dos:

Primero. *¿Cuántos elefantes de 5.000 kg cada uno podríamos elevar a 5 m con la energía que suministra un yogur de 120 kcal?* Respuesta: *2 elefantes.*

n.º elefantes = (energía yogur)/(energía potencial/elefante)
Energía potencial por elefante $= mgh = 5.000\ kgr \times 9{,}8\ m/s^2 \times 5\ m =$
$= 245 \times 10^3\ kg\ m^2/s^2 = 245\ kJ$
Energía del yogur $= 120\ kcal \times 4{,}18\ kJ/kcal = 501{,}2\ kJ$
n.º de elefantes $= 501{,}2/245 \cong 2$

Es evidente que si una vez arriba el elefante, lo soltamos, no podremos fabricar yogur con la energía disipada.

El segundo. *¿Qué velocidad llevaría un gramo de agua si tuviera la energía cinética de una caloría?* Respuesta, *329,1 km/h.*

$$E_{cinética} = \frac{1}{2} m V^2; \qquad V = \sqrt{\frac{2E_k}{m}}$$

$$V = \sqrt{\frac{2 \times 1\ cal \times 4{,}18\ J/cal}{1\ gr \times 10^{-3}\ kg/gr \times J/(kg\ m^2/s^2)}} = 91{,}43\ m/s = 329{,}1\ km/h$$

La percepción que tenemos de un móvil a *329 km/h* es la de que tiene mucha energía, sin embargo, es falsa. La energía de una caloría es la necesaria para elevar a ese gramo de agua *sólo* un grado centígrado su temperatura, es decir, casi nada: el simple contacto de un centímetro cúbico de agua con nuestra mano ya eleva su temperatura varios grados. Por contraposición, si alguna vez experimentamos la mala fortuna de darnos un golpe con nuestro vehículo contra un árbol, podremos aprovechar para comprobar que el árbol apenas se calienta. La posibilidad de convertir energía térmica en energía cinética explica así los logros espectaculares de la civilización industrial: el manejo de los combustibles fósiles para este fin le abrió las puertas hacia una especie de reino de jauja, en el que la energía térmica degradada se multiplicaba sin cesar sin daños aparentes.

La energía térmica es un enorme sumidero de energía, más quizá de lo que podemos imaginar y comprender. Este simple hecho ayuda a entender mejor la Naturaleza.

Así, aunque parezca sorprendente, la Tierra está en un balance energético nulo. Toda la energía que nos llega del Sol se disipa en el espacio exterior. En efecto, el calor fluye de los cuerpos de más alta temperatura a los de más baja. El Sol emite calor a la Tierra que está a una temperatura media de unos *300 K* pero, a su vez, la Tierra emite al Universo que está a unos *2 K*. Este es un hecho afortunado ya que si la Tierra fuera adiabática no resistiríamos ni minutos. Las olas, el viento, la formación de las nubes, el calentamiento del globo no son más que manifestaciones intermedias de

la degradación. Es el enfriamiento nocturno el que nos permite calentarnos agradablemente con el Sol de la mañana. Sólo el *0,023%* de toda la energía solar se almacena en forma de biomasa. Y con ella la Tierra ha almacenado a lo largo de millones de años todos los combustibles fósiles que ahora estamos quemando en unas pocas generaciones.

La energía solar es la auténtica fuente energética de la Tierra ya que todas las actividades humanas suponen mucho menos de un uno por mil de esta energía radiante.

A su vez, la mayor producción entrópica que tiene lugar en la Tierra es debida a este macrofenómeno de degradación. Si sólo aprovecháramos un pequeño porcentaje de esta energía sería suficiente para todas las necesidades humanas presentes y futuras. Desgraciadamente la energía solar está demasiado dispersa y hace que su aprovechamiento requiera, como sabemos, equipos muy costosos.

Desde un punto de vista económico-ecológico debemos tener presente este simple análisis. La mayor degradación entrópica que tiene lugar en la Tierra no es de origen antropogénico, sino solar, ello da esperanzas termodinámicas al propio futuro de la humanidad en esta nave espacial llamada Tierra, ya que evitando una mínima parte de esa degradación, es decir, utilizando máquinas que aprovecharan la energía solar en todas sus formas, podríamos dejar de degradar el entorno planetario. Estas consideraciones pueden parecer excesivamente teóricas ya que no aportan soluciones prácticas, pero son necesarias ya que algunas veces se pierde la perspectiva y pensamos que sólo es disipación aquello que el hombre hace sobre la Tierra. Cuando hablamos de conservar la Naturaleza, damos por hecho que ello significa conservar sus procesos de degradación energética, que los ríos de agua dulce se mezclen irreversiblemente con el agua salada del mar, que se mantengan las cascadas y que el aire fluya en forma de viento enfriando las zonas calientes y que haya terremotos y volcanes. Mantener el delicado equilibrio de lo viviente y su diversidad en el planeta es algo mucho más sutil que realizar meros balances entrópicos; sin embargo, el Segundo Principio está presente en todos los procesos naturales y si alguna vez no se entiende por qué un proceso natural ocurre como ocurre, al final, echemos un vistazo al Segundo Principio y encontraremos siempre una explicación.

Incluso la vida, que parece antientrópica, es un proceso eminentemente degradativo. La muerte degrada menos energía que la vida, y todo sistema evoluciona a la mayor velocidad posible de degradación hasta que no puede más y alcanza el equilibrio con su medio. Las sociedades son también organismos vivos cuyo poder es tanto mayor cuanto más rápidamente degraden los recursos disponibles, y lo harán hasta que no queden más y alcancen el equilibrio termodinámico con el medio que les rodea.

Sólo la inteligencia nos salvará. Hay que comprender claramente este fenómeno para parar la acelerada máquina del tiempo en la que la huma-

nidad no es sino un mero instrumento del Segundo Principio. El equilibrio es la muerte.

8.3. Exergía y el mito de Blancanieves

Quizá, la gran aportación de Carnot fue notar que la fuerza motriz de las máquinas térmicas se apoyaba en 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 sólo podemos convertir en trabajo la diferencia de energías potenciales entre la cota mayor y la menor, es decir

$$W = mg\,Z - mg\,Z_0 \tag{8}$$

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.

$$W = Q\,(T) - Q_0\,(T_0) \tag{9}$$

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

$$Q/T = Q_0/T_0 \quad \text{o bien} \quad T_0/T = Q_0/Q \tag{10}$$

En esas condiciones el rendimiento valdrá

$$\eta = W/Q = (Q - Q_0)/Q = 1 - Q_0/Q = 1 - T_0/T \tag{11}$$

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 tanto:

$$W_{máx} = Q\,(1 - T_0/T) \qquad (12)$$

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 $W_{máx} = mgh = mg\,(Z - Z_0)$, y a esa magnitud la llamaremos energía potencial del flujo másico con respecto a la cota Z_0.

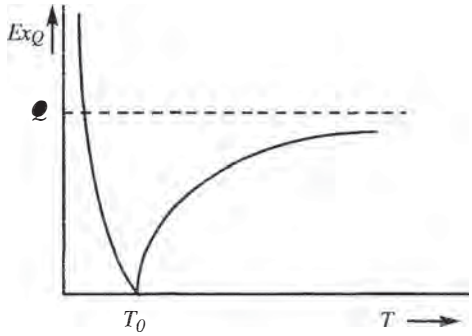
¿Por qué no hacer lo mismo con la energía térmica? Podemos llamar al término $Q\,(1 - T_0/T)$ la energía potencial que tiene el flujo de calor a una temperatura T para producir trabajo mecánico con respecto a otra temperatura T_0. Y a esa magnitud, el yugoslavo Zoran Rant en 1956 la llamó *exergía.*

Dadas unas condiciones de referencia, *0,* 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 coincide casi 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. Sólo la exergía presenta una fórmula poco usual cuando tratamos de flujos de calor porque, como hemos visto, ésta depende de la temperatura a la que fluyan.

$$Ex_Q = Q\,(1 - T_0/T) \qquad (13)$$

Si no fuera la energía térmica la energía más común y degradada, 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. Quizá 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 sólo 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 clásicos 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 sólo a temperaturas infinitas coincidirá con la energía. Por ejemplo, la exergía que recibimos del Sol, a una temperatura equivalente de unos *5.700 Kelvins*, constituye el *95,5%* de su energía con respecto a la temperatura ambiental media de *300 K.*

En la medida que el flujo de calor esta próximo a T_0 su exergía se va anulando. Así, la exergía del calor que emite el cuerpo humano a *37°C* es sólo un *3,2%* de su energía. O en otras palabras, la mejor máquina térmica que pudiéramos diseñar para extraer trabajo del calor corporal sólo 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 en la máquina térmica correspondiente.

Sin embargo, lo más sorprendente del gráfico 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. Ésta podría ser 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 galardonados con el Nobel haya en su entorno. Y un rico es tanto más poderoso cuantos más pobres tenga 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 a Blancanieves le resulta fácil lucir su hermosura alrededor de los siete enanitos.

CAPÍTULO 9
EL «ESTADO MUERTO» Y EL FIN TERMODINÁMICO DE LA TIERRA

Antonio Valero

La formulación de Clausius del Segundo Principio como que «la entropía del Universo tiende a un máximo» llevó rápidamente a la conclusión de que el Universo tendía a una muerte térmica. Que ésta sea o no alcanzable es una cosa que no está tan clara con nuestros conocimientos actuales de cosmología. No obstante, S. Hawking (1988) ha demostrado que el principio del aumento de entropía se cumple incluso en los agujeros negros.

Sin ir tan lejos ni en el tiempo ni en el espacio, es en la nave espacial llamada Tierra donde todas las actividades económicas humanas tienen lugar y donde el hombre vive gracias al soporte de la energía y materiales que de la Tierra dispone. La gran preocupación de los economistas-ecológicos es notar que vivimos de lo que la Tierra nos da y que ésta es finita. Los recursos que utilizamos no son renovables, las minas no producen nuevos minerales cuando extraemos los que había y los bosques y selvas que desaparecen lo hacen irreversiblemente. Mientras el hombre ha tomado pequeñas cantidades de energía y materiales del medio, ha tenido la sensación de que la Naturaleza era inagotable y la economía convencional se basó en las premisas mecanicistas de que todo es sustituible y todo es reversible. Con dinero todo se arregla... menos la muerte. Reponer los bosques que una vez poblaron Europa o volver a concentrar los metales que una vez se extrajeron de las minas o convertir todo el CO_2 y agua formados en las combustiones en hidrocarburos y oxígeno son perfectamente posibles desde un punto de vista termodinámico, pero requerirían de tan enormes cantidades de energía, información y tiempo que hacen de lo irreversible no sólo costoso sino imposible en términos prácticos.

Podemos y debemos imaginar una muerte entrópica de la Tierra, y ésta no se producirá como la muerte térmica del Universo imaginadas por Clausius y Kelvin, porque mientras el Sol salga todos los días con la misma

intensidad y espectro que hace más de 4.500 millones de años no tendremos problemas significativos de enfriamiento, ni de pérdidas de la presión atmosférica.

Podemos imaginar la muerte entrópica de la Tierra como algo parecido a lo que ahora es Venus. Un planeta en que su atmósfera es en un *95%* CO_2, todos los materiales de su corteza están mezclados y han reaccionado entre sí hasta su mínima reactividad bajo las condiciones ambientales existentes. A largo plazo no son ni la presión ni la temperatura de la Tierra el problema, sino la oxidación y dispersión de sus recursos. En el planeta Venus, es su proximidad al Sol la que eleva su temperatura provocando corrientes de convección que mezclan y hacen reaccionar a los materiales de su corteza. A altas temperaturas se favorecen los estados líquido y gaseoso, además se superan las barreras energéticas de activación provocando la reacción de sustancias que de otro modo se mantenían en sus estados metaestables –un ejemplo de ello es la madera en presencia de oxígeno que aunque termodinámicamente la reacción está favorecida, sólo se activa a alta temperatura.

Sin embargo, a bajas temperaturas como las de la Tierra, los materiales de su corteza están en su mayor parte solidificados. Sólo el agua es el líquido mayoritario y es esencialmente inerte a la temperatura ambiental. Mientras que el aire, compuesto por un *20%* de oxígeno que es un gas extremadamente corrosivo, está diluido en una atmósfera con el *80%* de nitrógeno y otros gases minoritarios inertes a la temperatura ambiental. Si excluimos la deriva de las masas continentales que tienen lugar en plazos de edades geológicas, las corrientes de convección que provocan la mezcla y la homogeneización se dan en la hidrosfera y en la atmósfera. La acción química más importante del agua es por disolución de sustancias, mientras que la del aire es la de oxidación, que se ve impedida por la propia dilución del oxígeno y que la reacción de oxidación es mayoritariamente de tipo gas-sólido a baja temperatura, lo que necesita mucha superficie de activación y tiempo. En otras palabras, es nuestra relativa lejanía del Sol, la que ha impedido que la energía recibida a lo largo de millones de años no haya acelerado los procesos entrópicos de degradación que se dan en nuestro planeta hermano, Venus. Y es a su vez nuestra relativa proximidad al Sol la que ha favorecido la aparición de la vida al mantener las condiciones físicas y químicas que permiten la existencia de los ciclos del carbono, de nitrógeno, del agua y de todos los materiales que hacen de este planeta algo singular en el Universo.

Es el hombre el que acelera esas reacciones naturales. Después de extraer recursos minerales, los dispersa, provoca la oxidación de los metales, consume recursos fósiles que en un estado metaestable habían permanecido sin reaccionar durante millones de años, consume el oxígeno que se formó a la vez que la materia orgánica, provoca la disolución de los mate-

riales en el mar, arrasa y destruye los bosques, en definitiva, convierte la exergía química de la Tierra en nada.

La Tierra es un sistema cerrado en materiales, y excepto por pequeñas aportaciones de meteoritos y pérdidas de hidrógeno o helio, no admite ni emite masa. Además, está en equilibrio energético, absorbe y emite la misma energía, excepto un pequeño *0,023%* de esa cantidad que es lo que la Tierra convierte en biomasa a través de la fotosíntesis y éste es el pequeño/gran capital que ha sabido almacenar a lo largo de su vida para producir toda la materia orgánica existente.

Podemos, pues, imaginar un estado «comercialmente» (y termodinámicamente) muerto de la Tierra en que todos sus materiales hubieran reaccionado y se hubieran dispersado mezclándose hasta una sopa entrópica de composición homogénea correspondiente a la composición actual de todos y cada uno de los elementos que componen la corteza y la atmósfera terrestres a la presión y temperatura ambientales. A partir de aquí, cualquier sustancia que esté más concentrada o más diluida, más caliente o más fría, a mayor o menor potencial químico, presión, altura, velocidad, etc., tendrá más exergía que esa sopa entrópica. Por tanto, podría calcularse, al menos teóricamente, cuánto sería el capital natural de la Tierra. Puede que nunca lo lleguemos a saber, pero su estimación, aunque sólo fuera grosera, nos daría un orden de magnitud del efecto del hombre sobre la Naturaleza en una unidad de cuenta común, la exergía.

Hay que hacer notar que es la exergía y no la energía la unidad de cuenta, ya que las cuentas de cantidad de energía no son sensibles a las irreversibilidades y, por tanto, a las pérdidas de calidad de la misma. Las transferencias de calor de una a otra temperatura, las pérdidas de presión por fricción en un fluido o las mezclas de fluidos no se contabilizan como pérdidas de energía y sólo podemos dar cuenta de ellas como pérdidas exergéticas, es decir, pérdidas de capacidad de realizar trabajo útil para nuestros propósitos.

Es curioso ver la poca atención que los termodinámicos han prestado a la destrucción global de exergía por la mezcla y reacción de los materiales de la Tierra. Los ingenieros termodinámicos han dedicado sus esfuerzos a fenómenos de optimización y mejora de procesos de combustión y sistemas termomecánicos en los que el principal problema estaba en evitar las pérdidas térmicas y de fricción. Por otra parte, los termodinámicos químicos se han dedicado sobre todo a procesos químicos bien a escala industrial o bien de laboratorio, analizando la energética de las reacciones químicas. Es del mundo de los termodinámicos aplicados a la geología donde más información puede esperarse, sin embargo, el análisis exergético ha sido desarrollado tan recientemente que ningún grupo de investigación a nivel mundial que conozcamos y de forma persistente ha avanzado en estos temas. Sin embargo, el análisis exergético de los recursos de la Tierra cons-

tituye el fundamento de la cuantificación de su capital natural y puede ser una base firme de pensamiento sobre la cual asentar la estructura conceptual de la economía-ecológica.

Ya Nicholas Georgescu-Roegen (1977 y 1983) intuyó su importancia al proponer su «cuarta ley de la Termodinámica» al distinguir entre materia utilizable y no utilizable en paralelismo con el de energía utilizable o exergía y energía no utilizable o anergía. Él dice que materia no utilizable es la que está dispersa y que ninguna sustancia puede ser purificada completamente. Esto es verdad, pero es pura y simplemente una consecuencia de la Segunda Ley o Segundo Principio. Parece increíble cómo una mente tan preclara como la de Georgescu-Roegen se obcecara en crear un nuevo principio cuando es tan evidente su obtención a partir del Segundo. En cualquier caso, Georgescu-Roegen tiene razón al poner énfasis en la idea de la dispersión de materiales como elemento clave del análisis económico-ecológico. Lamentablemente, los seguidores de Georgescu-Roegen han sido más economistas que termodinámicos, así que las consecuencias cuantitativas de sus ideas sobre el mundo físico no han sido desarrolladas.

El problema del estado termodinámico muerto de la Tierra no es trivial, ya que mientras el Sol nos dé su energía cada día, él es el que aporta la mayor cantidad para construir y destruir los recursos naturales. El hombre con todo su poder aporta, en términos cuantitativos, a esa capacidad de destrucción mucho menos de un dos por mil de la energía solar incidente. La energía procedente del Sol es enorme, *1.353 J* por segundo en cada metro cuadrado; el *23%* evapora el agua de los océanos y el *1%* mueve el aire y el agua. La energía procedente del interior del planeta siendo mucho más pequeña, *0,034–0,078 J/m²s,* da lugar a la erupción de volcanes, terremotos y demás movimientos de la corteza terrestre, ver p. ej., Härte (1988) y Tyler Miller (1990). Parte de toda esta ingente energía solar se emplea en mantener la presión y temperatura del planeta, proporcionar energía potencial al agua o al aire, dando lugar a nubes, lagos y vientos, y un pequeño *0,023%,* como hemos dicho, en producir la fotosíntesis.

En otras palabras, mientras haya Sol, y según estimaciones hay para miles de millones de años más, y mientras haya calor del interior de la Tierra no habrá equilibrio ni muerte térmica.

Puesto que necesitamos definir un Ambiente de Referencia (AR) (o estado «comercialmente muerto») del que partir, analicemos las distintas propuestas que desde la Termodinámica Química se han presentado en esta última década.

En principio, lo más coherente sería buscar el equilibrio absoluto de todos los elementos de la corteza como si éstos llegaran al final a reaccionar y cedieran toda su exergía química. Algunos autores como Ahrendts hicieron este cálculo y llegaron a la conclusión de que esa sopa entrópica

no tendría oxígeno y estaría todo en forma de nitratos, debido al nitrógeno del aire. Suponer esto es bastante poco probable ya que los nitratos efectivamente ocupan el escalón más bajo de reactividad pero su formación necesita superar una barrera de activación tal que, como vemos en el aire, el oxígeno y el nitrógeno atmosféricos pueden convivir juntos durante millones de años sin que se formen los nitratos. El ambiente de referencia propuesto por Ahrendts es un estado muy alejado de la realidad y necesitaría de un período temporal muy dilatado para alcanzarse, por lo que no es muy apropiado si nuestros análisis se centran en actividades que se producen en escalas temporales humanas.

Pero si abandonamos también el concepto de equilibrio interno para el estado «comercialmente» muerto, estamos abandonando la unicidad y todo se convierte en materia opinable. Teóricamente al menos, habría tantas sopas entrópicas como autores. Y ello lleva a que la valoración de los recursos de la Tierra en unidades comunes de exergía, si algún día se lleva a cabo, tendría que adoptar un estado muerto por convenio internacional. En cualquier caso sería menos controvertido que muchos acuerdos internacionales que se están tomando todos los días.

El estado de referencia que tomaremos como «estado comercialmente muerto» debe ser lo más similar posible al ambiente físico real. Las propiedades más importantes que debe cumplir son:

- El ambiente de referencia no está en equilibrio interno, aunque a escala humana puede considerarse que las sustancias que lo componen sean suficientemente estables, abundantes y probables.
- Las sustancias que lo componen tienen una dispersión máxima.
- Los procesos químicos y físicos que tienen lugar son de corta duración a escala humana.

Tomando como base estas circunstancias, Szargut (1986–89) propone la metodología para calcular el ambiente de referencia a escala humana, y aunque no cierra el problema, lo acota lo suficiente como para considerar que el trabajo principal ya está hecho. Su metodología se basa en las siguientes hipótesis:

– A cada elemento se asocia una sustancia de referencia y se supone que dicho elemento, esté actualmente como esté, terminará reaccionando hasta formar dicha sustancia en el escalón más bajo aceptable de reactividad.

– Las sustancias de referencia estarán todas dispersas y su cantidad será coherente con la cantidad y abundancia relativa de los distintos elementos que componen la corteza terrestre.

– A cada una de estas sustancias de referencia en su máxima dispersión y a la presión, P_0, y temperatura, T_0, atmosféricas estándar se les asigna una exergía química nula.

– Toda sustancia de referencia en estado puro tiene una exergía, que llama exergía química estándar b_0^q a P_0, T_0, por el hecho de estar concentrada respecto a su máxima dispersión. Dicha exergía química estándar depende por tanto de su abundancia en cada una de las fases que componen el Ambiente de Referencia.

– Para cualquier otro compuesto o elemento puros, su exergía química estándar se calcula a partir de reacciones entre sustancias de referencia y conociendo los valores de la variación de la energía de Gibbs o entalpía libre de formación o de reacción del proceso ΔG_f^0 cuya tabulación se dispone.

En capítulos sucesivos se hará una exposición más exhaustiva del A. R. de Szargut, y de su aplicación en el cálculo de las exergías de una serie de compuestos minerales dados.

Desafortunadamente, el ambiente de referencia propuesto por Szargut no está libre de imprecisiones y éstas vienen más de los componentes químicos elegidos como referencia que de su imprecisión en conocer sus abundancias relativas. En efecto, tomar una sustancia u otra de referencia para un elemento lleva consigo a veces diferencias entre *10* y *40 kJ/mol*, mientras que, dadas las expresiones logarítmicas de la concentración, errores en la estimación de ésta superiores en *100* veces para una determinada sustancia, sólo arrojan errores de *11 kJ/mol*. Si el gran problema de la economía-ecológica está en valorar la dispersión de los materiales, es evidente que aunque el ambiente de referencia propuesto por Szargut sirve como metodología, aún es profundamente impreciso y necesita un esfuerzo importante de investigación. Un caso concreto es el del incremento del CO_2 a causa de las emisiones humanas y el efecto invernadero adicional que provoca. Duplicar la concentración de CO_2 desde los *335 ppm* a los actuales apenas supone *1,8 kJ/mol* en la exergía química estándar del CO_2 y sin embargo son bien conocidos sus efectos a niveles ecológico y económico.

De todos estos análisis se deduce que el problema del estado «comercialmente» muerto de la Tierra es algo fácil de formular pero difícil de calcular y que se necesita un gran esfuerzo investigador a la vez que acuerdos internacionales. Los principios están claros, su importancia para la correcta valoración del reciclado de materiales también, pero nuestra capacidad para obtener números es aún confusa. Que no sirva esta confusión para negar el hecho de que el hombre está acelerando la degradación entrópica de la Tierra.

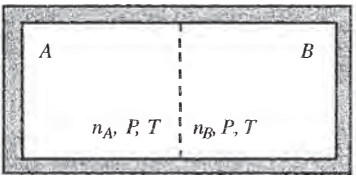
CAPÍTULO 10
LA ENTROPÍA DE MEZCLA Y EL «TOTUM REVOLUTUM»

Antonio Valero

La mezcla es uno de los procesos más irreversibles y comunes que hay. Cualquier proceso de contaminación es un proceso de mezcla y el coste de volver hacia atrás y recuperar los reactivos puros no sólo no es lineal con el grado de pureza que se quiera alcanzar, sino que requiere una exergía que es desde varias hasta muchas veces el orden de magnitud de la exergía destruida en la mezcla.

La tecnología actual permite recalentar lo enfriado, elevar lo caído, acelerar lo frenado, y hasta desoxidar lo oxidado con eficiencias termodinámicas que pueden estar desde el *1* hasta el *90%*. En cambio, los procesos de separación industriales rara vez superan el *1%*, es decir, que se necesita como poco cien veces más exergía para separar que la liberada en el proceso de mezcla. Sólo las bacterias y los organismos vivos microscópicos logran descontaminar algunas sustancias con eficiencias muy notables. Es pues el fenómeno de la contaminación/purificación, o de mezcla/desmezcla un fenómeno de la mayor importancia que vale la pena analizar.

Para ello consideraremos un experimento muy simple. Dos gases ideales diferentes y en estado puro a la misma presión y temperatura, separados por una pared que puede elevarse para permitir que se mezclen.



Supongamos, además, que ambos recintos son iguales. Hemos visto que el Primer Principio establecía que $dU = \delta Q + \delta W$, o bien para una

sustancia compresible $dU = TdS - pdV$. Si la sustancia es un gas ideal, su energía interna sólo depende de la temperatura, así que se convierte en $C_v\, dT = TdS - PdV$, siendo C_v la capacidad calorífica a volumen constante del gas ideal, que por otra parte cumple que $PV = RT$. Por tanto, despejando se obtiene que la variación de entropía de un gas ideal puede expresarse como

$$dS = C_v \frac{dT}{T} + R\frac{dV}{V} = C_p \frac{dT}{T} - R\frac{dP}{P} \tag{14}$$

ya que $C_p = C_v + R$ y $\dfrac{dT}{T} = \dfrac{dP}{P} + \dfrac{dV}{V}$ para este gas ideal.

Fijándonos ahora en el experimento, si seguimos al gas A en el estado inicial está a P y T, y cuando elevamos la pared se observa que ni la temperatura ni la presión se modifican pero ahora los gases han sufrido un proceso irreversible de mezcla. Ahora el gas A está a una temperatura T y ocupa el doble volumen que en el estado inicial. De acuerdo con la ley de Dalton, su presión parcial, p_A, en la mezcla será:

$$p_A = x_A P \tag{15}$$

donde x_A es la fracción molar, $x_A = n_A/(n_A + n_B)$; (16)

por tanto, la variación de entropía del gas A por unidad de mol será $ds = RdP/P$ ya que el proceso es isotérmico, e integrando entre ambos estados se obtiene

$$\Delta s_A = \int ds_A = -R\int_i^f \frac{dP}{P} = -R\,ln\frac{P_f}{P_i} = R\,ln\frac{x_A P}{P} = -R\,ln\,x_A \tag{17}$$

y si hay n_A moles, la variación total de A será

$$\Delta S_A = -R\, n_A\, ln\, x_A \tag{18}$$

De la misma manera podemos proceder con el gas B, obteniéndose

$$\Delta S_B = -R\, n_B\, ln\, x_B \tag{19}$$

Luego la variación total de entropía o entropía generada, σ, por mol de mezcla será

$$\sigma = \frac{\Delta S_T}{n_A + n_B} = \frac{\Delta S_A}{n_A + n_B} + \frac{\Delta S_B}{n_A + n_B} = -R\,x_A\,ln\,x_A - R\,x_B\,ln\,x_B \tag{20}$$

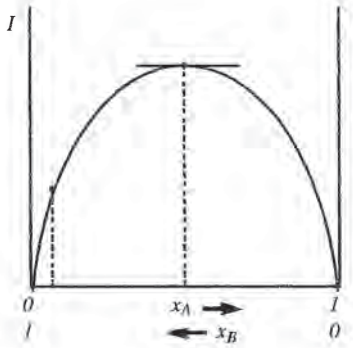
o bien $$\sigma = -R\,(x_A \ln x_A + (1 - x_A) \ln (1 - x_A)) \tag{21}$$

en general $$\sigma = -R\sum_{i=1}^{2} x_i \ln x_i \tag{22}$$

y como x_i siempre es menor que la unidad, σ, siempre será positivo, es decir, siempre se generará entropía en una mezcla.

Por otra parte, la Ley de Gouy-Stodola establece que la destrucción de exergía, o irreversibilidad, *I*, en un proceso irreversible está relacionada con la generación de entropía a través de

$$I = T_0\sigma = -RT_0\sum_{i=1}^{2} x_i \ln x_i \tag{23}$$



Es interesante representar *I* frente a *x*, y analizar su significado. Como se ve en la figura, la curva es simétrica con un máximo en $x = 1/2$, que corresponde a una irreversibilidad de $I_{máx} = R\ T_0 \ln 2$, y su valor se hace nulo cuando *A* y *B* son la misma sustancia, porque en ese caso $x_A = 1$ y no se produce irreversibilidad al mezclar dos sustancias idénticas, ya que las moléculas son indistinguibles y al bajar nuevamente la pared restituimos el estado inicial.

Si analizamos la pendiente de la curva de la expresión (23):

$$\frac{dI}{dx_A} = -RT_0(\ln x_A - \ln(1 - x_A)) \tag{24}$$

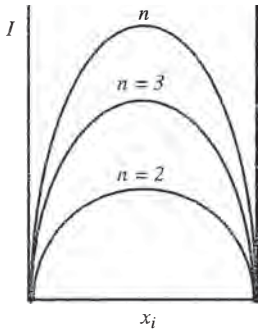
cuyo valor se anula cuando $x_A = 1 - x_A$, es decir, al 50% de mezcla y se hace menos infinito cuando x_A tiende a cero.

Este resultado es sorprendente ya que si I es la exergía destruida en el proceso de mezcla, también es el menor trabajo posible que habría que realizar para desmezclar ambas sustancias. Como ya hemos dicho, los procesos de separación que usamos hoy en día son muy poco eficientes, así que el trabajo real de separación siempre es varios/muchos órdenes de magnitud mayor que el trabajo termodinámico mínimo. Por tanto, la ecuación (24) expresa que el primer esfuerzo de desmezclar una mezcla de dos sustancias al *50%* es nulo, pero cada vez que queremos purificarla nos cuesta más separar la siguiente fracción y llegar a purificar totalmente cuesta infinito trabajo. En otras palabras, pasar del *50* al *51%* de pureza no cuesta lo mismo que pasar del *90* al *91%*. En efecto, el esfuerzo requerido sigue la ley exponencial necesitándose menos trabajo por unidad de masa para purificar desde el *90* al *91%* que desde el *99,0* al *99,1* o que desde el *99,90* al *99,91* y así sucesivamente. Ésta es una forma de expresar la «Cuarta Ley de la Termodinámica» propuesta por Georgescu-Roegen (1977), y que en realidad es consecuencia del Segundo Principio, como hemos visto. Los hechos existen, la cuarta ley no. Purificar absolutamente cuesta infinitamente, mientras que contaminar es infinitamente fácil en cantidades infinitesimales.

Antes de analizar algunas de sus consecuencias físicas, vale la pena generalizar la expresión (23). Si la mezcla de gases ideales hubiera sido de más de dos, entonces la expresión sería idéntica, con el sumatorio extendido a los n gases mezclados

$$I = -R\,T_0 \sum_{i=1}^{n} x_i \ln x_i \tag{25}$$

y la curva de la figura representando a I frente a x_i es cualitativamente igual, pero más puntiaguda. Lo que significa que ahora el esfuerzo de desmezclar se hace mucho mayor para un nivel de pureza definido.



De la misma forma que con los gases ideales, se pueden suponer mezclas ideales de líquidos o también de sólidos, el resultado es que expresiones similares a la (25) se obtienen para estas mezclas. Así se explican las ecuaciones que veremos para el cálculo de la exergía química estándar de las especies de referencia del estado muerto.

Si el primer problema de la Economía-Ecológica es la desaparición de los recursos naturales y cómo tenerlos en cuenta, el segundo problema es la contaminación del medio ambiente. Abatir la contaminación es cada vez más difícil, y ya no es un problema de normativa[3] porque, al final, existirán tantas restricciones que éstas ya no se podrán cumplir ni con toda la energía del mundo. Como se ve, la contaminación del medio ambiente es un problema íntimamente ligado a la desaparición de los recursos naturales.

Podemos imaginar que hace cien mil años el hombre empezó a despertar y recibió como don a la Naturaleza y estaba sometido a sus leyes inexorables. Para protegerse quemó la madera y creó el hogar y construyó utensilios para matar animales, comerlos y protegerse con su piel. Como los bosques y los animales que albergaban se volvieron escasos, creó la agricultura y necesitó utensilios más poderosos, por lo que desarrolló la minería, y cada vez necesitó más energía directa e indirecta para sobrevivir. Como las tierras se volvían menos fértiles y los minerales menos fáciles de extraer, necesitó progresivamente más energía. Y se arrasaron los bosques de Europa, y la agricultura necesitó fertilizantes y las materias primas cada vez se traían de más lejos, con lo que el transporte se desarrolló mucho más. Mientras hubo tierras vírgenes que explotar siempre hubo desarrollo y siempre aparecieron nuevas fuentes de energía que lo acompañaron cuando las anteriormente utilizadas entraron en crisis. Primero fue la madera, luego el carbón, luego el petróleo, luego la nuclear...

Pero la contaminación del medio creció a mayor escala, hasta alcanzar la escala global. Nuestro éxito nos multiplicó y cada uno además queremos más. Aunque aparecieran eternamente nuevas fuentes de energía para sostener el desarrollo necesitaríamos más y más energía para mantener habitable el medio natural al que el hombre está atado biológicamente, y esas fuentes energéticas necesarias para descontaminar y sostener el desarrollo contaminarían más que lo descontaminado, así que resolveríamos los problemas locales a costa de aumentar los problemas globales, hasta que éstos nos afecten localmente.

Cada vez que avanzamos en esta espiral infernal del *totum revolutum,* es más difícil volver atrás, porque se necesita más energía para restaurar lo destruido que para seguir destruyendo. Si el Sol necesitó 4.500 millones

[3] Y como se ve, la «legurrea» también está sometida a la ley de la entropía

de años para crear la Naturaleza, probablemente necesitaría otros tantos para restaurarla. Pero no estamos dispuestos a esperar ese tiempo, es más, queremos vivir más experiencias y tener más poder que cualquiera de los grandes emperadores que existieron en el pasado. Todo ello a costa de la energía fósil acumulada o de la caja de Pandora nuclear. Al utilizarlas contaminamos más la Tierra con lo que más tiempo-del-Sol necesitaremos para volver al estado original. En definitiva, por vivir cada vez más intensamente estamos consumiendo el capital temporal acumulado en forma de combustibles fósiles y a la vez, al contaminar, estamos pidiendo créditos de tiempo al Sol y a las generaciones futuras.

Ninguna generación pasada ni futura habrá sido tan destructiva como la nuestra. En el pasado es evidente, en el futuro porque ya no habrá recursos naturales que consumir.

Irónicamente, cuanto más deprisa vamos, más tiempo consumimos. Sólo la inteligencia que ayuda a comprender estos fenómenos y nos recomienda la conservación, el reciclado, la investigación de procesos más eficientes, nos puede ayudar a salvarnos de los efectos del *totum revolutum.*

CAPÍTULO 11
EL COSTE, EL PRECIO Y EL VALOR

Antonio Valero

La transición de la Termodinámica a una Economía Física o Termoeconomía requiere una clarificación de ideas sobre el coste, el precio y el valor de las cosas.

Consideramos el coste, como el sacrificio de recursos que han sido necesarios para producir algo. El coste nace así de una contabilidad pura, por tanto, puede objetivarse sumando todos los recursos puestos en juego. El precio de las cosas, sin embargo, se forma en el intercambio, en el mercado y es fruto de las contingencias sociales, institucionales y utilitarias del momento. Parece evidente que en un mercado suficientemente amplio, con todas las fuerzas confluyendo, se puede alcanzar un precio que también podría decirse que es objetivo. El precio ya no es el resultado de un análisis contable, pero resulta fácilmente predecible en sus tendencias. De los tres conceptos, es el valor el más subjetivo porque simplemente no todo es reducible a términos económicos. El aprecio personal que hacemos de las cosas y de los hechos no tiene por qué estar en relación con su precio en el mercado. Es difícil mercantilizar las vivencias personales que son la fuente más genuina del valor.

Desafortunadamente, la objetividad del coste y el precio frente a la del valor sólo están en sus definiciones, sobre el papel. Los conceptos y sobre todo su uso son más obstinados. Así, para contabilizar un coste unitario, uno debe definir los límites de análisis del sistema, es decir, identificar los recursos puestos en juego, el producto o productos y el valor que dé a los residuos y subproductos que genere. Por otra parte, la producción puede ser variable con el tiempo, así que también habrá que especificar sobre qué intervalo temporal estamos contabilizando. Si fijamos todo ello, podremos obtener los costes medios. Un problema con el coste medio es que no es predictivo, es decir, no informa del coste de la última unidad productiva, ni tampoco de las primeras, ni siquiera de las intermedias. Es muy común que, por economías de escala, las primeras unidades cuesten más, en tanto que producir en grandes cantidades estabiliza los costes medios reduciéndolos. Sin embargo, aunque no es regla general, ocurre que, una vez sobre-

pasados ciertos límites productivos, el coste medio suele dispararse. En cualquier caso, la falta de predictibilidad del coste medio impone el nacimiento del concepto de coste marginal. También aquí se necesitan definir los límites de análisis, los recursos que entran al sistema y el objeto de la producción. Sin embargo, el coste marginal es una derivada parcial y como tal necesitan definirse también las condiciones de variación sobre los que se calcula.

$$\textit{Coste marginal} = \left(\frac{\partial\ \textit{Recursos}}{\partial\ \textit{Productos}} \right)_{\textit{condiciones de variación}}$$

Así que implícitamente estamos diciendo que existe una función de producción en el sistema que liga los recursos con los productos, emisiones, variables intermedias físicas, de control y económicas y finalmente el tiempo. De ello resultan demasiados costes para un sistema, todos válidos sobre el papel, pero a veces confusos en la vida práctica. Existen muchas incertidumbres sobre la función «objetiva» de producción, no se saben con exactitud los valores físicos del proceso, ni las condiciones económico-financieras, ni el conjunto de decisiones sobre los que se actúa.

Estas consideraciones son igualmente válidas para los costes físicos, por ello es estéril hacer una teoría energeticista del valor utilizando los costes físicos como criterio más objetivo del valor de las cosas. La información que proveen los conceptos de coste puede ayudarnos a apreciar las cosas, pero no es la única fuente genuina del valor, sean los costes físicos o monetarios.

Si la estructura conceptual del coste es compleja, más lo es la del precio, porque si el precio se forma en el mercado, este mercado depende de la naturaleza de dicho mercado y de las características del marco socio-institucional que lo configura. Todo mercado está más o menos intervenido y sometido a reglas e intereses cuyas fuerzas condicionan los precios. Por otra parte, aun en un mercado globalizado, los precios siempre son función de la disponibilidad –o mejor la escasez– de los productos. Si los precios están condicionados por la demanda y ésta puede manipularse en función de una campaña publicitaria, por ejemplo, es evidente su arbitrariedad. Sin embargo, y esto es bien conocido por los economistas, se pretende que sean los precios los que regulen los valores y comportamientos humanos, e incluso los de la vida en la Tierra. «Las cosas valen lo que pagamos por ellas en el mercado». La arrogancia del razonamiento económico actual, corre normalmente pareja a la habitual ignorancia del contexto físico en el que se desenvuelve. En lo que sigue intentaremos paliar esa ignorancia, al acercarnos al concepto de coste físico, poniendo un ladrillo más en el afán de apreciar las funciones que espontáneamente realiza la Naturaleza y la incidencia del hombre en los procesos.

Capítulo 12
COSTE TERMODINÁMICO O EXERGÍA

Antonio Valero

La Termoeconomía –quizá por el momento– *no* está interesada ni en el precio ni en el valor, sólo en el coste. Porque la Física pretende objetivar los hechos naturales y cuantificarlos. Por ello, si pretendemos buscar el coste auténtico de las cosas, es necesario buscar herramientas que no dependan de la voluntad humana o que si lo hacen que sea en términos acotados y fácilmente cuantificables.

Esto nos lleva a varias cuestiones fundamentales:

1) ¿Es el dinero la mejor unidad de medida del coste físico de las cosas? Si no lo es, ¿cuál es su mejor unidad de medida?

2) ¿Cómo se forma el coste natural?

3) ¿Cómo se reparten los costes cuando obtenemos varios productos a la vez a partir de los mismos recursos?

La respuesta a estas cuestiones son la base conceptual de la Termoeconomía y el salto de la Termodinámica a la Termoeconomía nunca será firme si no se logran responder con rigor físico-matemático.

Sin tratar de dar una respuesta exhaustiva, sí vamos a dar una visión esencial a las mismas.

Es evidente que el dinero no puede ser la mejor unidad de medida del coste porque la moneda varía de un país a otro y para una misma moneda su valor fluctúa con los acontecimientos, además, es imposible cuantificar a la Naturaleza en términos monetarios, sin abrir la puerta a arbitrariedades manifiestas. La Naturaleza no nos vende nada que podamos comprarle con dinero. Estos argumentos son sólidos y evidentes y, sin embargo, cuesta admitirlos por la familiaridad y omnipresencia del dinero. Frente al argumento de que «todo se compra» hay que oponer «el coste no se mide con dinero», o «todo cuesta más que el dinero que pagamos».

Entonces, ¿cuál debe ser la unidad de medida del coste? La respuesta a esta pregunta está en el Segundo Principio de la Termodinámica: si el

coste es un sacrificio de recursos, y los recursos una vez consumidos, lo han sido para siempre, se deduce que debemos contemplar este hecho como la base de la contabilidad física. En este campo la Termodinámica provee de herramientas como son la energía, la entropía y la exergía, entre otras. El problema con la energía es que no distingue la calidad, todos sabemos que un kilowatio-hora en forma de energía eléctrica da más juego que el mismo en forma de agua caliente o incluso en forma de agua fría. La energía sólo mide la cantidad, pero es insensible a la calidad o capacidad de realizar trabajo de un flujo determinado. En la entropía, sin embargo, encontramos la respuesta a este problema, así que el carbón tiene más baja entropía que los gases que se generan en su combustión, y además sólo ocurren procesos espontáneos si la entropía aumenta. El problema con la entropía es esencialmente que sus unidades [energía/temperatura] son poco prácticas y que, como la energía, sólo dan una dimensión del problema, pues son necesarias simultáneamente ambas para analizar completamente un proceso. Aunque la exergía *[Balance de Exergía = Balance de Energía – T_0 x Balance de Entropía]* es también unidimensional, lleva incorporadas ambas informaciones, tiene dimensiones energéticas y es sensible a la cantidad y calidad de la energía intercambiada, así que si un proceso genera entropía, σ, disminuye la exergía en un ritmo $T_0\ \sigma$. Por tanto, la exergía es un buen candidato como unidad de medida del coste.

En efecto, la exergía mide la mínima cantidad de energía útil que es necesario comunicar a un sistema para formarlo a partir de sus elementos constituyentes que se encuentran en el ambiente muerto.

El ambiente muerto es, como hemos visto, fácil de describir, ya que es un estado hipotético homogéneo de la Tierra, con todas las sustancias mezcladas en una composición a la más baja reactividad, sin energía cinética ni potencial y a una presión y temperatura ambientales, P_0, T_0. Sin embargo, es muy complejo fijarlo, ya que si dejáramos que todas las sustancias de la Tierra reaccionaran entre sí llegaríamos a estados absolutamente extraños. Como hemos dicho, si el N_2 reaccionara con todo el O_2 se formarían nitratos que son termodinámicamente más estables que los gases por separado, pero se formaría una atmósfera totalmente alejada de la que estamos habituados. Por otra parte, el O_2 coexiste con el N_2 en el ambiente sin que espontáneamente reaccionen y ello se debe a que están en un estado metaestable que no cambia, a menos que se les comunique una enorme energía de activación previa, como la que tiene lugar a altas temperaturas en procesos de combustión en la que es bien conocida la formación de óxidos de nitrógeno.

De la misma forma, mantener a la Tierra en un estado de presión de *1 atmósfera (101,325 kPa)* y *25°C (298,15 K)* no se puede hacer sin la energía solar que recibimos diariamente.

Por ello, aun el estado muerto necesita energía útil (solar) para ser mantenido. Y dada la variedad de elementos que existen y sus cantidades relativas en la corteza terrestre, el estado muerto es más una convención razonable que una realidad alcanzable. No obstante, deben quedar claras dos ideas. La primera es que dada una cantidad de elementos químicos en cualquier composición inicial, siempre es posible termodinámicamente alcanzar un estado de equilibrio a una presión y temperatura también dadas. Así que siempre será posible calcular la cantidad de energía útil o energía libre para formar el estado de referencia (muerto) a partir de uno de equilibrio dado. La segunda idea se refiere a la magnitud de estos cambios. La diferencia de valores obtenidos de exergía para una sustancia con respecto a dos ambientes de referencia posibles es inapreciable en términos prácticos. Esto lo veremos más adelante cuando tratemos el concepto de coste exergético o coste físico. En otras palabras, la discusión de la fijación del estado de referencia es más de orden conceptual que de relevancia numérica.

Definido el ambiente de referencia, el coste termodinámico mínimo o exergía de todo flujo material y/o energético ya puede ser calculado. Esto es de la mayor importancia porque la exergía toma en cuenta todas las manifestaciones físicas que diferencian a un sistema de su ambiente: altura, velocidad, presión, temperatura, composición química, concentración, etc., y lo hace, no en función del aprecio que le tengamos, sino de la energía útil que puede liberar hasta agotarse. Por ejemplo, el diamante tiene prácticamente la misma exergía química que el grafito, sin embargo, es más escaso que éste, por lo que el término escasez también tiene un reflejo en su componente exergético de concentración. Podemos dar mucho valor al diamante, o al oro, pero sus exergías son inapreciables, y ello se debe a que la exergía de concentración contribuye poco al valor final de la exergía de las sustancias, debido, como hemos visto, a su fórmula logarítmica. Más adelante explicaremos con detalle esta paradoja.

Por otra parte, el concepto de exergía participa de todas las propiedades del concepto de coste: es aditiva y puede ser calculada a partir de su proceso de producción, sólo que este proceso necesita ser considerado como reversible en todas sus etapas.

La más importante aportación del concepto de exergía está en su capacidad de objetivar todas las manifestaciones físicas en unidades energéticas e independientemente de su valor económico.

Cualquier producto, recurso natural o artificial, proceso productivo o emisión contaminante pueden ser valorados desde un punto de vista exergético. Ello lleva consigo además la valoración de subproductos por lo que los problemas de reparto de costes entre varios productos resulta elemental.

En cuanto a los valores de la exergía para diferentes sustancias químicas, están muy próximos a los valores de energías libres de Gibbs con las que podemos estar más familiarizados. Para los combustibles fósiles su exergía prácticamente coincide con su poder calorífico superior. Las exergías potencial, cinética, eléctrica y magnética coinciden con sus energías. Donde más diferencia con la energía aparece es en el componente térmico de la exergía. Ello debido al factor de Carnot $(1 - T_0/T)$. En efecto, $Ex^T = En^T (1 - T_0/T)$. Como ya hemos visto, sólo cuando T es muy elevada la exergía térmica coincide con la energía. Sin embargo, en términos prácticos para análisis con relevancia económica-ecológica pocas veces se hacen balances energéticos de materiales en los que la componente térmica tenga importancia, ello se debe a que casi todos los intercambios se hacen a temperatura ambiente, y en ese caso la exergía térmica es nula. Finalmente, la componente de la exergía de mezcla es quizá la más interesante desde un punto de vista económico-ecológico, porque, si bien al estar afectada por el término neperiano toma siempre unos valores muy pequeños (recordemos que $I = - RT_0 \Sigma x_i \ln x_i$), es conceptualmente clave ya que en la mayor parte de los casos que se pueden estudiar en economía-ecológica no se desprende energía al mezclarse dos sustancias. Así, por ejemplo, en todos los procesos de contaminación atmosférica o de las aguas o de desechado de residuos, la energía final es la de la suma de los componentes mezclados, sin embargo, la entropía aumenta, o la exergía disminuye, con respecto a los materiales separados. El coste real de descontaminación será decenas, centenares o miles de veces superior al coste termodinámico o exergía pero nunca al de la energía de mezcla ya que multiplicaríamos por cero.

El concepto de *exergía* nos informa de la mínima energía útil que tendríamos que invertir para la creación de un sistema dado. Sin embargo, la experiencia de la vida cotidiana nos demuestra que esa mínima energía útil es un límite al que intentamos sin fortuna ajustar la eficiencia de nuestras actividades. Podríamos, por tanto, traducir y comparar la información que nos brinda la exergía, con aquel otro valor de la energía real que efectivamente invertimos en los procesos. Es lo que presentaremos en los capítulos siguientes.

CAPÍTULO 13
EL COSTE EXERGÉTICO O FÍSICO

Antonio Valero

Sólo en un mundo *termoutópico* podríamos pensar que todos los procesos fueran reversibles, es decir, que no hubiera fricciones ni efectos disipativos y además que fueran infinitesimalmente lentos para dar tiempo a equilibrarse a los sistemas a lo largo de los procesos que realizan. Entonces y sólo entonces no destruiríamos exergía adicional al fabricar los productos y su coste sería su coste termodinámico o exergeticoteórico.

¿Hasta qué punto es necesario y alcanzable este mundo? Ésta es una cuestión francamente interesante. La fricción y la disipación son necesarias para vivir. Centrándonos en procesos cotidianos, necesitamos la luz para ver o el rozamiento para andar. La conversión de energía eléctrica en radiación luminosa y ésta finalmente en calor es un proceso totalmente irreversible y claramente necesario. Lo mismo pasa con el rozamiento, sin él difícilmente podríamos caminar erguidos. Mantener la Tierra en unas condiciones habitables requiere una enorme destrucción exergética de la radiación lumínica que recibimos todos días del Sol. La vida es un continuo proceso irreversible, y la muerte es la ausencia de irreversibilidad.

La irreversibilidad es necesaria para vivir, pero para ello no se necesita mucha. Los procesos biológicos son prácticamente los más próximos a la reversibilidad que existen. Parece sorprendente, pero es así. Por ejemplo, la fijación del CO_2 atmosférico por la función clorofílica de las plantas es un proceso que se realiza a temperatura ambiental y sólo con aporte de energía solar que como sabemos es poco densa por unidad de superficie. Para reducir el CO_2 a carbono puro o formar hidrocarburos, el hombre necesita una tecnología muy compleja y energéticamente muy intensiva. Otro ejemplo lo constituye la fijación del N_2 atmosférico por las leguminosas. El hombre necesita temperaturas de arco voltaico para romper la molécula de N_2, al igual que lo hacen los rayos un día de tormenta. La constitución de tejidos vitales e incluso la combustión química de los alimentos se hace a la temperatura corporal. La tecnología humana actual no es capaz de mejorar estos procesos, ni siquiera imitarlos. Sabemos

demasiado poco. Los procesos biológicos son muy eficientes, la tecnología humana actual no.

El coste físico de producir las cosas es siempre mayor que su coste termodinámico o exergía, y tanto mayor cuanto más ignorantes seamos.

Definimos coste exergético como la suma de todos los recursos que han sido necesarios para constituir un producto a partir de sus componentes, expresado en unidades exergéticas.

Es evidente que para calcular el coste exergético es necesario definir unos límites de análisis. Para todos los flujos que atraviesan esos límites entrando al proceso habrá que medir su exergía, la diferencia entre la exergía entrante menos la del producto y la de los residuos y subproductos emitidos será la irreversibilidad interna del proceso. La exergía de las emisiones y residuos será la irreversibilidad externa. El coste exergético debe incorporar todas esas irreversibilidades.

El coste exergético unitario es el cociente entre el coste exergético real de un producto y su exergía. Su valor es adimensional y mide el número de unidades de exergía necesarias para obtener una unidad de producto. Por ejemplo, el coste unitario de producir la energía eléctrica de origen termoeléctrico es aproximadamente tres, ya que la eficiencia de este proceso es *0,33*. En general, el coste exergético de los productos es decenas e incluso miles de veces superior a su contenido exergético, y ello se debe, como ya hemos dicho, a nuestra ignorancia. En realidad, el coste exergético unitario *es* una medida de nuestra ignorancia.

En los procesos de separación es donde más evidente se muestra esta idea. La destilación es un proceso energético muy intensivo que requiere miles de julios más que los que se desprenden en el proceso de la mezcla de sustancias que luego se quiere separar. Separar el azúcar de la sal requeriría un disolvente orgánico selectivo para el azúcar, por ejemplo, y luego la evaporación y posterior enfriamiento de dicho disolvente. ¿Quién no ha mezclado el azúcar con la sal alguna vez? Cuando esto nos ha pasado, es mejor tirar la mezcla que tratar de separarlos. No tenemos a nuestra disposición microorganismos capaces de separarlos sin realizar tanto consumo energético.

En el fondo lo que es relevante es el coste exergético, no la exergía en sí. La exergía es el punto de referencia del coste físico real de las cosas. Ésta es necesaria porque necesitamos unidades homogéneas y universales. Ni la masa ni la energía proveen de estas unidades ya que la masa y la energía de un mineral en la mina, disperso o concentrado, son las mismas. Lo mismo pasa con todos los procesos de contaminación.

Se han hecho muchos esfuerzos, que analizaremos en el punto siguiente, para determinar los costes físicos de los productos, pero ninguna unidad es satisfactoria, incluso se preconiza que la diversidad de unidades provee más información que la homogeneidad de una sola. El problema

reside más en la falta de una metodología desarrollada que en la objeción de pérdida de información. Esta crítica también puede hacérsela al dinero y, sin embargo, a todo le ponemos precio.

Aunque la producción de productos puede ser multifacética, hoy aceptamos como criterio válido para tomar decisiones un análisis puramente crematístico, y todo lo tratamos de reducir a dinero. Una contabilidad de recursos consumidos y de emisiones y efectos contaminantes producidos tiende a considerarse cada vez más. Sin embargo, la diversidad de unidades es un bosque conceptual del que difícilmente puede salirse por otros medios que los que provee la Termodinámica a través del concepto de exergía. Y es quizá la falta de esta metodología bien desarrollada y aceptada una buena excusa para aquellos consumidores finales, industrias o gobiernos que no quieren asumir las consecuencias de su consumo irresponsable de recursos naturales y de los impactos medioambientales de su *modus vivendi.*

Creemos que falta por desarrollar una Teoría de Variable Compleja de la Economía en la que dinero y exergía sean dos componentes irreducibles entre sí. Al igual que una onda electromagnética tiene amplitud y fase o un número complejo está compuesto por dos valores irreducibles, la nueva Economía deberá considerar el coste monetario y el coste exergético como dos criterios cuyo balance final defina las decisiones de una forma responsable tanto económica como ecológicamente.

Por supuesto, no pretendemos reducir la complejidad de la realidad extendiéndola sólo a dos de sus dimensiones. De hecho, la proposición que lanzamos parte de un enfoque multidimensional, en el que además de la exergía y el dinero, otros componentes provenientes de las ciencias sociales, de la ecología o de otros campos del conocimiento podrán estructurar nuevos universos irreducibles, paralelos al monetario. De esta manera, la información conjunta proveniente de este ente multidimensional orientará más adecuadamente los procesos de toma de decisiones de los que dependen nuestras, muchas veces, irresponsables actividades humanas.

Éste es un reto teórico para las generaciones venideras.

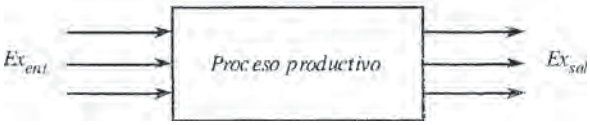
CAPÍTULO 14
PRECISIONES METODOLÓGICAS SOBRE EL COSTE EXERGÉTICO

Antonio Valero

Si el coste exergético es la clave, debemos analizar detalladamente su metodología de cálculo.

En un nivel de agregación dado, podemos identificar un sistema como una caja negra de la que entran y salen flujos energéticos. El Segundo Principio nos dice que la exergía que entra menos la que sale es la irreversibilidad ocurrida dentro del proceso

$$\sum Ex_{ent} - \sum Ex_{sal} = I_{int}$$



Sin embargo, los procesos productivos a escala humana tienen un *propósito:* producir efectos que consideramos útiles. No todos los flujos energéticos de salida son deseados y, lo que es peor, son casi siempre inevitables: los gases de una combustión, el mismo calor que irradian las paredes de una caldera, el ruido de una máquina en marcha y, por supuesto, los residuos sólidos, líquidos o gaseosos que provocan la contaminación de la Naturaleza. Todos ellos tienen exergía y el objetivo último de la producción sería una producción sin residuos, es decir, que hubiéramos agotado la exergía de todos los efluyentes hasta conseguir que estuvieran en equilibrio con nuestro estado de referencia, un ambiente muerto legal del que sabríamos su total inocuidad para la vida en la Tierra. Además de asegurar que la exergía de los recursos se habría utilizado de la mejor forma posible en la producción de productos.

Desafortunadamente esto no es así nunca en términos prácticos actuales y el efecto residual de nuestra producción no sólo existe, sino que desactivar los residuos nos cuesta un consumo adicional de recursos. Volveremos sobre ello.

En un estadio intermedio entre residuos y productos se encuentran los subproductos, éstos, aunque no buscados, tienen un valor de mercado y por ello deben ser también objeto de análisis. Por otra parte, un proceso productivo no tiene por qué producir un solo «producto» sino varios simultáneamente, y dependiendo incluso de las condiciones externas del mercado o de otro tipo dirigir la producción en un sentido u otro.

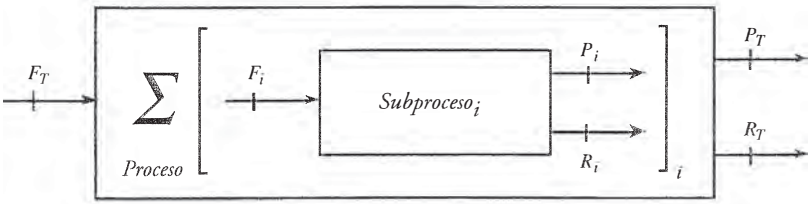
Vemos, por tanto, que el propósito clasifica aquello que es útil de lo que no lo es, y que un mismo proceso puede tener varios propósitos simultáneos o alternativos y finalmente el propósito no es del tipo todo-nada, sino más bien un continuo que va desde el residuo puro hasta el producto también puro.

Todas estas consideraciones *no* están en el Segundo Principio, son una información adicional que debe incluirse en nuestros análisis.

¿Cómo entonces repartir costes entre los distintos productos y residuos de un proceso productivo? Ésta es la pregunta clave de la Termoeconomía, y la exergía juega un papel tan importante en la respuesta que algunos autores prefieren llamar a la Termoeconomía, Exergoeconomía.

Para responder a la pregunta, debemos recuperar la definición de coste como un sacrificio contabilizado de recursos.

Hay que identificar los recursos que se ponen en juego en un proceso. No todos los flujos que entran tienen por qué ser recursos, pueden ser, por ejemplo, producto sin elaborar. Tampoco todos los flujos que salen deben estar en la categoría de productos-residuos. Pueden ser recursos sin consumir o agotar. Por otra parte, no todos los recursos se utilizan al principio del proceso productivo, sino que puede ser en etapas intermedias, de la misma manera que los residuos y subproductos pueden producirse en estadios intermedios. En otras palabras, la identificación del propósito productivo afecta también a la clasificación de los flujos de entrada como recursos o no y además que el modelo de caja negra no es válido definitivamente. Es necesario desagregar, identificando en cada subproducto qué es recurso, *F*, producto, *P*, y residuo, *R*.



También para cada subproducto, y obviamente a nivel global, se cumple el Segundo Principio, pero ahora la clasificación de los flujos de entrada y salida como recursos, productos y residuos añade una información adicional, el propósito productivo, que no estaba en el puro balance que proporciona la Termodinámica.

$$F = P + R + I \quad \left[\begin{array}{ll} F_i = P_i + R_i + I_i & \textit{(Subproceso)} \\ F_T = P_T + \sum R_i + \sum I_i & \textit{(Proceso agregado = Sistema)} \end{array} \right.$$

Éste es un primer paso para el reparto de costes. A partir de aquí el proceso de análisis de costes es muy simple. Se pueden seguir unas reglas de asignación para casos sencillos y para casos complejos existe un procedimiento matemático general que incluye los anteriores como caso particular (véase, p. ej., Valero, Torres y Serra, 1992). Estas reglas se basan en la utilización del concepto de exergía como concepto clave en la asignación de costes.

Regla 1. El coste exergético es una propiedad conservativa. Por tanto, el coste de los flujos de entrada debe repercutirse íntegramente en los de salida de un sistema.

Si indicamos con un asterisco el concepto de coste exergético de un flujo, entonces:

$$F^* = P^* + R^*$$

Ya que las irreversibilidades internas no son un flujo que atraviese los límites del sistema.

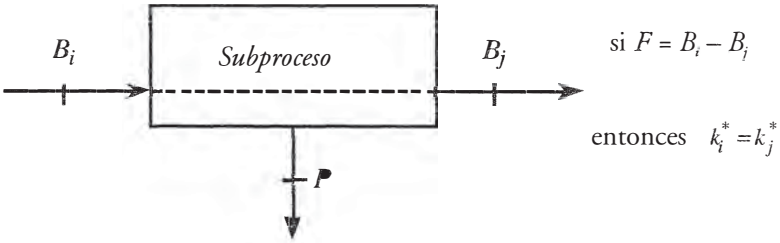
Regla 2. El coste exergético de los recursos que entran a un sistema es igual a su exergía:

$$F_T^* = F_T \quad \text{, o bien} \quad k_{F_T}^* = 1$$

Designando k^* como coste exergético unitario.

Esto se debe a que queremos calcular el coste de los productos referido a unos límites de análisis. El proceso de producción de los recursos anterior a estos límites no es objeto de consideración en este análisis particular.

Regla 3. (De los recursos): Todo recurso no consumido en un subproceso tiene el mismo coste exergético unitario que el recurso de entrada del que proviene, es decir:

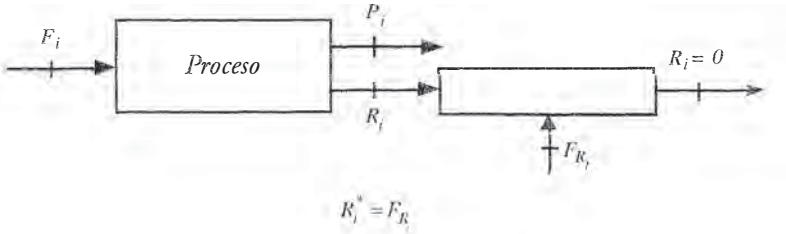


siendo B_i y B_j las exergías de los flujos que constituyen el recurso y genéricamente $k^* = B^*/B$.

Regla 4. (De los productos): Todos los productos producidos simultáneamente en un subproceso tienen el mismo coste exergético unitario, es decir:

En otras palabras, que el reparto de costes de producción se realiza en proporción a la exergía de los productos producidos simultáneamente y no en proporción a la energía o la masa u otra propiedad particular del proceso.

Regla 5. (De los residuos): El coste exergético que se asigna a los residuos es la cantidad de recursos que específicamente son necesarios para deshacerse de ellos, es decir:



El cálculo de costes no puede estar completo sin la internalización de los costes de los residuos. La práctica industrial y la contabilidad económica consiguiente pueden aceptar o incluso les conviene dejar los residuos

sin desactivar aun a riesgo de pagar una multa por ello. Cuando buscamos el verdadero coste de las cosas, su coste exergético, no podemos hacer esto porque la Naturaleza no entiende de saldos económicos. Los costes exergéticos deben ser internalizados, los económicos dependen de las leyes y de la voluntad de los individuos.

Por ello, paralelamente al proceso de producción de productos existe el proceso de producción de residuos que deben ser desactivados a costa de consumir recursos adicionales. Es decir, en realidad existen dos ecuaciones:

$$\begin{array}{ccccc} F & - & P & = & R + I \\ F_R & + & R & = & I_R \\ \hline (F + F_R) & - & P & = & (I + I_R) \end{array}$$

Al igual que un producto no se forma en la frontera de salida de un sistema, tampoco lo hace un residuo. Por tanto, igual que existe el «proceso de formación del coste de los productos», también existe el «proceso de formación del coste de los residuos».

Este fenómeno es muy interesante porque los residuos se forman en alguna parte del proceso productivo pero se exhaustan generalmente en otra. El principio de «quien contamina paga», también debe aquí aplicarse. Por ello las ecuaciones anteriores deben considerarse a nivel de subproceso.

Las implicaciones filosóficas también son interesantes. Aunque el coste exergético se asocia a las irreversibilidades que han tenido lugar para producir un producto, es decir:

$$B^* = B + I$$

la *localización* de las irreversibilidades no tiene por qué coincidir con su *causalización* y, por tanto, con su coste. En el caso de la producción de residuos es clara. Si una empresa emite efluentes que son finalmente diluidos por el medio ambiente a costa de daños irreparables o no, la degradación del medio es la irreversibilidad, I_R, producida en ese proceso, pero la causa no está en el medio ambiente, obviamente está en el proceso productivo que generó esos efluentes. *El coste exergético es una medida cuantificada de la causalidad.*

De acuerdo con Aristóteles, existen cuatro causas, la «causa materialis», que fácilmente puede identificarse con los recursos empleados; «causa finalis», que se asocia al «para qué» se han consumido los recursos, que es obviamente el objeto de la producción o producto; la «causa efficiens», que se asocia al mecanismo físico que hace posible la producción y cuya cuantificación está en la irreversibilidad del proceso y es una medida de nuestra ignorancia; y finalmente la «causa formalis», que se relaciona con la estructura y organización física del proceso productivo y cuya imagen es el modelo matemático que permite que se relacionen los flujos de entrada con los de salida del proceso.

Aunque el modelo clásico de causalidad se ajusta bien a la estructura *F-P-R* aquí descrita, no debemos olvidar el «effectum residualis» que Aristóteles olvidó. Todo proceso productivo es a la vez un proceso de producción de residuos, y en último extremo todos los productos terminan convirtiéndose en residuos, así que al final

$$P = R,$$

y como dice Georgescu-Roegen (1971), la causa final de la producción humana es «el disfrute de la vida».

En resumen, hemos visto que para calcular los costes exergéticos es condición necesaria el Segundo Principio a través del concepto de exergía, pero la suficiencia sólo se alcanza cuando clasificamos los flujos de un proceso productivo en tres categorías: recurso, producto y residuo. Fijados los límites de análisis existen unas reglas de cálculo de costes cuya razón se soporta finalmente en una teoría físico-matemática formalmente similar a la teoría Input-Output de Leontieff (1966), bien conocida por los economistas convencionales, y que utiliza la exergía como medida universal de los flujos energéticos que se intercambian en los procesos.

Los conceptos recurso, producto y residuo dependen del propósito productivo del sistema analizado. Un producto se convertirá en residuo dependiendo del uso y valor que le demos. De la misma manera un recurso de un proceso productivo ha sido en algún momento producto de un proceso anterior. Fijar los límites de análisis no es suficiente, el *quid propositum* necesita también ser definido.

CAPÍTULO 15
ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Antonio Valero

El análisis de ciclo de vida, en adelante ACV, nació oficialmente en 1991 a partir de un informe de la SETAC (Fava *et al.,* 1991), la Sociedad para la Química y la Toxicología Ambiental en el que se detallaba la forma de hacer evaluaciones para determinar el impacto en recursos, ambiental y toxicológico de los productos a lo largo de su ciclo de vida. La idea consistía en estudiar sistemáticamente, desde «la cuna hasta la tumba», todos los productos industriales, desde la producción y distribución, hasta su uso y final evacuación.

A pesar de su reciente aparición, el ACV se va a ir imponiendo como una herramienta clave para la producción industrial sostenible, ya que en el diseño de nuevos productos será crítico conocer y minimizar los impactos medioambientales, los impactos sobre la salud ocupacional y aquellos otros relacionados con el consumo de recursos. El ACV se configura así como un instrumento de vital importancia para una gestión ambiental responsable dentro de las empresas. Además se presenta como base objetiva para un eco-etiquetado de los productos, que tenga como objeto suministrar este tipo de información física al consumidor final. Para más información, ver referencias Boustead (1994, 1996), Alting y Legarth (1995) y Spold (1993).

La metodología del ACV se divide en cuatro etapas: definición de objetivos y alcance, inventario, análisis de impacto ambiental y estudio de alternativas de mejora.

La primera etapa es crucial porque se trata de fijar la atención sobre un producto, servicio o proceso sobre el que se quiere incidir, definiendo los límites de análisis, así como los objetivos perseguidos. Los resultados y su coherencia deben ser acordes con ellos.

El análisis de *inventario* es el trabajo más sistemático, para el cual ya existen programas informáticos comerciales que facilitan mucho el trabajo, no obstante, siempre se requiere una labor de campo de toma de datos. En esta etapa los esfuerzos se encaminan hacia un análisis del sistema total, examinando desde los procesos de producción de materiales y energía, pasando por aquellos otros relacionados con la producción, el transporte, la distribución y el mantenimiento, hasta culminar con el análisis de los procesos de reutilización, reciclado y tratamiento de residuos. En ellos se identifican las entradas como materias primas, agua y energía, y las salidas como productos utilizables, efluentes líquidos, emisiones a la atmósfera, residuos sólidos, así como otros impactos como ruido, calor, etc. Esta etapa de análisis de inventario presenta cuatro focos de interés. En primer lugar, la definición de la unidad funcional sobre la que se quiere hacer el análisis, junto con su utilidad, las unidades a utilizar, etc. Segundo, la identificación del diagrama de flujos del ciclo de vida. Tercero, la categorización de los datos como recursos energéticos, materias primas y emisiones. Cuarto, la calidad de los datos en los que se incluye la precisión, el alcance, las fuentes, las unidades de medida, la moneda, aplicabilidad geográfica, etc. Este último punto es quizá uno de los más importantes, y sin embargo se perfila como la más fuerte limitación del ACV actual.

La tercera etapa en el ACV consiste en la *evaluación del impacto ambiental*, EIA (Powell, Pearce y Craighill, 1997), de todo el proceso. Es definitivamente la más controvertida porque unos valores objetivos de emisiones y de agotamiento de recursos puede tener una significación u otra dependiendo de los intereses, circunstancias y escala de valores de quien lo realiza y sobre todo de quien lo paga. A pesar de ello existe una metodología sistemática que ve los efectos locales, regionales y globales, analizando las acciones sobre la ecología/naturaleza, la salud humana, la salud social y los recursos. En la EIA del ciclo de vida no se intenta determinar las relaciones causa-efecto porque los efectos en cascada desde lo local a lo global existen pero se van diluyendo y con ellos la responsabilidad. La emisión de SO_2 es un dato objetivo obtenido del inventario pero el efecto de lluvia ácida depende cualitativa y cuantitativamente de circunstancias, su impacto sobre la muerte de los bosques estará a su vez cruzada con efectos de sequía o de plagas o de limpieza de los bosques o de otros contaminantes puestos en juego. A su vez, la enfermedad o muerte de un

bosque afecta a la fauna, flora y habitabilidad de una zona y su erosión. A nivel global influye sobre el incremento del efecto invernadero. Consecuentemente, la EIA del ACV utiliza indicadores de impacto y cuantifica «estresores» como el equivalente de CO_2 para medir el potencial de calentamiento global, el equivalente en CFC-11 para medir el potencial de daño a la capa de ozono, el equivalente en SO_2 para la acidificación de los suelos, el equivalente N/P para la eutrofización de las aguas, una serie de equivalentes de toxicidad humana, o simplemente metros cuadrados de área afectada por ruido u otros impactos.

Para realizar la EIA se utilizan esencialmente cuatro tipos de aproximación a la valoración. La primera consiste en definir un objetivo ideal y realizable de impacto –por ejemplo, la legislación europea actual– y medir la distancia al objetivo en porcentaje. Este procedimiento tiene varios inconvenientes: se asume implícitamente que todos los indicadores tienen el mismo peso, lo cual no es cierto ni desde un punto de vista económico ni ecológico. El objetivo puede ser muy discutible porque puede estar sometido a nuestra ignorancia y sobre todo a intereses. A pesar de ello, es un método práctico y sencillo que no arroja valores absolutos, pero sí da valores relativos que hacen reaccionar rápidamente. La segunda valoración consiste en analizar los costes económicos necesarios para controlar los impactos. Ello requiere ponerse de acuerdo en unos estándares de emisión como en el método anterior o ambiente legal de referencia y analizar el coste económico de la mejor tecnología disponible para mitigar las emisiones. Este procedimiento, aunque más objetivo que el anterior, adolece también de la subjetividad del estado de la tecnología, del conocimiento de los estándares y de la variabilidad de la unidad de medida: la moneda.

La tercera valoración es aún más compleja y altamente discutible, pues se basa en los métodos de valoración que utiliza la economía ambiental para internalizar los costes que se originan por el deterioro que provocan nuestras actividades en el medio ambiente. Como es muy difícil disponer de estos datos en la mayor parte de los casos, éstos se sustituyen por la medida del «deseo de pagar» que tienen los consumidores por evitar el daño. Para ello se puede preguntar directamente al público lo que está dispuesto a pagar por un servicio o por una prohibición. O también se pueden utilizar otros métodos indirectos de valoración. Entre éstos se encuentran el método del coste de viaje (muy utilizado cuando se trata de parajes naturales utilizados para recreo), la estimación de los costes de reposición de un bien dañado para devolverlo a su estado original, la valoración del incremento de coste por un incremento de calidad de vida, o bien la utilización de precios de mercado para valorar los impactos ambientales cuando se conocen relaciones entre dosis y respuesta. Estos procedimientos son aún más subjetivos, pero incluyen al público y su opinión, lo que en cierta manera transfiere la responsabilidad de los impactos a la causa

final que los produce, el deseo de la gente por disfrutar de productos o de la Naturaleza o de un combinado sostenible o equilibrado de ambos. El fiel de la balanza se dejaría así hipotéticamente en manos del público. No nos extenderemos aquí exponiendo la gran cantidad de críticas y objeciones que desde el propio seno de la Economía han suscitado estos métodos de valoración, sobre todo desde las filas de aquellos que poco a poco se han ido adhiriendo al nuevo paradigma de la Economía Ecológica.

La cuarta valoración sería un equilibrio entre la opinión sopesada de un grupo de expertos, que podría incluir a grupos ambientalistas, de consumidores y de negocios, reflejando así opiniones científicas y sociales en el resultado final. Aunque el procedimiento parece muy subjetivo, se le pueden aplicar técnicas de la teoría de la decisión que hacen más explícitos los juicios de valor. A pesar de ello casi nunca los experimentos realizados han sido repetitivos.

Objetividad, viabilidad, transparencia y repetibilidad son los criterios que aboga la sociedad para la promoción del ACV, mientras que otros autores como Powell *et al.* (1997) proponen la transparencia, practicalidad, extensividad, consistencia con el objetivo y aceptabilidad con los objetivos sociales.

Como se ve, en todos los métodos de valoración se busca en mayor o menor extensión el consenso social, desafortunadamente estamos lejos de la Física en la que la única cuestionabilidad de las medidas es el error en su medición y no la opinión del medidor.

La cuarta etapa del análisis del Ciclo de Vida es la de *evaluación de mejoras*. Al final es el objeto de todo el proceso. Lo que se trata es diseñar para un medio ambiente sano, guiar al consumidor en la elección de productos incluso a través del ecoetiquetado y favorecer con datos objetivos a aquellas empresas, gobiernos y sociedades que sean responsables con su medio ambiente y las generaciones posteriores.

El ACV es un procedimiento elegante y atractivo y aún de uso restringido y la mayor parte de las veces cualitativo. No obstante, sólo pensar en el ciclo de vida de un producto ya es suficiente como para cambiar el punto de vista de todos los agentes sociales. Desde el consumidor hasta el empresario, y desde el acto de venta hasta la decisión política. Sus implicaciones en la ingeniería de materiales, de diseño y finalmente en los hábitos de consumo se irán notando progresivamente.

La Organización Internacional de Estándares (ISO) ha preparado la norma ISO 1404x, que consiste en las cuatro etapas del ACV explicadas. ISO 14040, documento básico; ISO 14041, inventario; ISO 14042, evaluación y valoración de los impactos ambientales; e ISO 14043, interpretación de resultados.

Con ello se dará un espaldarazo al ACV y será una condición clave para establecer la confianza sobre sus resultados, lo que permitirá avalar las reclamaciones de superioridad ambiental de unos productos sobre otros.

CAPÍTULO 16
EL ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL «CICLO DE VIDA» Y EL «COSTE ECOLÓGICO»

Antonio Valero

La metodología y el rápido desarrollo del análisis del ciclo de vida es una buena base para el análisis del coste ecológico de los productos. *Entendemos por «coste ecológico de un producto, o más estrictamente coste exergoecológico» a la exergía que necesita ser utilizada a lo largo de su ciclo de vida, desde que se extraen las materias primas que lo conforman, hasta que éstas se devuelven a la Naturaleza completamente repuestas.*

El coste ecológico de un producto se expresará en unidades energéticas, y su valor final se obtendrá a través de la suma de tres magnitudes: la exergía invertida a lo largo del ciclo de vida del producto, la exergía de abatimiento de los residuos generados tras el ciclo de vida y el coste exergético de reposición de los materiales utilizados en la formación del producto.

El proceso de cálculo de costes ecológicos podría esquematizarse en la figura 16.1.

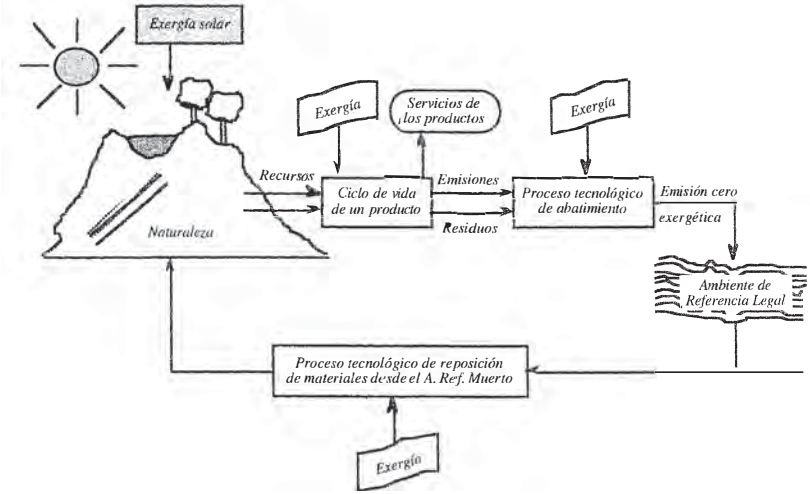
La exergía que destruimos a lo largo de los procesos productivos puede provenir de nuestros *stocks* de combustibles fósiles y demás recursos naturales, o puede proceder del Sol. En nuestra noción de coste ecológico, registraremos las pérdidas de exergía asociadas al empleo de recursos de origen mineral, y no contabilizaremos la exergía utilizada proveniente del Sol, pues es exergía que, la utilicemos o no, va a acabar degradándose.

Se trata, por tanto, de aplicar la lógica de la circularidad y de la interdependencia que caracteriza a la biosfera, reproduciendo e imitando su comportamiento. Y esto sólo lo podremos conseguir si cerramos los ciclos de materiales reduciendo la cantidad de recursos naturales utilizados, a la vez que disminuimos la intensidad exergética de esos ciclos, tendiendo a articularlos mediante la energía procedente del Sol, la única verdaderamente renovable. Nuestro camino hacia la sostenibilidad pasará por reducir al mínimo los valores de los costes ecológicos de nuestros productos.

Hemos visto en el capítulo anterior cómo el inventario del ciclo de vida va a convertirse en una herramienta común. Sin embargo, no va a ser

Figura 16.1

ESQUEMATIZACIÓN DEL CÁLCULO DEL COSTE ECOLÓGICO



suficiente porque el inventario define como entradas materias primas y productos energéticos más o menos elaborados que no están en la Naturaleza y define como salidas efluentes gaseosos, líquidos o sólidos junto con otros de naturaleza energética no material como ruido, calor, vibraciones, radiaciones que tampoco están en el ambiente legal que consideremos como estado de referencia.

En el primer caso, la objeción no parece tal, ya que toda materia prima energética procede de una industria de transformación que ha necesitado otros productos energéticos y materias primas para extraer de la Naturaleza los recursos de los que proceden los primeros. En ese sentido, se sabe el coste de extracción, ya que es un proceso industrial más. Pero aquí, el ACV cae en una falacia común al análisis económico. En efecto, el coste se calcula sumando todos los recursos que han sido necesarios para producir un producto. A su vez, los recursos son productos de algún proceso anterior, por tanto, llevan su coste. Cuando llegamos a la Naturaleza de la que proceden los recursos primigenios, al no disponer de un coste de ellos, la Economía les asigna un *precio*, así que en este punto se rompe la cadena lógica. Los costes económicos de los productos no están formados a partir de los costes naturales, sino de los precios que alcanzan las materias primas en el mercado y que reflejan tanto situaciones de escasez o de abundancia en el mercado –que no en la Naturaleza– como situaciones de poder e influencias de índole humana. En otras palabras, la economía humana, al sustituir el precio por el coste

natural de los recursos, distorsiona ya desde la base todo reflejo de la Física. Como la Naturaleza no entiende de dinero, ¿qué sentido tiene pagarle por los fondos que nos provee? Si un bosque tiene propietario, a quien hay que pagarle es al dueño del bosque por talarlo, no a la Naturaleza que lo produjo.

En cuanto al ACV, su contabilidad no es crematística, sino de materiales, pero, al llegar a la Naturaleza, declara cantidades heterogéneas e irreducibles. Por ejemplo, toneladas de carbón, de crudo, de bauxita, de mena de hierro, etc.

No obstante hemos visto que una mina, por el hecho de tener un mineral en una concentración diferente a la del estado muerto de referencia tiene exergía, también la tiene por estar en una composición química, y unas condiciones termoquímicas diferentes de las del estado de referencia.

La Naturaleza sólo entiende de reposiciones, así que, al nivel tecnológico actual, la cantidad de exergía que sería necesaria para reponer la mina a su estado natural es su coste tecnológico de reposición. Más adelante desarrollaremos la metodología para calcular la exergía de los recursos naturales. También los recursos naturales tienen un coste exergético unitario –el resultado de dividir su coste exergético de reposición por su exergía– y si no lo tenemos en cuenta nunca podremos saber cuál es el verdadero coste ecológico de los productos que utilizamos.

De la misma manera el proceso de inventario del ACV informa de las emisiones producidas, sin hacer un juicio de valoración de las mismas, luego será la etapa de evaluación de impacto ambiental la que valorará los efectos. También aquí el análisis se queda corto desde el punto de vista del coste ecológico porque las emisiones tienen exergía con respecto al ambiente muerto de referencia que hayamos acordado, y, lo que es más importante, necesitamos exergía para mitigarlos hasta dicho ambiente. Así que el coste ecológico debe internalizar estos costes también.

Tal y como mostramos en el gráfico 16.1 la metodología de análisis exergético del ciclo de vida de un producto engloba y supera a los análisis de ciclo de vida que habitualmente se manejan, quienes a su vez amplían los análisis económicos convencionales.

El análisis exergético del ciclo de vida se configura así como un punto de encuentro entre distintas disciplinas. Pues este análisis se basa en una contabilidad física de los materiales y energía que alimentan los ciclos productivos (información que suministran los actuales ACVs), en un conocimiento de las técnicas de ingeniería más avanzadas (sobre todo en el proceso de reciclaje y abatimiento de residuos), y en una contabilidad del patrimonio natural en clave geofísica (para el cálculo de los costes exergéticos de reposición). Todos estos datos se unifican y se estructuran mediante la Teoría del Coste Exergético, para finalmente alumbrar un valor, el del coste ecológico, que bien podrá utilizarse como un indicador de la sostenibilidad de nuestras actividades.

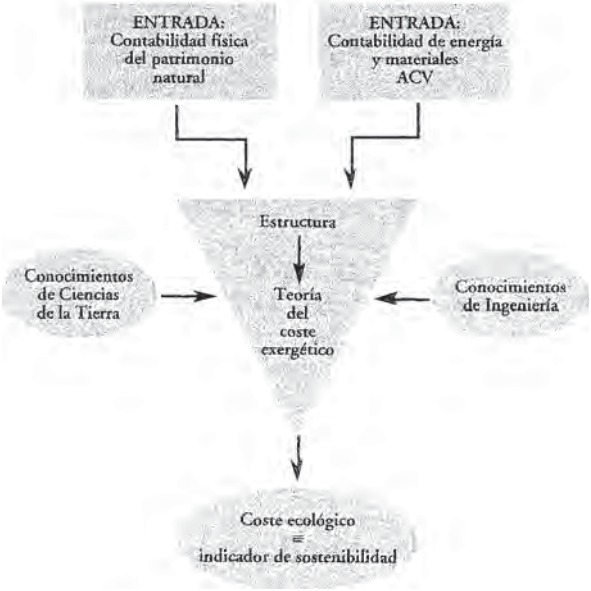
Gráfico 16.1

EL ANÁLISIS EXERGÉTICO DEL CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO Y SU RELACIÓN CON OTROS ANÁLISIS AL USO

Gráfico 16.2

ESTRUCTURA DEL ANÁLISIS EXERGÉTICO DEL CICLO DE VIDA

ANÁLISIS EXERGÉTICO DEL CICLO DE VIDA



El proceso aquí descrito de cálculo de coste ecológico puede afianzarse con algunas observaciones:

a) Todos los procesos tienen su cuantificación exergética, nada que ver con el dinero; por tanto, los resultados que se obtengan no serán dependientes de juicios de valor individuales, sino de las convenciones acordadas para los cálculos exergéticos.

b) Tanto el proceso tecnológico de abatimiento de emisiones como el de reposición de materiales corresponden a la tecnología actualmente disponible. Es evidente que cuanto más avanzadas estén las técnicas de tratamiento de residuos y las de reciclado, menor serán los costes ecológicos. Por ello es muy importante desarrollar estas tecnologías, para hacer sostenible la presencia del hombre en la Tierra.

c) Si la exergía necesaria para completar el ciclo ecológico viene de los propios recursos naturales: agua dulce, minas, recursos energéticos fósiles, madera, etc., parece una contradicción separar el concepto de exergía del de recurso natural, sin embargo, es conveniente distinguir entre flujos y *stocks,* al igual que lo hace la economía convencional. El hombre en la Tierra vive del capital natural que se ha formado a lo largo de millones de años gracias sobre todo a los aportes de la energía solar.

Al final el único flujo externo verdadero es la energía proveniente del Sol. Si la exergía necesaria para completar el ciclo ecológico de los productos humanos fuera de origen solar porque hubiéramos desarrollado la tecnología correspondiente, estaríamos más próximos a la sostenibilidad de la Tierra. No obstante, ésta nunca se alcanzará hasta que no repongamos efectivamente los materiales que utilicemos. Ya que si no lo único que haríamos es frenar la máquina de la irreversibilidad termodinámica pero no anularla.

Ya hemos visto en capítulos anteriores que recibimos energía solar suficiente como para cerrar el ciclo. La potencia solar es más de mil quinientas veces mayor a toda la potencia energética que por todos los conceptos usa hoy la civilización humana.

d) Al igual que la Naturaleza es cíclica en el tratamiento de sus materiales –el carbono, el nitrógeno, el agua, etc.–, debemos aprender a completar el ciclo de nuestra producción e integrarlo en la propia Naturaleza.

Si la especie humana no comprende esto y desarrolla la tecnología necesaria en pocas generaciones, haremos imposible su supervivencia en la Tierra. La sostenibilidad de la civilización humana en la Tierra está en la ciclicidad de los materiales que utiliza, y hay energía del Sol suficiente para completarla.

e) Muchos analistas de ciclo de vida han rechazado la reducción a un número de todos los resultados de su inventario. Como dice Alting (1995): ...y si lo tuviéramos, ¿qué haríamos con él? O Boustead (1994),

que aboga que el reduccionismo hace perder información significativa. No obstante, se acepta sumar la energía en kilowatios-hora o las emisiones en equivalentes de CO_2, o de SO_2 o de CFC-11 o las materias primas en toneladas. Es evidente que dependiendo de la aplicación que se le dé a los resultados del ACV, estos autores están o no en lo cierto.

El análisis del coste ecológico no es una reducción, sino una aplicación más del ACV. Y podría ser utilizado como índice absoluto de sostenibilidad del hombre en la Tierra y de los materiales que utilizamos en nuestra civilización.

En las industrias, en los países y a nivel global se realizan balances energéticos y de emisiones con objeto de realizar diversos análisis económicos y ambientales. Son balances de materia y energía, es decir, basados en el Primer Principio de la Termodinámica. El desorden y la irreversibilidad producidas sólo se imaginan como resultado lógico. En términos cualitativos se razona que se utilizan sustancias de baja entropía de la Naturaleza y se devuelven a ella materiales de alta entropía.

El Segundo Principio de Termodinámica es el gran olvidado cuantitativo en los análisis, porque esencialmente no se sabe cómo utilizarlo.

Con la metodología del coste exergético es posible saber el coste ecológico de un producto o servicio –desde la Naturaleza hasta la Naturaleza– en contraposición del ACV que dice –desde la cuna hasta la tumba–, es decir, desde la Naturaleza no degradada hasta una degradada.

El Segundo Principio también puede aplicarse en forma de balance y con unidades energéticas. Y puede aplicarse a un producto, a una industria, a un país o a escala global. El coste ecológico informa de la exergía total necesaria para producir un producto desde la Naturaleza no degradada hasta ella misma.

Y como al final todos los productos terminan volviendo a la Tierra de donde vinieron, lo que queda es el servicio que realizaron mientras estuvieron en su ciclo y... la exergía que destruyeron, es decir, la irreversibilidad que provocó su producción contabilizada en los términos de coste ecológico.

El coste ecológico internaliza tanto los costes de abatimiento de residuos como de reposición de materiales y cuanto mayor sea más insostenible es la producción. Sólo la exergía solar no entra en las cuentas. Una civilización sostenible sería aquella cuyos costes ecológicos fueran nulos, es decir, que viviera de la energía del Sol y que utilizara a éste para reponer los materiales.

Una civilización sostenible no significa una sociedad primitiva, sino, por el contrario, puede tratarse de una sociedad tecnológicamente muy avanzada. Para reducir costes se necesita un conocimiento profundo de los mecanismos de los procesos y al final veremos que son los procesos biológicos los menos irreversibles y de los que más hay que aprender. Tarde o tem-

prano el hombre aprenderá a desechar los procesos energéticamente muy intensivos y sustituirlos por otros que soslayen la conversión energética a través de ciclos térmicos. Nos aproximaremos a la reversibilidad a través de la eficiencia energética y ésta se alcanza a base de aumentar *ad infinitum* nuestro conocimiento sobre los mecanismos de formación de las sustancias.

La tecnología, sin embargo, sólo podrá liberarnos si está dirigida por una ética que haga del Sol, en última instancia, la única fuente energética admisible. Para ello necesitamos números que indiquen lo próximos o alejados que estamos de esa sostenibilidad. El coste ecológico es la herramienta clave. Sería importante un programa de investigación para su desarrollo.

CAPÍTULO 17
EL «COSTE ECOLÓGICO» DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA. UN EJEMPLO DE CÁLCULO

Antonio Valero

Las anteriores consideraciones serían meramente teóricas si no se soportaran con una metodología de cálculo de costes exergéticos en todos los procesos del ciclo del material.

Los combustibles fósiles son el caso más común y más simple de analizar. La exergía de un combustible fósil es bien conocida y prácticamente coincide con su potencia calorífica superior. Por otra parte, su exergía de concentración es fácil de calcular de acuerdo con las fórmulas dadas en apartados anteriores, este término es pequeño en comparación con su contenido exergético, pero resulta decisivo a la hora de considerar la explotabilidad económica del yacimiento, porque el trabajo necesario para extraerlo, es decir, su coste exergético aumenta exponencialmente con la ley del mineral en el yacimiento. En cualquier caso, para calcular el coste exergético de extracción de un carbón, será necesario añadir a la exergía directa e indirecta empleada en la extracción de la mina, la de transporte, lavado de estériles, acondicionado en parque y la de otras actividades. Si el carbón se utiliza para la producción de energía eléctrica, y la planta por lo general está cerca de la mina, el coste exergético de una unidad de exergía de carbón puede estar entre un 10 y un 25% superior, es decir, su coste unitario será $1{,}10 \leq k_C^* \leq 1{,}25$.

La producción de energía eléctrica actualmente tiene una eficiencia energética entre un 33 y un 40%, lo que el coste exergético unitario de una unidad de exergía eléctrica está entre 3 y 2,5, así que el proceso completo desde la mina hasta la energía eléctrica puesta en bornes de la central tendrá un coste unitario

$$k_{EE}^* = k_{CE}^* \cdot k_C^*, \quad 3{,}75 \leq k_{EE}^* \leq 2{,}75$$

Los procesos de desulfuración y lavado de gases pueden llevarse incluso hasta un 10% de la energía eléctrica producida, es decir, el proceso de abatimiento de emisiones eleva el coste de la energía eléctrica puesta en bornes de la central a aproximadamente:

$$4{,}1 = k^*_{EE} = 3{,}3$$

El transporte de la energía eléctrica al consumidor puede llevarse hasta un 8-10% adicional, lo cual resulta en

$$4{,}4 = k^*_{EE} = 3{,}6$$

Actualmente, éste es el coste exergético unitario de la energía eléctrica que utilizamos y que al final terminamos degradándola en forma de luz, movimiento o calor. Todo ello suponiendo que la misma utilización de la energía eléctrica no tenga efectos colaterales.

Sin embargo, en este análisis hemos omitido completar el ciclo del carbono. En efecto el CO_2 emitido a la atmósfera es una molécula de dióxido de carbono por molécula de carbono quemada, o bien 44 g de $CO_2/12\ grC$. Para hacer sostenible el proceso es necesario fijar dicho CO_2 en C nuevamente y el coste exergético final de la energía eléctrica debe reflejar también este proceso –al igual que el de todas las emisiones y consumos adicionales realizados, por cierto–. Centrándonos en el caso del CO_2, en vez de preocuparnos por el efecto invernadero que produce si dejamos el proceso sin cerrar, es necesario preocuparse porque la producción de energía eléctrica cierre el ciclo. Reconstruir a partir del CO_2 las complejas cadenas de los hidrocarburos exigiría muchísima más exergía de la que liberan en combustión, con lo que la ineficiencia de esta fuente saltaría a la vista si hubiera que reconvertir los residuos en recursos. Esto sólo cabría hacerlo a partir de la energía solar, mediante la fotosíntesis (véase Apéndice II. Sobre la producción de combustibles a partir de la radiación solar). En este caso, la mejor tecnología disponible y la más barata es la plantación de árboles. Donde una vez estuvieron las minas de carbón, habrá que restaurar los terrenos y plantar bosques como los que hace millones de años se convirtieron en carbón. A modo de ejemplo el balance de CO_2 de España está desequilibrado entre lo que se emite y se fija en alrededor de 2 a 6 veces (Valero, Subiela y Cortes, 1994). Esta imprecisión está relacionada con la necesidad urgente de este tipo de cálculos que transcienden del campo de la energía, al plantear exigencias de espacio y de tiempo. Como la fijación de CO_2 se hace con energía solar, y nosotros sólo contabilizamos la exergía de origen no solar, el coste exergético adicional que debe ser cargado a la energía eléctrica es relativamente bajo ya que aquí sólo se contabilizarán las energías del transporte, plantación, tratamientos silvícolas, etc. En cual-

quier caso, el coste ecológico unitario de la energía eléctrica a partir del carbón puede estar entre aproximadamente:

$$5 = k^*_{EE} = 4$$

Y éste es el caso quizá más simple de análisis. La producción de energía eléctrica tendrá un coste ecológico próximo a 1-2 si su origen es renovable, hasta simplemente desconocido si su origen es nuclear, porque, ¿cuál es el coste exergético de destruir los residuos nucleares?

En contra de lo que comúnmente se piensa, la energía eléctrica no tiene mucho impacto ambiental o, mejor, coste ecológico. En efecto, un coste ecológico unitario de 5 significa que por cada kilowatio-hora utilizado se destruyen cuatro más a lo largo de su ciclo de vida. Teniendo en cuenta la creciente electrificación de la sociedad, significa que cualquier producto que requiera energía eléctrica tendrá al menos ese coste. Por otra parte, la producción de energía eléctrica es uno de los procesos térmicos industriales más eficientes –aunque sólo, como hemos visto, entre 0,33 y 0,40, lo cual está razonablemente próximo a la eficiencia del ciclo de Carnot o máxima alcanzable.

El problema con la energía eléctrica es su producción muy intensiva, con menos de 30 ó 40 centrales de potencia equivalente a *1 GW* se puede suministrar energía a todo un país de tipo medio como España. Sin embargo, esta concentración que aparentemente es un inconveniente, resulta una ventaja a la hora de controlar sus impactos medioambientales. Como hemos visto, la dispersión es un factor clave en la disipación, lo que lleva a un consumo unitario de recursos naturales más elevado y una incapacidad mayor para controlar las emisiones. Otra vez el Segundo Principio juega aquí un papel importante. Compárese con la emisión pequeña pero incontrolable de los gases de escape de cada automóvil. Ni el rendimiento ni el control de las emisiones puede ser tan eficaz en millones de automóviles dispersos como en 30 ó 40 centrales eléctricas a las que se puede someter a un estricto control legal. No siempre lo pequeño es bello. Lo pequeño y natural sí. El Segundo Principio nos puede jugar malas pasadas.

CAPÍTULO 18
BASES PARA UNA METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL «COSTE ECOLÓGICO»

Antonio Valero

Hemos visto cómo la sostenibilidad, desde un punto de vista termodinámico, sólo se alcanzará cuando alimentemos con energía solar el proceso circular sobre el que se asienta la noción introducida de coste ecológico. Nos acercaremos a la sostenibilidad siempre y cuando cerremos los ciclos de materiales reduciendo la cantidad de recursos naturales utilizados. En la disminución de los valores de nuestros costes ecológicos se registrará este cambio de tendencia.

Sin embargo, para calcular el coste ecológico de los productos o servicios que la sociedad nos ofrece, es necesario vencer varias dificultades metodológicas, a saber:

a) El cálculo del coste termodinámico de los recursos naturales utilizados.
b) El cálculo del coste exergético de reposición de los recursos naturales utilizados.
c) El cálculo del coste exergético del ciclo de vida del producto.
d) El cálculo del coste exergético del proceso de abatimiento de los residuos y las emisiones.

Dado que el proceso de inventario del análisis de ciclo de vida provee datos sobre el manufacturado, transporte, uso y evacuación del producto, la etapa *c* será la más sencilla de desarrollar. Las etapas *b* y *d* deberán ser tratadas por especialistas que hagan una prospección de la tecnología medioambiental actual, así como de los procesos biológicos naturales que pueden ser aprovechados para ello. En cualquier caso en las tres etapas *b*, *c* y *d* el problema metodológico no se refiere a la exergía porque ésta quede reducida a una mera contabilidad más o menos compleja.

El mayor problema metodológico de cálculo exergético proviene de la etapa *a*, y es el que vamos a tratar en el siguiente apartado. Más tarde, presentaremos algunos ejemplos del cálculo del coste exergético de reposición.

En cualquier caso, el desarrollo metodológico total requiere un proceso de investigación y una fijación de convenciones que habrán de llevarse a cabo en los próximos años.

Capítulo 19
EL COSTE TERMODINÁMICO DE LOS RECURSOS MINERALES

Lidia Ranz

Como hemos esbozado en el Apéndice I, los recursos minerales constituyen un capital natural limitado en cantidad y de carácter no renovable (al menos respecto a la cadencia generacional humana), por lo que su extracción constituye una pérdida patrimonial de la riqueza mineral con la que la Tierra nos obsequió hace ya algunos millones de años. La importancia de estas sustancias minerales es hoy en día enorme, ya que constituyen el motor y el combustible de la economía mundial. Según datos del capítulo 6, apartado 4 (ver también US Bureau of Mines, 1997), el consumo mundial de materiales extraídos de la corteza terrestre supera ya los treinta mil millones de toneladas anuales, presentando además una alarmante tendencia a la alta. Obviamente, este comportamiento depredador característico de nuestra civilización industrial es inviable en el tiempo. De lo que se deduce que si decidimos reconducir nuestras acciones hacia bases más sostenibles, será menester comenzar por una gestión responsable de las actuaciones relacionadas con los recursos minerales. Gestión que debería partir de un conocimiento lo más riguroso posible de la riqueza mineral del territorio a administrar, contabilizando además las pérdidas de capital que periódicamente provoca la extracción.

Los *stocks* de minerales, así como los flujos generados por la mal llamada «producción» minera, se podrían caracterizar a través de una batería de propiedades físicas. Éstas aportarían información, por ejemplo, acerca del tamaño del yacimiento, de su geometría, de su composición mineralógica, de sus leyes, de la escasez del recurso que contienen, etc. La metodología que aquí proponemos nos permitirá evaluar en unas mismas unidades energéticas dos de esas propiedades físicas de los recursos minerales. En concreto aquellas relacionadas con su estructura y concentración. Dejamos de lado, por tanto, esas otras características que poseen los recursos minerales y que se enuncian someramente en el Apéndice I. A pesar de ello, aun reconociendo sus limitaciones, la metodología energética aquí

propuesta puede configurarse como una herramienta útil para la gestión, eso sí, empleada como un instrumento más a combinar con otros.

Con esta propuesta de valoración energética del patrimonio mineral, y apoyándonos en las nociones de *coste termodinámico* y *coste exergético de reposición*, hemos intentado asentar un primer peldaño metodológico que señale el camino hacia una gestión más sostenible de los recursos minerales y, por ende, de nuestras actividades productivas. Procedamos a desgranar, sin más preámbulos, las líneas maestras bajo las que se va a articular la metodología de cuantificación energética que aquí presentamos.

19.1. Introducción

Los recursos minerales, al interaccionar con el ambiente que les rodea, son capaces de ceder energía, hasta que finalmente se dispersan, y se convierten en sustancias comunes del entorno. Supongamos que llegáramos al hipotético caso en que todos los materiales minerálicos que encierran los yacimientos minerales de la Tierra, se hubieran extraído y explotado, de forma que todos hubieran reaccionado con su ambiente físico circundante. Al final todos se habrían convertido en sustancias comunes de ese ambiente físico, eso sí, completamente desperdigados por la superficie terrestre. La energía que espontáneamente se liberaría en este proceso de reacción y disipación coincidiría con el mínimo trabajo que tendríamos que invertir, en caso de que deseáramos deshacer el proceso, esto es, volviéramos a concentrar y colocar esos minerales en sus depósitos, a partir de ese estado ambiental de máxima disipación.

Como cada tipo de mineral, dependiendo de su composición y de sus condiciones de concentración, tendría un coste mínimo de reposición diferente, esto permitiría una ordenación del variado mundo mineral, que se unificaría bajo una perspectiva energética. De esta manera, los minerales susceptibles de explotación podrían ordenarse de acuerdo con su contenido energético.

Llamaremos coste termodinámico de un mineral al mínimo trabajo necesario para producir ese material, en un estado específico de estructura y concentración, a partir de materiales comunes en el entorno, y de manera reversible. Este mínimo trabajo, que por definición es teórico, es precisamente lo que hemos acordado en llamar en capítulos anteriores exergía de un mineral. Observemos cómo, a la luz de este enfoque, el concepto de coste termodinámico encierra en su interior una valoración energética de dos propiedades físico-químicas de los recursos minerales, como son su composición química específica y su concentración geográfica singular.

19.2. Metodología

La metodología que se va a utilizar para el cálculo del coste termodinámico del recurso mineral contará con una serie de etapas, tal y como se desprende del gráfico 19.1.

Partiremos de un sistema artificial al que hemos llamado Ambiente de Referencia (A.R.), y que presentará una gran similitud con el ambiente físico real. Al igual que éste, el A.R. contará con tres fases: una sólida, otra líquida y una tercera gaseosa. Cada una de estas fases estará compuesta por unas sustancias de referencia (S.R.), que se encuentran en un estado de máxima dispersión. En primer lugar, calcularemos la mínima energía útil necesaria para separar de esa sopa entrópica un conjunto de sustancias de referencia que nos permitan luego construir el compuesto mineral del que buscamos calcular su exergía. La mínima energía útil que tendremos que invertir en esta etapa la llamaremos exergía de concentración de las sustancias de referencia ($b^0_{conc\ S.R.}$). Una vez concentradas y aisladas las sustancias de referencia, romperemos los enlaces que las ligan, de manera que dispondremos ya de los elementos que forman el mineral, aislados. La energía útil teórica invertida en este proceso es de naturaleza química. El mínimo trabajo que hemos tenido que poner en juego para obtener los elementos aislados, a partir de sustancias integrantes del A.R., es lo que se conoce como la exergía del elemento (b^0_{elto}). Una vez que contamos con los elementos aislados, los unimos formando el compuesto mineral deseado. La exergía que se libera en este proceso es también de naturaleza química. El mínimo trabajo que se ha ido invirtiendo progresivamente en cada una de las etapas dará lugar a la exergía total del mineral ($b^0_{mineral}$).

La exergía total del mineral tiene por tanto dos componentes, la *exergía de concentración* y la *exergía de reacción* (de naturaleza química). El valor de la primera nunca suele sobrepasar el 15% del valor de la exergía total, a menos, claro está, que el mineral estudiado forme parte del A.R, en ese caso la exergía de concentración y la exergía total coinciden.

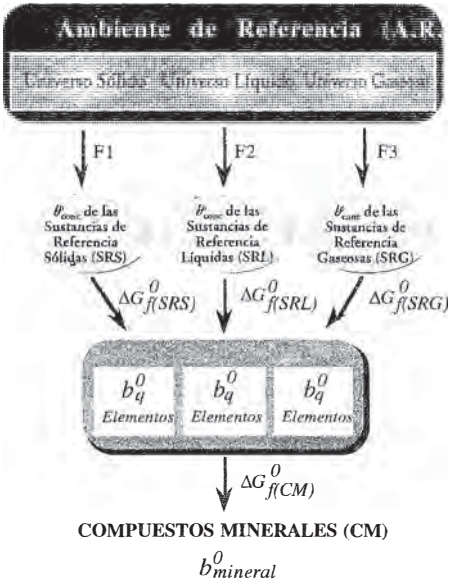
Vamos ahora a analizar con más profundidad cada etapa del proceso de cálculo del *coste termodinámico.*

19.2.1. El ambiente de referencia

El cálculo de la exergía de un mineral requiere, en primer lugar, definir y describir el Ambiente de Referencia (A.R.) del cual vamos a partir. Si queremos evaluar el contenido energético del capital mineral de la Tierra, para posteriormente incluirlo en el análisis energético de las etapas posteriores que transforman dichos recursos minerales en bienes de consumo, deberemos utilizar un A.R. que sea estable y se encuentre en equilibrio, al menos en lo que a escala humana se refiere.

Gráfico 19.1

METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL *COSTE TERMODINÁMICO* DE UN MINERAL



Además, este A.R. deberá escogerse cuidadosamente ya que, aunque su elección no va a influir en las pérdidas de exergía interna del proceso productivo que deseemos estudiar, sí que condicionará las pérdidas de exergía externa, que son las que aparecen cuando los residuos del proceso se abandonan en el ambiente. El entorno con el cual interaccionan los recursos minerales tras ser extraídos por el hombre, es nuestro ambiente físico circundante.

Por lo que se deduce que, puesto que estamos estudiando la interacción de los recursos minerales con un ambiente que es nuestro mundo físico circundante, lo adecuado será elegir un Ambiente de Referencia que sea lo más similar a éste. Por ello, tomaremos el A.R. propuesto por Szargut (1988).

Este A.R. es un universo artificial, adaptado a la realidad humana, y por tanto muy similar al ambiente físico real. A imagen y semejanza de éste, el A.R. está configurado por tres fases de naturaleza distinta: una sólida que se asemeja a la litosfera terrestre, otra líquida correspondiente a la hidrosfera y una tercera gaseosa, que juega el papel de la atmósfera terrestre. Estos subsistemas que forman el A.R. interaccionan entre sí, a la vez que se mantienen en un estado de equilibrio, por lo menos en lo que a escala humana se refiere.

Cada una de estas fases del A.R. está formada por un conjunto de sustancias, que hemos acordado en llamar sustancias de referencia (S.R.), cada una de ellas asociadas a un elemento. Estas sustancias de referencia se encuentran completamente dispersas, y representan los productos de interacción más probables entre los componentes del entorno natural y los productos de desecho de los procesos. Corresponden, por tanto, a las sustancias más abundantes y estables del ambiente físico real. Una vez elegidas las especies de referencia, la reacción de referencia puede formularse para cada elemento.

En el cuadro 19.1 se muestran las especies de referencia que componen el A.R. de Szargut. Del total de 85 elementos químicos tratados, a 53 se les ha asignado especies de referencia sólidas (presentes en la corteza terrestre), a 23 se les ha asignado especies de referencia líquidas (disueltas en el agua de mar), y a 9 especies de referencia gaseosas (gases nobles y componentes de la atmósfera).

Adentrémonos ahora con más detalle en la metodología que nos permitirá, a partir de esa sopa entrópica que es el A.R., separar y aislar de él las sustancias de referencia, que luego darán lugar a los minerales en cuestión.

19.2.2. Cálculo de la exergía de concentración de las especies de referencia sólidas

La fase sólida del Ambiente de Referencia de Szargut va a reproducir, lo más fielmente posible, la litosfera terrestre. Las Sustancias de Referencia Sólidas (SRS) que van a integrar este ambiente artificial, coincidirán con las especies más abundantes y comunes que presenta la litosfera terrestre. Además, se encontrarán en un estado de máxima dispersión. La exergía de concentración de estas SRS será el mínimo trabajo a invertir, para a partir de ese maremágnum que es la fase sólida del A.R., aislar y separar cada una de las sustancias que lo componen.

Para su cálculo supondremos que las sustancias de referencia de la fase sólida se comportan como los componentes de una solución ideal. A cada una de las sustancias de referencia, le asociaremos lo que hemos acordado en llamar *exergía de concentración,* que es la contribución de esa sustancia al coste energético total que supone separar y aislar las sustancias que componen el ambiente de referencia. La exergía de concentración estándar se expresa por mol de la sustancia de referencia a separar y viene dada por la expresión:

$$b^{0}_{concSRS} = - RT_0 \ln x_{SRS} \qquad (26)$$

ESPECIES QUÍMICAS DEL AMBIENTE DE REFERENCIA

Elemento químico Z Nombre	Elto	PM	$n_{p\,i}$ (kmol kg^{-1})	Especies de referencia Fórmula química	s/g/l	ε	γ	p	m	x	b^0_{conc} (S.R.) (kJ mol^{-1})	ΔfG^0 (kJ mol^{-1})	Estado	Exergía (kJ mol^{-1})
1 Hidrógeno	H	1.01		H_2O	g			2.2			9.49	-228 59	H2, g.	236.09
2 Helio	He	4		He	g			4.85E-04			30.37	0	g.	30.37
3 Litio	Li	6.94	2.90E-06	Li^+	ac.		0.68		2.50E-05			-294	s.	393
4 Berilio	Be	9.01	3.10E-07	Be_2SiO_4	s.	0.01				2.10E-07	38.1	-2033.3	s.	604.4
5 Boro	B	10.81	9.30E-07	$B(OH)_3$	ac.		1.0		3.40E-04			-968.8	s.	628.5
6 Carbono	C	12.01	1.70E-05	CO_2	g.			0.0335			19.87	-394.36	s., grafito	410.26
7 Nitrógeno	N	14.01	0.00E+00	N_2	g.			75.78			0.72	0	N2, g.	0.72
8 Oxígeno	O	16	0.00E+00	O_2	g.			20.39			3 97	0	O2, g.	3.97
9 Flúor	F	19	3.30E-05	$CaF_2.3Ca_3(PO_4)_2$	s	0.01				2.20E-05	26.6	-12985	F2, g.	504.9
10 Neón	Ne	20.18	0.00E+00	Ne	g.			1.77E-03			27.19	0	g.	27.19
11 Sodio	Na	22.99	1.03E-03	Na^+	ac.		0.68		0.474			-262.05	s.	336.6
12 Magnesio	Mg	24.305	9.60E-04	$Mg_3Si_4O.10(OH)_2$	s.	0.02				2.60E-03	14.8	5543	s.	626.1
13 Aluminio	Al	26.98	3.05E-03	Al_2SiO_5	s.	0.01				2.10E-03	15.3	-2625.9	s.	888.2
14 Silicio	Si	28.09	1.00E-02	SiO_2. a cuarzo	s	0.3				0.407	2.2	-856.7	s.	854.9
15 Fósforo	P	30.97	3.04E-05	HPO_4^{2-}	ac.		0.1		4.90E-07			-1089.3	s.	861.4
16 Azufre	S	32.06	8.10E-06	SO_4^{2-}	ac.		0.11		1.17E-02			-744 6	s., mómbico	609.6
17 Cloro	Cl	35.45	3.70E-06	Cl^-	ac.		0.68		0.5657			-131.26	Cl2, g.	123.6
18 Argón	Ar	39.95	0.00E+00	Ar	g.			0.906			11.69	0	g.	11.69
19 Potasio	K	39.1	5.40E-04	K^+	ac.		0.64		1.04E-02			-282.44	s.	366.6
20 Calcio	Ca	40.08	1.03E-03	$CaCO_3$	s.	0.01				1.40E-03	16.3	-1129	s.	729.1
21 Escandio	Sc	44.96	1.10E-07	Sc_2O_3	s.	0.05				3.70E-07	36.7	-1819.7	s., (alfa)	925.2
22 Titanio	Ti	47.9	1.20E-04	TiO_2.III	s.	0.01				1.60E-04	21.7	-889.5	s., II	907.2
23 Vanadio	V	50.94	2.70E-06	V_2O_5	s.	0.01				3.70E-06	31	-1419.6	s.	720.4
24 Cromo	Cr	52	2.00E-06	$K_2Cr_2O_7$	s.	0.01				1.40E-06	33.4	-1882.3	s.	584.3
25 Manganeso	Mn	54 94	1.70E-05	MnO_2	s.	0.01				2.30E-04	20.8	-465 2	s.	482
26 Hierro	Fe	55.85	1.00E-03	Fe_2O_3	s.	0.1				6.80E-03	12.4	-742.2	s., (alfa)	374.3
27 Cobalto	Co	58.93	4.20E-07	$CoFe_2O_4$	s.	0.005				9.50E-08	40.1	-1032.6	s.., III	312
28 Níquel	Ni	58.7	1.30E-06	Ni^{2+}	ac.		0.2		1.20E-07			-45.6	s.	232.7
29 Cobre	Cu	63.548	8.70E-07	C^{2+}	ac.		0.2		7.30E-10			65.5	s.	134.2
30 Cinc	Zn	65.38	1.10E-06	Z^{2+}	ac.		0.2		1.70E-08			-147.3	s.	339.2
31 Galio	Ga	69.72	2.20E-07	Ga_2O_3	s.	0.02				1.00E-08	37.2	-998 6	s.	514.9
32 Germanio	Ge	72.59	1.40E-08	GeO_2	s.	0.05				9.50E-08	40.1	-521.5	s.	557 6
33 Arsenio	As	74.92	2.40E-08	$HAsO_4^{2-}$	ac.		0.1		2.10E-08			-714.7	s.	494 6
34 Selenio	Se	78.96	6.30E-10	SeO_4^{2-}	ac.		0.01		1.20E-09			-441.4	s.	346.5
35 Bromo	Br	79.9	3.10E-08	Br^-	ac.		0.68		8.70E-04			-104	Br2, l.	101.2

Elemento químico Z Nombre	Elto	PM	n_{p1} (kmol kg^{-1})	Especies de referencia Fórmula química	s/g/l	ε	γ	p	m	x	b^o_{conc} (S.R.) (kJ mol^{-1})	ΔfG^o (kJ mol^{-1})	Estado	Exergía (kJ mol^{-1})
36 Criptón	Kr	83.8	0.00E+00	Kr	g.			9.70E-05			34.36	0	g.	34.36
37 Rubidio	Rb	85.47	1.05E-06	Rb^+	ac.		0.6		1.40E-06			-282.4	s.	388.6
38 Estroncio	Sr	87.62	4.30E-06	$SrCO_3$, II	s.	0.05				2.90E-05	25.9	-1140.1	s.	749.8
39 Itrio	Y	88.91	3.70E-07	$Y(OH)_3$	s.	0.02				1.00E-06	34.2	-1291.4	s., (alfa)	965.5
40 Circonio	Zr	91.22	1.80E-06	$ZrSiO_4$	s.	0.1				2.40E-05	26.4	-1919.5	s., (alfa)	1083.4
41 Niobio	Nb	92.91	2.20E-07	Nb_2O_3	s	0.01				1.50E-07	39	-1766.4	s.	899.7
42 Molibdeno	Mo	95.94	1.60E-08	MoO_4^{2-}	ac.		0.1		1.10E-07			-836.4	s.	730.3
43 Tecnecio	Tc	98.91	0.00E+00											
44 Rutenio	Ru	101.07	1.00E-12	RuO_2	s	0.005				6.80E-13	69.5	-253.1	s.	318.6
45 Rodio	Rh	102.91	9.70E-12	Rh_2O_3	s	0.005				3.30E-12	65 5	-299.8	s.	179.7
46 Paladio	Pd	106.42	9.40E-11	PdO	s	0.005				6.40E-11	58 2	-82.5	s.	138.6
47 Plata	Ag	107.87	3.70E-10	$AgCl_2^-$	ac.		0.6		2.70E-09			-215 5	s.	70.2
48 Cadmio	Cd	112.41	1.80E-09	$CdCl_2$	ac.		1		6.90E-11			-359.4	s.	293.8
49 Indio	In	114.82	8.70E-10	In_2O_3	s.	0.05				2.90E-09	48.7	-830.9	s.	436.8
50 Estaño	Sn	118.69	1.70E-08	SnO_2	s.	0.2				4.60E-07	36.2	-519.6	s.	551.9
51 Antimonio	Sb	121.75	1.60E-09	Sb_2O_5	s.	0.001				1.10E-10	56.8	-829.3	s. III	438.1
52 Teluro	Te	127.6	1.40E-11	TeO_2	s.	0 005				9.50E-12	62 9	-270.3	s.	329.2
53 Iodo	I	126.9	3.90E-09	IO_3^-	ac.		0.6		5.20E-07			-128	I2, s.	174.7
54 Xenón	Xe	131.3	0.00E+00					8.70E-06			40.33	0	g.	40.33
55 Cesio	Cs	132.91	2.20E-08	Cs^+	ac.		0.6		2.30E-09			-282.2	s.	404.4
56 Bario	Ba	137.33	3.10E-06	$BaSO_4$	s.	0.01				4.20E-06	30.7	-1361.9	s.	775.1
57 Lantano	La	138 91	2.20E-07	$La(OH)_3$	s.	0.02				6.00E-07	35.5	-1319.2	s., (alfa)	994.6
58 Cerio	Ce	140.12	4.30E-07	CeO_2	s.	0.02				1.20E-06	33.8	-1024.8	s., gamma	1054.6
59 Praseodinio	Pr	140.91	5.80E-08	$Pr(OH)_3$	s.	0.02				1.60E-07	38.8	-1285.1	s., (alfa)	963.8
60 Neodimio	Nd	144.24	1.90E-07	$Nd(OH)_3$	s.	0.02				5.10E-07	35.9	-1294.3	s., (alfa)	970 1
61 Prometio	Pm	145	0.00E+00											
62 Samario	Sm	150.4	4.00E-08	$Sm(OH)_3$	s.	0.02				1.10E-07	39.7	-1314	s., (alfa)	993.6
63 Europio	Eu	151.96	7.90E-09	$Eu(OH)_3$	s.	0.02				2.10E-08	43.8	-1320.1	s.	1003.8
64 Gadolinio	Gd	157.25	3.40E-08	$Gd(OH)_3$	s.	0.02				9.20E-09	40.2	-1288.9	s., (alfa)	969
65 Terbio	Tb	158.93	6.30E-09	$Tb(OH)_3$	s.	0.02				1.70E-08	44.9	-1314.2	s., (alfa)	998.4
66 Disprosio	Dy	162.5	1.80E-08	$Dy(OH)_3$	s.	0.02				4.90E-08	41.7	-1294.3	s., (alfa)	975.9
67 Holinio	Ho	164.93	7.20E-09	$Ho(OH)_3$	s	0.02				1.00E-08	43.9	-294.8	s., (alfa)	978.6
68 Erbio	Er	167.26	1.70E-08	$Er(OH)_3$	s.	0.02				4.60E-08	41.9	-1291	s.	972.8
69 Tulio	Tm	168.93	2.80E-09	$Tm(OH)_3$	s.	0.02				7.60E-09	46.3	-1265.5	s.	951.7

Cuadro 19.1 *(continuación)*

Elemento químico *Z Nombre*	*Elto*	*PM*	$n_{0,i}$ *(kmol kg^{-1})*	*Especie de referencia* *Fórmula química*	*s/g/l*	*c*	*γ*	*p*	*m*	*x*	b^{o}_{conc} *(S.R.)* *(kJ mol^{-1})*	ΔG^{o} *(kJ mol^{-1})*	*Estado*	*Exergía* *(kJ mol^{-1})*
70 Iterbio	Yb	173.04	1.70E-08	$Yb(OH)_3$	s.	0.02				4.60E-08	41.9	-1262.5	s.. (alfa)	944.3
71 Lutecio	Lu	174.97	2.90E-09	$Lu(OH)_3$	s.	0.02				7.90E-09	46.2	-1259.6	s.	945.7
72 Hafnio	Hf	178.49	1.70E-08	HfO_2	s.	0.05				1.20E-07	39.5	-1027.4	s. (alfa)	1062.9
73 Tantalio	Ta	180.95	1.10E-08	Ta_2O_5	s.	0.01				7.50E-09	46.4	-1911.6	s.	974
74 Wolframio	W	183.85	8.20E-09	$W_2O_4^{2-}$	ac.		0.1		5.60E-10			-920.5	s.	827.5
75 Renio	Re	186.21	5.40E-12	Re_2O_7	s.	0.01				3.60E-12	65.3	-1067.6	s.	559.5
76 Osmio	Os	190.2	5.00E-13	OsO_4	s.	0.005				3.40E-13	71.2	-305.1	s.	368.1
77 Iridio	Ir	192.22	5.30E-12	IrO_2	s.	0.005				3.60E-12	65.3	-185.6	s.	246.8
78 Platino	Pt	195.09	2.60E-11	PtO_2	s.	0.005				1.80E-11	61.3	-83.7	s.	141
79 Oro	Au	196.97	2.00E-11	Au	s.	0.5				1.40E-09	50.5	0	s.	50.5
80 Mercurio	Hg	200.59	4.00E-10	$HgCl_4^{2-}$	ac.		0.1		3.40E-10			-446.9	l.	115.9
81 Talio	Tl	204.37	2.20E-09	Tl_2O_4	s.	0.01				1.50E-09	60.4	-347.3	s. (alfa)	194.9
82 Plomo	Pb	207.2	7.70E-08	$PbCl_2$	ac.		1		4.20E-11			-297.2	s.	232.8
83 Bismuto	Bi	208.98	8.10E-10	BiO^{+}	ac.		0.6		1.00E-10			-146.4	s.	274.5
84 Polonio	Po	209	0.00E+00											
85 Astato	At	210	0.00E+00											
86 Radón	Rn	222	0.00E+00											
87 Francio	Fr	223	0.00E+00											
88 Radio	Ra	226.03	4.40E-15	$RaSO_4$	s.	0.05				3.00E-14	77.2	-1364.2	s.	823.9
89 Actinio	Ac	227	0.00E+00											
90 Torio	Th	232.04	4.00E-08	ThO_2	s.	0.05				2.70E-07	37.5	-1169.1	s.. (alfa)	1202.6
91 Protactinio	Pa	231.04	0.00E+00											
92 Uranio	U	238.03	1.10E-08	$UO_3.H_2O$	s.	0.01				1.50E-08	44.7	-1395.9	s.. III	1196.6
93 Neptunio	Np	237.05	0.00E+00											
94 Plutonio	Pu	244	6.20E-20	PuO_2	s.	0.01				8.40E-20	108.9	-995.1	s.	1100
95 Americio	Am	243	0.00E+00											
96 Curio	Cm	247	0.00E+00											
97 Berkelio	Bk	247	0.00E+00											
98 Califórnio	Cf	251	0.00E+00											
99 Einstenio	Es	252	0.00E+00											
100 Fermio	Fm	257	0.00E+00											
101 Mendelevio	Md	258	0.00E+00											
102 Nobelio	No	259	0.00E+00											
103 Laurencio	Lr	260	0.00E+00											

Para calcular esta exergía de concentración de las SRS es necesario, en primer lugar, establecer la concentración en la corteza de las mismas. Sin embargo, habitualmente la concentración de la corteza terrestre suele encontrarse expresada como concentración elemental, por lo que habrá que convertir ésta, de forma que al final dispongamos de la concentración de las sustancias de referencia en el Ambiente de Referencia. La concentración elemental de la corteza terrestre que se ha utilizado es la tomada por Szargut (1988). Aunque los valores de la concentración han quedado algo desfasados, y hoy en día existen revisiones más recientes y fiables como la de Taylor y McLennan (1985), no se comete un gran error tomando la más antigua. La razón estriba en que no es necesaria una gran precisión en el establecimiento de la fracción molar x_{SR}, ya que en la expresión de la exergía estándar aparece en el seno de una función logarítmica. De hecho, si utilizamos un valor de x_{SR} cien veces mayor, el valor de $b^{o}_{conc,SRS}$ sólo varía *11 kJ/mol.*

La fracción molar de las especies de referencia en la litosfera puede calcularse, tal y como propone Szargut (1986), como:

$$x_{SR} = \frac{1}{l_i} n_{oi}\, c_i\, M_0 \qquad (27)$$

donde l_i es el número de átomos del elemento en la molécula de la especie de referencia y M_0 es la masa molecular media de la capa externa de la corteza terrestre, $M_0 = 135.5$ *kg/kmol*, y c_i es la fracción del elemento que aparece en forma de esa especie de referencia concreta. En orden de menor a mayor disipación del elemento en diferentes compuestos, este parámetro toma los valores de *0.05*, *0.01* y *0.005* para los elementos menos frecuentes.

Los valores de la exergía de concentración de las especies de referencia sólidas han quedado recogidas en el cuadro 19.1.

19.2.2.1. La exergía de concentración de las especies de referencia líquidas

Para la configuración de la fase líquida del AR de Szargut, se va a tomar como referencia la composición y concentración del agua de mar. Las sustancias de referencia líquidas (SRL), elegidas para cada elemento, son las que más frecuentemente se encuentran en el agua marina, y cuentan con la ventaja de que sus concentraciones medias se conocen con la suficiente precisión para la mayoría de los elementos.

La expresión para el cálculo de la exergía propuesto por Szargut ofrece directamente la exergía del elemento, sin necesidad de calcular primero la

exergía de concentración de su especie de referencia. La exergía de un elemento se puede obtener con una gran exactitud de la forma siguiente:

$$b^0_{elto} = j\left[-\Delta G_{f\,ref} + 1/2\, z\, b^0_{q\,H_2} - \sum \nu_k\, b^0_{q\,elto-k} - 2{,}303\, RT_0\, z\,(pH) - RT_0 \ln m\,\gamma\right] \quad (28)$$

donde j es el número de iones o moléculas de referencia derivados de una molécula del elemento considerado, $\Delta G_{f\,ref}$ es la entalpía de formación de Gibbs de la sustancia de referencia, z es el número de cargas elementales positivas en el ión de referencia (para cargas negativas, $z < 0$), ν_k es el número de moles de elementos adicionales presentes en la molécula de la especie de referencia, $b^0_{q\,H_2}$ y $b^0_{q\,elto-k}$ son las exergías estándar del hidrógeno gas y del elemento k-ésimo de la especie de referencia, respectivamente, m es la molaridad estándar de las especies de referencia del agua de mar, R es la constante de los gases, T_0 es la temperatura y pH es el pH del agua de mar $(pH = 8{,}1)$.

La exergía del hidrógeno gas se calcula previamente, como veremos a continuación, a partir de su especie de referencia gaseosa, el vapor de agua.

Los valores de la exergía química de los elementos asociados a especies de referencia líquidas calculados se muestran en el cuadro 19.1.

19.2.2.2. La exergía de concentración de las especies de referencia gaseosas

La fase gaseosa del AR de Szargut se construye a imagen y semejanza de la atmósfera terrestre, y cuenta por ello con la misma composición que ésta. Nueve sustancias correspondientes a los elementos: *C*, *H*, *O*, *N*, *Ar*, *Ne*, *He*, *Kr* y *Xe*, serán las Sustancias de Referencia Gaseosas (SRG), que integren este universo artificial. La exergía de concentración de estas SRG, es decir, el mínimo trabajo necesario para separarlas de este ambiente gaseoso de máxima disipación, se va a calcular a partir de su fracción molar en el aire atmosférico:

$$b^0_{CONCSRG} = -RT_0 \ln x_{SRG} \quad (29)$$

Recordando las relaciones que ligan las fracciones molares de los gases atmosféricos con sus presiones parciales, $P_{SRG} = x_{SRG}\, P_0$, la exergía de concentración de las sustancias de referencia gaseosas puede expresarse de manera más conveniente como:

$$b^0_{CONCSRG} = -RT_0 \ln\left(\frac{p_{SRG}}{p_0}\right), \quad (30)$$

donde R es la constante de los gases, T_0 y P_0 son respectivamente la temperatura y la presión en condiciones estándar, y p_{SRG} es la presión parcial media en la atmósfera de la Sustancia de Referencia Gaseosa.

Los elementos químicos acompañados de sus respectivas SRG, así como el valor de la exergía de concentración de éstas, se recogen en el cuadro 19.1.

19.2.3. Cálculo de la exergía química de un elemento

Una vez aisladas las sustancias de referencia correspondientes a los elementos que componen el mineral del que deseamos calcular su exergía, el siguiente paso es calcular la exergía necesaria para obtener cada uno de los elementos. Para ello, deberemos romper los enlaces de las sustancias de referencia y liberar los elementos. El cálculo exergético se lleva a cabo planteando las ecuaciones de formación de las sustancias de referencia, y utilizando sus entalpías de formación de Gibbs. Los valores de éstas han sido tomados de Faure (1992). A la mínima energía necesaria para obtener un mol de elemento le llamaremos exergía química estándar del elemento y se obtendrá a partir de la expresión

$$\sum \nu_k \, b^0_{q\,elto} + \Delta G_{fS.R.} = b^0_{conc\,S.R.} \tag{31}$$

donde $b^0_{q\,elto}$ son las exergías químicas estándar de los elementos químicos que componen la sustancia de referencia, $\Delta G_{fS.R.}$ es la entalpía de formación de Gibbs de la sustancia de referencia, y $b^0_{conc\,S.R.}$ es la exergía de concentración de la sustancia de referencia.

Luego la exergía química estándar de un elemento particular tomará la forma:

$$b^0_{q\,elto\,i} = b^0_{concS.R.} - \Delta G_{f\,S.R.} - \sum_{k \neq i} \nu_k \, b^0_{q\,elto\,k}$$

Para ello será necesario conocer la exergía de los demás elementos que participan en la reacción. El orden de cálculo de la exergía de los elementos ha de escogerse con cuidado, ya que en principio hay que comenzar por calcular la exergía de aquellos elementos cuya especie de referencia sea lo más sencilla posible, es decir, por aquellas en cuyo cálculo no interviene ningún otro elemento (por ejemplo, O_2, N_2, etc.). Se continuará con los elementos en cuyas especies de referencia aparezca un elemento más (por ejemplo, óxidos, cloruros, etc.), y así sucesivamente.

Como se puede observar, la *exergía química de un elemento* contiene el valor de la exergía de concentración de cada una de las sustancias de referencia que se utilizan para aislar los elementos, además de incluir información sobre la exergía de reacción, expresada mediante la entalpía de formación de Gibbs, y que es consecuencia directa del alejamiento químico del elemento respecto a su sustancia asociada en el A.R.

19.2.4. Cálculo de la exergía de un mineral

Conocida la exergía de los elementos, se puede obtener la de cualquier compuesto aplicando el mismo tipo de balance anterior. Para el caso del mineral, basta con conocer la variación de la energía de formación de Gibbs del mismo

$$b^0_{q\,mineral} = \sum \nu_k \, b^0_{q\,elto-k} + \Delta G_{f\,mineral} \qquad (32)$$

La $b^0_{q\,mineral}$ es la exergía química estándar del compuesto mineral y en ella están incluidas las exergías de concentración de las sustancias de referencia, la exergía de reacción correspondiente a la ruptura de los enlaces de esas sustancias de referencia para obtener los elementos, y la exergía de reacción necesaria para unir a esos elementos formando el compuesto mineral deseado.

La exergía del mineral informa sobre el mínimo trabajo necesario para, a partir de sustancias comunes de un ambiente de referencia en completa disipación, producir ese mineral en un estado específico de concentración dado. Y esto es precisamente lo que hemos acordado en definir como *coste termodinámico* del mineral.

Ejemplo: Vamos a determinar el coste termodinámico de la calcopirita, $CuFeS_2$.

Datos: $\Delta Gf_{CuFeS_2} - 186{,}19$ *kJ/mol* $\Delta Gf_{Fe_2O_3} = -742{,}2$ *kJ/mol*

La reacción de formación de la calcopirita es la siguiente:

$$Cu(s) + Fe(s) + 2\,S(s) \rightarrow CuFeS_2(s) \qquad (33)$$

por lo que, de acuerdo con la expresión (32), la $b^0_{CuFeS_2}$ se puede calcular en función de las exergías de los elementos que la componen.

$$b^0_{CuFeS_2} = b^0_{Cu} + b^0_{Fe} + 2\,b^0_S + \Delta G_{f\,CuFeS_2} \qquad (34)$$

Las exergías elementales se calculan directamente a través de (28) si sus especies de referencia asociadas son líquidas, o aplicando (29) y (31) si son gaseosas, y (26) y (31) si son sólidas. El cuadro 19.1 recoge esta información.

Elemento: Cobre *(Cu)* Sustancia de referencia: Cu^{+2} *(l)* b_{Cu} = *134,2 kJ/mol*

Elemento: Hierro *(Fe)* Sustancia de referencia:

$$Fe_2O_3(s) \quad b^0_{conc\,Fe_2O_3} = 12{,}4 \text{ kj/mol}$$

$$b^0_{Fe} = \frac{1}{2}\left(b^0_{Fe_2O_3(s)} - 3/2\, b^0_{O_2(g)} - \Delta G_{f\,Fe_2O_3(s)}\right) \tag{35}$$

$$b^0_{O_2(g)} = b^0_{conc\,O_2(g)} = 3.97\,kJ/mol \tag{36}$$

Por lo que b^0_{Fe} = *374,3 kJ/mol*

Elemento: Azufre (S) Sustancia de referencia: SO_4^{-2} *(l)* b^0_S = *609,6 kJ/mol*

Al introducir estos valores de la s exergías elementales de cobre, hierro y azufre en la expresión (34) obtenemos que

$$b^0_{CuFeS_2} = 1.541{,}51 \text{ kj/mol}$$

19.3. Aplicación de la metodología a una selección de minerales

En esta sección vamos a aplicar la metodología que acabamos de introducir a un conjunto de compuestos minerales que hemos seleccionado. La elección de estos minerales se ha llevado a cabo atendiendo a criterios de compatibilidad con el diseño metodológico, y de accesibilidad a los datos mineros disponibles.

19.3.1. Sobre la selección de los minerales elegidos

La localización de los yacimientos minerales en el territorio puede obedecer a razones diferentes relacionadas en parte con la génesis de estos yacimientos. Por un lado están los yacimientos minerales que explotan elementos que presentan unas concentraciones muy superiores a las medias de la corteza terrestre. Sus recursos tienen como características físicas singulares respecto al entorno circundante una composición concreta y una concentración determinada. Éste es el caso de la práctica totalidad de los

minerales energéticos, y de la gran mayoría de los metales. Por otro lado están los yacimientos cuyo emplazamiento no obedece a la singularidad de la composición o concentración de los recursos que contienen. Su localización espacial obedece a otros motivos, uno de los cuales puede ser la cercanía a los lugares donde se van a utilizar estos recursos mineros. Los áridos que se utilizan para la construcción son un buen ejemplo de ello. Puesto que la noción de *coste termodinámico* que hemos introducido informa sobre la composición y concentración peculiares del mineral, hemos juzgado conveniente dejar fuera del análisis a aquellos recursos cuyo motivo de explotación no radique en estas dos características físicas.

Habría que destacar, además, que las especies minerales básicas elegidas como menas pueden ser tanto rocas como minerales. Las rocas son agregados mono o poliminerálicos sin composición fija exacta. Esto dificulta la caracterización energética de la roca que pretendemos realizar, puesto que para ello es estrictamente necesario disponer de una composición química concreta. Por lo que sería conveniente, en una primera aproximación del trabajo, dejar de lado por el momento a las rocas y centrarnos, como botón de muestra, en los minerales metálicos, siempre y cuando éstos dispongan de una composición conocida y concreta.

De acuerdo con estas limitaciones, los recursos que se han seleccionado para la aplicación de la metodología han sido: hierro, azufre, cinc, plomo, cobre y estaño. La disponibilidad de datos referentes a sus reservas ha primado como criterio en la elección de los mismos. Los minerales particulares asociados a estos recursos son: magnetita y hematites para el hierro, pirita para el azufre, galena para el plomo, esfalerita para el cinc, calcopirita para el cobre y casiterita para el estaño.

19.3.2. Aplicación de la metodología

La aplicación de la metodología al conjunto de los minerales seleccionados presenta los resultados del cuadro 19.2.

Como revela el análisis del cuadro, la exergía específica más baja corresponde al mineral hematites. Al ser esta sustancia parte integrante del A.R., el valor de su exergía química coincide con el valor de su exergía de concentración. La magnetita, mineral de hierro, presenta ya una exergía muy superior, y su elevado valor es consecuencia directa del desequilibrio químico de esta sustancia con el A.R.

Otro mineral que presenta un valor de la exergía química específica muy bajo es la casiterita. Al igual que el mineral hematites, también es una sustancia integrante del A.R., pero como el estaño es mucho más escaso que el hierro, la exergía de concentración de la casiterita es muy superior, cuesta más trabajo concentrarla al estar más difundida.

Cuadro 19.2

EXERGÍA ESPECÍFICA DE UNA SELECCIÓN DE MINERALES

Recurso	*Minerales*	*Fórmula*	(kJ/kg)	$B^0_{mineral}$ (kJ/kg)
Hierro	Magnetita	Fe_3O_4	1.047,88	3.835,67
	Hematites	Fe_2O_3	4.647,46	77,36
Azufre	Pirita	FeS_2	325,00	7.876,14
Plomo	Galena	PbS	95,70	3.949,26
Cobre	Calcopirita	$CuFeS_2$	248,50	9.165,86
Cinc	Esfalerita	ZnS	493,94	9.243,53
Estaño	Casiterita	SnO_2	3.447,91	240,69

El valor más alto de la exergía química específica corresponde a la esfalerita. En este elevado valor ha influido más el desequilibrio químico de la sustancia con el ambiente de referencia, que la baja concentración del cinc en la corteza, pues otras sustancias como el estaño, aun presentando una concentración menor, tienen un valor de la exergía química mucho menor.

Podemos evaluar el potencial exergético de las reservas y las bases de reservas mundiales de estos minerales calculando su exergía asociada. Las reservas mundiales de estos minerales se han obtenido a partir de datos del World Resources Institute (1994), excepto las del hierro y el azufre, para las que se han manejado valores del U.S. Bureau of Mines (1996). Estos datos se referían al recurso y no al mineral. Así que para expresarlos en función del mineral, hemos supuesto que todos los recursos de plomo estaban en forma de galena, los de azufre como pirita, los de cobre como calcopirita, los de cinc como esfalerita, los de estaño como casiterita y los de hierro como hematites. Aunque esta aproximación en ámbitos geomineros sería inaceptable, para la cuantificación energética de los recursos es lo suficientemente correcta.

El coste termodinámico de las reservas y base de reservas de estos minerales a nivel mundial será el que figura en el cuadro 19.3.

Analizando los resultados así obtenidos se observa que en el valor final del coste termodinámico de las reservas de los minerales, el tonelaje de éstas juega un papel mucho más predominante que el de la exergía específica de dichos minerales. Obsérvese que los valores de la exergía específica de los minerales seleccionados se encuentran entre *70* y *10.000 kJ/kg*, mientras que los tonelajes de recursos y reservas alcanzan cifras del orden de cientos de millones de toneladas.

Cuadro 19.3

COSTE TERMODINÁMICO DE LAS RESERVAS MUNDIALES DE LOS MINERALES SELECCIONADOS

Minerales	*Reservas mundiales (ton. de mineral)*	*B. Res. mundiales (ton. de mineral)*	*Ex. reservas (MJ)*	*Ex. B. reservas (MJ)*
Hematites	$1{,}86 \cdot 10^{11}$	$2{,}86 \cdot 10^{11}$	$1{,}44 \cdot 10^{13}$	$2{,}21 \cdot 10^{13}$
Pirita	$5{,}24 \cdot 10^{9}$	$1{,}31 \cdot 10^{10}$	$4{,}13 \cdot 10^{13}$	$1{,}03 \cdot 10^{14}$
Galena	$7{,}28 \cdot 10^{7}$	$1{,}50 \cdot 10^{8}$	$2{,}87 \cdot 10^{11}$	$5{,}93 \cdot 10^{11}$
Calcopirita	$8{,}95 \cdot 10^{8}$	$1{,}70 \cdot 10^{9}$	$8{,}20 \cdot 10^{12}$	$1{,}56 \cdot 10^{13}$
Esfalerita	$2{,}09 \cdot 10^{8}$	$4{,}92 \cdot 10^{8}$	$1{,}93 \cdot 10^{12}$	$4{,}54 \cdot 10^{12}$
Casiterita	$1{,}02 \cdot 10^{7}$	$1{,}27 \cdot 10^{7}$	$2{,}44 \cdot 10^{9}$	$3{,}06 \cdot 10^{9}$

El valor más alto del coste termodinámico de las reservas mundiales de estos minerales corresponde a la pirita, esto es debido al gran tonelaje que le hemos asociado (al suponer que todas las reservas de azufre estaban en forma de pirita) y a su alta exergía específica. El valor más bajo corresponde a la casiterita, cuyo tonelaje, el más pequeño de la selección de minerales, determina el bajo valor final de la exergía total.

El valor obtenido para la exergía de la base de reservas mundial de nuestra selección de minerales es de $1{,}46 \cdot 10^{14}$ *MJ*, lo que equivale aproximadamente al total de petróleo extraído en el mundo en 1995.

Esto significa que si extrajéramos de la Tierra la base de reservas de los minerales seleccionados, y utilizáramos éstos de forma que al final reaccionaran totalmente con el entorno, quedando en su seno completamente dispersados, como mínimo teórico tendríamos que invertir el total de petróleo extraído en 1995 para volver a reponer los minerales en sus depósitos, en las condiciones de estructura y concentración iniciales. Este valor de energía no es muy elevado, porque recordemos que éste es un cálculo termodinámico. Si queremos hacernos una idea de lo que nos costaría esta reposición efectiva de los minerales, teniendo en cuenta que en nuestro mundo real los procesos son irreversibles, y que contamos con la tecnología actual disponible (muy alejada de las máximas eficiencias teóricas), tendremos que comparar los procesos teóricos con los reales, y extrapolar de ello cuál sería aproximadamente este valor que hemos acordado en llamar *coste exergético de reposición de los minerales.*

Ni qué decir tiene que la metodología de cálculo del coste termodinámico que aquí hemos expuesto podría completarse ampliando su alcance a las rocas que, recordemos, habíamos dejado de lado en esta primera aproximación al no disponer éstas de una composición química concreta y fija. Igualmente, se podrían afinar los valores arrojados por la cuantificación energética de las distintas reservas de minerales, siempre y cuando desde

ámbitos geomineros se facilitara la información de las reservas y recursos de todos los elementos, de acuerdo con las principales menas minerálicas donde éstos habitualmente se agrupan.

La investigación técnica y la colaboración interdisciplinar suministrarán las herramientas necesarias para llevar a cabo una exhaustiva cuantificación energética de nuestro patrimonio mineral.

CAPÍTULO 20
EL COSTE EXERGÉTICO DE REPOSICIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES

Antonio Valero y Lidia Ranz

La tecnología minera ha acompañado al hombre desde los albores de la civilización hasta tal punto que las edades del hombre se han clasificado por los materiales predominantes que ha utilizado: edad de piedra, del bronce, del hierro o más recientemente del carbón, del petróleo, del uranio...

Para extraer los recursos de las entrañas de la Tierra se necesita energía, y a lo largo de la historia ésta ha sido de origen animal, a partir de la fuerza del vapor –de hecho el concepto de caballo de vapor proviene de la máquina de vapor que sustituía a los caballos en las minas de Gales–, energía eléctrica y del motor de combustión interna. Extraer, transportar, separar la ganga del mineral, machacar, moler, lavar, etc., son operaciones unitarias que requieren energía.

Igualmente ocurre en los procesos químicos y metalúrgicos que siguen a estas actividades mineras. Invertimos energía en modificar la composición química de los minerales. Por ejemplo, en el caso de los minerales metálicos realizamos procesos que tienen como objeto aislar el metal que estos minerales contienen. Vemos, por tanto, que son necesarios dos tipos de actividades para obtener el metal aislado: en primer lugar la extracción y concentración del mineral, en segundo lugar la transformación química del mineral en metal.

Recordemos que los procesos teóricos que daban lugar al coste termodinámico o exergía del mineral, también tenían dos componentes: la exergía de concentración y la exergía de reacción (de naturaleza química). Estas dos magnitudes, juntas, daban lugar a la exergía química total del mineral.

Lo que buscamos es comparar los costes teóricos con los reales para poder calcular así *la exergía total que habría sido necesaria aportar para, con la tecnología actual disponible, crear y concentrar los recursos minerales partiendo de un ambiente de referencia de máxima disipación,* que es lo que hemos acordado en definir como *coste exergético de reposición del recurso.*

Puesto que tanto los procesos termodinámicos como los reales tienen dos componentes distintas (la de concentración y la química), el *coste exergético de reposición* lo calcularemos por adición del *coste exergético de concentración* y del *coste exergético de reacción*. El primero se calculará a través de la comparación entre la energía invertida en los procesos reales de separación y el valor de la exergía de concentración. De la misma manera, el coste exergético de reacción se obtendrá tras el cotejo de la energía invertida en los procesos químicos necesarios para el aislamiento del metal, y los valores aportados por la exergía de reacción.

Luego, el *coste exergético de reacción* de un recurso mineral coincidirá con la energía necesaria para *producir* ese recurso, a partir de sustancias comunes del ambiente (y ya concentradas), contando con la mejor tecnología actualmente disponible. Este coste real, aunque más elevado que el mínimo valor fijado por la exergía de reacción, se mueve en el mismo orden de magnitud que ésta. Pues, como bien se conoce, la oxidación del hierro, por ejemplo, es un proceso exotérmico en el que se libera energía. Si los procesos reales fueran reversibles, invirtiendo el valor de esa energía podríamos deshacer el proceso, esto es, obtener hierro, a partir de su óxido. No es esto lo que ocurre en la realidad, el valor de la energía a invertir es superior a ese mínimo valor que fija la Termodinámica, pero, sin embargo, nuestra tecnología es tal, que ambos valores se mueven en el mismo orden de magnitud.

Esto no ocurre en los procesos de mezcla y separación, que es donde más se acusa la irreversibilidad de los procesos. Ya hemos comentado lo que ocurre cuando se mezclan sal y azúcar. La energía que se libera en el proceso es prácticamente nula. Sin embargo, su separación es costosísima. De hecho, cuando esto ocurre en nuestra vida cotidiana, más vale tirar la mezcla, que esforzarnos en separarla. El orden de magnitud de la energía liberada en la mezcla (exergía de concentración), y el de la energía real a invertir para la separación (coste exergético de concentración) son bien distintos. A pesar de ello su tendencia es la misma.

Hemos visto que la exergía o el coste termodinámico por mol de componente necesario para separar dos sustancias sólidas era:

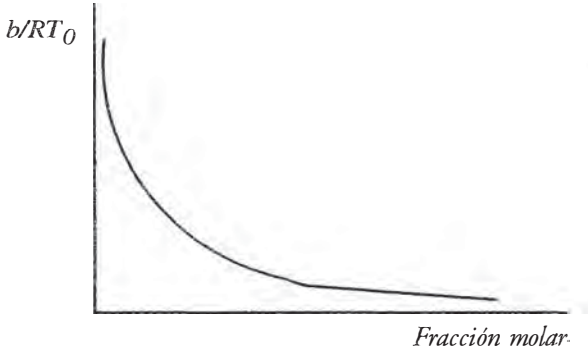
$$b = -RT_0 \sum x_i \ln x_i = -RT_0 \left[x_1 \ln x_1 + (1 - x_1) \ln (1 - x_1) \right]$$

Su representación gráfica resulta más clarificadora (figura 20.1).

Se ve que cuanto más diluido está el mineral objeto de extracción más energía se necesita para separarlo y este crecimiento es exponencial. Si la Termodinámica nos da la tendencia, la energía real necesaria resulta varios órdenes de magnitud mayor.

Figura 20.1

RELACIÓN ENTRE LA EXERGÍA DE CONCENTRACIÓN Y LA FRACCIÓN MOLAR



El oro no es caro en el mercado porque tenga exergía química, ya que no la tiene, sino porque es escaso y su extracción requiere enormes movimientos de tierras para encontrarlo, aun así, en pequeñas cantidades. La escasez es también una propiedad termodinámica.

Schmidt–Bleek creó en 1994 el concepto de «mochila ecológica» o intensidad de materiales por unidad de servicio, que mide la cantidad de material que es necesario utilizar a lo largo de la vida de un producto o servicio. Un concepto similar al de coste ecológico pero en toneladas de material. Así, para 10 gramos de oro se deben mover 3,5 toneladas de material en la mina sólo. O los tres mil millones de toneladas de combustible que quemamos al año tienen una mochila de 15.000 millones de agua y escombros sin contar las emisiones asociadas. La fabricación de un coche lleva asociada la producción de 15 toneladas de residuos sólidos. Este autor da datos exhaustivos sobre las «mochilas ecológicas» de muchas rocas y minerales de uso actual. La solución de reciclado es importante pero no menos lo es el mejorar la eficiencia de los procesos de separación. Según este autor, podría reducirse por diez el tamaño asociado de las mochilas ecológicas simplemente aplicando la tecnología actual.

La determinación de los costes exergéticos de extracción y separación de los minerales debe ser objeto de un programa específico de especialistas en tecnología minera que los cuantifique en función de su calidad y composición. Afortunadamente, la recopilación de datos en los Análisis de Inventario de Ciclo de Vida proveen parte de esta información por lo que los costes exergéticos ya son más fáciles de calcular.

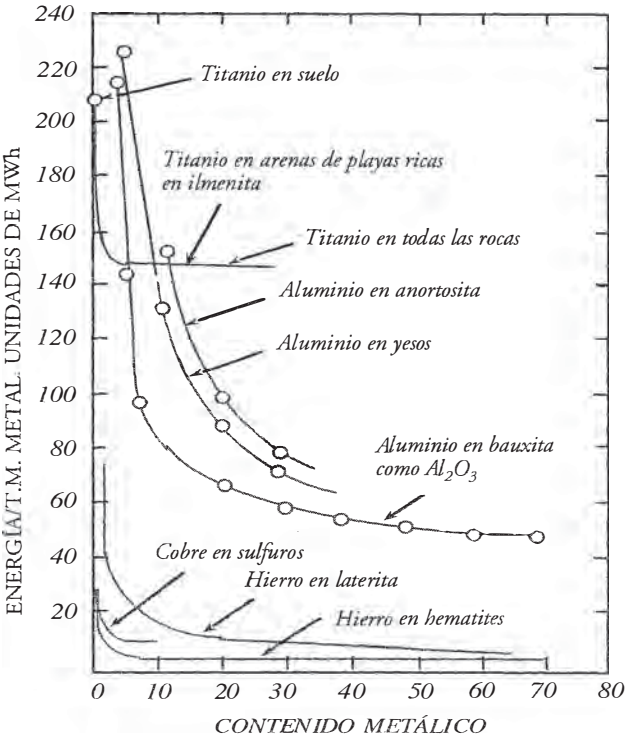
Una vez conocidos los datos reales de la energía invertida en los procesos reales de extracción y separación de las sustancias minerales, y disponiendo de la exergía de concentración de las mismas, se podría estimar su coste exergético de concentración. El coste exergético de concentración de un mineral quedaría definido como: *la exergía total que habría sido necesario aportar para, con la tecnología actual disponible, concentrar los recursos minerales partiendo de un ambiente de referencia de máxima disipación.*

Como se deduce de su definición, el coste exergético de concentración depende del estado de la tecnología de extracción y separación, que, como bien sabemos, varía con el tiempo y con el tipo de mineral.

Ya Preston Cloud en 1977, a partir de un trabajo de Page y Creasey publicado en 1975, presentó los costes energéticos de la producción de metales, que se reproduce en la figura 20.2.

Figura 20.2

RELACIÓN ENTRE LA EXERGÍA DE CONCENTRACIÓN Y LA FRACCIÓN MOLAR



Como puede apreciarse, la evolución del coste real sigue la misma tendencia que la ley termodinámica de separación. Sin embargo, como se deduce de su definición, el coste exergético de concentración depende del estado de la tecnología de extracción y separación, que, como bien sabemos, varía con el tiempo y el tipo de mineral y, no menos importante, también varía con nuestra habilidad tecnológica para extraerlo, es decir, su curva de aprendizaje.

C. J. Cleveland (1991) analizó la evolución temporal del cociente de la producción total de distintos sectores industriales medida en unidades físicas dividido por la energía directa más la indirecta asociada a la respectiva industria extractora, en otras palabras, la inversa del coste energético de extracción y uso de diferentes materiales mineros, agrícolas, forestales y pesqueros. Observó que si bien las mejoras tecnológicas a lo largo del tiempo hacían más eficientes la extracción de recursos, en general el coste energético por unidad de producto obtenido ha ido aumentando en los últimos sesenta años especialmente en minerales poco frecuentes. Lo mismo se aplica a los productos agrícolas, forestales y pesqueros.

El trabajo de M. Ruth (1995) es muy significativo en este sentido; propone un modelo dinámico de evolución histórica de la producción de cobre y de aluminio para Estados Unidos frente al consumo energético necesario para extraer cada metal de la mina, fundirlo y refinarlo. Al comienzo de las actividades mineras siempre se extrae el mineral con mayor concentración de metal, por contra, la tecnología no está lo suficientemente desarrollada y se consume mucha energía. Con el paso del tiempo la tecnología mejora y el consumo energético disminuye, sin embargo, al ir agotando el mineral, la concentración en el metal disminuye y la energía que se necesita por tonelada de metal producida aumenta como ya hemos descrito. Esta tendencia en forma de U la describieron Chapman y Roberts en 1983, y a largo plazo dominará la relación directa entre energía y escasez. Ruth aporta datos muy interesantes, así desde los años treinta hasta hoy se ha pasado de una concentración de cobre en el mineral desde un 2% hasta un 0,57%. Un 88% se extrae en la actualidad en minería a cielo abierto, y se producen 420 kg. de desechos sólidos por kg. producido, siendo el sector de la minería el responsable de más de un tercio de todos los estériles producidos por la minería metálica en Estados Unidos. Desde 1930 hasta la actualidad, el uso de energía por tonelada de cobre producido ha seguido una tendencia decreciente, aunque con ligeras oscilaciones cuando aumentaba la demanda ya que se ponía en marcha también maquinaria vieja menos eficiente.

Es decir, en la serie temporal para la minería del cobre estudiada por Ruth (1995), predominan los efectos de la curva de aprendizaje sobre la disminución de la riqueza en cobre del mineral extraído y el consiguiente consumo adicional de energía para su separación.

Aunque el problema tratado por Ruth es distinto al que aquí tratamos, nos hace vislumbrar la complejidad del problema y la cantidad de factores que entran en juego. La concentración de un mineral desde la ley de la mina hasta su ley comercial implica poner en juego un valor de energía real complemente distinto al de la concentración comercial desde la ley media del mineral en la corteza hasta la ley del yacimiento. En otras palabras, desde el punto de vista teórico el coste exergético de concentración de un mineral podría requerir *k* veces más que la exergía de concentración mínima.

Consumo real de concentración,

$$b^* = k \cdot b = k \left\{ -RT_0 \left[x_1 \ln x_1 + (1 - x_1) \ln (1 - x_1) \right] \right\}$$

donde *k* sería una constante, la inversa de la eficiencia termodinámica del proceso de concentración, a determinar.

En 1957, R. J. Charles propuso una ecuación empírica del tipo

$$E \sim \frac{1}{x^{\alpha}}$$

donde *E* es la energía necesaria para extraer el mineral por unidad de volumen de material tratado y α una constante a determinar en función del tipo de mineral y el estado de la tecnología. Earl Cook en 1976 hizo un extensivo análisis sobre este problema al estudiar los límites de explotación de los recursos naturales.

Desafortunadamente no tenemos datos para determinar empíricamente este comportamiento, ni quizá nunca se podrán determinar, ya que ninguna empresa trataría de obtener –por ejemplo, hierro– con objetivos comerciales[4] a partir del orín y la herrumbre que lo van disgregando y diluyendo por el ambiente. Sólo experimentos de laboratorio o simplemente cálculos aproximados nos darían números razonables.

Además, existen dos problemas adicionales a este análisis, uno es que, como hemos dicho, el conocimiento tecnológico permite hacer rentables tratamientos a partir de diluciones minerales cada vez mayores. En otras palabras,

$$k = k\ (x,\ t)$$

donde la función temporal de *k* es sólo definible para el pasado y para cada metal en particular, pero difícilmente extrapolable hacia el futuro por la impo-

[4] No obstante, en algunos metales esto ya se vislumbra como factible comercialmente, sería el caso de las tierras raras –lantánidos–, cuya concentración en la Naturaleza está próxima a la máxima dispersión y el caso de los metales preciosos –oro, platino– al que la revista *National Geographic* (abril, 1983) dedicó un artículo sobre la recuperación de estos metales a partir de la basura de las ciudades en las que se detectó mayor concentración de estos metales que en la propia Naturaleza.

sibilidad práctica de predecir los saltos en el conocimiento científico y tecnológico que ocurrirán. Por ejemplo, ¿será posible en el futuro diseñar bacterias que sean selectivas a la concentración de un determinado metal? o ¿existirán en el futuro microrobots que puedan manipular concentraciones muy bajas de un determinado yacimiento? ¿Quién puede predecir los adelantos a largo plazo de la biotecnología o de la micro-quimio-robótica computerizada?

El segundo problema con la función k es que no es continua. En unos intervalos de concentración se aplica una tecnología y en otros otra, que a su vez depende del origen, tipo y circunstancias con que se da el mineral en la corteza terrestre.

Supongamos que analizamos el proceso de separación para tres intervalos de concentración: ΔX_1, ΔX_2 y ΔX_3. Para cada uno de ellos la energía real de separación será k_1, k_2 y k_3 veces la energía de separación teórica. En los procesos reales $k_3 > k_2 > k_1$, pues cuanto menor es la concentración, la energía real a invertir se hace cada vez mayor en proporción. Para conocer la expresión analítica de la curva real necesitaríamos comparar una serie de franjas de concentración.

Sin embargo, como para este trabajo sólo disponemos de la información proveniente de un solo intervalo de concentración de la curva (desde la ley de la mina hasta la ley comercial), únicamente podremos determinar k_1. Pero como k_1 será menor que k_2, que será menor que k_3, el proceso real será *al menos* k_1 veces el proceso termodinámico, de forma que este valor nos fijará un mínimo: la mínima energía que tendríamos que invertir en el proceso de concentración real. En definitiva, en lugar de determinar *el coste exergético de concentración* podríamos obtener el *coste exergético mínimo actual de concentración* .

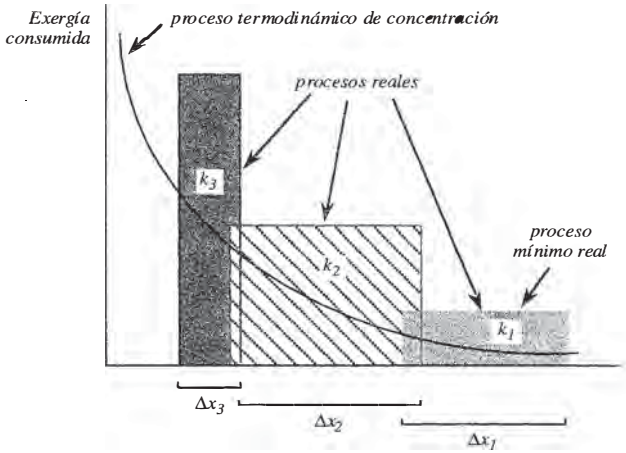
Con todas estas salvedades, vamos pues a proceder al cálculo del coste exergético mínimo de algunos recursos naturales.

Como ya hemos comentado, las sustancias minerales susceptibles de explotación minera se encuentran en el interior de minas y canteras con una determinada concentración, que recoge la *ley de la mina*. En estos complejos mineros se procede a la extracción de los minerales y a la concentración de los mismos hasta alcanzar el nivel señalado por la *ley comercial* del recurso. Para realizar estos procesos de extracción, separación y concentración de los minerales, hay que poner en juego energía. Ésta puede contabilizarse y sumarse dando lugar a la energía total utilizada en la mina.

Por lo que puede estimarse teóricamente cuánto es la mínima energía necesaria para, a partir de los recursos en la mina (con composición específica y concentración dada por la ley de mina), obtener los recursos a la salida de la mina (con composición específica y ley comercial). Aunque esta información no está directamente contenida en el valor de la exergía del recurso, se puede calcular fácilmente.

Figura 20.3

EXERGÍA CONSUMIDA EN LA SEPARACIÓN PARA CADA INTERVALO DE CONCENTRACIÓN: *COSTE EXERGÉTICO DE CONCENTRACIÓN* = K_I (ΔX_I) · *COSTE TERMODINÁMICO*



Posteriormente, se compararán los costes exergéticos obtenidos teóricamente, con los costes exergéticos reales estimados. A partir de ello se extrapolarán los resultados de la comparación, y se podrá estimar, como mínimo, cuánto nos costaría concentrar los recursos minerales de un yacimiento dado, contando con la tecnología hoy existente, si estos recursos se encontraran completamente desperdigados en la corteza terrestre.

En la figura 20.4 se resumen a modo de organigrama las distintas etapas del proceso aquí expuesto.

El cálculo se ha de centrar entonces en la obtención de las constantes, *k*, que separan el comportamiento teórico con el mínimo real para cada recurso. De acuerdo con los datos suministrados por Antonio Ortiz (1997), hemos procedido al cálculo de esas constantes para nuestra selección de minerales.

Los resultados que arroja la metodología podrían resumirse así:

El cuadro 20.1 muestra la comparación entre la exergía teórica y la real necesaria para concentrar determinadas sustancias desde las leyes de concentración en las que puede encontrarse el mineral en las minas hasta alcanzar las leyes comerciales. Los datos se han tomado de procesos de concentración que tienen lugar en explotaciones mineras concretas. El parámetro k indica el ratio en el que el coste real multiplica al teórico. Nótese la gran dispersión que se observa en los valores de k entre las sus-

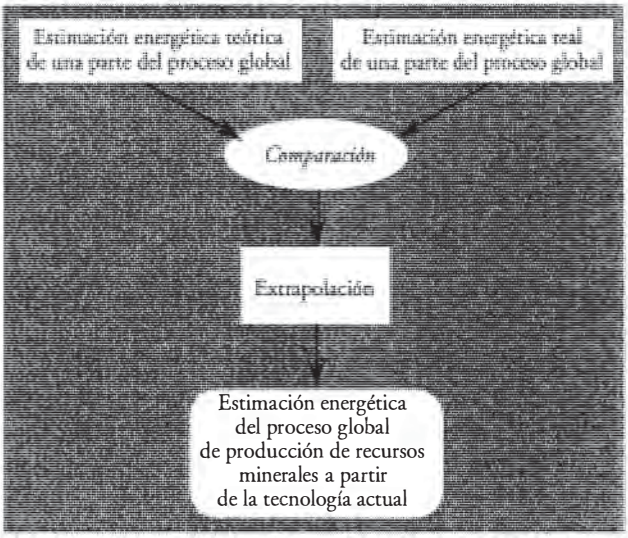
Cuadro 20.1

Recurso	*Ley mina (%)*	*Ley comercial (%)*	*Energía real kJ/kg*	*Exergía teórica kJ/kg*	*k*
Cinc	5	50	7.418-9.130	87,3	85-105
Cobre	0,5	20	17.118-28.530	143,9	119-198
Estaño	0,05	60	380.020	148,1	2.566
Hierro	30,00	55	456-685	26,9	17-25
Plomo	3,00	65	9.130-11.412	36,8	248-310

Fuente: Elaboración propia.

Figura 20.4

PROCESO DE CÁLCULO DEL COSTE DE SEPARACIÓN



tancias analizadas (que va desde 17 y 25 para el hierro hasta 2.566 para el estaño), lo cual indica la conveniencia de profundizar en la toma de datos sobre los costes físicos que plantean en el mundo real los procesos de concentración que, como vemos, difieren notablemente del mínimo teórico que nos señala el cálculo termodinámico. En el mejor de los casos, para la media de las sustancias metálicas consideradas, la energía real necesaria para la concentración de la riqueza mineral de sus reservas

es entre 21 y 52 veces superior a la calculada termodinámicamente. En el capítulo anterior estimamos que si utilizáramos y dispersáramos la base actual de reservas de estas cinco sustancias, haría falta para recuperarla, razonando con procesos termodinámicamente reversibles, una energía teórica equivalente a la del total del petróleo extraído en 1995. Ahora vemos que trabajando con procesos reales haría falta muchas veces esa cantidad. Por tanto, cabe concluir que el coste que nos ahorra la naturaleza al ofrecernos yacimientos con sustancias en condiciones muy particulares de concentración y estructura, o, también, el coste futuro que ocasionará la actual extracción y dispersión de minerales de la corteza terrestre, distan mucho de ser despreciables. Profundizar en el análisis de estos costes es condición necesaria para poder hablar con conocimiento de causa de la *sostenibilidad* de la sociedad industrial o de las consecuencias que sobre las generaciones futuras ocasiona el deterioro del capital mineral de la tierra.

El cuadro 20.2 ofrece algunos de los resultados más expresivos a los que es posible llegar con el aparato analítico que hemos desarrollado. Este cuadro desglosa el coste de concentración por tonelada de cada uno de los metales considerados, desde el ambiente de referencia (AR), en aquella parte que nos ahorra la naturaleza (al ofrecernos estas sustancias ya concentradas en los yacimientos hasta alcanzar la ley de minas) y aquella que corre a cargo de los procesos industriales (hasta lograr la tonelada del metal correspondiente). Los resultados se ofrecen en kilos equivalentes de petróleo (***kep***) por tonelada (***t***) de metal. Se observa así, por ejemplo, que por cada tonelada de estaño que se dispersa, harían faltan, como mínimo, siete toneladas de petróleo para concentrarla de nuevo al nivel en el que se encontraba en el yacimiento; algo más de media tonelada en el caso del cobre y del plomo, etc. Podemos estimar así el porcentaje de la energía de concentración que nos ahorra la naturaleza, para cada una de las cinco sustancias, así como la media ponderada por las reservas estimadas de cada una de ellas: en este caso la naturaleza nos ahorra en media, como mínimo, el 62% de la energía que tendríamos que gastar en concentrarlas hasta llegar a obtener el metal. Evidentemente, en la medida en la que se extraigan y dispersen las sustancias contenidas en los yacimientos con mejores leyes, la industria humana tendrá que suplir cada vez más la función concentradora de la naturaleza, ganando peso el coste de los procesos industriales (recogido en la columna 2) frente al aportado por la naturaleza (columna 1). El manejo de informaciones como ésta se revela esencial si queremos cambiar la mentalidad meramente extractiva de nuestra civilización, por otra que piense en cerrar los ciclos de materiales, reconvirtiendo los residuos en recursos, paliando así el deterioro al que nuestra civilización somete diariamente nuestro patrimonio natural.

Cuadro 20.2

Recurso	*Ley del Ambiente de Referencia (%)*	*Cost. Ex. real$_{Conc.}$ Ley mina (%)*	*Cost. Ex. real$_{Conc.}$ aportado por la Naturaleza (1) kep/t(metal)*	*Cost. Ex. real$_{Conc.}$ aportado por la industria (2) kep/t(metal)*	*Cost. Ex. real$_{Conc.}$ total del metal (3)=(1)+(2) kep/t(metal)*
Cinc	0,0072	5,00	504-620	406-500	910-1.120
Cobre	0,0055	0,5	499-832	634-1.389	1.133-2.221
Estaño	0,0002	0,05	7.059	11.640	18.699
Hierro	5,5850	30,00	30-45	15-22	45-67
Plomo	0,0016	3,00	535-668	609-762	1.144-1.430
Total			35-52	22-32	57-84

Fuente: Elaboración propia.

Se podría proceder de manera semejante para calcular el *coste exergético de reacción*, y así obtener finalmente el *coste exergético total de reposición*. Para una correcta obtención del *coste exergético de reposición* será necesario disponer de datos energéticos reales concernientes a los procesos industriales químicos, metalúrgicos y de separación, que como hemos mencionado también se encuentran en los Inventarios de Análisis de Ciclo de Vida.

Aplicando esta metodología a todos los recursos minerales, podríamos obtener de esta manera el *coste exergético de reposición de todas las reservas y bases de recursos minerales de la Tierra.*

Cada metal tendrá un coste exergético de reposición dado, y a cada territorio se le asociará un valor de coste energético en función de los yacimientos minerales que éste encierre. De esta manera se podrá evaluar la pérdida de capital mineral que supone la extracción, y se podrá contabilizar en unas mismas unidades energéticas. Esto permitiría ordenar el variado mundo mineral desde una perspectiva energética.

Aunque esta metodología de cuantificación energética tan sólo aporta información acerca de dos características de los recursos minerales, dejando de lado al resto, creemos que podría utilizarse como una herramienta útil para la gestión, pero, eso sí, empleada como un instrumento más a combinar con otros.

De hecho, la información de una cuantificación energética como la que proponemos, contribuiría a instruir y a orientar a la sociedad sobre los verdaderos costes físicos en los que ésta incurre al extraer y hacer uso de los recursos minerales de la Tierra.

Capítulo 21
DEFINICIÓN CUANTITATIVA DEL CONFLICTO ENTRE EFICACIA Y SOSTENIBILIDAD EN LA ACTUAL CIVILIZACIÓN: UTILIZAR LA POTENCIA ACUMULADA EN EL CAPITAL MINERAL DE LA TIERRA O RECURRIR AL FLUJO SOLAR Y SUS DERIVADOS

José Manuel Naredo y Antonio Valero

21.1. Propuestas*

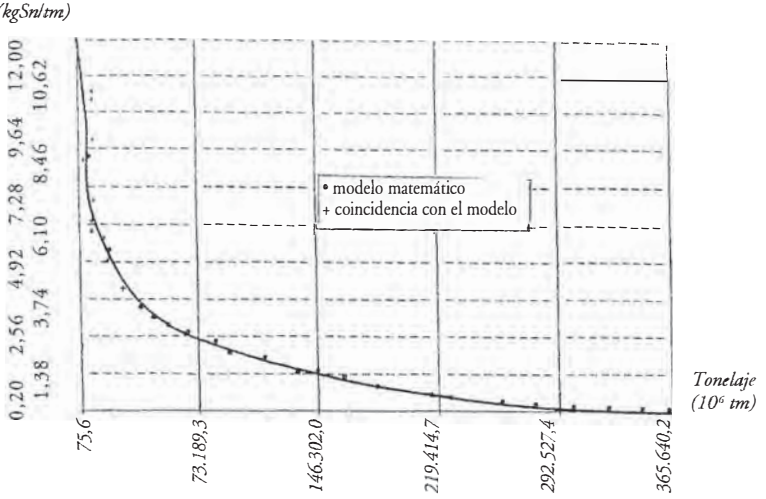
Recurriendo a la metodología definida y aplicada en apartados anteriores a los minerales contenidos en los yacimientos con leyes comerciales, podríamos extender el cálculo del coste exergético de concentración al conjunto de los recursos minerales contenidos en la corteza terrestre. Para ello habría que definir la forma en la que se distribuye actualmente el *stock* de cada sustancia en la corteza terrestre, relacionando las leyes de concentración y el tonelaje en los minerales que la contienen. La experiencia indica que la relación entre la ley (que podemos representar en el eje de ordenadas) y el tonelaje (en el de abscisas) adopta la expresión geométrica de funciones con pendiente negativa y, generalmente, de exponenciales convexas hacia el origen de coordenadas, en las que la pendiente varía atendiendo a la situación peculiar de cada sustancia concreta. El hierro ejemplificaría el caso de sustancias muy abundantes en casi toda la corteza terrestre, apareciendo buena parte del tonelaje con leyes iguales o ligeramente superiores al contenido medio de la corteza terrestre. Sin embargo, en sustancias más raras y peor distribuidas, como el mercurio, el oro... o el petróleo, el tonelaje se concentrará más en ciertos yacimientos. El gráfico 21.1 adjunto trata de ilustrar la forma que cabe esperar que adopten las

* Redacción de José Manuel Naredo.

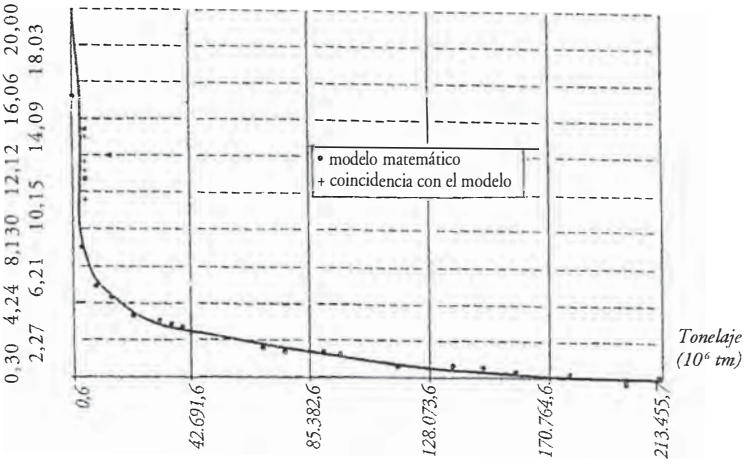
Gráfico 21.1

RELACIÓN TONELAJE /LEYES EN LOS YACIMIENTOS MUNDIALES DE WOLFRAMIO Y ESTAÑO

Modelo matemático de tonelajes/leyes. Yacimientos de estaño



Modelo matemático de tonelajes/leyes. Yacimientos de wolframio



Fuente: Antonio Ortiz Ramos, «Recursos no renovables», en Naredo, J. M. y F. Parra, comps. (1993), *Hacia una ciencia de los recursos naturales*, Madrid, Siglo XXI.

relaciones indicadas para algunas sustancias. Evidentemente escapa a las posibilidades de este trabajo la pretensión de apoyar con información empírica la construcción de este tipo de curvas: modelizar la relación entre leyes y tonelaje para las principales sustancias de la corteza terrestre que están siendo objeto de explotación, constituye así una tarea pendiente para completar la aplicación de la metodología propuesta. Esta tarea es importante para romper el actual vacío que se observa entre la investigación geológica y la minera, que dificulta la modelización y clasificación de los yacimientos por escalones de coste físico y monetario de extracción. Una metodología de este tipo ha sido diseñada y aplicada a los yacimientos españoles de estaño y wolframio, situándolos en el contexto mundial por Ortiz (1993). El gráfico 21.1 adjunto recoge los datos de esta experiencia.

Una vez modelizada la presencia de las sustancias en la corteza terrestre, podríamos aplicarle la metodología antes expuesta de cálculo del coste físico de reposición de dichas sustancias y, mediante agregación, cuantificar en unidades energéticas el coste físico que nos ahorra su extracción, al evitar tener que concentrarlas. Este coste sería indicativo de la potencia que nos brinda la corteza terrestre en forma de concentración y enlace químico de sustancias minerales explotables. Lo cual permite plantear en términos cuantitativos el conflicto fáustico en el que se debate la civilización industrial, al haber optado por utilizar la eficacia inmediata que le ofrece la simple explotación (y deterioro) de esta potencia, aunque ello sea a costa de renunciar, de hecho, a la sostenibilidad global del sistema. La preocupación actual de hacer que el sistema atienda al objetivo de la sostenibilidad global, sin menoscabo de su eficiencia inmediata, resulta bastante problemático. Ya que tal objetivo exigiría, como hemos indicado, que la sociedad se apoyara en la energía solar y sus derivados para restituir esa potencia reconvirtiendo los residuos en recursos, lo que nos llevaría a reconsiderar todos los procesos y a descartar muchos de ellos por incapaces o ineficientes a la hora de atender este requisito. Las centrales nucleares serían un ejemplo de procesos a descartar, por no existir procedimiento técnico alguno que permita reconvertir en este caso los residuos en recursos, dejando así permanentemente abierto el ciclo de materiales. A la vez que el uso del petróleo como combustible debería ser descartado por ineficiente o impracticable si se pretendieran reconvertir los residuos en recursos: reconstruir los enlaces químicos de los hidrocarburos una vez quemados exigiría una energía que se situaría varios órdenes de magnitud por encima de la liberada en su combustión*. Así, la única manera viable de reponerlos sería hacerlo indirectamente, a base de plantar los bosques necesarios para ello, pero esto exigiría un uso tan masivo de suelo y de tiempo, que imposibilitaría tal reposición a los ritmos a los que actualmente se están quemando. La exigencia de cerrar los

* Ver apéndice II.

ciclos de materiales reconvirtiendo los residuos en recursos, a fin de imitar el funcionamiento de la biosfera como ejemplo modélico de sistema de gestión y uso sostenible de los recursos planetarios, desbancaría a los combustibles fósiles del pedestal de eficiencia y competitividad en el que los sitúan los enfoques parcelarios al uso frente a las fuentes renovables de energía. El enfoque más amplio desde el que estamos razonando aconseja distinguir, así, los procesos en los que no se conoce procedimiento alguno de hacerlos reversibles, de aquellos otros en los que existen, pero no resultan practicables a la escala a la que se requiere, y, por último, aquellos en los que existiendo procedimientos y siendo teóricamente practicables en gran escala, merece la pena analizar los costes físicos y monetarios a fin de estudiar su viabilidad técnica y económica con vistas a su posible implantación.

Retomando el hilo del razonamiento anterior, hemos de advertir que la metodología que estamos proponiendo permite dar un salto cualitativo en los análisis que, desde el ángulo de la sostenibilidad global, se han venido aplicando al uso del «capital mineral» de la Tierra en la sociedad actual, deshaciendo algunos de los equívocos más comunes. Estos análisis han venido subrayando que la condición de *stocks* de los depósitos minerales en explotación hace insostenible el futuro de una sociedad que se asiente en la extracción y dispersión continuada de los mismos. Los trabajos de M. King Hubbert (1969 y 1974, reed. 1993) ocupan entre ellos un lugar importante, al aunar tempranamente la formalización matemática a la claridad expositiva. Tras constatar que estamos habituados a que una suma de dinero, que no tiene naturaleza física, se atenga a la regla del interés compuesto y aumente siguiendo indefinidamente una curva de crecimiento exponencial, este autor observa que la civilización industrial ha proyectado también sobre el mundo físico ese hábito del crecimiento exponencial, originando un comportamiento sin precedente en la historia de la humanidad, que a largo plazo se muestra inviable: la novedad e inviabilidad de ese comportamiento se derivan de que, primero, se apoya masivamente sobre la extracción de recursos no renovables de la corteza terrestre y, segundo, que practica estas extracciones de modo exponencial en el tiempo. Hubbert muestra con lápiz y papel que «ninguna cantidad física puede seguir una curva exponencial más que durante un relativamente breve período de tiempo». Para ello pone en conocimiento de los legos en la materia las implicaciones matemáticas del crecimiento exponencial, mostrando con ejemplos que la persistencia en el tiempo del aumento de una población o la expansión de cualquier objeto físico a una tasa acumulativa constante se revela inviable a plazos relativamente cortos, al desatar crecimientos exponenciales que transcienden las dimensiones de nuestro planeta. De ahí que el autor mencionado presente el crecimiento exponencial, como explícitamente indica el título del segundo de sus trabajos citados, como «un fenómeno transitorio» en la historia de la humanidad. Y viendo que la explota-

ción de determinados *stocks* de minerales, y muy particularmente los «energéticos», están siguiendo curvas exponenciales de crecimiento en nuestra actual civilización, se postula que tarde o temprano sus tasas de crecimiento tendrán que flexionar primero para transmutarse después en tasas de decrecimiento, dado el carácter limitado de estos *stocks.* Este autor enfrenta las curvas de extracción de determinados recursos minerales a la estimación de los *stocks* o reservas disponibles, utilizando para ello un procedimiento formalizado relativamente sencillo que facilita su interpretación. Veamos cómo se aplica al caso del petróleo.

El gráfico 21.2 representa la extracción de petróleo en miles de millones de toneladas anuales, en el eje de ordenadas, y el tiempo en años, en el de abcisas. Esta figura reproduce el ajuste que propusieron Hubbert (1969) y Warman (1971), de una exponencial a la curva de extracciones tal y como se venía produciendo hasta la primera «crisis petrolífera» de los setenta. También recoge la curva de agotamiento teórico, en el que la superficie comprendida entre la curva y el eje de abscisas representa la estimación del *stock* de petróleo convencional cifrado en 274 miles de millones de toneladas (equivalente a unos dos billones $(2 \cdot 10^{12})$ de barriles[5]). Al atenerse la extracción al carácter limitado de la reserva, la pendiente de esta curva de explotación inflexiona desde la exponencial originaria hacia el decrecimiento, mostrando una de las posibles sendas que puede seguir en el tiempo la extracción de un recurso no renovable. Esta curva de explotación teórica preveía para principios de los setenta una inflexión hacia tasas de crecimiento cada vez menores que se prolongaría hasta alcanzar un máximo hacia 1996, a partir del cual empezaría a decrecer (dada la simetría de la curva, este máximo coincide con el momento en el que se ha extraído la mitad del *stock).* Al añadir en el gráfico las toneladas de petróleo realmente extraídas hasta 1996, podemos observar que la inflexión producida tras la llamada crisis energética de los setenta fue bastante más acusada que la prevista en la curva de extracción teórica, aunque en los últimos tiempos vuelve a repuntar. De esta manera, en 1996 se habría extraído el 40% del *stock,* en vez del 50% que preveía la curva (quedando un 60% por explotar). Por lo que habría que desplazar la curva de previsiones hacia la derecha (desplazando la fase de declive unos quince o veinte años, cosa que no hemos hecho en el gráfico por evitar hacerlo más farragoso, sobre todo cuando nuestro propósito no es actualizar este tipo de previsiones, sino discutir su interés y sus limitaciones, en relación con nuestra propuesta metodológica)[6].

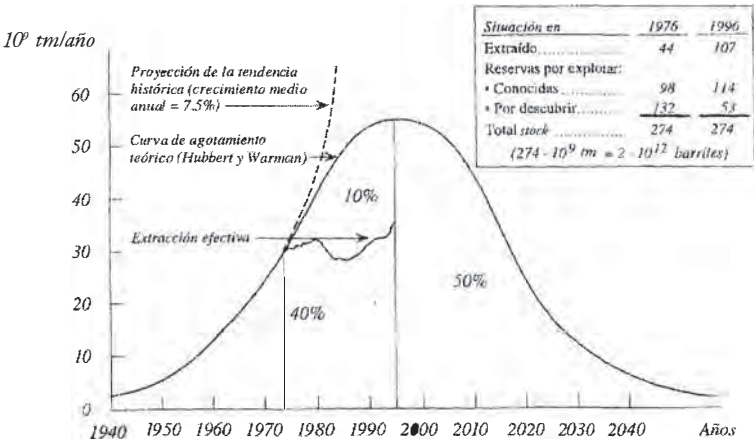
---

[5] 1 tm de crudo = 7,3 barriles.

[6] El lector interesado puede encontrar un intento reciente de actualizar el enfoque de Hubbert relacionándolo con variables económicas en CLEVELAND, C. J. y R. K. KAUFMANN (1997), «Forecasting Ultimate Oil Recovery and its Rate of Production: Incorporating Economic Forces into the Models of M. King Hubbert», en R. Constanza, Ch. Perrings y C. J. Cleveland, eds., *The Development of Ecological Economics,* Cheltenham, U.K., Edward Elgar Publishing Ltd., pp. 316-345.

Gráfico 21.2

AGOTAMIENTO TEÓRICO Y EFECTIVO DE LAS RESERVAS DE PETRÓLEO CONVENCIONAL



Fuentes: Este gráfico actualiza las curvas planteadas por Hubbert (1969) y Warman (1971), con datos de extracción anual y de reservas tomados del capítulo 6.4 y de Campbell (1997).

Hemos de subrayar que si hemos tomado el petróleo convencional como base de este ejercicio es, entre otras cosas, porque es uno de los recursos mineros mejor estudiados en la corteza terrestre. Esto hace que la estimación de los dos billones de barriles de reservas se haya mantenido vigente como una cifra razonable a lo largo de los últimos veinte años. Fue entre la década de los treinta y la de los sesenta cuando se descubrieron las dos decenas de depósitos «supergigantes» de Oriente Medio que acumulan cerca de la tercera parte de las reservas mundiales. Hoy se estiman descubiertos al menos el ochenta por ciento de los estratos sedimentarios existentes susceptibles de contener petróleo, y ha sido explorada la práctica totalidad de los accesibles a bajo coste, por lo que al parecer no caben grandes sorpresas en este campo. Lo cual reduce la incidencia de una primera limitación al uso del tipo de ejercicios matemáticos propuestos por Hubbert: la que se deriva del desconocimiento de las reservas disponibles, que hace que la curva de agotamiento se vaya desplazando hacia la derecha debido a los nuevos descubrimientos, aunque la extracción siga creciendo. Todo ello ante la desconexión antes mencionada entre las estimaciones de la geología sobre la composición de la corteza terrestre y la investigación minera en su búsqueda de esas rarezas que en dicha corteza son los yacimientos.

Una segunda limitación de este tipo de análisis procede de la definición imprecisa del recurso cuyas reservas se pretenden estimar y relacionar con las extracciones. Por ejemplo, no tiene mucho sentido hablar de agotamiento del hierro, cuando se trata de una sustancia muy abundante de la corteza terrestre que por mucho que se oxide y disperse seguirá siendo abundante. Pero sí tendría sentido hablar del agotamiento de determinados yacimientos con ciertas características de ley, tonelaje y accesibilidad, que corresponderían a ciertos tramos de coste físico y monetario de extracción. Aunque para ello habría que tender puentes entre los enfoques geológicos y los mineros, avanzando en la modelización de la composición y distribución de los yacimientos en la corteza terrestre, como sugerimos al inicio de este capítulo. En el caso del petróleo que estamos utilizando como ejemplo, habría que distinguir entre las reservas en esos depósitos «supergigantes» y fácilmente accesibles del Oriente Medio u otros cuyo coste no exceda de los *10$* el barril, de los yacimientos más pequeños, situados a mayor profundidad, en el mar, etc., que requieren procedimientos de extracción más onerosos, cuyos costes de extracción se sitúan entre los *10* y *20$* el barril. A este «petróleo convencional caro», que se empezó a explorar tras las «crisis petrolíferas» de los setenta, le seguirían otros de mayor coste todavía entre los que cabe esperar se encuentre el grueso de las reservas cuya puesta en explotación todavía no se ha producido: se trata del «nuevo petróleo», que daría paso al «petróleo no convencional», cuya extracción y proceso mostraría unos costes mucho más elevados. Por otra parte, no está de más recordar que ya durante la segunda guerra mundial el ejército alemán pudo paliar la penuria del petróleo convencional a partir del obtenido por la industria química a partir de carbón. Por lo que incluso en un recurso aparentemente tan claro como el petróleo, las reservas no plantean tanto un problema de cantidad como de costes. El verdadero problema estriba en que la era del petróleo barato parece estar aproximándose a su fin. A un nivel más general, cuando en el CERN[7] se consiguió hacer realidad la vieja quimera de «transmutar» plomo en oro, pero a un coste tan elevado que despojaba a su creación de todo interés económico, podemos decir que el problema que plantea el abastecimiento de los llamados recursos naturales no renovables es cada vez más un problema de costes y no de imposibilidad física de obtenerlos, lo cual revaloriza nuestra propuesta metodológica orientada precisamente al cálculo de los costes físicos por procedimientos susceptibles de aplicación general y agregación.

Concluyendo que, para que el esquema analítico de Hubbert adquiera plena utilidad, ha de aplicarse a dos niveles. Uno, micro, referido a depósi-

[7] Centro de investigación sobre altas energías con sede en Ginebra.

tos minerales concretos inequívocamente identificados y otro, el de máxima agregación, referido al conjunto de la corteza terrestre, que es la que en última instancia marca los *stocks* de forma también inequívoca.

Un reciente trabajo de Campbell (1997) ofrece un buen ejemplo de análisis desagregado, en el que se desglosan las reservas por yacimientos y países, indicando en cada caso si la curva de agotamiento de Hubbert ha superado la mitad del *stock* e iniciado la fase de declive. Este análisis pormenorizado es el que permite agregar después por grupos y obtener conclusiones más solventes (aunque dependan siempre, claro está, de la validez de los datos disponibles, que a veces aparecen alterados por razones políticas y comerciales). Este autor completa, por último, su análisis del petróleo «convencional», con el del gas y el petróleo «no convencional», advirtiendo cómo el primero empezó a cobrar peso a partir de la década de los setenta y el segundo lo hará en los primeros años del milenio en ciernes, sin que ambos consigan evitar el declive del conjunto de los hidrocarburos extraídos que se prevé para el siglo que comienza.

Pero la sustitución que se prevé para los hidrocarburos, se ha producido y se seguirá produciendo entre las sustancias que componen la corteza terrestre en general. Por lo que un mínimo afán de globalidad y coherencia exigiría completar y referir los análisis de sustancias concretas al agregado último de la corteza terrestre, siguiendo los pasos iniciados en este trabajo. Para ello lo verdaderamente significativo no son las cantidades de tales sustancias, sino la exergía de concentración y enlace químico de los minerales que las contienen, que nos ofrece la corteza terrestre en forma de yacimientos. Exergía que hemos calculado para algunas sustancias en los capítulos precedentes, dando las orientaciones necesarias para generalizar y agregar dicho cálculo para el conjunto de la corteza terrestre, abarcando así desde una perspectiva más amplia el problema de la sustitución de materias primas que escapa al estudio de cada sustancia por separado, limitando su interés. De esta manera podríamos llegar a representar la curva de agotamiento de la potencia de la corteza terrestre en un esquema como el presentado para el petróleo en el gráfico 21.2. Lo cual nos permitiría comparar este *stock* de potencia con el flujo de exergía que nos envía directamente el Sol y sus posibles derivados. Al igual que en su día se comparó la exergía en combustión que podría liberar el *stock* de combustibles fósiles, con la de origen solar (viendo que la almacenada por el petróleo equivalía a unos cinco días de radiación solar y la del total de combustibles fósiles a quince, Georgescu-Roegen, 1972), la aplicación de la metodología propuesta permitiría hacerlo para el conjunto de la exergía almacenada en la corteza terrestre, expresando en términos meridianamente cuantitativos el conflicto que plantea en términos físicos la sostenibilidad global de la civilización que nos ha tocado vivir. Con todo, hemos de advertir que no consideramos que el enfoque propuesto deba de ser el único de interés para

orientar la gestión del «capital mineral» de la Tierra. (En el Apéndice I que figura a continuación se presenta un abanico de posibles aproximaciones al tema). Pero sí el más importante para cuantificar en términos de coste físico (no de valor) la contribución de los recursos minerales al proceso económico y enjuiciar su sostenibilidad. Lo cual supone, nada más y nada menos, un prerrequisito esencial para enjuiciar la gestión sobre las bases racionales que ofrece la ciencia cuantitativa. Pero no permite cerrar el tema de la gestión proponiendo éste o aquel óptimo. Es más, estimamos que cualesquiera que sean las decisiones que la gestión adopte, serán fruto de juicios de valor, inclinaciones e instituciones, cuyas orientaciones escapan necesariamente al campo de la ciencia cuantitativa, aunque puedan venir informadas por ésta.

21.2. Contexto y utilidad de las propuestas*

Algunos malintencionados entienden como producto interior bruto aquel que expelemos después de haber digerido los alimentos. Lo cierto es que lo que mide el PIB de un país es cuando menos controvertido e incompleto. Si el PIB de un país se asimilara a la velocidad con que un barco navega hacia un destino (¿desarrollo económico?), entonces quedaríamos muy satisfechos de nuestra velocidad, como Phileas Fogg, que en su «vuelta al mundo en ochenta días» quema los aparejos, camarotes y todo contenido combustible de su barco con el único objetivo de llegar cuanto antes a puerto. No importa el barco, importa la velocidad. El problema con la Economía es que no hay puerto de destino y que si quemamos la nave, nos quemamos dentro.

¿Quién da cuenta del consumo de recursos no renovables y de la limpieza del aire y del agua? ¿Cómo incluir en la Contabilidad Nacional y Global la degradación medioambiental y la dispersión de recursos no renovables –combustibles fósiles y minerales– que hemos realizado para obtener nuestro adorado PIB? ¿Cuánto costaría en unidades monetarias reponer, con la tecnología actualmente disponible, la degradación anual que infringimos al planeta Tierra? Hay quien intenta cifrarla en términos monetarios para restarla del producto global y ver si habíamos avanzado o retrocedido realmente en nuestra evolución económica. Pero no se trata sólo de consideraciones monetarias, sino físicas. Mientras que cada generación no deje el «planeta como lo encontró», es decir, mientras cada familia, empresa o país no cierren su ciclo de materiales y energía, estaremos acortando el número de generaciones que podrán vivir al menos tan bien como la nuestra.

* Redacción de Antonio Valero.

Es evidente que los recursos no renovables ya utilizados no podrán ser repuestos, por ello es necesario hacer cuentas y ver la sustituibilidad física de un recurso físico consumido por otro que pueda ser repuesto alternativamente. Por ejemplo, nunca podremos reponer el petróleo que consumimos, pero sí fijar el CO_2 liberado en su combustión a través de la reforestación.

En este punto es importante hacer una reflexión acerca del concepto «no renovable». Si el concepto está unido a la irrevocabilidad, es decir, a nuestra incapacidad radical de reponer lo que fue, tal como fue, es evidente que todo recurso sería no renovable por definición, ya que ninguna mina podrá reponerse, ni el paisaje, ni sus contenidos podrán volver a ser justo como fueron antes de explotarse. Sin embargo, si el concepto está unido a la irreversibilidad termodinámica, la situación es más asequible, y ningún recurso no renovable lo sería *sensu strictu* ya que la irreversibilidad está ligada, como hemos visto, con el coste de reponer lo que fue, es decir, el coste de concentrar lo disperso, y reponer químicamente lo oxidado y físicamente lo degradado. El problema aparece con la exponencial –termodinámica o tecnológica– que el comportamiento del coste físico de reposición tiene frente a la concentración.

El conocimiento tecnológico podría avanzar hasta extremos impensados hoy, y, aun en el caso de que fuéramos omniscientes, la exergía de concentración sigue una tendencia exponencial, es decir, no lineal. Cuanto más degradamos el medio ambiente y cuanto más dispersamos más costoso es reponer. Éste es el sentido de no renovabilidad que nosotros entendemos. Nada es no renovable en sentido estricto, es simplemente costosísimo reponerlo, excepto con energía solar que luce todos los días, sin faltar uno solo, desde hace más de cuatro mil quinientos millones de años.

Nunca podremos reponer íntegramente lo que fue, cada generación tendrá que utilizar parte de los recursos fósiles y minerales de la Tierra y contaminarla hasta un determinado nivel. A cambio cada generación habrá avanzado en conocimientos y éstos nos ayudarán a reponer más eficientemente lo consumido y lo degradado. Cuanto más hagamos uso de la energía solar directa o indirectamente más nos aproximaremos a un balance cero en el deterioro de la Tierra. Y éste sólo se conseguirá si cerramos el ciclo de los materiales y la energía tomados de la corteza terrestre. Por ello no sólo hay que estudiar el impacto de los procesos «desde la cuna hasta la tumba», sino «desde la cuna hasta la cuna», es decir, desde la Naturaleza hasta la Naturaleza. No se trata de abatir o anular el efecto nocivo de los residuos hasta el medio ambiente muerto, sino reponerlos con energía solar hasta que vuelvan a ser reutilizables. Y en este proceso no valen atajos como la energía nuclear porque, ¿cómo podríamos recomponer la radiación emitida y los residuos nucleares producidos en combustible otra vez fisible con energía solar?

Si Gaia –el planeta vivo– ha sobrevivido a lo largo de millones de años, ha sido gracias a la ciclicidad, el agua, el carbono, el nitrógeno, el oxígeno, todos los elementos de la atmósfera, hidrosfera y corteza terrestres mantienen su ciclo y estos ciclos han sido alimentados por la energía solar. Si el hombre rompe estos ciclos en beneficio propio, lo hará de una forma insostenible a largo plazo.

¿Qué significa esto en términos prácticos? Que estamos haciendo un intercambio intergeneracional de recursos futuros por conocimiento, instalaciones y medios de consumo auxiliares y sospechamos que este intercambio no es equitativo.

Robert Solow (1992) dijo que «sería un auténtico logro que llegara a ser habitual tener en una misma escala de valores y sujetar a las mismas reglas de contabilidad a los activos naturales, los medioambientales y los del capital monetario. Si ello fuera así, formas profundas del pensamiento se verían afectadas». Aún añadimos nosotros, y también convendría incluir a los activos del conocimiento.

Con la teoría esbozada aquí, utilizando el concepto del Análisis Exergético de Ciclo de Vida, y un análisis sistemático de los costes de reposición de los materiales, en definitiva, el uso del Segundo Principio de la Termodinámica, se cubriría un prerrequisito imprescindible para atender a esa demanda de Solow. El camino aún es largo, pero necesario si alguien quiere defender con números a las generaciones venideras. Los problemas se empiezan a resolver cuando las cuestiones se trasladan a decisiones desde el sí o no a las de más o menos.

Entretanto, ¿qué hacer con los números que se obtendrían con la metodología presentada aquí? o, en otras palabras, ¿cuál es el mensaje práctico para actuar ya?

Es evidente que desarrollar un sistema de contabilidad energética global e integral de todos los productos sería un paso importante. Para ello deberían desarrollarse reglas contables, convenciones y acuerdos internacionales para poner en marcha y unificar la metodología. Y poner instituciones e instrumentos financieros para llevar adelante el programa de investigación. A. Valero ha propuesto en diferentes foros internacionales (ASME, Banco Mundial, UE, etc.) la realización de un proyecto global del estilo del proyecto GENOMA o el de enviar un hombre a la Luna, en el que centros de investigación y gobiernos se unieran en un esfuerzo global para conocer los costes energético-ecológicos de nuestra sociedad.

No obstante, las acciones se imponen mucho antes de llevar a cabo este proyecto o incluso aunque no se llevara a cabo. En efecto, nuestra sociedad consume recursos naturales no renovables y contamina el medio y no es fácil frenar la máquina de destrucción. En algunos casos ni siquiera se conoce la tecnología necesaria para evitarla. Así que difícilmente podre-

mos poner ecotasas sobre lo desconocido. Además, la Naturaleza no entiende de dinero, sólo de acciones de reposición.

Existe un concepto de la mayor importancia ecológica y es el concepto de resiliencia (K. Arrow *et al.,* 1995). O la capacidad que el medio natural tiene para absorber los impactos y perturbaciones que realizamos sobre él. En efecto, el medio natural está en equilibrio estable y es capaz de absorber perturbaciones hasta que se alcanza un umbral que lo hace evolucionar a otro estado estable diferente. Si queremos conservar el medio natural como hoy lo conocemos no debemos superar esta capacidad de carga umbral. Para ello hay que reponer, no con dinero, sino con acciones físicas que incrementen esta capacidad de carga.

Puede que no dispongamos de la tecnología de reciclar materiales desde el ambiente, ni siquiera sea conveniente desarrollarla. De la misma manera, exhaustar las emisiones hasta un extremo ambiente legal de referencia sería utópico. También lo sería renunciar al carbón, los combustibles fósiles o incluso al uranio a corto plazo. Sin embargo, podemos cuantificar todas esas acciones en términos exergéticos sobre el medio con la metodología aquí esbozada. Por tanto, lo que se proponen son acciones *sustitutivas* de reposición que actúen al menos de contrapeso a la capacidad de carga del planeta y sus ecosistemas.

Por ejemplo, acciones sobre la erosión de los suelos, sobre la pérdida de calidad y cantidad de las aguas subterráneas, la desertificación y la pérdida de biodiversidad. Conservar lo que existe, aprender de la Naturaleza y reponerla. La reforestación y la repoblación de especies son un medio práctico compensatorio. Existen muchos más. Lo importante es conocer y comprender nuestra deuda, e igual que las empresas y los gobiernos hacen sus cuentas monetarias y declaran el monto de su deuda con otras instituciones humanas, se deberían realizar los balances contables de nuestra deuda natural..., y saldarla, porque si no alguien la está pagando o la tendrá que soportar. El uso masivo de la energía solar, el reciclaje de materiales y la recuperación de la resiliencia de los ecosistemas son los procedimientos para saldar esta deuda.

APÉNDICES

APÉNDICE I. SOBRE LOS RECURSOS MINERALES

Lidia Ranz

La litosfera terrestre se encuentra integrada por numerosas y variadas agrupaciones minerálicas. Muchas de estas asociaciones de materiales han ido emergiendo hacia la superficie, empujadas y presionadas por elevadas tensiones generadas en las profundidades de la Tierra. Con el transcurrir del tiempo, la acción progresiva de estas fuerzas ha ido moldeando y esculpiendo el semblante terrestre, de forma que gran parte de su riqueza mineral se ha ido situando al alcance del hombre.

Algunos de los agregados minerales presentes en la superficie terrestre acompañaron los primeros pasos del hombre primitivo, quien percibiendo la existencia de rocas, guijarros y piedras que se acumulaban a su alrededor, comenzó a servirse de ellos para las más diversas actividades. Cuchillos, punzones, hachas y arpones formaron parte de este primer utillaje. Posteriormente, otros minerales particulares, los metales, contribuyeron al surgimiento y posterior desarrollo de las primeras civilizaciones, allá por tierras de Mesopotamia y del Nilo. Desde entonces hasta nuestros días, la utilización de rocas y minerales no sólo se ha mantenido, sino que se ha incrementado exponencialmente con el triunfo de la civilización industrial que, actualmente, extrae de la Tierra más de 20.000 millones de toneladas anuales de minerales no energéticos, y casi unos 10.000 millones de toneladas de combustibles fósiles y de uranio.

Convendría destacar, sin embargo, que no todas las agrupaciones de minerales que conforman la corteza terrestre constituyen un recurso para aquellas comunidades que desean arrancar el capital mineral que la Tierra encierra. De hecho, sólo son considerados como *recursos* aquellos minerales o rocas que se concentran en la corteza terrestre de forma que son susceptibles de ser explotados. Su extracción ha de ser posible en determinadas condiciones económicas, y ayudándose de la tecnología disponible en ese momento, o con la que se prevé contar en un futuro no muy lejano. Si además coincide que, a lo largo del intervalo temporal analizado, la concentración del depósito mineral que acoge a estos recursos llega a un punto tal que la rentabilidad económica de su explotación no sólo es posible, sino que es un hecho, el depósito se convierte entonces en *yacimiento económico*, y el mineral que estos depósitos contienen recibe el nombre de *reservas*.

Estas reservas de minerales que cada vez con más profusión arrancamos de las entrañas de la Tierra, constituyen uno de los principales motores de la economía mundial, puesto que suministran la mayor parte de las materias primas necesarias para la elaboración de los productos que más tarde consumimos. De este modo, el aumento de la producción de bienes y servicios al que anualmente asistimos, se traduce necesariamente en un incremento de la extracción de las rocas y los minerales que los integran. Y para hacer hincapié en la gran trascendencia que tienen estos recursos para nuestra sociedad actual, sirva la confirmación de que la práctica totalidad (más del 90% incluyendo uranio) de la energía que utilizamos en este fin de siglo es de origen mineral.

En España, en 1994, tal y como se desprende del cuadro A1.1, el consumo de energía procedente de combustibles fósiles representaba aproximadamente un 82% del consumo de energía primaria total. Si a este número le añadimos el consumo de energía nuclear, procedente del uranio, obtenemos que el consumo de energía mineral es del orden del 97% del total de la energía. El resto del consumo energético procede de fuentes energéticas renovables como son la energía hidráulica, la eólica o la solar. Sin embargo, convendría subrayar que aunque estas fuentes obtengan energía de recursos renovables como pueden ser el agua, el sol o el viento, utilizan convertidores de energía que necesitan también ingentes cantidades de recursos minerales para su creación y mantenimiento. Las grandes presas y los pequeños saltos de agua, los antiguos molinos de viento, los más modernos aerogeneradores, e incluso las células fotovoltaicas que componen los paneles solares, requieren de multitud de recursos minerales para elaborar sus estructuras.

A nivel mundial, según datos del World Resources Institute, el panorama es muy similar al caso español. El consumo de energía de origen mineral presenta incrementos anuales, constituyendo este tipo de energía

Cuadro A1.1

CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA EN ESPAÑA EN 1994

Tipo de energía	*Consumo de energía (ktep)*	*Porcentaje (%)*
Carbón	17.711	18,92
Petróleo	52.326	55,80
Gas natural	6.480	6,91
Hidráulica	2.418	2,58
Nuclear	14.415	15,37
Otros	231	0,25
Saldo	160	0,17
Total	93.771	100,00

Fuente: Energía 95, Forum Atómico Español.

el grueso del consumo energético global. En el cuadro A1.2 se observa cómo en 1991 la producción de energía mineral se cifró en el 97,2% del total de la producción de energía comercial, correspondiendo el grueso a combustibles fósiles, y tan sólo un 6,8% a la energía nuclear.

Cuadro A1.2

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA COMERCIAL
A NIVEL MUNDIAL EN 1991

Tipo de energía	*Producción energética (Petajulios)*	*Porcentaje (%)*
Comb. fósiles sólidos	93.689	27,97
Comb. fósiles líquidos	132.992	39,71
Comb. fósiles gaseosos	76.275	22,77
Hidráulica	8.049	2,40
Nuclear	22.669	6,77
Geotérmica y eólica	1.261	0,38
Total	334.935	100,00

Fuente: World Resources 1994-95.

Una vez puesta de relieve la gran importancia que para nuestra sociedad industrial tienen los recursos minerales, procedamos a una revisión rápida de las características con las que habitualmente los clasificamos y ordenamos.

A1.1. Características singulares de los recursos minerales

Los recursos minerales se caracterizan por un conjunto de propiedades que los diferencian de otros recursos naturales que nos ofrece la Tierra. Igualmente, los depósitos donde se acumulan poseen una serie de características que los distinguen de otras agrupaciones minerales de la corteza terrestre. Estas características pueden ser principalmente de dos tipos: intrínsecas o extrínsecas, y ambas responden a los enfoques de los distintos campos científicos desde los que los minerales se pueden analizar.

A1.1.1. Características intrínsecas

Las características intrínsecas son peculiaridades propias del mineral e independientes de la sociedad humana que las analiza. Entre éstas encontramos dos grandes grupos: las características físico-químicas y las geológico-mineras.

A1.1.1.1. Características físico-químicas

Las rocas y minerales que encontramos enquistados en el interior de los yacimientos minerales, se caracterizan en primer lugar por poseer una *composición química* específica, que los distingue de otras sustancias de su entorno.

Además, cuentan con una *concentración* altamente peculiar, que acostumbra a ser muy superior a la media que les correspondería en la corteza terrestre. En la tabla A1.3 podemos comparar para un conjunto de recursos, sus concentraciones medias en la corteza, con las concentraciones mínimas con las que estos elementos se encuentran en los yacimientos minerales en explotación. El factor de concentración de un elemento es el número de veces que debe ser superior su valor medio de concentración en la corteza, para que sea rentable su explotación en un yacimiento.

Cuadro A1.3

ABUNDANCIA EN LA CORTEZA TERRESTRE Y FACTOR DE CONCENTRACIÓN PARA ALGUNOS METALES

Elemento	*Abundancia en la corteza terrestre (%)*	*Factor de concentración*
Aluminio	8,13	4
Hierro	5	6
Cobre	0,02	140
Níquel	0,0108	175
Cinc	0,013	300
Uranio	0,0002	2.500
Oro	0,0000003	4.000

Fuente: Enciclopedia Británica.

La concentración y la estructura son características asociadas a los yacimientos minerales, pero un cambio de escala dentro de los mismos puede brindarnos la oportunidad de analizar también los minerales individuales que estos depósitos contienen. Procediendo así, los citados minerales pueden clasificarse en función de las propiedades magnéticas, ópticas, eléctricas o térmicas que presenten. La radioactividad y la luminiscencia pueden proporcionar otros criterios válidos de catalogación, y la densidad, la dureza, o el peso específico se convierten también en características a considerar.

A1.1.1.2. Características geológico-mineras

Si atendemos a los procesos de formación y concentración que han actuado durante la *génesis* de los depósitos minerales, éstos se pueden clasificar en tres grandes grupos: *ígneos, sedimentarios* y *metamórficos.*

Los yacimientos minerales de origen ígneo se hallan relacionados con los procesos de diferenciación y consolidación de los magmas. La primera corteza terrestre se compuso precisamente de este género de rocas. La masa magmática, que bien puede proceder del manto terrestre, o bien puede haber sido originada tras la fusión de rocas de la corteza continental, va abriéndose camino a través de ésta, fluyendo hacia zonas que reúnen condiciones de mayor estabilidad. Algunos de estos materiales ígneos, cristalizan antes de alcanzar la superficie, y dan lugar a los llamados yacimientos relacionados con *rocas intrusivas.* Dependiendo de la fase del proceso de diferenciación magmática en la que éstos se consoliden, dan lugar a yacimientos ortomagmáticos, neumatolíticos, pirometasomáticos o hidrotermales. Otros materiales ígneos se abren paso hasta el aire libre y fluyen a través de los cráteres de los volcanes, dando lugar en los sitios en que solidifican a *rocas extrusivas.*

El período de renovación de los depósitos de origen ígneo es altamente variable, pudiendo los procesos de concentración durar tan sólo unos días, como prolongarse durante millones de años. Sin embargo, aunque su concentración pueda ser muy rápida, habría que analizar también la orogenia que en algunos casos los hace accesibles. La erupción de un volcán, por ejemplo, puede conseguir en cuestión de días la formación de un yacimiento de azufre. Sin embargo, habría que analizar también la frecuencia temporal de ese suceso, ya que una acumulación de azufre de tal calibre no es un fenómeno que se repita con igual asiduidad. De hecho, si atendemos al proceso completo, la formación y concentración de minerales ígneos puede prolongarse durante millones de años.

Los yacimientos sedimentarios se forman como consecuencia de la acción conjunta de diversos agentes erosivos que, actuando sobre la superficie de la corteza terrestre, prolongan sus efectos durante millones de años. Los minerales que contienen estos yacimientos pueden proceder de masas depositadas después de la desintegración de rocas preexistentes, aunque también pueden tener como origen la acumulación de organismos vegetales y animales. Hasta su consolidación, los procesos que generan estos yacimientos pueden resumirse en: desintegración (causada por procesos mecánicos o alteraciones químicas), transporte, sedimentación y diagénesis.

Los yacimientos metamórficos están asociados con cambios importantes de presión y temperatura Se dividen en dos grandes grupos: los metamórficos regionales y los metamórficos de contacto. En el metamorfismo regional, materiales a menudo sedimentarios, se someten a altos niveles de

presión y temperatura, convirtiéndose tras la cristalización en minerales metamórficos. En el metamorfismo de contacto, es la temperatura el principal factor de variación. El magma intrusivo calienta rocas y minerales preexistentes, produciendo una estrecha zona de minerales recristalizados. Los gases volátiles del magma pueden causar alteraciones extensivas de la composición química, produciendo los llamados skarns. La cadencia de los procesos que dan lugar a yacimientos de tipo metamórfico es también muy larga, del orden de millones de años.

Otras características geológicas de los yacimientos minerales son su tamaño, su geometría, su composición mineralógica o su asociación geológica. La profundidad a la que se encuentran y la roca encajante son otros factores a tener en cuenta en las prospecciones mineras.

A1.1.2. Características extrínsecas

Las características extrínsecas de los minerales son de índole socioeconómica, y entre éstas podemos hallar: su utilidad, su necesidad, su sustituibilidad, su toxicidad, su valor económico, etc. Estas propiedades dependen de la sociedad que las juzga, y por tanto son muy variables en el espacio y en el tiempo.

A1.1.2.1. La utilidad

Cada sociedad tiene un concepto distinto sobre la utilidad que le puede reportar un determinado recurso mineral, ya que el concepto de utilidad corre paralelo a las funciones para las que cada comunidad decide destinar al recurso en cuestión. Y estas funciones varían conjuntamente con las condiciones económicas, culturales, científicas y tecnológicas que en cada instante confluyen en el seno social.

Los recursos energéticos sobre los que hoy día se asienta nuestra civilización industrial, constituyen un buen ejemplo del cambio que sobre su utilidad se ha producido a lo largo de la historia. El caso del petróleo es de todos conocido. Esta sustancia bituminosa ya era utilizada por los sumerios para la construcción de acequias y canales, además de constituir un elemento indispensable en la elaboración de pinturas. Sus usos medicinales estaban muy extendidos, empleándose principalmente como linimento para fricciones y heridas. Está registrada también su utilización en la construcción de caminos, así como su empleo en los procesos de calafateo de naves y barcas.

Estas utilizaciones que del petróleo hicieron estos pueblos de la antigüedad cayeron prácticamente en el olvido con la aparición de las civiliza-

ciones griega y romana. Al estar tanto Grecia como Roma ubicadas en ámbitos territoriales alejados de Egipto y Mesopotamia, sus entornos circundantes eran muy distintos, estando éstos integrados por materiales diferentes. Así que, tanto los helenos como los romanos, pudieron cubrir sus necesidades utilizando minerales autóctonos, sin tener que recurrir al petróleo que era un elemento muy poco común en sus tierras, por lo que su existencia fue prácticamente enterrada en el olvido.

El interés por el petróleo resurgió con el empuje de los árabes, al comenzar éstos a interesarse por el arte de la destilación, y por las sustancias que esta técnica proporcionaba. Tras aplicarla al caso del petróleo, comenzaron a recoger algunos de los productos que de él así se derivaban. Pronto les encontraron utilidad, constituyendo la elaboración de perfumes y el alumbrado de calles y casas, algunos de sus destinos más afamados.

Sin embargo, todo este conocimiento acerca de la posible utilidad del petróleo y sus derivados volvió a caer en el olvido, y no fue hasta mediados del siglo XIX, que se recuperaron algunos de estos usos. De la mano de los primeros pozos petrolíferos, una nueva era industrial comenzaba. Los productos procedentes de la destilación del petróleo empezaron entonces a emplearse con gran profusión. El queroseno comenzó a comercializarse para iluminación, como combustible en lámparas de aceite. La nafta, por ejemplo, se empezó a utilizar para calentar edificios, y pronto empezó a competir con el carbón en la producción de energía eléctrica. La gasolina, una vez acoplado el motor de explosión al automóvil, se reveló como un práctico combustible para la tracción, contribuyendo posteriormente al desarrollo de la motorización en masa. La industria petroquímica inventaba y multiplicaba los usos del petróleo y sus derivados. Y este producto orgánico cuya utilidad fue desconocida y por tanto inexistente durante grandes períodos de la historia, alcanzó en este siglo unas cotas de utilización como pocas sustancias las habían alcanzado con anterioridad.

El uranio es otro mineral cuya utilidad se ha modificado a lo largo de la historia. Las primeras fuentes escritas que testifican su existencia datan de finales del siglo XVIII, sin embargo, no fue hasta mediados del siglo XIX cuando realmente se consiguió aislar el metal. Con el descubrimiento de la radioactividad, el interés por su estudio se intensificó. Sin embargo, a pesar de ello, en la década de los años veinte sus aplicaciones todavía no dejaban de ser testimoniales. Se utilizó como sustancia colorante para cristales y vidrios, además de constituir un sustituto ocasional del tungsteno. Realmente no fue considerado útil hasta casi mediados del siglo XX, donde los descubrimientos que brindó la nueva física atómica se compaginaron con el desarrollo de la tecnología adecuada para explotar la potencialidad de este mineral, primero residualmente como fuente ener-

gética de primera magnitud, y más tarde como arma militar de gran potencia.

Después de la II Guerra Mundial, el uranio empezó a emplearse industrialmente para la generación de energía eléctrica en centrales nucleares y, en menor medida, aprovechando sus propiedades radioactivas, en clínicas y hospitales. También se utilizó en geología y arqueología como instrumento útil para la datación. Estos usos del uranio se mantienen hoy en día conjuntamente con aquellos otros armamentísticos, que al ser tristemente conocidos no merecen más comentarios.

A1.1.2.2. La necesidad

La necesidad corre a menudo pareja con la noción de utilidad, y es consecuencia de la estructura económica sobre la que se asienta la sociedad. Hay minerales que, aunque se consideran útiles, no son estrictamente necesarios, puesto que las funciones para los que estos minerales se destinan, o son superfluas o podrían ser cubiertas por otro tipo de mineral. Un ejemplo de la variación en el tiempo del concepto de necesidad del mineral, lo puede constituir de nuevo el petróleo. Como ya se ha mencionado, tras pasar desapercibido a lo largo de dilatadas etapas de la historia, este compuesto orgánico se ha convertido en la actualidad en un producto de primera necesidad, que no solamente es fuente de energía, sino que, además, constituye una valiosa materia prima para multitud de industrias de plásticos, textiles, de alimentos, etc. Incluso para la agricultura, puesto que tras el triunfo de la Revolución Verde, se ha convertido en un elemento imprescindible.

A1.1.2.3. La toxicidad

El carácter tóxico de un material, ya sea para la vida humana o para el medio ambiente en general, puede en muchos casos desconocerse, y son los nuevos descubrimientos de la medicina o de la ecología los encargados de sacar a la luz los posibles efectos contaminantes que poseen algunas sustancias. El plomo, por ejemplo, se solía utilizar para la construcción de cañerías en edificios y viviendas. Mas tras conocerse su carácter contaminante, se dejó de emplear con este fin, sustituyéndose en muchos casos por otros productos.

Y más cercano es el caso del mercurio, uno de cuyos principales usos desde los años cuarenta hasta la década de los sesenta, fue en cátodos de cubas electrolíticas para la producción de cloro y sosa cáustica. Sin embargo, en la actualidad este uso prácticamente se ha abandonado

debido a los peligros que las emisiones mercuriales acarrean al medio ambiente. La regresión de la minería del mercurio en el mundo es un hecho fácilmente comprensible. Si tenemos en cuenta el período de desarme que actualmente atravesamos, además de la fama de contaminante que recientemente acompaña al mercurio. La existencia de grandes *stocks* de este material almacenados durante las décadas anteriores, ha reforzado aún más la tendencia a la baja a la que hoy en día está sometida su producción. Incluso en la milenaria Almadén se ha tenido que suspender temporalmente la extracción de nuevo mineral.

A1.1.2.4. La sustituibilidad

A menudo, las características semejantes de algunos minerales permiten que para ciertas funciones puedan reemplazarse unos por otros. La sustitución puede hacerse por motivos de escasez, debido al fuerte impacto ambiental que puede provocar su extracción, o debido a la peligrosidad o toxicidad de sus residuos. A este último caso responde el ya mencionado relevo del mercurio por celdas de diafragma en los procesos de generación de cloro y de sosa cáustica. Convendría sin embargo recalcar que, generalmente, las razones que más peso tienen para que se produzca el cambio de unos recursos por otros, son de índole económica o estratégica.

Los recursos energéticos destinados a la producción de electricidad constituyen un buen ejemplo de ambos casos, ya que en principio todos ellos son sustituibles entre sí. Francia, por ejemplo, ha apostado por la energía nuclear debido principalmente a razones estratégicas. La búsqueda de la mínima dependencia energética del exterior ha sido el factor que ha primado en la configuración de su política energética. En España, las fuertes subvenciones estatales que se han venido concediendo a la maltrecha minería del carbón se revelan también como un claro ejemplo de decisión política en materia de recursos. Las razones en este caso han sido de índole fundamentalmente social. Hoy en día, sin embargo, estas actuaciones se van a modificar. Tras el giro político que va a suponer la liberalización del sector energético, se ha preferido dejar la elección de los recursos a utilizar en manos de la lógica del mercado, de forma que la sustitución de unos recursos por otros vendrá guiada por los dictados de los vaivenes económicos.

A1.1.2.5. Valor económico

La valoración económica de los recursos naturales, y en particular de los minerales, se decide en mercados internacionales. Como se desprende de los datos del World Resource Institute (1994), la evolución de las cotizacio-

nes de los metales, así como la de los minerales energéticos, muestra una acusada tendencia a la baja. Sin embargo, las extracciones de estos minerales se incrementan año tras año. De forma que a nivel mundial, cada vez se consumen más recursos minerales a precios cada vez más baratos.

Como se ha esbozado anteriormente, los recursos minerales son recursos limitados en cantidad y no renovables (al menos si los comparamos con la cadencia generacional humana), por lo que su extracción constituye una pérdida del capital primigenio que nos ofrece la Tierra. Además, su importancia es enorme, ya que constituyen el motor y el combustible de la economía mundial. Lo cual nos lleva a que las actuaciones relacionadas con los recursos minerales deberían apoyarse en una gestión responsable de los mismos que, teniendo en cuenta la riqueza mineral del territorio a administrar, contabilizara las pérdidas de capital debidas a la extracción. Una vez realizada la contabilización de los *stocks* de capital mineral de un territorio, debería implementarse una política que estableciera prioridades y ritmos de extracción de estos recursos, sin perder de vista el ciclo global de las actividades mineras.

Precisamente, con las nociones de *coste termodinámico exergético* o *coste físico* que hemos introducido en este libro, pretendemos desarrollar una metodología que allane el camino hacia una gestión más responsable de los recursos minerales. El disperso y variado mundo mineral se puede unificar bajo una perspectiva energética, y ordenarse de acuerdo con las citadas nociones de coste físico. Sin embargo, y para no suscitar falsas expectativas, convendría recalcar ya desde este instante que la valoración energética que proponemos tiene en cuenta solamente dos propiedades físicas de los recursos minerales, como son su estructura y su concentración. No aporta, por tanto, información alguna sobre el resto de las características minerales que antes hemos repasado. Por ello, la citada metodología energética se configura como una herramienta útil para la gestión, empleada como un instrumento más a combinar con otros.

APÉNDICE II. SOBRE LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE LA RADIACIÓN SOLAR

Antonio Valero

El petróleo como combustible fósil es irreproducible en términos prácticos ya que es una mezcla dependiente de su origen geológico, muy variable de hidrocarburos desde cadenas cortas a muy largas, es decir, desde gases licuados del petróleo o GLP hasta asfaltenos.

Con radiación solar, sin embargo, sí se pueden producir hidrocarburos que puedan ser utilizados como combustibles. Describir someramente los procesos de obtención y su rendimiento es el objeto de este apéndice.

La fotosíntesis es el proceso químico más importante que tiene lugar en la Tierra. Sin él no habría vida, y convertir la radiación solar en sustancias orgánicas rompiendo las moléculas de CO_2 y agua a temperatura ambiental es uno de los fenómenos más fascinantes desde un punto de vista energético que quizá existan.

Básicamente, la fotosíntesis consiste en la reacción

$$nCO_2 + nH_2O \xrightarrow[\text{plantas verdes}]{\text{luz solar}} (CH_2O)_n + nO_2, \quad DG_0 = 114\, kcal/mol)$$

donde la fórmula general $(CH_2O)_n$ representa un carbohidrato como podría ser la glucosa cuando n es seis. No toda la luz solar, compuesta de fotones de diferente longitud de onda, es activa. De todo el espectro de la radiación solar, el proceso fotosintético es óptimo cuando se absorbe la radiación roja cuya longitud de onda corresponde a 680 nanometros $(1nm = 10^{-9}\, m)$. Esta radiación es absorbida por unos pigmentos contenidos en los vegetales llamados clorofitos que dan el característico color verde a las plantas ya que absorben el color rojo y emiten su color complementario, el verde. Aunque existen otros pigmentos cloroplásticos que absorben a diferentes longitudes de onda, como los carotenoides o las ficobilinas propias de las algas azules, son los pigmentos clorofílicos los más abundantes y eficientes.

La ganancia exergética en el proceso es de *114 kcal/mol*, es decir, el proceso inverso de combustión del carbohidrato liberaría ciento catorce kilocalorías de exergía por cada mol. Pero para producir la fotosíntesis se necesitan al menos *420 kcal* de radiación solar roja. Por lo que el rendimiento del proceso clorofílico se estima en un 25-27% o, en otras palabras, el coste exergético del proceso clorofílico de producción de carbohidratos es cuatro.

No obstante, existen muchas más pérdidas en el proceso. De una parte, sólo se puede aprovechar un 50% de la radiación que es la que corresponde al espectro utilizable por la reacción de fotosíntesis, entre 400 y 700 nm. Por otra, no toda la radiación que llega a la hoja es absorbida ya que en parte se refleja o es absorbida por otros centros no fotosintéticos. De tal forma que menos de un 10% de la energía solar que llega a la planta se fija. Además, la respiración, que es el fenómeno contrario por el que los vegetales queman los carbohidratos para producir CO_2 y agua, se lleva otro 50% de toda la producción fotosintética. Si a ello añadimos las condiciones reales de una planta, como son temperatura y asimilación de nutrientes variable, el rendimiento neto de conversión no supera el 0,3%. Este valor se convierte en el ya citado en el libro de 0,023% a nivel de toda la Tierra y en promedio bajo todas las condiciones posibles.

Es decir, el coste físico de una planta para fijar el carbón medido en unidades de energía solar estará comprendido entre 300 y 5.000 (0,3 y 0,023% de rendimiento de conversión). Se podrá alegar que no pagamos por la energía solar y que el Sol va a seguir emitiendo exista o no la planta; sin embargo, estos números nos enseñan lo francamente mejorable que aún podría ser la eficiencia fotosintética. Además, dado que la radiación solar extraterrestre es aproximadamente igual a *2 cal/cm²/min*, significa que con esa productividad fotosintética se necesitan entre *600* y *10.000 cm²* de superficie para tener una potencia energética productiva promedio de *2 cal/minuto* o en términos de toneladas equivalentes del petróleo *30-2,4 tep/ha*. Esto equivale a que cada europeo medio necesitaría al menos la energía que proveen entre 0,16 y 2 has para mantener su ritmo de consumo si toda la energía que consumiera proviniera de la biomasa. Ello sin considerar otros requerimientos de espacio y sobre la base de que absolutamente toda la biomasa fuera destinada a consumo energético humano. En otras palabras, estos valores están aún muy por debajo de unos valores más realistas.

Si se desea una alta productividad en biocombustibles es evidente que primero hay que preguntarse cuáles son los biocombustibles con mayor potencial energético. Por unidad de masa el mejor combustible es el hidrógeno (*28.100 kcal/kg*), le siguen el metano *(11.800 kcal/kg)*, los biocarburantes de automoción *(10.400 kcal/kg)*, el etanol *(6.600 kcal/kg)*, el amoníaco (*4.400 kcal/kg)* y la madera *(entre 2.000 y 6.000 kcal/kg)*.

La producción de *hidrógeno* se puede obtener con microorganismos fotoproductores, como algunas algas verdes, rojas, cianobacterias y bacte-

rias púrpuras y verdes que descomponen el agua o la materia orgánica liberando hidrógeno. Aunque el hidrógeno está quizá llamado a ser el combustible del futuro, hoy en día la producción biológica de hidrógeno no ha alcanzado más que la escala de laboratorio debido a su baja productividad y elevada complejidad de mantenimiento de las condiciones de reacción.

Un problema con el hidrógeno es su volumen, dos gramos ocupan en condiciones normales 22,4 litros, ello obliga a almacenarlo bien a elevadas presiones o en forma de hidruro embebido en una matriz metálica que lo adsorbe. El metano ocupa ocho veces menos volumen y su producción es más sencilla ya que cualquier fermentación anaerobia de una sustancia orgánica tenderá a producirlo.

El metano o mejor biogás, ya que siempre se produce una mezcla con gas carbónico, se obtiene a partir de residuos agrícolas, marinos y forestales, procedentes del ganado o de residuos urbanos tratados en un digestor que en ausencia de aire hace actuar una flora bacteriana metanogénica muy compleja e interdependiente que dificulta el estudio de su optimización.

La producción de un digestor es típicamente inferior a *0,5* m^3 de biogás por kilogramo de materia orgánica biodegradable, teniendo en cuenta que el biogás tiene una potencia calorífica aproximadamente la mitad que el metano y típicamente entre *4.000* y *6.000* $kcal/m^3$. El rendimiento energético de este proceso está alrededor del 50%; lo que multiplica por dos el coste exergético inicial de la materia prima utilizada.

Los *biocarburantes* que se pueden utilizar para automoción son esencialmente de dos tipos, los derivados de aceites vegetales y los de alcohol obtenidos de la fermentación de sustratos biológicos con elevado contenido en azúcares. Los primeros se utilizan como sustitutivos del gasóleo en motores diesel y los segundos se utilizan en motores de encendido provocado como sustitutivos de la gasolina.

Cualquier *aceite vegetal,* en principio, puede ser utilizado en un motor diesel, sin embargo, sus propiedades físicas, sobre todo de viscosidad, desaconsejan su uso directo. Por ello se recurre a un proceso de esterificación con alcohol etílico que mejora sus características como carburante. En Europa, se utiliza extensivamente este proceso a partir del aceite de colza y en menor cantidad de girasol. No obstante, otros aceites –como el de oliva, soja, palma, etc.– podrían ser utilizados. Si ello no se hace es por razones económicas o porque los países que producen dichos aceites están más preocupados por el uso alimentario.

El hecho de que estos aceites se producen a partir de su extracción de las semillas ya da idea de la baja productividad general que se consigue.

La producción de biodiesel se realiza a partir del aceite crudo. Por cada kilo de semilla se obtienen entre *0,43* y *0,45 kg* de aceite crudo que luego se desgoma y se neutraliza para estabilizarlo. Posteriormente, se realiza el

proceso de transformación que consiste en hacerlo reaccionar con metanol según la reacción siguiente:

105 kg aceite vegetal + 11 kg metanol → 100 kg éster metílico + 12 kg glicerina

en presencia de un catalizador como hidróxido potásico. Es el éster metílico del aceite al que se llama propiamente biodiesel.

En general, el coste económico de obtención del biodiesel aún no es competitivo ya que es del orden de dos a tres veces superior al del coste de obtención del gasóleo. No obstante, por efectos de economía de escala, si se produce en plantas de transformación con capacidad superior a *20.000 tm/año*, se puede conseguir un precio de obtención equivalente al del gasóleo, si al biodiesel no se le cargan las tasas que gravan al gasóleo. La productividad de aceite de girasol por hectárea es de alrededor de *1.500-2.300 kg/ha/año*, mientras que la de colza se sitúa entre *2.000 y 2.800 kg/ha/año* para climas templados y en zona de regadío.

La otra alternativa más desarrollada de producción de biocarburantes consiste en generar *etanol* a partir de cultivos agroenergéticos como son los de caña de azúcar *(5.000-10.000 litros etanol/ha/año)*, remolacha *(3.500-6.500 l/ha/año)*, maíz *(2.500 l/ha/año)*, patata, sorgo azucarado y otros. Brasil ha sido el país que más fuerte ha apostado por este proceso a partir de la caña de azúcar, mientras que Estados Unidos lo produce sobre todo a partir de los excedentes del maíz.

Tecnológicamente, las fermentaciones de celulosa en glucosa y ésta en alcohol son bien conocidas y su rendimiento mejora constantemente. No obstante y en el mejor de los casos, como es la caña de azúcar, con una productividad de *60 tm/ha* y una producción de *70 l/tm*, significa una energía bruta fijada de *2,7 tep/ha/año*. Pero para producir un kilogramo de etanol se estima que en su proceso se necesitan unas *1.600-1.800 kilocalorías*, es decir, un 25% de la energía que se produce se consume en el mismo proceso, por ello la productividad neta de la caña de azúcar en producción de bioalcohol es, en el mejor de los casos, de *2 tep/ha/año*.

Cabe citar finalmente en el apartado de biocarburantes los esfuerzos realizados por cultivar plantas que produzcan directamente hidrocarburos como la «hevea brasiliensis» o árbol de caucho, el género de las «euphorbias» y los pinos resinosos. Estos hidrocarburos son, no obstante, difícilmente transformables en carburantes y no hay desarrollos industriales hasta la fecha. También cabe citar algunas algas unicelulares de agua dulce que acumulan hidrocarburos en forma de glóbulos en su pared celular y que han llegado a dar una producción de *2,5 tep/ha/año*.

La utilización de la *madera* producida en cultivos con fines energéticos o los residuos agrícolas y forestales constituye el siguiente escalón del uso de la biomasa con fines energéticos. El objetivo final del uso de estos productos es obtener energía de su combustión, bien directa o por un proceso

intermedio de gasificación, pirólisis u otros. Por tanto, si son cultivos agroenergéticos se buscan productividades elevadas, como es el caso de los cultivos de rotación corta tales como plantaciones de chopo, sauce, álamo, eucalipto, etc., en los que se consiguen hasta 10-20 toneladas de materia seca/ha y año. Mientras que en el caso de residuos agrícolas y forestales, la productividad es un factor secundario. Un valor típico de producción podría ser en este caso de *400-2.000 kg* de materia seca/ha y año dependiendo de la explotación.

Si la producción energética está destinada a convertir la biomasa en electricidad, los rendimientos esperables estarán entre un 20 y un 40%, dependiendo de la tecnología empleada. Si, por el contrario, el proceso va encaminado a producir calor, el rendimiento energético puede estar entre un 60 y un 80%.

En resumen, dadas las enormes posibilidades del mundo vegetal, la biomasa puede ser una fuente enrgética tan versátil que cualquier aprovechamiento energético es viable, es decir, producción de calor, electricidad y biocarburantes para automoción. Asimismo, se puede producir en las más diversas formas, como gas, líquido o sólido. Otra cosa es la productividad vegetal y las eficiencias de los procesos de transformación. Por ello, es complejo dar un valor que pueda considerarse razonablemente típico de la conversión de la radiación solar sobre la superficie de la tierra en biomasa. Como hemos dicho, éste podría ser entre un 0,3 y 0,6% o, lo que es lo mismo, un coste físico de 300 a 600 unidades de exergía solar a nivel del suelo necesarias por unidad de exergía de biomasa producida. Éste, por tanto, sería el coste físico aproximado de sustituir cada kilocaloría que quemamos de combustible fósil. A pesar de tan elevado coste, es el procedimiento más barato y disponible que tenemos. ¿Hasta qué punto somos conscientes del coste de reposición de los combustibles fósiles que tan despreocupadamente quemamos?

Bibliografía

ABBOTT, M. M., y H. C. VAN NESS (1989), *Theory and Problems of Thermodynamics*, McGraw-Hill. (Versión española, Edit. McGraw–Hill, 1991).

AHRENDTS, J. (1980), «References States», *Energy*, Vol. 5, pp. 667-677.

ALTING, L. L., y J. B. LEGARTH (1995), *Life-Cycle Engineering and Design Life Centre*, Copenhague, DTU.

ARROW, K., B. BOLIN, R. CONSTANZA, P. DASGUPTA, C. FOLKE, C. S. HOLLING, B. O. JANSSON, S. LEVIN, K. G. MALER, Ch. PERRINGS y D. PIMENTEL (1995), «Economic Growth, Carrying Capacity and the Environment», *Science*, Vol. 268, pp. 520-521.

BOUSTEAD, I. (1994), «What can we do with LCA?», *Proceedings of Intl. Conference on Ecobalance-LCA for Development of Materials and Tecnologies*, 25 de octubre.

BOUSTEAD, I. (1996), «LCA-How it came about. The Beginning in the U.K.», *Intl. J. of Lyfe Cycle Assessment*, Vol. 1 (3), pp. 147-150.

CAMPBELL, C. J. (1997), «Depletion Patterns Show Change Due for Production of Conventional Oil», *Oil & Gas Journal*, 29 de diciembre, pp. 32-37.

CHARLES, R. J. (1957), *Trans AIME*, Vol. 208, 87. Citado por E. Cook, 1976.

CLEVELAND, C. J. (1991), «Natural Resource Scarcity and Economic Growth Revistied: Economic and Byophisical Perspectives», en R. Constanza, ed., *Ecological Economics-The Science and Management of Sustainability*, Nueva York, Columbia Univ. Press.

CLOUD, P. (1977), «Mineral Resources and National Destiny», *Ecologist*, Vol. 7, núm. 7, agos.–sep.

COOK, E. (1976), «Limits to Exploitation of Nonrenewable Resources», *Science*, Vol. 191, pp. 677-682.

COURNOT, A. A. (1861), *Traité de l'enchainement des idées fondamentales dans les sciences et dans l'historie*, París, Hachette. (Versión española, Edit. Espasa-Calpe, Buenos Aires, 1946).

FAVA, J., R. DENISON, B. JONES, M. CURRAN, B. VIGON, S. SELKE y J. BARNUM, eds. (1991), *A Technical Framework for Life Cycle Assessment*, Pub. for SETAC, Pensacola, Florida.

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1971), *The Entropy Law and the Economic Process*, Cambridge, Massachusetts, Harvard Univ. Press. (Versión española, Fundación Argentaria y Visor Dis., S.A., 1996).

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1972), «Energy and Economic Myths», Reed. 1996 en *Energy and Economic Myths an Institutional and Analytical Economic Essays*, Nueva York, Pergamon Press (publicado en castellano en *El Trimestre Económico,* octubre-diciembre de 1975).

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1977), «The Steady and Ecological Salvation: A Thermodynamic Analysis», *Bioscience*, Vol. 27, p. 226.

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1983), «The Promethean Condition of Viable Technologies», *Materials and Society*, Vol. 7, núms. 3-4, pp. 423-435.

GOODSTEIN, D. (1994), *Nature*, Vol. 368, 14 de abril, p. 598.

HÄRTE, J. (1988), *Consider a Spherical Cow*, Univ. Science Books, Mill Valley, California.

HAWKING, S. W. (1988), *A Brief History of Time. From Big-Bang to Black Holes*, Nueva York, Bantam Books. (Versión española, Edit. Crítica, Barcelona, 1988).

HUBBERT, M. K. (1969), «Capítulo sobre recursos energéticos», en *Committee on Resources and Man,* Natl. Acad. of Sciences, Natl, Res. Council, *Resources and Man*, San Francisco, W. H. Freeman.

HUBBERT, M. K. (1974), «Exponential Growth as a Transient Phenomenon in Human History», en M. A. Strom, ed., *Societal Issues, Scientific Viewpoints*, Nueva York, American Inst. of Physics (reed. en H. E. Daly y K. N. Tawsend, eds., 1993), *Valuing the Earth: Economics, Ecology, Ethics.* Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.

HUXLEY, A. (1978), «The Human Situation Lectures at Santa Barbara, 1959», Londres, Triad Grafton Books, en *Man and his Planet,* pp. 20-34.

LEONTIEFF, W. (1966), *Input-Output Economics*, Cambridge, Massachusetts (versión española, Ariel, Barcelona, 1973).

LEONTIEFF, W. (1970), «Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach», *Review of Economics and Statistics*, Vol. 52, núm. 3, agosto.

NAREDO, J. M. (1987), *La economía en evolución*, Madrid, Siglo XXI de España Editores (reeditado en 1996).

ORTIZ, A. (1993), «Los recursos mineros», en J. M. Naredo y F. Parra, eds., *Hacia una ciencia de los recursos naturales*, Madrid, Siglo XXI Editores.

PAGE, N. J., y S. C. CREASEY (1975), «Ore Grade, Metal Production and Energy», *Journ. Research U.S. Geological Survey*, Vol. 3, núm. 1, pp. 9-13.

POWEL, J. C, D. W. PEARCE y A. L. CRAIGHILL (1997), «Approaches to Valuation in LCA Impact Assesment», *Int. J. of Life Cycle Assessment*, Vol. 2 (1), pp. 11-15.

PRIGOGINE, I. (1980), *Temps et devenir*, París, Masson.

PRIGOGINE, I. (1993), *Le leggi del caos*, Roma, Laterza (versión española, Edit. Drakontos Crítica, Barcelona, 1997).

PRIGOGINE, I. e I. STENGERS (1979), *La nouvelle alliance. Metamorphose de la science*, París, Gallimard.

RUTH, M. (1995), *Ecological Economics,* núm. 15, pp. 197-213.

SCHMIDT-BLEEK, F. (1994), *Wieviel Umwelt brauch der Mensch?: MIPS-das Mass für ökologisches Wirtschaften,* Basilea, Berlín, Birkhäuser.

Society for the Promotion of LCA Development, SPOLD (1993), *The LCA Sourcebook, A European Business Guide to Life-Cycle Assessment*, Sustainability, ISBN 0-9521904-0-0, Londres.

SOLOW, R. (1992), «An Almost Practical Step toward Sustainability», edición en internet www.rff.org de la conferencia invitada por el cuarenta aniversario de *Resources for the Future*, octubre, Washington D.C.

SZARGUT, J. (1989), «Chemical Exergies of the Elements», *Applied Energy*, Vol. 32, pp. 269-286.

SZARGUT, J. y D. R. MORRIS (1986), «Standard Chemical Exergy of some Elements and Compounds on the Planet Earth», *Energy*, Vol. 11, pp. 733-755.

SZARGUT, J., D. R. MORRIS y F. R. STEWARD (1988), *Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*, Nueva York, Hemisphere.

TAYLOR, S. R. y S. M. MCLENNAN (1985), *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*, Londres, Blackwell.

TYLER MILLER Jr., G. (1990), *Resource Conservation and Management*, Belmont, California, Wadsworth Pub. Co.

U.S. Department of Interior, (1997), «U.S. Geological Survey and Bureau of Mines», *Mineral Commodity Summaries, 1996*, Washington D.C, U.S. Department of Interior.

VALERO, A., V. SUBIELA y C. CORTÉS (1994), «Balance de emisiones y consumos de dióxido de carbono en España», *Energía*, sep-oct., pp. 97-107.

VALERO, A., C. TORRES y L. SERRA (1992), «A General Theory of Thermoeconomics: Part I, Structural Analysis», en A. Valero y G. Tsatsaronis, eds., *ECOS'92, The International Symposium on Efficiency, Costs, Optimization and Simulation of Energy Systems*, Nueva York, ASME Book I00331.

WARMAN, R. H. (1971), «Future Problems in Petroleum Exploration», *Petroleum Review*, marzo.

World Resources Institute (1994), *World Resources 1994-1995, A Guide to the Global Environmental*, Londres, Oxford Univ. Press.

Tercera parte

COSTE FÍSICO Y VALORACIÓN MONETARIA

CAPÍTULO 22
LA CONEXIÓN ENTRE ECONOMÍA Y TERMODINÁMICA

José Manuel Naredo y Antonio Valero

22.1. Introducción

No faltan autores que desde hace ya más de un siglo han venido[1] subrayando la trascendencia económica de las elaboraciones de la termodinámica. El libro ya citado de Georgescu-Roegen (1971), *The Entropy Law and the Economic Process,* supuso un serio avance en el enunciado de los desarrollos que permitirían acercar economía y termodinámica. Sin embargo, estos desarrollos todavía acusan serios vacíos que tratan de cubrir, en parte, las elaboraciones presentadas en este volumen. En 1950 el economista William Kapp[2] acuñó la noción de «costes sociales» para designar todas las pérdidas, directas o indirectas, ocasionadas por los procesos de producción, que no registraban las contabilidades de las empresas. Los economistas han venido manejando este término desde entonces, junto con aquel otro más amplio de «externalidades», para referirse a la conveniencia de extender la reflexión hacia la incidencia que tenían los procesos económicos sobre los bienes que (al no estar valorados) eran considerados «no económicos». Sin embargo, obsesionados por valorar en términos monetarios los «costes sociales» y las «externalidades ambientales», los economistas dejaron a los termodinámicos, y demás científicos naturales, la tarea de su cuantificación en términos físicos. Pero la termodinámica convencional tampoco ha dispuesto de herramientas adecuadas para enfocar y

[1] Véanse referencias y reproducciones de textos de autores como Cournot, Podolinsky, Geddes, Clausius, Soddy, Kapp, etc., en los volúmenes de la colección «Economía y Naturaleza», serie Textos Básicos, que la Fundacion Argentaria coedita con Visor Dis.; en NAREDO, J. M. (1987, reed. 1996), *La economía en evolución,* Madrid, Siglo XXI, y en MARTÍNEZ ALIER, J. y K. SCHLÜPMANN, (1991), *La economía ecológica,* México, FCE.

[2] KAPP, K. W. (1950), *The Social Costs of Private Enterprise* (1963: 2.ª ed. revisada y ampliada con el título *Social Costs of Business Enterprise,* Londres, Asia Publishing House; de la que hay traducción española en Barcelona, Oikos, 1966).

resolver estos problemas de forma cómoda y general. La entropía es una función excesivamente abstrusa cuando se quiere calcular en sustancias reales. La energía utilizable, o «exergía», más simple de aprehender, tiene, sin embargo, similares o mayores problemas de cálculo y no se han desarrollado sus análisis a pesar de que esta función se conoce desde principios de siglo. Así, no sólo es necesario hacer que la economía sea más receptiva a las enseñanzas de la termodinámica, sino también desarrollar la termodinámica en la dirección de la economía, utilizando los mensajes de ésta y cuantificándolos en términos físicamente objetivables. En este sentido apuntaron los capítulos precedentes. En éste empezaremos a reflexionar sobre la conexión entre el aparato conceptual de la economía estándar y el de la termodinámica.

Hemos visto que, como en todos los procesos físicos, cualquiera que sea su naturaleza, se pierde energía utilizable (o exergía), la función del coste exergético puede aportar una base objetiva para medir los costes físicos de aquel conjunto de procesos llamados de producción, es decir, orientados a conseguir algún producto. Esta medida hace abstracción de quiénes son los perjudicados y, por tanto, trasciende los límites de las contabilidades monetarias habituales de los agentes económicos, que obligaron a definir los «costes sociales», por contraposición a los «privados». Insistimos en que no estamos hablando de valores monetarios, sino de costes físicos medidos en unidades de recursos empleados. Lo cual permite cuantificar, a la luz del Segundo Principio de la Termodinámica, problemas relacionados no sólo con el coste y con la eficiencia, sino también con la dispersión y deterioro de nuestros recursos naturales, la evolución del medio ambiente hacia temperaturas más elevadas y con composición más dispersa, el problema del ahorro de recursos por reciclado, la valoración más objetiva y a diferentes niveles de agregación de los efectos nocivos de la producción y del consiguiente aumento de residuos, cada vez más y más acelerado, etcétera. Bien lo atestigua la Ley conocida en Termodinámica con el nombre de Gouy-Stodola, que dice que la irreversibilidad generada en el proceso vale $I=T_oS_g$, siendo T_o la temperatura ambiente y S_g la generación de entropía, de desorden medio en términos termodinámicos del proceso. Esta Ley recoge el gran conflicto fáustico al que se enfrenta una sociedad industrial apoyada sobre el uso y la dispersión de ciertas concentraciones de materiales contenidos en la corteza terrestre: a mayor irreversibilidad generada por los crecientes y desenfadados procesos «productivos» realizados por el hombre, o mayor será la temperatura ambiente, originada por la contaminación térmica, o mayor la creación de desorden, es decir, mayor la dilución de materiales en la Tierra, el Agua y el Aire.

Pero a la vez que el enfoque termodinámico registra las pérdidas y costes físicos en que van incurriendo las elaboraciones productivas, el enfoque económico estándar va registrando las ganancias monetarias derivadas de

la revalorización de los productos cuya obtención constituye la finalidad del proceso (finalidad que la termodinámica sólo refleja parcialmente, en términos de baja entropía, escapándosele esa otra meta utilitaria más de fondo que Georgescu-Roegen define como el «disfrute de la vida»).

El propósito de este capítulo es mostrar los puntos de conexión y de divorcio entre la aproximación a los procesos que se practica desde la termodinámica y desde la economía convencional, con ánimo de facilitar el entendimiento entre los practicantes de ambas disciplinas para trascender los viejos dogmatismos. Frente a los enfoques unidimensionales habituales, ya sean energetistas o monetaristas, se sugiere la conveniencia de aplicar en este caso un enfoque bidimensional de los procesos que enriquezca la apreciación de los mismos al enjuiciarlos desde los dos ángulos de visión tan diferentes que muestran cada una de las dos disciplinas mencionadas. Resumamos los rasgos formales y las unidades de medida sobre los que toman cuerpo las dos versiones del proceso económico que estamos comentando.

22.2. Formulaciones

a) Enfoque termodinámico del proceso de «producción»

Nomenclatura

F Recursos utilizados en el proceso.
P Producto obtenido en el proceso.
I Irreversibilidad total o degradación total originada por el proceso.
L Pérdidas de calidad interna.
R Residuos generados.

Unidades

Las unidades de F, P e I deben ser energéticas y vinculadas, por tanto, al Sistema Internacional de Unidades y no unidades monetarias. Para ello se utiliza el concepto de «exergía», que es una medida objetiva que equipara todas las potencialidades termodinámicas de un flujo físico. Su valor es objetivo respecto de unas condiciones ambientales dadas y es independiente del marco institucional y del aprecio que se tenga por un tipo u otro de manifestación material o energética.

Ecuación básica representativa del proceso

$$F - P = L + R = I \qquad [1]$$

Postulado: $F>P$ ó $I>0$

Como la irreversibilidad debe ser siempre positiva, dada la definición termodinámica de rendimiento o eficiencia:

$$\eta = P/F$$

tenemos que: $0<\eta< 1$.

Es decir, que en virtud de la Segunda Ley de la Termodinámica, la eficiencia de todos los procesos físicos siempre está comprendida entre cero y uno.

La inversa de la eficiencia sería el coste en recursos por unidad de producto: $k=1/\eta=F/P$.

b) Enfoque económico estándar del proceso de «producción»

Nomenclatura

CI Recursos utilizados en el proceso (o consumos intermedios).
PR Producto obtenido en el proceso.
VA Valor añadido en el proceso.

Unidades

CI, PR y VA deben medirse en las mismas unidades monetarias y no en unidades físicas.

Ecuación básica representativa del proceso

$$PR - CI = VA \qquad [2]$$

Postulado: PR>CI o VA>0

La única acepción concreta y medible que se da en economía al término «producción» se refiere a la producción de valores monetarios. El proceso así denominado debe arrojar, por tanto, valores añadidos positivos y, si esto no ocurriera, se estima que el proceso en cuestión carece de viabilidad económica.

Siendo PR>CI y definiendo la rentabilidad monetaria de un proceso como

$$r=PR/CI$$

se postula que en los procesos económicos viables: $r>1$.

22.3. Conexión formal entre ambos enfoques

1) Supongamos que [1] y [2] se refieren a aspectos físicos y monetarios de un mismo proceso.

2) Supongamos que los recursos utilizados F y el producto P en [1] coinciden exactamente con los que son objeto de valoración monetaria en [2].

3) Supongamos que se conoce el precio de las unidades físicas de los recursos introducidos y de los productos obtenidos en el proceso, expresadas todas ellas en las mismas unidades (por ejemplo: calorías) como se puntualizó en el epígrafe a).

4) Supongamos que no existen más costes monetarios, que los derivados de las unidades físicas introducidas en el proceso.

Considerando, para simplificar, un único flujo físico de recursos utilizados y un único flujo de producto (medibles, por ejemplo: en calorías), con precios p_F y p_P, respectivamente, tenemos:

$$PR=P.p_P \text{ como, según [2], } PR>CI \text{, siendo } CI=F.p_F \text{ tenemos que}$$
$$P.p_P > F.p_F \text{ y que } p_P/p_F > F/P \qquad [3]$$

o, en otras palabras, el proceso de «producción» en el enfoque económico estándar exige que la relación entre el precio de una unidad de producto y el de una unidad de gasto sea mayor que el número de unidades físicas de recursos requeridas para obtener una unidad de producto; o, dicho de otra manera, que la revalorización unitaria del gasto monetario supere a la pérdida física por unidad de producto; o, también, que la ganancia de calidad perseguida en el proceso, medida en términos monetarios, compense la dispersión o pérdida de calidad física ocasionada en el mismo.

El cumplimiento de la condición [3] también puede expresarse diciendo que

$$1>\eta> p_F/p_P$$

es decir, que la eficiencia termodinámica (η=P/F) ha de ser mayor que la relación entre el precio del recurso y el del producto. La expresión [3], en cualquiera de sus manifestaciones, puede presentarse como el *teorema que enuncia el requisito de conexión* entre las dos versiones del proceso de «producción» que nos ofrecen la Termodinámica y la Economía estándar.

En el caso general de m flujos de recursos $F=[F_1...F_m]$ y de n flujos de productos $P=[P_1...P_n]$ con m y n precios, respectivamente,

$$p_F = \begin{bmatrix} p_{F1} \\ \cdot \\ \cdot \\ p_{Fm} \end{bmatrix}; \quad p_P = \begin{bmatrix} p_{P1} \\ \cdot \\ \cdot \\ p_{Pn} \end{bmatrix}, \quad \text{la expresión } P.p_P > F.p_F$$

mostraría la desigualdad entre los dos escalares resultantes de los dos productos matriciales

$$P.p_P = \sum_{i=1}^{n} P_i.p_{P_i}$$

$$F.p_F = \sum_{j=1}^{n} F_j.p_{F_j}$$

De un modo general, podemos expresar el teorema de conexión antes mencionado de la siguiente manera

$$P.p_P > F.p_F \qquad [4]$$

esta expresión es la condición de la existencia misma del proceso de «producción» en el enfoque económico estándar: por definición, el valor total (en términos monetarios) de los productos obtenidos ha de ser mayor que el valor monetario total de lo gastado en el proceso. O, lo que es lo mismo, ha de producirse una revalorización monetaria (media ponderada) de las unidades físicas introducidas en el proceso, que supere el valor monetario (medio ponderado) de las pérdidas físicas que se han ido produciendo a lo largo del mismo en virtud del Segundo Principio de la Termodinámica.

22.4. Consecuencias lógicas: diferencias y convergencias entre ambos enfoques

22.4.1. Unidades y postulados diferentes

Las distintas unidades en que se expresan los dos enfoques señalados indican una primera diferencia que provoca la irreductibilidad de ambos: el enfoque termodinámico se expresa en unidades físicas vinculadas al SI, que permanecen invariables en todo tiempo y lugar, pudiendo servir de base a las elaboraciones de la ciencia cuantitativa. Por el contrario, el enfoque económico estándar se expresa en unidades monetarias (no vinculadas al SI) cuyo poder adquisitivo está sujeto a variaciones en el espacio y en el tiempo que sólo cabe corregir de modo parcial y arbitrario, no pudiendo servir de base a elaboraciones de una ciencia cuantitativa, en el sentido estricto que la metrología concede a este término.

La oposición entre los postulados adoptados en a) y b) lleva a la oposición formal entre la expresiones [1] y [2]. En efecto, en [1] se postula que el número de unidades físicas de producto ha de ser siempre menor que el de recursos utilizados, obteniéndose como saldo de pérdidas y residuos

físicos no deseados. Por el contrario, en [2] se postula que el número de unidades monetarias que vale el producto ha de ser siempre superior al de unidades monetarias que valen los recursos empleados, obteniéndose como saldo una ganancia monetaria.

La oposición formal que se observa entre los postulados de uno y otro enfoque, unida a las diferentes unidades en las que se expresan, hacen que sea lógicamente incoherente la pretensión de aplicar símiles de la termodinámica para razonar sobre la noción usual de sistema económico, que incluye la noción de producción recogida en [2], y viceversa.

22.4.2. Conexión entre eficiencia física y rentabilidad monetaria

Cabe observar, sin embargo, que el objetivo de aumentar la eficiencia termodinámica converge con el de aumentar la rentabilidad monetaria, si suponemos dados los precios. En efecto, tenemos que un aumento de la eficiencia (η=P/F) se traduce automáticamente en un aumento de la rentabilidad ($r=P.p_P/F.p_F$). De esta manera, cualquier investigación que apunte a mejorar la eficiencia termodinámica de un proceso dado, no sólo es compatible, sino que converge con el objetivo de mejorar la rentabilidad propio de la economía estándar. Lo que no quita para que la eficiencia haya de seguir siendo inferior a la unidad y la rentabilidad mayor que la unidad.

El problema estriba en que los procesos monetariamente más rentables, capaces de obtener un mismo propósito productivo, no tienen por qué ser los más eficientes desde el punto de vista termodinámico. Ya que el menor coste monetario de los recursos empleados puede compensar sobradamente las mayores pérdidas originadas a lo largo del mismo, con relación a otros procesos físicamente más eficientes, pero basados en recursos monetariamente más caros. Desde esta perspectiva, el enfoque termodinámico puede ser un auxiliar importante para el logro de la finalidad propia del enfoque económico estándar, que aparece así revestido de una mayor generalidad. Pero también puede ocurrir lo contrario, por las razones que a continuación se exponen.

En efecto, al tratar de la conexión entre el enfoque termodinámico y el económico estándar en el tratamiento del proceso llamado de producción, hemos supuesto que los recursos y productos considerados en ambos enfoques eran coincidentes, siendo objeto de valoración monetaria todos los recursos que intervenían en el proceso. Sin embargo, en la práctica no suele darse esta coincidencia absoluta, al existir componentes físicos del proceso que carecen de valoración monetaria y que resulta problemático imputársela. Esto es lo que ha llevado a los economistas a diferenciar entre «costes privados», que figuran en las contabilidades ordinarias de los agentes económicos y «costes sociales», que existen físicamente, pero que esca-

pan a esos formatos contables. De esta manera, la termodinámica puede orientar con criterios económicos la gestión del mundo físico más allá de los confines del universo de los valores monetarios o de cambio, al que se circunscribe el enfoque económico corriente. La mayor amplitud del objeto de estudio que puede brindar la termodinámica con relación a la economía estándar, ya fue advertido por los padres de aquélla hace más de un siglo. Tanto Carnot, como Thomson y Clausius, fueron conscientes de que estaban respondiendo a preocupaciones económicas desde enfoques más amplios que los ordinarios.

22.4.3. La asimetría entre coste físico y valor monetario

Hasta aquí hemos enunciado las convergencias y las divergencias que pueden plantearse entre los planteamientos económicos de cada uno de los dos enfoques considerados: el de la economía estándar y el de la termodinámica. Centremos ahora la atención en la asimetría que acusan las lecturas diferentes del proceso llamado de producción que ofrecen estos enfoques.

La principal paradoja que plantean las visiones distintas del proceso de producción que ofrecen los dos enfoques mencionados, arranca del carácter opuesto de sus respectivos postulados y la naturaleza de los saldos que arrojan. Si bien los precios permitieron conectar las valoraciones monetarias del producto y de los recursos con sus mediciones en unidades energéticas, no ocurre lo mismo con la pérdida y la ganancia que se obtienen como saldo de las expresiones [1] y [2]. La energía y los recursos dispersados pierden también, por definición, su antiguo valor de uso, careciendo así comúnmente de precio. A la vez que el valor añadido, como simple saldo monetario, no tiene ninguna correspondencia con unidades físicas, a diferencia de lo ocurrido con la valoración de los recursos y del producto. Nos encontramos así con dos resultados contrapuestos e inconexos que se derivan de dos enfoques diferentes de un mismo proceso, uno que registra pérdidas y otro que registra ganancias; uno registra un deterioro neto de calidad y otro una revalorización neta; uno refleja coste físico y otro valor monetario.

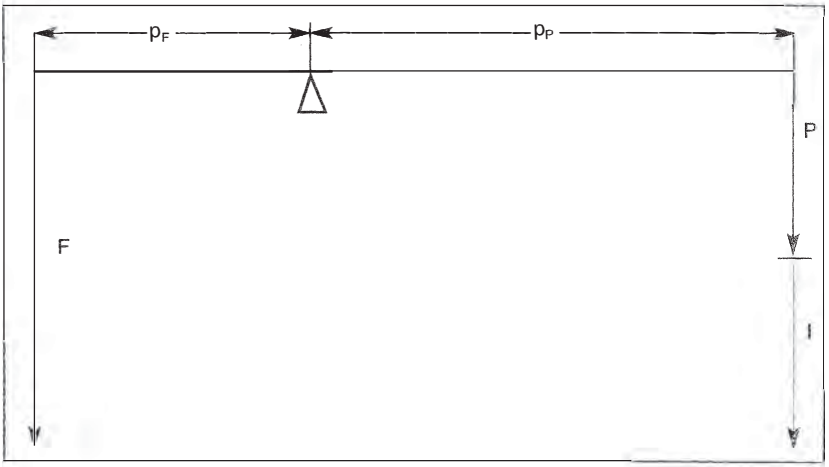
El principal corolario que se extrae de lo anterior es que la evolución del coste físico y de la valoración monetaria que tiene lugar a lo largo de los procesos llamados de producción, ha de ser por fuerza asimétrica: la valoración monetaria tiene que crecer a mayor ritmo que el coste físico medido en unidades de recursos empleados, para que el proceso sea económicamente viable, desde el punto de vista de la economía estándar. Lo cual tiene profundas implicaciones sobre las que volveremos en el próximo capítulo 23. Profundicemos ahora sobre esa asimetría o desequilibrio de fondo que gobierna todos los procesos llamados de producción, recurriendo para ello al símil del equilibrio de la palanca.

La expresión [4] del teorema de conexión muestra un claro isomorfismo con aquélla relativa al equilibrio de la palanca: si atribuimos a P y F el papel de fuerzas y postulamos en virtud del Segundo Principio que P<F, la condición de viabilidad económica del proceso exige que los precios, ejerciendo el papel de brazos de la palanca, inviertan el desequilibrio observado entre P y F, en favor del producto medido en términos monetarios, haciendo que $P.\ p_P > F.\ p_F$.

El gráfico 22.1 ofrece una representación del mencionado isomorfismo de la palanca que indica que para que «salgan las cuentas» de un determinado proceso productivo según el enfoque económico estándar, es necesario que el punto de apoyo de la palanca se desplace hacia el lado de los recursos (F), de modo que la diferencia entre los brazos (precios) incline la situación en favor del producto (P) a pesar de su menor peso físico. Este desequilibrio, que explica la obtención de valores añadidos y márgenes positivos, se opera en la vida económica corriente porque muchos de los recursos utilizados en el proceso se toman gratuitamente (es decir, a precio cero) o a precios muy inferiores a los de las unidades físicas de producto, a la vez que los residuos apenas se penalizan, evitando cargar los costes monetarios de un posible reciclaje sobre los individuos o empresas que los generan.

Gráfico 22.1

EL ISOMORFISMO DE LA PALANCA



Fuente: Naredo, J. M., «El proceso industrial visto desde la economía ecológica», *Economía Industrial*, núm. 297, Ministerio de Industria y Energía, mayo-junio de 1994.

Además hay que recordar que, una vez utilizados los productos, la sociedad acaba desechándolos, sin preocuparse de reciclarlos, por lo que a la postre también los productos se acaban convirtiendo en residuos. Por ello, al final del proceso la ecuación resultante no es F=P+I sino F=I. Es decir, que la sociedad industrial extrae materiales y energía de la naturaleza en forma concentrada (o sea, con exergía o con baja entropía) para obtener productos que finalmente devuelve a la naturaleza de forma degradada, diluida (o sea, sin exergía). Por lo que el análisis del proceso económico no sólo debe abrirse hacia el tratamiento de los recursos antes de haber sido captados, transformados y valorados, sino hacia su posterior degradación y pérdida de valor, considerando su existencia física como residuos. Porque si admitimos que la finalidad última del proceso económico es, o debe ser, el disfrute de la vida, precisamente por eso debemos preocuparnos de analizar los efectos de la degradación originada, para reducirla en la medida de lo posible y de lo económicamente razonable, o paliarla reconvirtiendo los residuos en recursos mediante la recuperación y el reciclaje.

Dos son los caminos por los que el instrumental económico convencional puede ser utilizado para reducir la emisión de residuos. Uno, a través de medidas que eleven el precio de los recursos más contaminantes, para desanimar su uso y/o favorecer una utilización más eficiente reduciendo en ambos casos los residuos originados. Otro penalizando con el pago de derechos, tasas, etc., los resultados contaminantes de los procesos, o exigiendo completarlos con fases de restauración o reciclaje. Es decir, uno, incidiendo sobre el origen del proceso para forzar el ahorro y la mayor eficiencia en el uso de los recursos más problemáticos e incentivando su sustitución por otros más abundantes (y menos contaminantes); y, otro, incidiendo sobre las consecuencias no deseadas del proceso, al exigir pagos o responsabilidades a los causantes del deterioro «ambiental». La primera forma de proceder actuaría desplazando hacia la derecha el punto de apoyo de la palanca representada en el gráfico 22.1, al elevar los precios de determinados recursos con relación a los de los productos. La segunda forma de proceder incide facturando o gravando los residuos e incrementando así los costes monetarios y recortando el valor añadido resultante.

Hay que insistir en que el «milagro» de la obtención de saldos monetarios positivos de valores añadidos y ganancias, cuando la versión física de los procesos recoge pérdidas, reside en que la valoración monetaria que se opera a lo largo del proceso, sobrevalora notablemente el producto con relación a los recursos utilizados y perdidos y, por supuesto, no acostumbra a penalizar los residuos[3]. Tener bien claro que la naturaleza de los valo-

[3] Recordemos también que el caso de la energía solar y sus derivados sería el único en el que la naturaleza renovable y no contaminante del recurso justifica que se le atribuya un precio cero y que no se penalice una dispersión que de todas maneras se produciría en estado natural. A la vez que en la

res añadidos y rentas que se obtienen en la presente civilización industrial arranca de la muy escasa valoración de los recursos, y casi nula penalización de los residuos, es fundamental para saber que el problema de la contaminación no puede resolverse por el mero hecho de gravarla o facturarla, como sugieren afirmaciones tales como que el «calentamiento global» es resultado lógico de estar utilizando la atmósfera como sumidero a precio cero. Sin negar el interés de posibles instrumentos que graven la contaminación, hay que advertir que su implantación engrosaría las arcas de las administraciones o empresas de los países más ricos, mientras que, por ejemplo, el aumento del precio del petróleo o los minerales redundaría más en beneficio de los países exportadores netos del «tercer mundo» (otro tema es el de la distribución y la asignación que se haga en estos países). Pero la naturaleza no entiende de precios o impuestos. Por otra parte, la decisión de cobrar derechos o tasas por la combustión, llevada al extremo, afectaría a todos los individuos de la especie humana e incluso de especies animales, habida cuenta que la respiración es una forma de combustión. El problema estriba en que la aplicación universal del principio «quien contamina paga» generalmente propuesto por los economistas (lo mismo que una revalorización generalizada de los recursos) daría al traste con casi todos los «valores añadidos» positivos que sirven de base al análisis económico habitual, recortando la esfera de la producción a la escala de un «producto neto fisiocrático» que el desarrollo de la sociedad industrial ha reducido a la mínima expresión. De hecho, esta sociedad se sostiene gracias a la existencia de un mundo no industrial que utiliza como fuente adicional de recursos y como sumidero de residuos, resaltando cada vez más la inviabilidad de generalizar a escala planetaria los patrones de vida propios de las metrópolis industriales.

En este contexto, por mucho que se extiendan las aplicaciones puntuales del instrumental de la microeconomía convencional para imputar de forma errática y descontextualizada valores monetarios a las «externalidades» medioambientales y a los recursos naturales «no renovables», difícilmente aportarán soluciones globales operativas para lograr un intercambio más sostenible de las sociedades humanas entre ellas y con su entorno físico. En los capítulos 19 y 24.II del libro *La economía en evolución* (Naredo, J. M., 1987, reed. 1996), se señalan las limitaciones que comporta este tipo de aplicaciones. Y su auge reciente en medios académicos, auspiciado por la mayor demanda de las administraciones públicas, se ha encargado precisamente de ofrecer una mayor evidencia empírica de estas

---

mayoría de las aplicaciones de esta fuente, si bien, para la energía solar siempre, finalmente, P=I, la irreversibilidad de los materiales en proceso puede ser recuperada, haciendo que I→F en la medida, por ejemplo, que la descomposición convierta a la materia orgánica degradada en fuente de fertilidad que posibilita de nuevo el crecimiento de las plantas y de los siguientes eslabones de la cadena trófica.

limitaciones, y originando una literatura crítica digna de mención[4]. Esta literatura resalta la inconveniencia de seguir planteando (y resolviendo) el tema en el universo aislado del valor, o como indicábamos al principio, de seguir considerando el mercado como panacea, a la vez que muestra la conveniencia de utilizarlo como instrumento. Se trata en suma de modificar las reglas del juego sobre las que se apoyan las actuales formas de valoración. Pero ¿cuál ha de ser la información física que guíe este cambio de reglas para orientar el mercado como instrumento?, ¿cuáles deben ser las señales objetivas que informen el marco institucional y la subjetividad humana que interviene en la configuración de los precios, costes y cantidades de recursos (y de residuos) movilizados? ¿Qué criterios objetivos podrían utilizarse para replantear la valoración con vistas a reorientar hacia el flujo solar y sus derivados la energía que hoy se obtiene directa o indirectamente de los materiales extraídos de la corteza terrestre que, como hemos visto, constituye la causa primordial de los males ecológicos de la actual civilización? El presente trabajo pretende responder, en parte, a estas preguntas, a la vez que evidencia que la mayor amplitud del enfoque ecointegrador propuesto reclama la elaboración de una teoría económica mucho más amplia de la que ofrecen los manuales de la economía estándar (incluida la «medioambiental»).

22.5. Finalidades utilitarias y costes físicos

La asimetría entre las dos versiones consideradas del proceso llamado de producción podría chocar con el hábito propio de la lógica aristotélica de razonar identificando la contradicción con el error, pero no con los enfoques pluridimensionales de la ciencia moderna, que culminaron con el dualismo entre ondas y partículas observado en la física cuántica como expresión de una misma realidad.

La confusión aparece cuando no se acepta la multidimensionalidad de enfoques como algo deseable y se atribuyen a cualquiera de ellos pretensiones desmesuradas de universalidad: es decir, cuando los economistas tratan de abarcar con sus enfoques monetarios corrientes la gestión conjunta del «medio ambiente» físico que los envuelve, o cuando los termodinámicos tratan de construir nuevas teorías del valor «energético»[5].

---

[4] *Vid.* EBERLE, W. D. y F. G. HAYDEN (1991), «Critic of Contingent Valuation and Travel Cost Method for Valuating Natural Recources and Ecosystems», *Journal of Economic Issues,* vol. XXV, n.º 3. (Hay traducción española en AGUILERA, F. y V. ALCÁNTARA, eds. (1995), *De la economía ambiental a la economía ecológica,* Barcelona, Icaria.

[5] Para una crítica del «energeticismo», véase GEORGESCU-ROEGEN, N. (1983), «La teoría energética del valor económico: un sofisma económico particular», *El Trimestre Económico,* n.º 198, abril-junio.

En el caso que nos ocupa, la asimetría antes indicada debe servir de acicate para mostrar la conveniencia de aplicar la multidimensionalidad de enfoques en el razonamiento económico, en un sentido más amplio del sugerido por dicha asimetría. Pues ciertamente, la relación que establece entre ambas versiones del proceso el isomorfismo de la palanca antes mencionado, aunque añada complejidad a los enfoques unidimensionales ordinarios, resulta todavía bastante pobre para tomarlo como única guía capaz de orientar con criterios económicos la gestión de los recursos naturales. En primer lugar hay que recordar que tal isomorfismo surge cómodamente del hecho de que las formulaciones [1] y [2] se atienen al modo de razonar habitual de la mecánica clásica, regido por una ley de conservación (de la energía y del valor, respectivamente) y por un empeño de maximización de la eficiencia y de la rentabilidad (o, lo que es lo mismo, minimizador de sus inversas, el coste exergético y el gasto monetario), dejando de lado aspectos cualitativos fundamentales del proceso objeto de estudio. El enfoque de la termodinámica clásica utilizado en [1] recoge implícitamente, como saldo, el deterioro cualitativo de la energía utilizada en el proceso, pero no nos informa sobre los cambios cualitativos que se operan entre F y P, que señalan el propósito o finalidad productiva perseguida. A la vez que el enfoque económico estándar recoge también implícitamente, como saldo de revalorización monetaria, las mejoras de calidad que se operan entre F y P cuyo logro constituye la razón de ser del proceso, pero es incapaz de informar sobre la dispersión y deterioro de recursos que inevitablemente se origina a lo largo del mismo.

Parece, pues, evidente la conveniencia de profundizar en el estudio de los logros pretendidamente neguentrópicos de los procesos llamados de producción, cifrando las ganancias de información y estructura conseguidas en el producto y relacionándolas con los costes físicos, en un marco más amplio y objetivo del que ofrecen los análisis monetarios habituales, mediatizados por las contingencias del marco institucional y valorativo de cada momento. La relación entre termodinámica y teoría de la información, o entre la estructura y la energía de interacción que la mantiene, ofrece la posibilidad de desarrollar el análisis en este sentido.

En un momento en el que existen posibilidades sin precedentes en la manipulación de los materiales, la energía, e incluso los genes –con consecuencias destructivas también sin precedentes–, el razonamiento económico se impone para delimitar entre lo técnicamente posible –e incluso, en ocasiones, financieramente rentable– aquello cuya aplicación generalizada en el espacio y en el tiempo resulta además viable y deseable. El criterio general que debe informar, desde este punto de vista, la economicidad de las posibles manipulaciones de los recursos naturales es el que permita sopesar con transparencia hasta qué punto las ganancias de orden, de estructura y de información, que se persiguen en los procesos productivos,

son capaces de justificar el aumento de entropía que ocasiona en la Tierra su obtención y uso, viendo además hasta qué punto este aumento es reparable. Aclarar lo relativo a la exergía contenida en los materiales y al deterioro planetario que entraña su uso y dispersión, es un primer paso obligado para dar una orientación económica global a las intervenciones con vocación neguentrópica del *homo faber*. El presente texto trata de facilitar ese primer paso.

Capítulo 23
LA EVOLUCIÓN CONJUNTA DEL COSTE FÍSICO Y DEL VALOR MONETARIO EN EL CURSO DEL PROCESO ECONÓMICO: LA «REGLA DEL NOTARIO» Y SUS CONSECUENCIAS

José Manuel Naredo y Antonio Valero

En el capítulo anterior hemos visto que la asimetría que se observa entre la evolución del coste físico y la valoración monetaria en el curso de los procesos llamados de producción, es un corolario que se desprende de los postulados a los que se atiene el comportamiento físico y monetario de tales procesos. Dicha asimetría resulta de la mayor tasa de crecimiento que debe acusar la valoración monetaria con relación al coste físico para asegurar la viabilidad económica de los procesos. Ilustremos con un ejemplo el símil del equilibrio de la palanca utilizado en el capítulo anterior (gráfico 22.1).

Supongamos una central termoeléctrica en la que hace falta quemar tres toneladas equivalentes de petróleo (F=3 tep) para obtener una en forma de electricidad (P=1 tep), perdiéndose, por tanto, dos tep en el proceso (I=2 tep). La eficiencia del proceso sería igual a un tercio (η=1/3) y el coste unitario igual a tres (k=3). Suponiendo que no existan otros materiales en el proceso, ni otros gastos monetarios significativos distintos de los de la compra del combustible, la condición para que los ingresos obtenidos de la venta del producto (PR) superen a los gastos (CR), alcanzándose un valor añadido (VA) positivo, es que el precio del producto (p_P) sea más de tres veces superior al precio del combustible (p_F) (es decir, que la revalorización observada entre el precio del combustible y el del producto supere al coste físico unitario). Por ejemplo, si el precio de 1 tep de combustible fuera de una unidad monetaria (p_F=1\$) y el de 1 tep de electricidad fuera de cinco unidades monetarias (p_P=5\$), se obtendría un valor añadido de dos unidades monetarias por cada tep obtenido en forma de electricidad ($VA=PR-CI=P.p_P-F.p_F=1.5-3.1=5-3=2$).

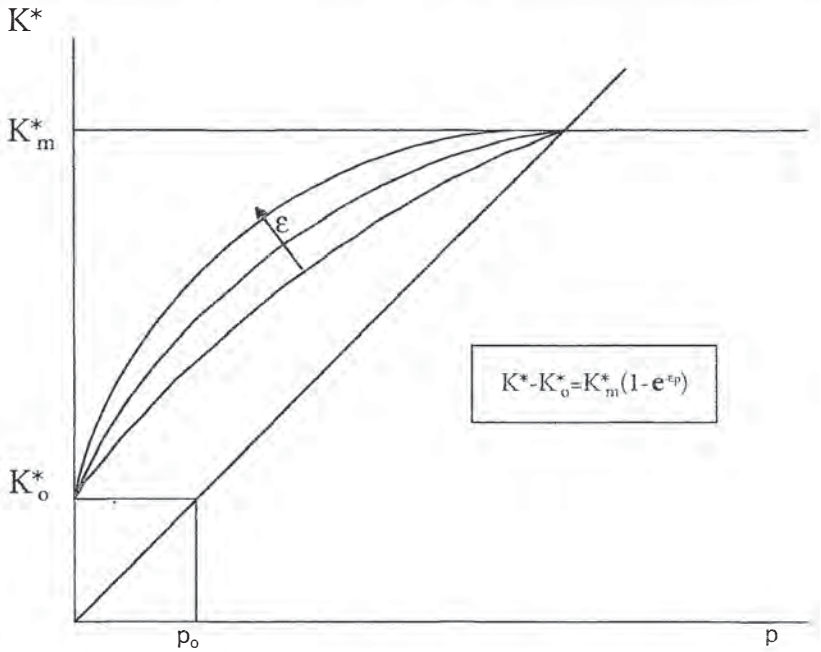
Una consecuencia importante se deriva de la asimetría que estamos ilustrando con este ejemplo simple: los abastecedores de fuel (F), o de materias

primas en general, nunca podrán comprar (con el dinero que reciben) productos (P) con una exergía similar a la que entregan. En el ejemplo comentado, los abastecedores de fuel ni siquiera podrían comprar 1 tep en forma de electricidad (que vale 5$) con los 3$ que obtienen por las 3 tep de fuel que venden. De esta manera, en virtud de la asimetría comentada propia del juego económico mercantil, la creciente especialización de territorios, países y poblaciones en abastecedores de productos primarios y vendedores de productos finales, está llamada a acentuar la dominación económica y la explotación ecológica que ejercen los primeros sobre los segundos. Ciertamente, esta propensión se puede paliar alterando las reglas del juego sobre las que se realiza el comercio, pero nunca se podrá equilibrar, y menos aún invertir, mientras sigan existiendo valores añadidos y beneficios.

En el ejemplo simplificado anterior de producción de energía eléctrica, se suponía un único proceso: el de la central térmica. Sin embargo, lo normal es que existan varios procesos encadenados hasta que se llegue a vender el producto destinado a la utilización final. Generalicemos y formalicemos ahora la relación entre el coste físico y la valoración monetaria en una sucesión de procesos y suponiendo que cada uno de ellos da lugar a la compraventa de productos intermedios. Como en cada uno de ellos la revalorización monetaria observada entre el precio del producto y el de los recursos empleados ha de ser mayor que el coste unitario, esta exigencia ha de cumplirse para el conjunto agregado de los procesos. Pero a esta asimetría entre el coste físico y la valoración monetaria observada en cada proceso, cabe añadir ahora otra referida al conjunto de los procesos que intervienen hasta la venta del producto final. Es la que señala una evolución creciente de la tasa de incremento de la revalorización con relación al coste físico, a medida que los procesos avanzan hacia las últimas fases de elaboración y comercialización. Para plasmar geométricamente este comportamiento podemos reducir a base 100, tanto el coste exergético unitario acumulado en el que se ha incurrido hasta llegar a la venta del producto final, como el precio de venta de ese producto, representando la evolución del coste exergético unitario en el eje de ordenadas y del valor unitario (o precio) en el de abscisas (gráfico 23.1).

Si la relación entre revalorización monetaria y aumento del coste físico se mantuviera constante en todos los procesos intermedios hasta llegar a la venta final del producto, la relación entre valoración monetaria y coste físico seguiría la senda de la bisectriz, que marca la proporcionalidad en la evolución de las dos variables representadas, una vez reducidas sus escalas a una misma base 100. Pero, como hemos apuntado, en los procesos reales existe una tendencia general a la aceleración de la tasa de revalorización con respecto a los aumentos del coste físico, a medida que los procesos se acercan a la venta del producto final. Lo cual se traduce en la concavidad hacia el eje de abscisas de las curvas que relacionan la valoración monetaria y el coste físico a lo largo de los procesos, al ir flexionando su pendiente a

Gráfico 23.1



siendo:

K^*_o = el coste «natural».
K^*_m = el coste físico máximo actual con tecnología conocida.
ε = elasticidad de la curva, que variará según el tipo de material.
K*= coste físico en el estado considerado.
p = precio en el estado considerado.

medida que avanzan hacia las fases finales de comercialización y venta, en las que se obtienen márgenes monetarios importantes sin incurrir apenas en costes físicos. Evidentemente, la tendencia señalada acentúa la dominación económica y la explotación ecológica que, como hemos visto, se opera entre vendedores de productos primarios y vendedores de productos finales, como corolario de los axiomas sobre los que reposa la producción y venta de mercancías.

Anticipemos una diferencia fundamental que separa las dos asimetrías mencionadas: la que relaciona la revalorización y el coste en cada proceso y la que compara las revalorizaciones y costes en una sucesión de procesos que terminan con la elaboración, transporte y comercialización del producto final. La primera es una consecuencia lógica de las exigencias con-

juntas de los postulados en los que se apoya el análisis físico (termodinámico) y el monetario (económico) de los procesos. La segunda es fruto de factores socioinstitucionales que condicionan el funcionamiento de los mercados y no consecuencia obligada de los postulados de partida. Así, la primera no necesita respaldo empírico, aunque pueda ser ilustrada con ejemplos, mientras que la segunda es fruto de la observación, por lo que debe ser respaldada con datos de procesos reales: refleja una regla de comportamiento que, de forma coloquial, denominaremos «Regla del Notario». Porque siguiendo, por ejemplo, los procesos que conlleva la construcción y venta de un edificio, observamos que empiezan con algunos con gran coste físico y escasa valoración monetaria (la excavación de los cimientos, la fabricación del cemento, de los ladrillos y los hierros...), dando paso, a medida que avanza la construcción y el remate del edificio, a otros con menor coste físico y mayor valoración monetaria (pintura, fontanería, electricidad, carpintería...), hasta que al fin se acaba la construción y se cierra la operación de venta en la mesa del notario en la que éste y el promotor obtienen por su labor sendos «valores añadidos» sin incurrir apenas en costes físicos. En el capítulo 24 presentaremos varios ejemplos de casos que muestran cómo la evolución conjunta del coste físico y la valoración monetaria se ajusta a la mencionada «Regla del Notario».

Resumiendo, hemos visto que, en todos los procesos llamados de producción, la revalorización monetaria operada entre las materias primas y el producto ha de ser mayor que el coste físico unitario y que esta asimetría entre revalorización monetaria y coste físico se acentúa a medida que los procesos avanzan hacia la venta del producto final. De ahí que la extremada especialización comercial que posibilitó a escala planetaria el abaratamiento del transporte y la comunicación a larga distancia, hayan acentuado hasta extremos también sin precedentes la dominación económica y la explotación ecológica de los territorios, países y poblaciones abastecedores de materias primas, por aquellos otros que se ocupan de las etapas finales de elaboración y comercialización de los productos. Prosiguiendo con los aspectos generales de la formalización, hemos de precisar cuál es el punto de partida de nuestro cómputo de valores y costes. El proceso general de valoración y facturación de costes se inicia con la actividad extractiva o recolectora que se apoya en los recursos naturales para poner en venta un producto primario. Esta actividad debe ya facturar el producto a un precio que le compense holgadamente de los costes unitarios en los que incurrió, iniciándose la creciente asimetría entre valoración monetaria y coste físico en la cadena de procesos que van hasta la venta del producto final. Pero hay que advertir que la naturaleza no cobra nada por los recursos naturales, aun cuando su obtención a partir de un estado de referencia acarrearía un coste físico medible, como hemos visto en los capítulos precedentes. Este coste físico (que no se factura) lo podemos representar en el

gráfico 23.1 como ordenada en el origen de las curvas que describen la revalorización monetaria y el coste físico en los procesos de producción y venta que se desarrollan a partir de los recursos naturales. El gráfico mencionado incluye también la expresión analítica del tipo de función que liga dicha relación entre coste físico y valoración monetaria a lo largo de los procesos económicos llamados de producción, formalizando así la que hemos denominado «Regla del Notario».

Hemos anticipado que la asimetría entre valoración monetaria y coste físico que recoge la «Regla del Notario» se desprende de dos tipos de asimetría, uno que es un derivado lógico de los postulados de la termodinámica y de la economía estándar y otro fruto de condicionantes ideológicos e institucionales. El primero indica que para que un proceso de producción sea económicamente viable la revalorización que se observa entre el precio de los recursos y el del producto debe superar al coste físico por unidad de producto, pero no dice si tal revalorización ha de ser creciente o decreciente. El segundo es el que precisa la tendencia marginalmente creciente de esta revalorización por unidad de coste físico, a medida que los procesos se aproximan a la venta del producto final. Esta última tendencia se corresponde con aquella otra que apunta sistemáticamente hacia la mayor retribución de las tareas de gestión, comercialización y dirección, frente a las más directamente implicadas en la producción. La explicación de esta tendencia hay que buscarla más en la concepción y valoración social que se tiene de las actividades y tareas, heredada de las sociedades jerárquicas anteriores al capitalismo, que en las modernas teorías del «capital humano» cuyo elevado componente tautológico sirve para justificar el *statu quo* presentándolo como expresión de una racionalidad objetiva y universal. Por ejemplo, las diferencias de retribución que han propiciado la tradicional emigración del campo a la ciudad no cabe explicarlas en razón de mejoras en la cualificación: el mero hecho de pasar de jornalero agrícola a peón albañil o de agricultor a obrero industrial suele entrañar aumentos de retribución que no cabe atribuir a mejoras en la cualificación. La formación de un agricultor es tan cualitativamente diferente a la de un albañil, a la de un administrativo o la de un agente de ventas, pongamos por caso, que no permite justificar las diferencias de retribución, sin recurrir a juicios de valor.

En efecto, como advirtió pioneramente Veblen en su *Teoría de la clase ociosa* (1899)[6], fue la asociación generalizada entre respetabilidad social y riqueza poseída la que permitió perpetuar bajo el capitalismo el desprecio por los trabajos ordinarios de la población, propio de sociedades jerárquicas anteriores, y revalorizar las «más altas tareas» de administración y ges-

[6] VEBLEN, T. (1899), *The Theory of Leisure Class. An Economic Study of Institutions*, Londres, Mac Millan Co. (Hay versión en español del FCE, México, 1995.)

tión. Recordemos las condiciones que este autor establece para que la propiedad privada y la «clase ociosa» (en cuanto a que está liberada de las tareas ordinarias que reclama la existencia material de la población) puedan prosperar:

1.º Condición necesaria: «La comunidad debe disponer de medios de subsistencia lo suficientemente grandes como para permitir que una parte importante de la comunidad esté exenta de dedicarse al trabajo rutinario».

2.º Condición suficiente: «La comunidad debe tener hábitos de vida depredadores; es decir, hombres habituados a infringir daños por la fuerza o mediante estratagemas» (cuyas «hazañas» se valoran por encima del trabajo ordinario).

Con el capitalismo, advierte este autor, disminuyen las posibilidades de obtener botín mediante hazañas bélicas o cinegéticas, «a la vez que aumentan, en radio de acción y facilidad, las oportunidades de realizar agresiones industriales, comerciales o financieras y acumular propiedad por los métodos cuasipacíficos de la empresa nómada». Siendo directamente medible el botín alcanzado en tales «hazañas» de «competitividad» a través de la riqueza pecuniaria acumulada y su ostentación (vinculadas al prestigio social)[7].

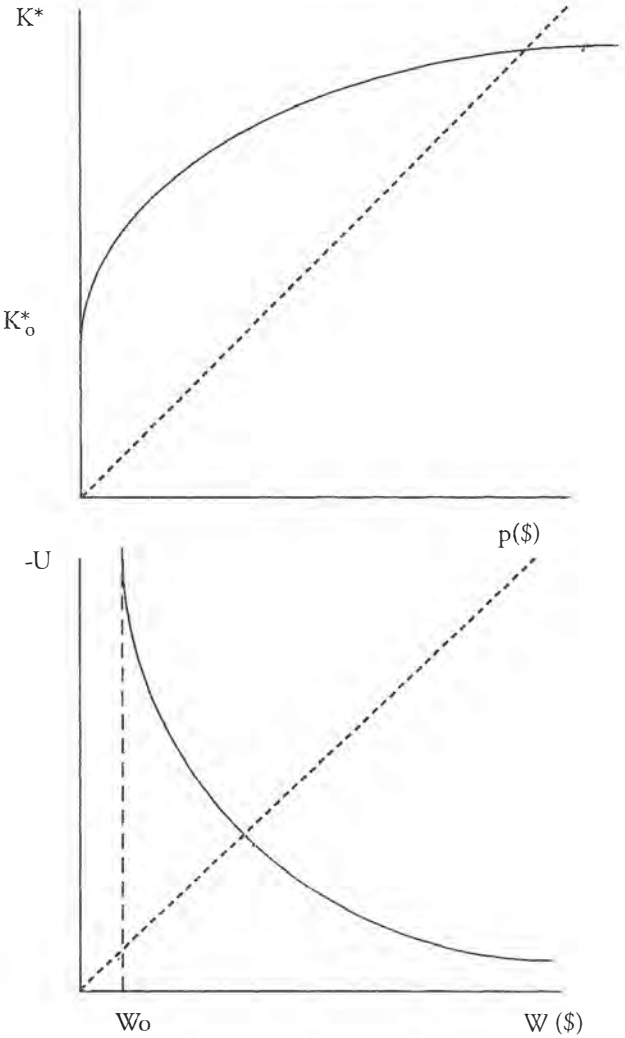
Son esos «hábitos de vida depredadores» los que se traducen tanto en la asimetría enunciada por la Regla del Notario, como en aquella otra que se observa entre la penosidad del trabajo y su remuneración: a mayor penosidad menor retribución. Tendencia esta que se deriva lógicamente de los presupuestos socioinstitucionales enunciados por Veblen. El gráfico 23.2 representa junto a la función que liga, a través de la Regla del Notario, el coste físico con la valoración monetaria en los procesos llamados de producción (parte superior del gráfico), aquella otra función que relaciona inversamente la penosidad o desutilidad (eje de ordenadas) a la retribución del trabajo (eje de abscisas).

Esta curva muestra una pendiente negativa al reflejar la relación inversa antes mencionada. Asciende en la parte de la izquierda paralela al eje de abscisas suponiendo que exista un acuerdo general para evitar que la retribución caiga por debajo de un determinado *salario mínimo*, que se aplicaría así a una serie de actividades penosas. En los niveles más altos de retribución, bien podría ocurrir que se realicen con gusto actividades de dirección u otras que serían más fuente de placer que de «desutilidad», situándose en tal caso la curva por debajo del eje de abscisas en los tramos de mayor retribución. Conviene advertir que con esta curva tratamos de ilustrar una tendencia general observable en nuestras sociedades, pudiendo

---

[7] *Vid.* NAREDO, J. M. (1997), «Configuración y crisis del mito del trabajo», en varios autores, *¿Qué crisis? Retos y transformaciones de la sociedad del trabajo*, San Sebastián, Gakoa Liburuak, pp. 51-73.

Gráfico 23.2



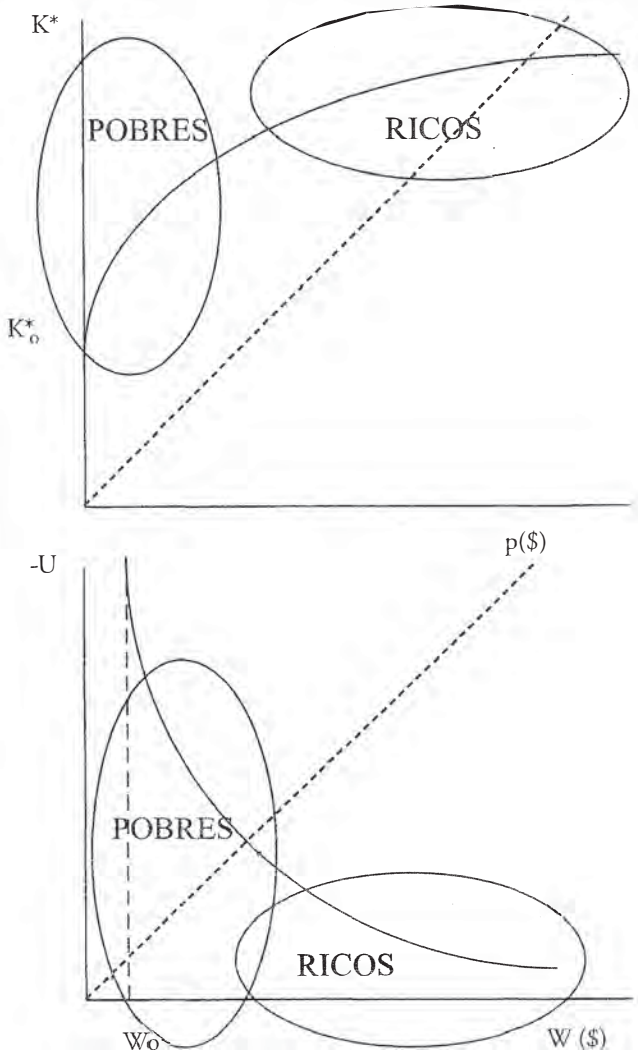
encontrar excepciones que, como reza el dicho popular, confirman la regla. Por ejemplo, tras años y años de conflictos y reivindicaciones, el movimiento obrero ha conseguido mejorar la retribución del trabajo de los mineros para compensar su penosidad, morbilidad y peligrosidad, al igual que el apasionado estímulo intelectual de investigadores y artistas puede

explicar la escasa retribución de muchos de ellos. En el primer caso, ha sido la presión del movimiento obrero la que consiguió paliar la tendencia antes apuntada; en el segundo, es el ansia de creación intelectual y expresión artística de determinadas personas la que les vino induciendo a practicar ciertas actividades sin especiales exigencias retributivas, planteando también una excepción a la tendencia arriba apuntada, en el caso de tareas gratificantes.

La Regla del Notario pone bien de manifiesto que, en el actual contexto de creciente especialización comercial, «la riqueza de las naciones» depende sobre todo de la posición que ocupan en la curva que ilustra esta regla: los países ricos lo son porque se ocupan básicamente de las fases finales de elaboración y comercialización de los productos, con gran valor añadido por unidad de coste físico (situándose en la zona superior de la derecha de la curva que figura en la parte de arriba del gráfico 23.3), mientras que los pobres lo son porque se ocupan de las primeras fases de extracción y elaboración de los recursos naturales, con escaso valor añadido por unidad de coste físico (situándose en la parte inferior izquierda del mismo gráfico). En otras palabras, los países ricos lo son porque las empresas de las que dependen se centran cada vez más en tareas de gestión, comercialización y manejo de información, en general, predominando en ellos las actividades llamadas de servicios, mientras que en los pobres predominan las actividades agrarias y extractivas y las primeras fases de elaboración industrial. A la vez que la mano de obra de los países pobres se ocupa sobre todo en tareas vinculadas a estas actividades, que resultan en general duras y penosas (situándose en la zona de la izquierda de la parte inferior del gráfico 23.3), mientras que en los ricos se ocupa predominantemente en tareas de investigación, gestión y comercialización, bastante llevaderas y hasta en ocasiones gratificantes (situándose en la zona de la derecha del gráfico indicado). Y hay que advertir que el hábil manejo del sistema financiero amplifica notablemente la desigualdad cuyos orígenes estamos investigando. Ya que los países ricos y las empresas en ellos domiciliadas, tienen una capacidad de crear dinero en sentido amplio (es decir, de emitir pasivos financieros líquidos que todo el mundo acepta) muy superior a la que tienen los pobres. Como se verá en el capítulo 26, la fuerte limitación para emitir pasivos que tienen los países pobres acentúa su penuria de capitales, que los induce a tratar de «hacer caja» vendiendo patrimonio en forma de recursos naturales, bienes raíces o empresas.

Evidentemente existe un empeño generalizado de los países y las personas de desplazarse hacia las actividades más valoradas y física y humanamente menos costosas, aunque sólo algunos lo logran. Las teorías del desarrollo tratan de dar orientaciones para conseguirlo. Pero, lo mismo que se sabe que el premio de la lotería no puede tocar a todos los que juegan,

Gráfico 23.3



también debería explicitarse que, por muchos trucos de política económica que se recomienden, no se conseguirá que todos los países y las personas se sitúen a la vez en las zonas más deseadas de la curva del notario, con sus derivaciones laborales. Una vez aceptada socialmente la forma de estas funciones, debe quedar claro que no existen soluciones generales satisfactorias

para todo el mundo, y menos aún incluyendo a la naturaleza. Estas soluciones pasarían por cambiar la forma de tales funciones y para ello es conveniente distinguir con claridad la parte que se deriva de postulados que no cabe modificar, de aquella otra que resulta de acuerdos socioinstitucionales más o menos encubiertos cuya identificación y discusión es condición necesaria para su posible modificación. Condición que debe abrir paso a cambios mentales e institucionales con envergadura suficiente para inclinar el *statu quo* hacia soluciones de valoración y cálculo económico globalmente más satisfactorias.

Capítulo 24
EJEMPLIFICACIÓN DE LA «REGLA DEL NOTARIO» EN ALGUNOS PROCESOS REALES

Vicente Subiela, Lidia Ranz y Antonio Valero

En las sociedades modernas, el complejo funcionamiento económico precisa de una contabilidad que resuma las transferencias entre los sectores involucrados. Como ya hemos remarcado, los flujos no son sólo monetarios, sino que éstos se intercambian, entre otros, por flujos de bienes materiales; y todo bien material ha sido producido gracias a los recursos naturales. Es este conjunto de materias primas y recursos energéticos (combustibles fósiles en su mayoría) el que hace posible la generación de productos. Sin embargo, algo tan imprescindible como son los flujos de materia y energía, no se tienen en cuenta a la hora de evaluar las actividades económicas. Por otro lado, los problemas ambientales, condensados en el agotamiento de recursos y la emisión de residuos, no son más que flujos de masa. Para conocer y entender la realidad productiva y sus consecuencias se precisa de una contabilidad rigurosa de los recursos naturales utilizados.

Para afrontar el desafío de crear un modelo económico que evite la degradación irreversible o no asimilable en el medio físico, es imprescindible establecer una estrategia interdisciplinar. Los conceptos energía, precio, ecosistema, las ciencias que los analizan y los especialistas que los estudian han de vincularse inevitablemente.

Como ya hemos comentado anteriormente, la etapa de inventariado de los actuales análisis de ciclo de vida (ACV) se orientan en este *sentido*, y aportan la información suficiente acerca de los flujos físicos que intervienen a lo largo de la vida de un producto, desde la extracción de los recursos minerales que lo componen, hasta la deposición del producto como residuo.

Investigar la relación entre costes físicos y costes económicos es crucial para entender cuál es la separación entre las «fuerzas del mercado» y un comportamiento sostenible del ser humano en la Tierra. Por ello hemos estudiado una serie de casos en los que analizamos el proceso productivo de una serie de bienes desde dos enfoques distintos. En primer lugar, desde

el punto de vista de la economía, esto es, analizando los precios, y en segundo lugar, desde el punto de vista del coste físico, esto es, determinando el montante de energía aportado en cada etapa de formación del producto. Al enfrentar el coste físico con el coste monetario, observaremos una gran asimetría, que será pertinente corregir y enderezar si lo que queremos es hacer que nuestras actividades industriales sean más sostenibles.

Vamos a detallar la metodología de cálculo de costes físicos que aquí hemos utilizado.

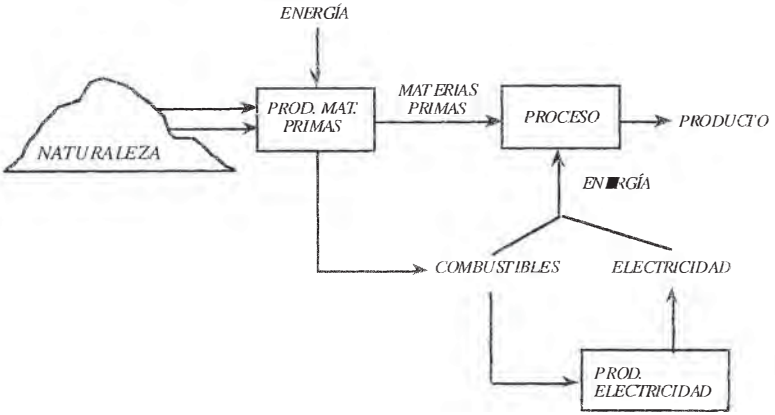
24.1. Metodología de cálculo del coste físico

Tal y como presentamos en capítulos anteriores, denominamos coste físico de un producto a la cantidad total de exergía consumida para producir una unidad de producto. Este valor depende de los límites del sistema. Boustead y Hancock (1979) proponen una metodología en la que se tenga en cuenta el consumo directo de energía (combustibles fósiles y electricidad), la energía para producir dicho consumo (consumo indirecto) y la incorporada al proceso como una materia prima más (ejemplo: la energía contenida en la madera, materia prima del papel). La figura 24.1 representa estas contribuciones sobre un proceso general.

Por consiguiente, en el consumo energético global se incluye el consumo de combustibles primarios (carbón, petróleo y gas) o secundarios (derivados de los anteriores).

Figura 24.1

DIAGRAMA DE FLUJOS DE ENERGÍA GENÉRICO PARA PRODUCIR UN DETERMINADO PRODUCTO

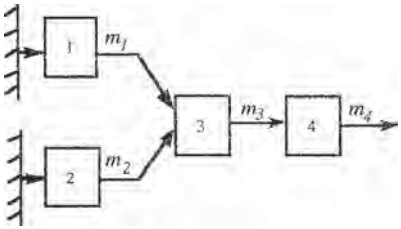


24.1.1. Ejemplo teórico

Todo proceso de fabricación se compone de varias etapas o subprocesos. Cada etapa puede ser simple o compuesta, es decir, puede generar uno o varios productos. El conjunto de productos de una etapa es la materia prima de la siguiente. Tal y como se representa en la figura 24.1, cada etapa lleva incorporado un coste energético. El cálculo del coste total del producto final es función de los costes de cada una de las etapas que componen el proceso global, y de cómo están relacionadas entre sí. La figura 24.2, resumen de la propuesta de Boustead y Hancock (1979), muestra un ejemplo teórico y aclara el concepto.

Figura 24.2

DIAGRAMA GENERAL DE UN PROCESO PRODUCTIVO TOTAL



Como idea general, el coste energético* unitario del producto generado en cada etapa se obtiene como el cociente entre toda la energía aportada (energía total consumida en la propia etapa más la asociada a cada flujo de entrada) y la cantidad de producto generada.

La etapa I representa la extracción de recursos minerales, por lo tanto suele ser compuesta; en este ejemplo se generan dos productos (m_1 y m_2). El coste del producto m_3 de la etapa II, debe tener en cuenta la energía total necesaria para producir sus materias primas: m_1 y m_2. De la misma manera, el coste de m_4 ha de considerar el coste del flujo de entrada m_3. Para cada etapa, el cálculo de costes energéticos es como sigue:

* Vamos a utilizar en este capítulo el concepto de energía en vez del de exergía porque se disponen de muy pocos datos ernpíricos de consumos de exergía en procesos industriales y los resultados con exergía tienden a diferir poco de los energéticos, salvo en casos muy específicos que han sido estudiados en el trabajo original del que procede la información de base de este capítulo (ver Subiela y Valero, 1994), publicación interna de la Fundación CIRCE para la Fundación Argentaria originada con motivo del convenio de colaboración entre ambas entidades sobre la «Economía de procesos». Consiguientemente, utilizaremos la supranotación (+) en vez de la (*) que reservamos para la exergía.

$$E_I^+ = E_1 + E_2 \quad ; \quad k_I^+ = E_I^+ / (m_1 + m_2)$$
$$E_{II}^+ = E_I^+ + E_3 \quad ; \quad k_{II}^+ = E_{II}^+ / m_3$$
$$E_{III}^+ = E_{II}^+ + E_4 \quad ; \quad k_{III}^+ = E_{III}^+ / m_4$$

donde:

m_i Flujos de salida del proceso *i; i=1, 2, 3, 4*
E_i Energía total aportada en el proceso *i*
k_j^+ Coste de la etapa *(MJ/kg) j; j=I, II, III*
E_j^+ Coste energético *(MJ)*. Etapa *j; j=I, II, III*

24.1.2. El coste energético unitario de la energía

La electricidad y los combustibles consumidos en la industria son bienes que precisan de una cantidad de energía para ser producidos y distribuidos (ver flujos de la figura 24.1); es decir, cada tipo de energía lleva asociada un coste energético. Dado que la cantidad de este producto puede expresarse en unidades energéticas, se puede establecer una definición adimensional de coste:

$$k^+ = \frac{E^+}{E} = \frac{\textit{Energía total consumida en producir el combustible}}{\textit{Energía del combustible}}$$

En los cálculos de costes presentados en este trabajo se han utilizado los valores propuestos por Boustead y Hancock (1979), resumidos en el cuadro 24.1.

Cuadro 24.1

VALORES DEL COSTE ENERGÉTICO DE LOS DISTINTOS TIPOS DE ENERGÍA

Combustible	*Coste unitario k^+*
Carbón	1,05
Gas natural	1,14
Derivados del petróleo	1,2
GLP's	1,18
Electricidad	3,17

24.1.3. Límites del sistema

Como se ha visto, la energía consumida en un proceso industrial hay que producirla o extraerla, y este proceso conlleva un nuevo gasto de energía que, a su vez, ha habido que generar consumiendo energía, y así sucesivamente. Esta ilimitada concatenación de consumos es cada vez de un valor más bajo: por ejemplo, según los datos de Boustead y Hancock (1979), para producir 1 MJ de gasolina, se precisan 0,2 MJ de aporte externo, los cuales necesitaron de 0,04 MJ (0,2 x 0,2) para ser producidos. Por tanto, pueden considerarse despreciables las contribuciones superiores al segundo nivel de análisis, que es el representado en la figura 24.1.

24.1.4. Otras contribuciones

La energía incorporada al proceso proveniente del capital –es decir, la que fue necesario consumir para construir la maquinaria y demás infraestructuras utilizadas en el proceso productivo– es una cantidad pequeña en comparación con la energía total aportada. Ello se debe a que el tiempo de fabricación de una unidad de producto es mucho menor que la vida útil de la máquina. Boustead y Hancock (1979) estiman la contribución del capital entre un 5 y un 10% de la energía total.

La energía introducida al proceso a través de la mano de obra es considerada despreciable. De hecho, supone un valor inferior al 0,5% de la energía incorporada por la maquinaria. Además, la progresiva modernización de los procesos de fabricación hace que este valor sea cada vez más reducido.

24.2. Aplicación de la metodología

Como hemos visto, en general el coste energético por unidad de producto obtenido en una etapa j, vendrá dado por la expresión:

$$k_j^+ = k_{j-1}^+ \frac{m_{entrada\ etapa\ j}}{m_{salida\ etapa\ j}} + \frac{E_j}{m_{salida\ etapa\ j}}$$

donde k_j^+ es el coste energético por unidad de producto de la etapa j, k_{j-1}^+ es el coste energético por unidad de producto de la etapa $j-1$, E_j es la energía directamente invertida en la etapa j para la producción de una unidad de producto, y m_e y m_s son, respectivamente, los flujos másicos de entrada y salida de la etapa j.

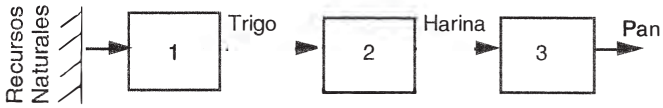
Al aplicar esta metodología de cálculo hemos obtenido los siguientes resultados:

24.2.1. Pan de molde

Se ha desglosado el proceso de fabricación del pan en tres etapas: 1) cultivo del trigo, 2) producción de la harina y 3) producción del pan, empaquetado y distribución hasta la panadería.

Figura 24.3

PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PAN



El siguiente cuadro resume los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología de cálculo del coste físico para el caso del pan:

Cuadro 24.2

COSTES ENERGÉTICOS INTERMEDIOS EN LA PRODUCCIÓN DE PAN

ETAPA	*Flujo entrada*	*Flujo salida*	m_e/m_s	e_j [a]	k_j^+
Etapa 1	RRNN	Trigo recolec.		4,02 MJ/kg trigo	4,02 MJ/kg trigo
Etapa 2	Trigo recolec.	Harina	1,42	2,70 MJ/kg harina	8,41 MJ/kg harina
Etapa 3	Harina	Pan de molde	0,7	14,81 MJ/kg pan	20,7 MJ/kg pan

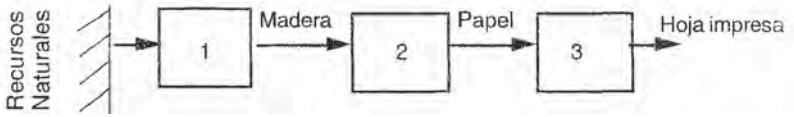
[a] **Fuente:** Según datos de Leach (1981).

24.2.2. Hoja de papel

El proceso de fabricación de una hoja de papel impresa se puede dividir en tres etapas: 1) extracción de la madera y transporte hasta la papelera, 2) producción del papel y 3) impresión de la hoja.

Figura 24. 4

PROCESO DE PRODUCCIÓN DE UNA HOJA DE PAPEL



El coste energético de los recursos naturales se ha tomado como cero: $k_0^{\pm} = 0$. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Cuadro 24.3

COSTES ENERGÉTICOS INTERMEDIOS EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL

ETAPA	*Flujo entrada*	*Flujo salida*	m_e/m_s	e_j [a]	k_j^+
Etapa 1	RRNN	Madera		25,7 MJ/kg madera	25,7 MJ/kg madera
Etapa 2	Madera	Papel	3,66[b]	29,02 MJ/kg papel	123,08 MJ/kg papel
Etapa 3	Papel	Hoja impresa	1	2,32 MJ/kg hoj. imp.	125,4 MJ/kg hoj. imp.

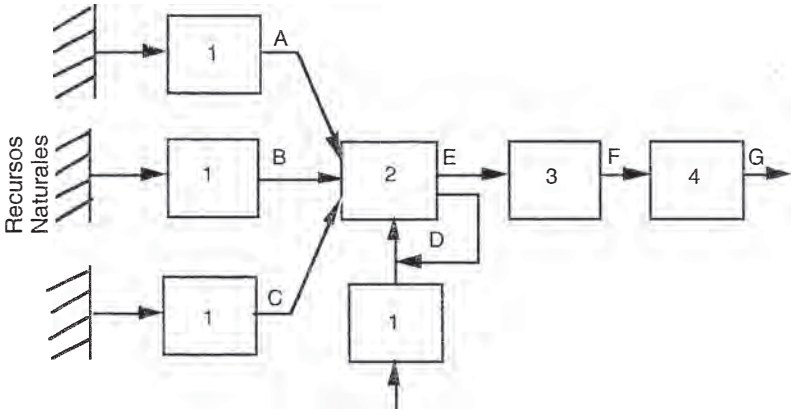
[a] **Fuente:** e_1 de Boustead y Hancock, 1979; e_2 de Goyftopoulos, 1974; e_3 elaboración propia a partir de datos de la Encuesta Industrial 1989-1992, INE.
[b] **Fuente:** Batelle Columbus, 1975.

24.2.3. Vaso de vidrio

El proceso de fabricación de un vaso de vidrio se ha desglosado en cuatro etapas: 1) obtención de materias primas, 2) producción del envase, 3) transporte y 4) distribución y venta.

Figura 24. 5

PROCESO DE PRODUCCIÓN DE UN VASO DE VIDRIO



Flujos: A: Arena, B: Caliza, C: Otras, D: Vidrios, E: Envase, F: Envase en mayorista, G: Envase en pequeño comercio

El coste energético de los recursos naturales (arena, caliza, etc.), se ha tomado como cero. El coste energético para cada etapa del proceso de fabricación de un vaso de vidrio es:

Cuadro 24.4

COSTES ENERGÉTICOS INTERMEDIOS EN LA PRODUCCIÓN DE UN VASO DE VIDRIO

ETAPA	*Flujo entrada*	*Flujo salida*	m_e/m_s	e_j [a]	k_j^+
Etapa 1	RRNN	Prepar. vidrio	1	3,21 MJ/kg RRNN	3,21 MJ/kg prep. vidr.
Etapa 2	Madera	Vaso vidrio	1,24	17,34 MJ/kg prep. vid.	21,31 MJ/kg vas. vidr.
Etapa 3	Vaso vidrio	Vaso vidrio	1	1,5 MJ/kg vas. vidr.	22,81 MJ/kg vas. vidr.
Etapa 4	Vaso vidrio	Vaso vidrio	1	1,09 MJ/kg vas. vidr.	23,9 MJ/kg vas. vidr.

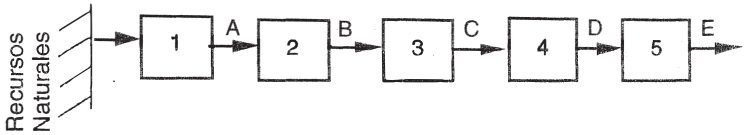
[a] **Fuente:** e_1, e_3 y e_4 de Boustead y Hancock, 1981; e_2, valor medio de Boustead y Hancock, 1979, Batelle Columbus, 1975, y Chigioji, 1979.

24.2.4. Lata de aluminio

Dividimos el proceso de fabricación de una lata de aluminio en seis etapas: 1) extracción del mineral, 2) producción de la alúmina, 3) producción de lingote, 4) laminado, 5) corte, soldadura, y transporte a embotelladora.

Figura 24. 6

PROCESO DE PRODUCCIÓN DE UNA LATA DE ALUMINIO



Flujos: A: Bauxita, B: Alúmina, C: Lingote de aluminio seccionado, D: Hoja de aluminio, E: Lata de aluminio

El coste energético de los recursos naturales (arena, caliza, etc.), se ha tomado como cero. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Cuadro 24.5

COSTES ENERGÉTICOS INTERMEDIOS EN LA PRODUCCIÓN DE UN VASO DE VIDRIO

ETAPA	*Flujo entrada*	*Flujo salida*	m_e/m_s	e_j [a]	k_j^+
Etapa 1	RRNN	Mineral		0,67 MJ/kg mineral	0,67 MJ/kg mineral
Etapa 2	Mineral	Alúmina	2,3[b]	24,4 MJ/kg alúmina	25,94 MJ/kg alúmina
Etapa 3	Alúmina	Lingote al.	1,97[b]	188,32 MJ/kg ling.	239,42 MJ/kg lingote
Etapa 4	Lingote al.	Hoja al.	1,04[b]	19,4 MJ/kg hoja	268,42 MJ/kg hoja
Etapa 5	Hoja al.	Lata al.	1,40[b]	69,28 MJ/kg lata	445,06 MJ/kg lata

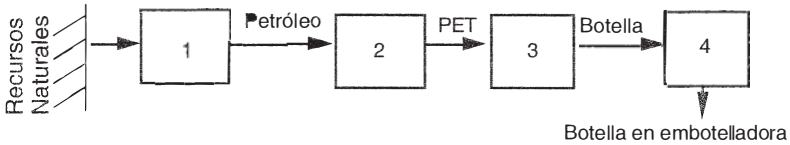
[a] **Fuente:** e_1, e_2, e_3, e_4 y e_5 de Boustead y Hancock, 1981.
[b] **Fuente:** Boustead y Hancock, 1981.

24.2.5. Botella de plástico

El proceso de fabricación de una botella de plástico PET, de volumen 2 l. y masa de 70 g. se puede dividir en 3 etapas: 1) extracción del petróleo, 2) producción del PET y 3) fabricación de la botella.

Figura 24.7

PROCESO DE PRODUCCIÓN DE UNA BOTELLA DE PLÁSTICO



El coste energético de los recursos naturales (arena, caliza, etc.), se ha tomado como cero. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Cuadro 24.6

COSTES ENERGÉTICOS INTERMEDIOS EN LA PRODUCCIÓN DE UNA BOTELLA DE PLÁSTICO

ETAPA	*Flujo entrada*	*Flujo salida*	m_e/m_s	e_j [a]	k_j^+
Etapa 1	RRNN	Petróleo		3,28 MJ/kg petróleo	3,28 MJ/kg petróleo
Etapa 2	Petróleo	PET	1,08[b]	148,49 MJ/kg PET	152,03 MJ/kg PET
Etapa 3	PET	Botella	1	102,11 MJ/kg bot.	254,14 MJ/kg bot.

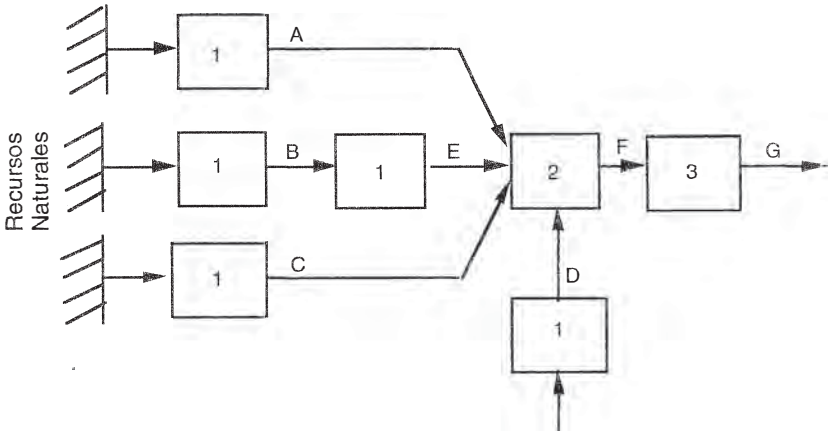
[a] **Fuente:** e_1, de Boustead y Hancock, 1979; e_2 y e_3, de Boustead y Hancock, 1981.
[a] **Fuente:** Boustead y Hancock, 1981.

24.2.6. Alicate de acero

Hemos desglosado el proceso de fabricación de un alicate de acero en cuatro etapas: 1) obtención de las materias primas, 2) producción del acero, 3) fabricación de la herramienta y transporte y 4) distribución y venta.

Figura 24.8

PROCESO DE PRODUCCIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE ACERO



Flujos: A:Caliza, B: carbón (hulla), C: Mineral de hierro, D: Chatarra, E: Coque, F: Acero, G: Herramienta

Cuadro 24.7

COSTES ENERGÉTICOS INTERMEDIOS EN LA PRODUCCIÓN DE UN ALICATE DE ACERO

ETAPA	*Flujo entrada*	*Flujo salida*	m_e/m_s	e_j^{fr}	k_j^+
Etapa 1	RRNN	Mat. primas		10,97 MJ/kg m. prim.	10,97 MJ/kg m. prim.
Etapa 2	Mat. primas	Acero	2,62	19,32 MJ/kg acero	48,05 MJ/kg acero
Etapa 3	Acero	Alicate	1,03	0,23 MJ/kg alicate	49,78 MJ/kg alicate
Etapa 4	Alicate	Alicate	1	1,44 MJ/kg alicate	51,22 MJ/kg alicate

[a] **Fuente:** e_1, elaboración propia a partir de datos de Boustead y Hancock, 1979; e_2, de Gyftopoulos, 1974; e_3, elaboración propia a partir de datos del IDAE, 1978, y e_4, de Boustead y Hancock, 1981.

24.3. Asimetría entre los costes físicos y los monetarios

Partiendo de la metodología descrita y utilizando diversas fuentes, hemos calculado los costes energéticos. Procedamos ahora a describir las fuentes utilizadas para la asignación de los costes monetarios. Los precios en las etapas primeras de producción se han obtenido a partir de una base de datos de comercio internacional (TRAD-STAT); los precios en las etapas finales se han tomado del comercio español.

Hemos representando gráficamente el coste físico frente al precio de mercado de los productos anteriormente seleccionados. Para obtener una misma escala en la representación gráfica, se han dividido ambas valoraciones (energética y monetaria) por el valor correspondiente del producto final (en unidades energéticas y monetarias respectivamente).

En todos los casos, el eje de ordenadas representa la cantidad de energía (exergía) consumida hasta llegar al producto; desde el mineral al producto(s) intermedio(s) y hasta llegar al producto a disposición del consumidor final en la tienda.

La tendencia es extrapolable y sigue la ley que hemos denominado «Regla del Notario», que señala el crecimiento más que proporcional de la valoración monetaria con relación al coste físico, en los procesos llamados de producción. Su formulación en términos coloquiales es la siguiente: *en la construcción de una casa el mayor consumo energético se lo llevan los materiales de construcción, cemento, vidrio, acero que, sin embargo, tienen un reducido precio unitario. Por el contrario, cuando la operación finaliza en la mesa del notario, éste, el promotor, el registrador, etc., consumen en su actividad muy poca energía y, sin embargo, reciben una buena fracción del precio final de venta.*

Recordemos que, matemáticamente, el modelo responde a la fórmula

$$k^{+} - k_{o}^{+} = k_{p}^{+} (1 - e^{-\varepsilon p})$$

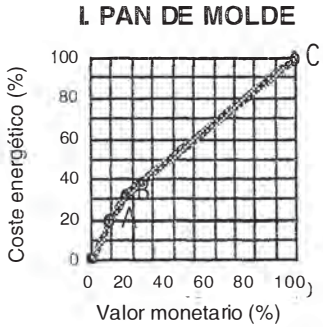
o en términos porcentuales, tales como los representados en la figura 24.9, sería,

$$k' \equiv (k^{+} - k_{O}^{+}) / k_{p}^{+} = 1 - \exp(-\varepsilon' \, p/p_{o}) \equiv 1 - \exp(-\varepsilon' . \, p')$$

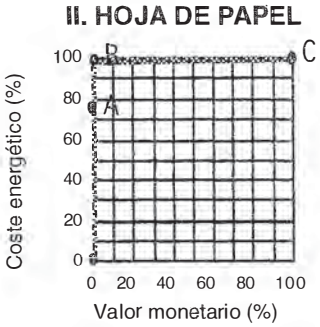
donde k^{+} el coste físico de un producto intermedio, p su precio en unidades monetarias, k_{o}^{+} es el coste físico de reposición del mineral (en *MJ/kg materia prima*, en nuestros ejemplos se ha tomado como cero), k_{p}^{+} es el coste físico final del producto *(MJ/kg producto)* y ε el coeficiente de elasticidad de la cadena de relación. Por otra parte, k' y p' son el tanto por uno del coste físico y del precio del producto intermedio con respecto al coste físico y precio del producto final, ε' es el nuevo coeficiente de elasticidad que se relaciona con ε a través de $\varepsilon' = \varepsilon . p_{o}$

Figura 24.9

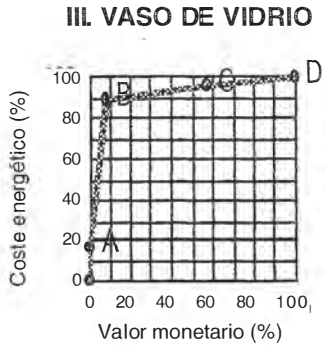
RELACIÓN EMPÍRICA ENTRE COSTES ENERGÉTICOS Y COSTES MONETARIOS PARA PAN, PAPEL, VIDRIO, ALUMINIO, PLÁSTICO Y ACERO



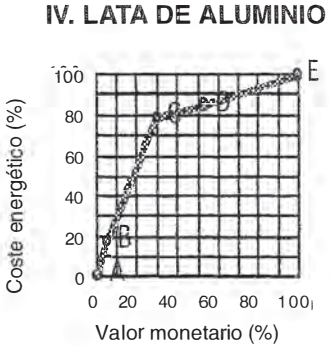
a) producción de pan



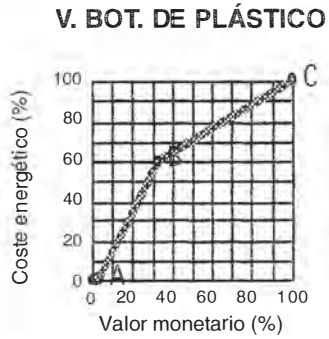
b) producción de papel impreso



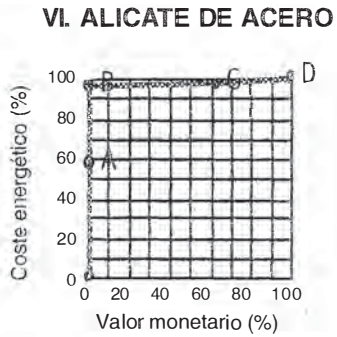
c) producción de vidrio



d) producción de aluminio



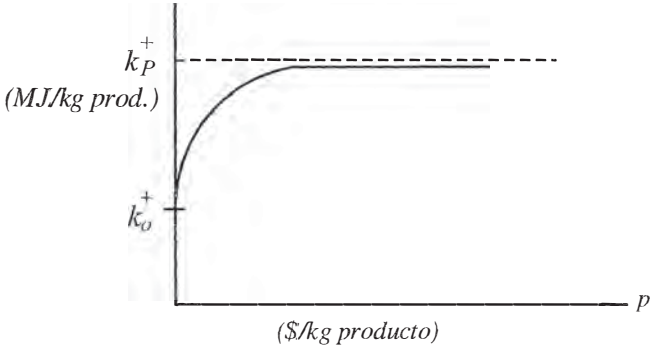
e) producción de plástico



f) producción herramienta de acero

Figura 24.10

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA «REGLA DEL NOTARIO»



Cuanto mayor sea ε más separada está la economía de la ecología porque si ε → 0 la función se hace lineal de la forma

$$k^+ - k_O^+ = k_p^+ \varepsilon p \qquad (\text{con } \varepsilon \to 0)$$

lo que significa que la valoración monetaria sería proporcional al coste físico. Cuanto más eficientes fueran los procesos productivos, menores serían los precios monetarios que habría que pagar por los productos. Es evidente que una estructura económica así estaría muy simplificada pues olvida muchos otros tipos de costes como los de administración, financieros, de información, etc. Así, a la vista de la figura 24.9 se observa que en la producción de pan la tendencia es casi proporcional, lo que indica que este proceso, casi tan viejo como la humanidad, apenas plantea costes de investigación, publicidad, etc., y existe un mercado lo suficientemente extendido como para que la valoración monetaria evolucione en paralelo con los costes energéticos. En el extremo contrario estaría la hoja de papel en el que el valor monetario de la hoja impresa de un libro se distancia enormemente del de los materiales en proceso que la originaron, planteándose una asimetría extrema entre valoración monetaria y coste físico. Sin embargo, ¿hasta qué punto se ha de retribuir mejor el trabajo intelectual que el manual o las actividades de gestión y comercialización que las de extracción y producción primaria? La asimetría entre valoración monetaria y coste físico, observada con mayor o menor intensidad en todos los procesos analizados, responde –como hemos indicado en el capítulo 23– a factores socioinstitucionales que habría que corregir para evitar tanto la polarización social, como la distorsión entre economía y naturaleza, presentes en nuestra sociedad.

Capítulo 25
FLUJOS FÍSICOS Y VALORACIÓN MONETARIA EN EL COMERCIO MUNDIAL: EL «EFECTO NOTARIO» EN EL REPARTO DE LOS FRUTOS DEL COMERCIO A NIVEL INTERNACIONAL

Óscar Carpintero, Sara Echeverría y José Manuel Naredo

25.1. Introducción

Algunos de los desarrollos conceptuales expuestos en los anteriores capítulos poseen diversas aplicaciones y un potencial explicativo nada despreciable en el ámbito concreto de las relaciones económicas internacionales. De manera especial, la llamada «Regla del Notario» aparece como un sugerente instrumento para explicar las pautas económico-ecológicas por las que se rigen los intercambios comerciales a nivel internacional. Desde este punto de vista, dedicamos las siguientes páginas al estudio del comercio internacional, dividiendo el razonamiento en tres partes. Una de ellas de mayor calado teórico, sirviendo el resto como contraste empírico de lo anterior. En primer lugar, entroncando con lo expuesto en otros capítulos, daremos cuenta del cambio de posición experimentado por el comercio internacional en la explicación convencional del proceso económico y su emergencia como una nueva categoría que contribuye a la «producción» de riquezas. Analizaremos también las principales insuficiencias económico-ecológicas en el tratamiento del comercio que realiza la teoría económica convencional, reseñando críticamente las contribuciones que desde esta corriente se han diseñado para eludir estas deficiencias. En segundo lugar, daremos cuenta del surgimiento de una auténtica «burbuja comercial» –iniciada en el período de la postguerra y que llega hasta nuestros días–, que ha llevado a un espectacular crecimiento de los intercambios comerciales internacionales en relación con la evolución de la producción de mercancías a nivel mun-

dial. La tercera parte estará dedicada al estudio y aplicación de la Regla del Notario a nivel internacional, mostrando la existencia de una asimetría entre los flujos físicos y la valoración monetaria de los mismos, así como las consecuencias que de esta circunstancia se derivan.

25.2. Libre comercio y medio ambiente: insuficiencias económico-ecológicas de la Teoría Pura del Comercio Internacional

«Si hubiera un Credo del economista contendría seguramente estas afirmaciones: "creo en el principio de la ventaja comparativa y creo en el libre comercio"»[8]. De esta forma tan provocativa, llamaba Paul Krugman la atención sobre algunos excesos de dogmatismo presentes en la profesión del economista. De hecho, aunque se reconoce la necesidad de la abstracción modelizadora en el quehacer científico habitual, esto no es óbice para confundir los supuestos simplificadores con la realidad objeto de estudio. Un ejemplo paradigmático de este proceder –denominado la falacia de la «concreción injustificada»[9]– lo constituye la Teoría Pura del Comercio Internacional. Dicho enfoque adopta como soportes básicos del razonamiento la hipótesis de la ventaja comparativa y la de especialización productiva. Es sabido que, bajo estos supuestos y auxiliados por una serie de hipótesis complementarias[10], se llega a la conclusión de que la mejor estrategia comercial –aquella que incrementa en mayor medida el bienestar de las naciones que participan en los intercambios y que aumenta las posibilidades de consumo de los países implicados respecto de una situación de ausencia de los mismos– es el libre comercio. Dicha argumentación, más o menos adobada formalmente, ha pasado a convertirse en la «sabiduría convencional» en cuestiones de relaciones comerciales internacionales. De nada servirá la llamada de atención y la prudencia de algunos economistas, pues el mensaje ha calado ya muy hondo, y no sólo en la esfera académica. En el afán de superar los inconvenientes de que adolecen los mimbres analíticos convencionales, resulta perentoria la tarea de evaluar, de forma serena, estas cuestiones y someter a contrastación los aspectos de la teoría que se han convertido en dogmas con el propósito de vislumbrar hasta qué punto son ciertas las bondades que se postulan.

[8] KRUGMAN, P. (1987), «Is Free Trade Passé?, *Journal of Economic Perspectives.* (2),1, p. 131. Citado por: DALY, H. E. y Jr. COBB (1989), *Para el bien común. Reorientando la economía hacia la comunidad, el ambiente y un futuro sostenible.* México, FCE, p. 193.

[9] DALY, H. E. y Jr. COBB (1989), *Para el bien común. Reorientando la economía hacia la comunidad, el ambiente y un futuro sostenible, op. cit.*, pp. 31-48.

[10] Entre ellas, pueden destacarse la ausencia de externalidades, la estabilidad de los precios, la igualdad dinámica de las ventajas comparativas y la inmovilidad internacional de los factores productivos.

Fue en esta línea, del sentido del rigor y el atenerse a las consecuencias de las reglas del juego, la que llevó a W. M. Corden a afirmar que «la Teoría no dice que «el libre comercio es lo mejor». Dice que *«bajo ciertas condiciones,* es lo mejor»[11]. Ya hemos visto lo que para dicho enfoque significa lo mejor. Podemos añadir ahora que este objetivo se consigue a través del crecimiento económico, consecuencia del aumento del comercio y ayudado por la asignación «eficiente» de los recursos según la especialización y la dotación factorial.

Los desarrollos de la Teoría de la Ventaja Comparativa del comercio internacional enunciada por David Ricardo «lograron» formalizar la vieja aspiración librecambista de que todos los países participantes en el comercio internacional saldrían *ganando* con el intercambio. El comercio como actividad económica se transforma, así, de ser un juego redistributivo de suma cero en el que unos ganan a costa de lo que el resto pierde, a convertirse en un juego de *suma positiva* en el que todos los participantes obtienen una ganancia o, al menos, ninguno de ellos pierde. Por contra, uno de los problemas a los que nos lleva el análisis de la anterior afirmación es el de la valoración de esas «ganancias»[12].

Varios han sido, no obstante, los planteamientos con que la teoría económica se ha pertrechado desde el siglo pasado para responder a la cuestión del por qué comercian los países. En general, estas explicaciones se han orientado a esconder el carácter conflictivo que surge del proceso de apropiación de riquezas y recursos por parte de un territorio respecto de otro, mostrando que, lejos de producirse esta situación, existe un interés mutuo en los países por comerciar entre ellos. Para apoyar esta afirmación se apeló básicamente a dos razones: las diferencias entre los países y el aprovechamiento de las economías de escala en la producción. De la primera razón se desprende, entre otras cosas, un potente argumento en favor de la especialización productiva con base en esas «diferencias». El segundo motivo alude al incremento en la producción apoyado en el aumento de la productividad de un país que realiza, comparativamente mejor, aquella actividad para la que posee ventaja por su dotación relativa de recursos. Y si aumenta la producción, se dirá, es lógico que aumenten también las posibilidades de con-

[11] CORDEN, W. (1974), *Trade Policy and Economic Welfare,* Weatsheaf, Hewel Hampstead, p. 8. Ref. EKINS, P. *et al.* (1994), «Trade, Environment and Development: The Issues in Perspective»; *Ecological Economics,* 9, p. 2.

[12] Por otro lado, a la hora de contabilizar las «ganancias» derivadas del intercambio, en los países empobrecidos se asiste generalmente al hecho de que «cuando la producción destinada a la subsistencia, y que no se tiene en cuenta en la contabilidad económica, se destina a la producción para el comercio, que *sí se incluye* en esa contabilidad, se percibe una falsa ganancia». EKINS, P. (1995), «Trading off the Future: Making World Trade Environmentally Sustainable», en B. KRISHNAN, N. GOODWIN y J. HARRIS, (eds.) (1995), *A Survey of Ecological Economics,* Washington, D.C, Island Press, p. 308.

sumo[13]. Este modo de razonar desemboca no sólo en una mejora unilateral, sino en una ganancia mutua derivada del aumento de *esas* posibilidades de consumo (y, por tanto, se añadirá que de «bienestar») para ambos países, ya que cada uno puede especializarse en la producción de aquellos bienes para los que posee una mejor dotación de recursos y consumir las mercancías que no produce mediante la importación, pagando con los ingresos obtenidos por las exportaciones. Nada se dice, no obstante, sobre la racionalidad de pagar las importaciones a costa de los ingresos obtenidos por unas exportaciones que se realizan con cargo al deterioro de un patrimonio natural no renovable, que constituye la fuente de riqueza futura de ese país. La potencia del efecto «especialización» se materializa, a su vez, en un incremento de la Frontera de Posibilidades de Producción. Vemos, pues, cómo se lleva a cabo un cambio cualitativo digno de reseñar: el comercio, que tradicionalmente había sido una actividad típicamente redistributiva a nivel internacional[14], se postula y erige, a partir de este momento, en agente propiciador del *crecimiento de la producción.* Respecto a las bondades del libre comercio en relación con el aumento de las posibilidades y de la diversidad de bienes puestos al servicio del consumidor, cabría añadir, como así lo hacen los esposos Lovins y el alemán E. U. von Weizsäcker, que «[...] la imagen engaña. Si bien, la diversidad de las ofertas crece en cada lugar del planeta, el número total de ofertas en el mundo disminuye. ¿Cuántas bebidas locales han sido desplazadas por la Coca-Cola? ¿Cuántos tipos de frutas y verduras han desaparecido de los mercados a raíz de la normalización de los tipos? Según un estudio del Rural Advancement Fund International, el 97% de los diferentes tipos de verduras ha desaparecido de la oferta entre 1903 y 1983 y seguramente se ha perdido»[15].

Del mismo modo que en otras ocasiones la vulgarización de la doctrina implicó la pérdida de una parte sustancial de su significado original, en este caso concreto de la Teoría del Comercio Internacional, la parte sacrificada será la relativa a los «supuestos». Así, lo que puede constituir una afirmación en presencia de estas hipótesis, deviene en una negación, o cuando menos en una afirmación muy matizada, en ausencia de las mismas. Si bien, podríamos convenir en que las mencionadas características del modelo «excluyen la discusión de cualquier problema de interés en el mundo real» y a pesar de las reticencias que pueden despertar la mayoría

---

[13] Una presentación de este argumento puede encontrarse en: KRUGMAN, P. y M. OBSTFIELD (1994), *Economía internacional: teoría y política*, Madrid, MacGraw-Hill, p. 13.

[14] Y habría que añadir que en sentido regresivo.

[15] WEIZÄCKER, E. U. VON., A. LOVINS y L. H. LOVINS (1996), *Factor 4. Informe al Club de Roma* Barcelona, Galaxia Gutemberg/Círculo de Lectores, p. 382.

de los planteamientos enunciados, desde un punto de vista general, uno de los talones de Aquiles, un lugar importante por donde se resquebraja el edificio de la Teoría de la Ventaja Comparativa, se encuentra en el último de los supuestos, a saber: *la ausencia de movilidad factorial entre los países que comercian.* Las implicaciones más relevantes de esta hipótesis serán comentadas en el próximo capítulo, si bien, en este momento, tal vez merezca la pena apuntar algún aspecto en especial.

Si aceptamos la ausencia de movilidad de la mano de obra y el «capital», esto quiere decir que ninguno de los factores tiene la posibilidad de emigrar de un país a otro, pues, en caso contrario, el intercambio no se guiaría por la ventaja comparativa, ni existirían las ganancias preconizadas por la teoría. En efecto, desde el momento en que el capital (como actualmente ocurre) atraviesa libremente las fronteras en busca de la máxima rentabilidad y modifica, de esta forma, la dotación de factores productivos entre los diferentes países, la inversión comercial no se regirá por criterios de rentabilidad relativa sino que, al contrario, responderá a la llamada de la rentabilidad absoluta[16]. En estas circunstancias, la extensión del principio de la ventaja comparativa (válido en un contexto individual) al comercio entre naciones resulta poco esclarecedora. Lo que puede ser una especialización individual basada en las propias capacidades, se vuelve una cuestión relativa y con matices en el caso de aquellos países entre los que existe libre movilidad de los factores productivos. En efecto, un flujo de capital desde un país hacia otro puede hacer totalmente irrelevante la ventaja «comparativa» preexistente[17]. Se llega así al punto en que han desaparecido casi por completo aquellos tiempos en los que los capitalistas, al decir de David Ricardo, se guiaban por «la fuerza de la comunidad» que los impulsaba a mantener su dinero en el país natal aunque en el extranjero pudieran obtener mayores beneficios.

Para lo que aquí nos interesa y dejando al margen la crítica general sobre la teoría ricardiana, baste decir que la prescripción normativa que se deduce de la misma, implica la ausencia de externalidades ambientales y demás fallos del mercado; o lo que es lo mismo: que los precios tienen que reflejar *todos* los costes en que se incurre en el proceso de fabricación de una mercancía destinada a la exportación. Esta exigencia de que los precios digan la «verdad» nos permite expresar de otra forma la misma circunstancia, a saber: *en presencia de externalidades ambientales no se puede afirmar que el libre comercio se traduzca en un incremento del bienestar económico ni por tanto que existan ventajas mutuas derivadas del intercambio.* En efecto,

[16] DALY, H. E. y R. GOODLAND (1994), «An Ecological-Economic Assessment of Deregulation of International Commerce under GATT», *Ecological Economics,* 9, p. 82. El interés de esta circunstancia reside en poner de actualidad la ya vieja y casi olvidada doctrina smithiana de la «ventaja absoluta».

[17] *Ibid.*

tomar en consideración o no, dentro de los costes, el deterioro ambiental y social provocado por la fabricación de una mercancía influye en el precio final de ésta y en la ventaja comparativa del país que la exporta. Si en vez de incluir estas consideraciones, se «externalizan» los costes de producción, una mercancía puede reducir su precio y obtener así una mayor ventaja comparativa de la que realmente posee.

La teoría convencional del comercio internacional, razonando en términos exclusivamente monetarios, y bajo los supuestos antes indicados, «demuestra» que el resultado final del comercio mundial arroja un saldo monetario positivo. Por el contrario, la interpretación del proceso económico desde el punto de vista de la termodinámica, indica que sólo alcanza a observar pérdidas[18]. Por tanto, no se puede afirmar que un proceso comercial sea beneficioso para todo el mundo, a la vez que se hace abstracción de la naturaleza física del proceso y de los deterioros que comporta. Uno de los problemas del análisis convencional del comercio mundial es su incapacidad para percibir las importantes implicaciones ecológicas que precisamente se encubren tras el usual «velo monetario». Así, nada se dice sobre el verdadero consumo de recursos, y su naturaleza en términos de *cantidades,* ni se informa sobre la sostenibilidad o insostenibilidad de ciertas prácticas comerciales. En definitiva, se hace reiteradamente abstracción de los contextos socioambientales en los que se practican los intercambios, reduciendo la capacidad explicativa de la propia teoría y, en consecuencia, de las propuestas de política comercial en ella basadas. Igualmente están por desarrollar las teorías culturales y antropológicas del comercio.

El alcance de estas objeciones afecta tanto a la teoría original como a los desarrollos posteriores, lo cual hace pensar en la dificultad que este venerable constructor teórico posee actualmente para explicar los intercambios y las «ganancias del comercio» a nivel internacional.

En cualquier caso, aun documentando la tradicional ausencia del «elemento medio ambiental» en las reflexiones históricas sobre el comercio internacional, conviene llamar la atención sobre los recientes intentos del análisis económico por integrarlo en la Teoría del Comercio. Aquí, como en general en la reflexión sobre las relaciones entre la economía y la naturaleza, se vuelven a poner de manifiesto las diferencias entre el enfoque de «economía ambiental» y la propuesta realizada desde la «economía ecológica o enfoque ecointegrador»[19]. En este caso, la economía internacional con preocupaciones «ambientales» lanza su red analítica convencional con el propósito de terciar en la polémica sobre las relaciones entre el libre comercio y el deterioro ambiental, abogando por la compatibilidad entre

[18] Para la aclaración de este resultado puede consultarse el capítulo 22 del presente volumen.

[19] Las diferencias en la perspectiva y el ámbito de razonamiento pueden verse en el capítulo 4 del presente volumen.

el crecimiento económico –impulsado por la liberalización de los intercambios– y la protección ambiental[20]. Lo que, a estas alturas, se puede decir de semejantes intentos es que, salvaguardando el cuerpo teórico fundamental, únicamente extienden el modo de razonamiento analítico parcelario hacia algunos aspectos «olvidados» por la corriente principal y que, por el contrario, requieren un tratamiento fundamentalmente sistémico y ecointegrador.

Los defensores del libre comercio utilizan un doble argumento para hacer plausible su pretensión de eludir el conflicto entre la ausencia de restricciones al comercio y la protección ambiental. En primer lugar, se propugna que un aumento de la liberalización comercial lleva consigo un crecimiento de la renta que puede, a su vez, redundar en un incremento de los recursos destinados a gastos en protección y restauración del deterioro ecológico. En otras palabras: existe un *efecto-escala positivo.* De esta opinión era el GATT (ahora OMC) cuando afirmaba que «[...]el aumento del ingreso por habitante –que se ve impulsado por un mayor acceso a los mercados y la expansión del comercio– permite obtener más recursos para frenar el deterioro del medio ambiente, ayudando a costear la lucha contra la contaminación y las operaciones de limpieza en caso de que las haya habido. En cambio, un país cuya economía se encuentre estancada, tenderá más a escatimar los gastos destinados a mejorar el medio ambiente»[21]. El segundo argumento, conocido como *el efecto tecnológico positivo* de la liberalización comercial, hace hincapié en el aspecto beneficioso que puede tener la difusión, a través de los intercambios, de tecnologías «limpias» que reduzcan el impacto ambiental de los procesos productivos.

Aquellos economistas críticos con este modo de razonamiento, que abarca tanto las premisas como los resultados, han centrado su actuación en dos líneas de trabajo. Por un lado, desbrozar las inconsistencias lógico-empíricas que la anterior argumentación presenta y, en segundo lugar, intentar demostrar que, lejos de ser la creciente liberalización comercial beneficiosa para el medio ambiente, lo que este proceso arroja como resultado es un agravamiento progresivo de las condiciones ambientales globales. De esta forma, y en referencia al efecto-escala positivo, conviene recordar –si se nos permite– la sentencia castiza que reza: «del dicho al hecho va un trecho». En otras palabras: una cosa es que, debido al crecimiento económico, *pueda* aumentar el gasto en protección ambiental, y otra muy distinta que ese gasto potencial se convierta en un gasto *real*[22]. Todo ello

---

[20] Una buena muestra de estas preocupaciones puede encontrarse en ANDERSON, K y R. BACKHURST (dirs.) (1992), *El comercio mundial y el medio ambiente,* Madrid, Mundiprensa.

[21] GATT (1991), *El comercio mundial, 1990-1991,* Ginebra, p. 22.

[22] EKINS, P. *et al.* (1994), «Trade, Environment and Development: The Issues in Perspective», *Ecological Economics,* 9, *op.cit.,* p. 7.

cuando, por el contrario, el crecimiento económico conlleva daños ecológicos o ambientales evidentes, que se acentúan en el caso de los países más pobres o económicamente dependientes. No es ésta, sin embargo, la única inconsistencia. Las bondades ambientales de un efecto-escala positivo sólo serían aplicables a un número reducido de casos, a saber: aquellos que no presenten irreversibilidades. La mayoría de los problemas ambientales globales adolecen, no obstante, de un fuerte carácter irreversible. Una tercera razón para dudar del carácter benéfico de este efecto se deriva de un hecho que acompaña a cualquier aumento de la liberalización comercial: el incremento del transporte. Es evidente que el volumen de mercancías transportadas aumentará, pero también la distancia recorrida por ellas y, por tanto, el consumo energético necesario para llevarlas a su destino. Las estimaciones barajadas para cifrar el aumento del transporte marítimo, consecuencia de la implementación de los acuerdos de la Ronda Uruguay, cifran éste en 1.200 millones de km-tm de incremento en el año 2004 respecto de los niveles de 1992[23]. Por último, a pesar de que la especialización y la división del trabajo aparece como un fuerte argumento en favor del comercio y el crecimiento económico, es muy probable que en ausencia de las condiciones ideales expresadas en las hipótesis del modelo, la liberalización del comercio esté causando, en determinados países en desarrollo, un efecto no deseado: el «aumento de la especialización en actividades ecológicamente insostenibles»[24].

Respecto de las consecuencias asociadas al efecto de difusión de tecnologías limpias, cabría realizar la siguiente matización. Generalmente, cuando se hace uso de este argumento se está pensando en una transferencia de tecnología en el sentido Norte-Sur, ya que el Sur –normalmente «subdesarrollado»–, no posee el desarrollo tecnológico adecuado para implementar una innovación de estas características. Esta visión sesgada del problema nos impide darnos cuenta de que los comportamientos y las técnicas respetuosos del medio ambiente no tienen una relación directa con el desarrollo tecnológico. Un ejemplo de lo que acabamos de decir lo constituye la agricultura tradicional, por contraposición a la moderna actividad agrícola esquilmadora del suelo pero muy avanzada «tecnológicamente».

[23] OCDE (1996), *The Global and Environmental Goods and Services Industry*, París. Ref. ADAMS, J. (1997), «Globalization, Trade and Environment», en OCDE (1997), *Globalization and Environment. op. cit.* p. 184. Como ejemplo de este tipo especial de coste ecológico, en 1989, el volumen de mercancías transportadas por vía marítima fue de casi 4.000 millones de tm, lo que en términos energéticos significa un consumo de 8,1 terajulios; es decir, el equivalente al consumo energético anual de Brasil y Chile. FRENCH, H. (1991), «La reconciliación del comercio y el medio ambiente», en Worldwatch Institute (1991), *La situación del mundo*, Madrid, CIP-Apóstrofe, p. 278.

[24] Dentro de esta categoría puede incluirse el comercio de madera, del cual sólo un exiguo 0,1% de toda la extracción para la exportación se realiza de manera sostenible, es decir, a tasas en las que la tala no supera la regeneración. FRENCH, H. (1991), *op. cit.*

Liberalización y proteccionismo se han convertido en los extremos de una polémica que esconde otros aspectos de interés. Hablar, por ejemplo, en favor de la liberalización de los intercambios comerciales internacionales es otra manera de argumentar por la desregulación del comercio mundial. En el fondo, desde el final de la Segunda Guerra Mundial, los partidarios de la ausencia de restricciones al comercio han gozado de mejor posición y medios que los que defendían posturas siquiera moderadamente proteccionistas. En esta controversia, los primeros han conseguido el apoyo del GATT, si bien no deja de existir un cierto sesgo extremista en plantear la discusión en estos términos. Aunque no resulta en modo alguno descabellado propugnar posturas proteccionistas cuando se trata de *proteger* un entorno social y territorial que se estima deseable. Cuando, por poner el caso, un país posee una avanzada «política ambiental» que internaliza los costes ambientales, se da la paradoja de que parte en desventaja en un entorno en el cual el comercio esté desregulado. Si opta por instaurar una tasa sobre los productos que, procedentes del exterior, hayan sido fabricados bajo regulaciones permisivas y contaminantes del medio ambiente, rápidamente será acusado de proteccionismo. La diferencia fundamental es que, en este caso, no se está defendiendo una industria ineficiente respecto de los competidores exteriores sino una *política nacional eficiente que internaliza los costes ambientales*[25]. Estaríamos, pues, dispuestos a aceptar el rótulo de «proteccionistas» si lo que se trata de proteger, además de estas actividades que internalizan los costes, es «[...]la salud, la seguridad ambiental, los estándares de calidad y un razonable nivel mínimo de vida para los ciudadanos, pues históricamente, estos beneficios han venido de la mano de las políticas nacionales, no desde una integración económica global»[26]. De todas maneras, hemos de recordar que el presente trabajo va más allá de la simple polémica que enfrenta librecambio a proteccionismo, al proponer nuevas interpretaciones orientadas a promover cambios mentales e institucionales que modifiquen las reglas del juego por las que se rige la valoración y el intercambio comercial.

25.3. Crecimiento del comercio y mundialización de la economía

La época posterior a la segunda guerra mundial ha sido un período rico en acontecimientos históricos. Desde el punto de vista de la economía internacional y mirando hacia atrás con cierta perspectiva, podríamos convenir en que un aspecto destacable de este período lo constituye el creci-

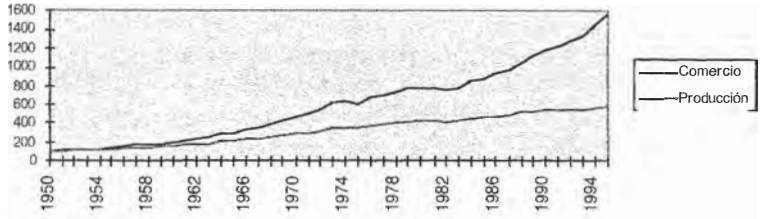
[25] DALY, H. E. y R. GOODLAND (1994), «An Ecological-Economic Assessment of Deregulation of International Commerce Under GATT», *Ecological Economics*, 9, p. 78.

[26] *Ibid.*, p. 76.

miento espectacular que desde 1950 ha experimentado el comercio mundial. Los economistas convencionales tienden a interpretar este hecho como un avance incuestionable en el proceso de integración de las economías nacionales o, por utilizar la «nueva» denominación, como una creciente *globalización* de los intercambios, o, simplemente, mundialización. Comparando los datos de la evolución del comercio mundial respecto de la producción de mercancías, se observa que, mientras el primero ha multiplicado su volumen por 15 en el período 1950- 1995, la producción ha aumentado su peso sólo en cinco veces[27].

Gráfico 25.1

EVOLUCIÓN DEL COMERCIO Y LA PRODUCCIÓN 1950-1995
(ÍNDICE 100=1950)



Fuente: GATT y OMC, *El Comercio Internacional,* Varios años.

Casi de inmediato se desprende una primera conclusión en relación con el anterior gráfico: durante casi todos los años, la tasa de crecimiento del comercio ha ido por delante de la correspondiente a la de producción para el mismo período. En la explicación de este mayor dinamismo del comercio se unen, a factores y tendencias antiguas, algunos aspectos novedosos. Si entendemos la mundialización económica en sentido estricto, es decir, como el incremento que el peso de la actividad exterior posee en las economías nacionales, no resultaría muy adecuado hablar de una mayor globalización económica o cuando menos habría que hacerlo de una forma más matizada. A este respecto, se ha llamado la atención sobre el hecho de que la tendencia hacia la globalización medida como el porcentaje que los

[27] A la hora de realizar comparaciones de este tipo, conviene tener presente la siguiente advertencia. En general, las cifras de producción y comercio no son directamente comparables ya que, por un lado, las estadísticas del PIB miden la suma de valores añadidos, mientras que las del comercio se realizan en valores de venta brutos correspondientes a las transacciones, incurriendo en procesos de doble contabilización. En todo caso, sirven como muestra del desarrollo de una tendencia.

intercambios comerciales representan sobre el PIB, ya era bastante significativo en la época del patrón-oro, y que únicamente desde el año 1973, se han superado los niveles de integración comercial existentes en 1913[28]. A pesar de la cautela proporcionada por los datos históricos, existe un elevado consenso a la hora de caracterizar los aspectos novedosos del período más reciente de mundialización. Cuatro son las causas que explican, desde esta perspectiva, las altas tasas de crecimiento del comercio mundial[29].

En primer lugar, el espectacular incremento del *comercio intra-industrial* (el realizado por economías similares sobre la base de productos poco diferenciados) ha otorgado mayor importancia a los intercambios intrarregionales entre zonas económicamente homogéneas, ayudado, las más de las veces, por imposiciones derivadas de procesos de integración comercial. Lo anterior no implica en modo alguno que desaparezca de escena el comercio inter-industrial. A este respecto, la actividad diversificada de las Empresas Transnacionales (ETN) opera como motor de ambos tipos de comercio a través del comercio intra-empresa, fundamentalmente el de las Empresas Transnacionales y sus filiales, y el de las ETN con sociedades que no son filiales. Respecto de esta cuestión llama la atención el dato proporcionado por Naciones Unidas según el cual, en 1983, las ETN comercializaban el 70% de los minerales no combustibles de los países pobres. A pesar de los esfuerzos de los gobiernos afectados por hacerse con la propiedad de estos recursos naturales, las ETN continuaron influyendo en las fases de procesamiento y comercialización[30]. De hecho, el poder de estos conglomerados empresariales no se agota en el control que ejercen sobre las diferentes fases del proceso productivo, sino que ofrece su aspecto más sobresaliente en la presencia conjunta de las ventas realizadas por las filiales extranjeras y la proporción que las exportaciones intra-empresas arrojan sobre las exportaciones totales (ver cuadro 25.1).

Como puede observarse, las ventas de las filiales de ETN superan en total, y en las principales economías, el valor total de las exportaciones mundiales no afectando a las ETN. Quizás el aspecto más relevante del control que las ETN ejercen sobre los intercambios comerciales a nivel mundial venga avalado por ese tercio del total de exportaciones que acaparan. En cualquier caso, el eslabón que une a las ETN con las exportaciones mundiales no se rompe con el anterior dato, ya que, aproximadamente,

[28] Por ejemplo, las exportaciones de mercancías en 1913 suponían el 11,9% del PNB mundial, el 11,7% en 1973 y el 17,1% en 1993. KRUGMAN, P. (1995), «Growing World Trade: Causes and Consequences», *Brookings Papers on Economic Activity*, 1: 1995; p. 332.

[29] *Ibid.*, pp. 332-343.

[30] ONU (1983), *Las empresas transnacionales en el desarrollo económico*, Nueva York. Ref. PALAZUELOS, E. (coord.) (1998), *Dinámica capitalista y crisis actual*, Madrid, Akal, p. 193. También: GLADWIN, Th. (1987), «Environment, Development, and Multinational Enterprise», en Ch. (de) PEARSON (1987), *Multinational Corporations, Environment, and the Third World*, Duke University Press.

Cuadro 25.1

MODALIDADES DE TRANSACCIONES INTERNACIONALES
(Miles de millones de dólares)

	Total	*Estados Unidos*	*Japón*	*Alemania*
Inversión extranj. directa *stock* (a)	2.500	712	298	248
Ventas de las filiales de ETN (b)	5.355	1.636	626	532
Exportaciones intrafirma (c)	1.646	163	86	208
Exportaciones totales (d)	4.940	448	374	623
b/(d-c)	1,6	5,7	2,2	1,3
c/d	0,33	0,36	0,23	0,33

Nota: Las cifras del *stock* de IED se refieren a 1995 mientras que el resto son de 1992.
Fuente: Bank for International Settlements.

otra tercera parte del comercio mundial es desempeñado por los intercambios entre las ETN y otras empresas no filiales, lo cual deja tan sólo un tercio para el comercio entre empresas nacionales distintas de las ETN[31]. Lo anterior es una muestra palpable de un cambio cualitativo que opera progresiva y paralelamente a este proceso de mundialización económica: la proporción en que se ha modificado el planteamiento tradicional basado en un comercio *inter-nacional* (que nunca fue tal porque eran las empresas las que comerciaban aunque, eso sí, bajo el paraguas del propio país) y el auge de un comercio *transnacional* que se despliega a través de un mercado mundial y que carece de referentes estatales o regionales. Ligado a ese proceso transnacional –y alimentándose de él–, surgen los procesos de segmentación progresiva de las fases de creación de valor añadido en el proceso productivo (partición de la cadena del valor), que viene acompañado de la deslocalización de ciertos subprocesos que son trasladados desde unos territorios ya implantados hacia aquellos otros que presentan mejores condiciones, generalmente en términos de bajos costes de producción. Este hecho se encuentra directamente relacionado con el rápido incremento del llamado «comercio de perfeccionamiento» en países no pertenecientes a la OCDE, que implica la utilización creciente de componentes y materiales importados de zonas especializadas en la fase de transformación y su posterior elaboración para la reexportación[32]. En una línea estrictamente cuanti-

[31] OMC (1996), *Informe anual, 1996*, Ginebra.

[32] Por ejemplo, en México, las exportaciones de las «maquiladoras» suponen el 40% de las exportaciones del país. En China, el 45% de las importaciones son posteriormente reexportadas tras una ligera transformación y montaje, lo que a su vez constituye el 50% de las exportaciones de este país. *Vid.* Secretaría General Técnica (1995), «El comercio mundial en 1995», *BICE*, n.º 2498, p. 3.

tativa de explicación del crecimiento comercial, destaca la progresiva aparición de lo que se han denominado economías «supercomerciales», caracterizadas por tasas de exportaciones (medidas como valor bruto de las ventas) sobre el PIB que superan a veces al 100%[33]. El último factor, directamente interrelacionado con el resto, es el crecimiento experimentado en la exportación de productos manufacturados por aquellas economías con bajos costes salariales, en las cuales al tradicional «*dumping* social» se une, las más de las veces, un no menos importante «dumping» ecológico. Como colofón, este crecimiento de los intercambios comerciales, lejos de llevarse a cabo en ausencia de estímulos y marcos propicios, se ha visto apuntalado por avances tecnológicos, que han simplificado y acelerado las transacciones, y por *factores político-institucionales,* que, vía fomento de la liberalización y abolición de las restricciones al comercio, han diseñado un marco de relaciones internacionales favorable[34].

25.4. Flujos físicos y valoración monetaria del comercio mundial: el desequilibrio «Norte-Sur». Análisis por grupos de productos y grupos de países

Cuando se habla de globalización o mundialización de la economía existe, en general, la pretensión de destacar las luces y los beneficios derivados del proceso de «integración» de las economías en el mercado global, en vez de apuntar las razonables sombras e incertidumbres que se vislumbran al realizar un análisis pormenorizado. No sería justo, por otro lado, obviar los esfuerzos realizados desde algunas corrientes «alternativas» del pensamiento económico, por desentrañar los mecanismos de explotación ejercidos por unos países sobre otros, muchas veces escondidos tras el velo «aséptico» de las relaciones económicas internacionales. Un esfuerzo éste que pone el acento en aquellos aspectos social-distributivos –escasamente tratados por la economía convencional– y que apuntan a las crecientes desigualdades generadas por la dinámica del orden económico internacional[35]. No obstante, poco se dice acerca de la naturaleza física de las mercancías comerciadas y de sus consecuencias ecológicas, lo que resulta clave

[33] En 1990, seis economías superaban la tasa del 50%; Singapur (174%), Hong Kong (144%), Malasia (78%), Bélgica (70%), Irlanda (64%) y Holanda (52%). WORLD BANK (1994), *World Development Report,* Nueva York, Oxford University Press.

[34] A este respecto puede consultarse: DÍAZ-MIER, M. A. (1995), *Del GATT a la Organización Mundial del Comercio,* Madrid, Síntesis.

[35] Desde la aportación pionera de ENMANUEL, A. (1971), *El intercambio desigual,* Madrid, Siglo XXI, a las contribuciones de Samir Amin, con sus tesis sobre la «desconexión». Más recientemente, puede consultarse con provecho: BARRATT-BROWN, M. (1993), *Fair Trade. Reform and Realities in the International Trading System,* Londres, Zed Books.

a la hora de explicar estas desigualdades así, como la actual división internacional del trabajo que conllevan. Es precisamente en este punto donde la aportación que presentamos adquiere pleno significado.

Si, ya metidos en arena, alguien pretende estudiar en tonelaje los intercambios comerciales a nivel internacional con un cierto nivel de detalle, se encontrará con la paradoja de que las estadísticas disponibles para su trabajo ofrecen, en la actualidad, menos información relevante de la que presentaban hace escasamente una década. En coherencia con la escisión apuntada entre el medio ambiente físico y el ámbito de lo económico, asistimos a la desaparición progresiva de los datos que puedan indicarnos la presión que, en este caso, el comercio mundial ejerce sobre los recursos del planeta. Aparentemente, sólo contamos con cifras monetarias para una realidad que, como ya hemos mencionado, esconde una vertiente física insoslayable. A pesar de ello, los resultados que aquí presentamos intentan llenar, de algún modo, esta laguna teórica y empírica. La Nota Metodológica que figura al final de este capítulo detalla las fuentes y el procedimiento de cálculo utilizado en las estimaciones del comercio internacional en tonelaje que a continuación se presentan.

Desde esta perspectiva, un análisis físico-económico del comercio internacional para los últimos quince años muestra algunos aspectos de interés a menudo escamoteados a la simple interpretación monetaria de esta realidad. Del mismo modo que para los procesos productivos se observaba una asimetría entre los costes físicos de producción en las distintas fases de los procesos y la valoración monetaria que en éstos se realizaba[36] (dando, dicho sea de paso, una señal o criterio de gestión de los recursos naturales, de su coste verdadero, y de las escasez de los mismos, profundamente equivocado), así también se puede analizar lo ocurrido a nivel internacional, a partir de las cifras en *tonelaje* y en valores monetarios que ofrecen los flujos comerciales. En el cuadro adjunto ofrecemos los datos sobre la importancia relativa del elemento monetario y físico en el comercio internacional (ver cuadro 25.2).

El «cuadro» ofrece, sin duda, un aspecto muy diferente dependiendo de la perspectiva desde la que nos enfrentemos a él. A continuación, sistematizaremos las conclusiones que se pueden extraer de estos datos en dos grandes apartados. La razón es también doble. De un lado, constatar la asimetría a nivel internacional entre los flujos físicos y la valoración monetaria de los intercambios comerciales por grupos de mercancías. Por otro, estrechar la conexión existente entre este desequilibrio, profundización de las desigualdades entre países a nivel internacional y su opción de especia-

[36] *Vid.* capítulo 15 del presente volumen. Recuérdese que, según el «efecto notario», aquellas fases de los procesos productivos que eran más intensivas en el consumo de recursos –medido éste en unidades físicas– eran las menos valoradas desde el punto de vista monetario y viceversa.

Cuadro 25.2

COMPARACIÓN EN VALOR Y EN TONELAJE DE LOS FLUJOS COMERCIALES, 1981-1995
(%)

	1981		*1985*		*1990*		*1995*	
	tm	*Valor*	*tm*	*Valor*	*tm*	*Valor*	*tm**	*Valor*
Prod. agro.	15,33	32,90	14,72	15,31	21,86	13,2	20,95	12,23
Combustible	53,33	9,84	51,63	18,28	44,11	12,3	42,70	7,38
Ind. extractiva	18,03	4,20	19,1	4,39	15,6	3,1	16,21	3,45
Manufacturas	13,4	53,06	14,55	62,02	18,43	70,8	20,14	76,94
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100

* Estimación en base a las tasas de crecimiento anual del volumen por grupo de mercancías.
Fuente: Elaboración propia en base a datos de: ONU, *International Trade Statistics Yearbook,* Varios años; GATT y OMC, *El Comercio Internacional,* Varios años.

lización productiva (al margen de ciertos casos particulares fácilmente explicables)[37] (ver gráficos 25.2 y 25.3).

25.4.1. Análisis por grupos de productos

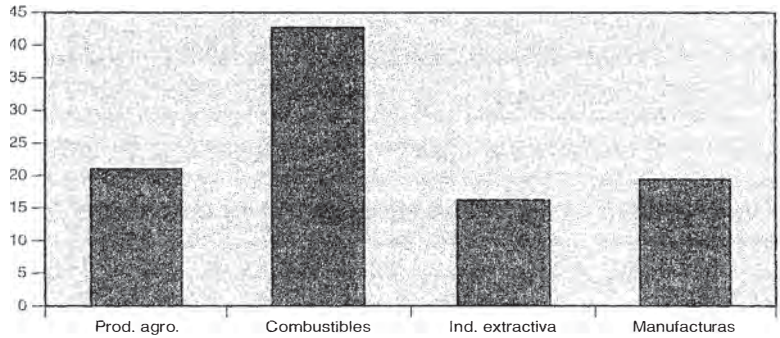
Sin demasiada dificultad, dos hechos sobresalen a una mirada atenta a los datos:

1.º Aquellas mercancías objeto de comercio que forman parte de las primeras fases de elaboración (productos agropecuarios y sobre todo los combustibles e industrias extractivas) y que, por tanto, ejercen una presión directa sobre los recursos proporcionados por la corteza terrestre, es decir, tienen un mayor coste físico de extracción y de reposición, son precisamente las que *en tonelaje poseen la mayor importancia en el comercio mundial.* Por contra, son estos mismos grupos de productos los que obtienen como compensación *la menor valoración monetaria* y, por tanto, desde el punto de vista pecuniario, los menos relevantes. Aunque, en términos rela-

[37] Nos referimos a los famosos «dragones»asiáticos. Aparte de constituirse en región privilegiada por parte de la política exterior y tecnológica estadounidense en la época de la guerra fría, y de basar su proceso de expansión y crecimiento económico en el fuerte peso del Estado, la orientación exportadora y el ahorro interno para financiar las inversiones (todo ello con un coste social nada despreciable), es fácil ver que su proceso industrializador ha sido especialmente intensivo en energía y materiales para alimentar sus industrias transformadoras. Como indicador de esa intensidad energética, baste recordar que, en 1995, dicha región fue la tercera receptora de importaciones de petróleo en todo el mundo con casi 200 millones de toneladas. *Vid. BP StatisticalReview of World Energy, 1996.*

Gráfico 25.2

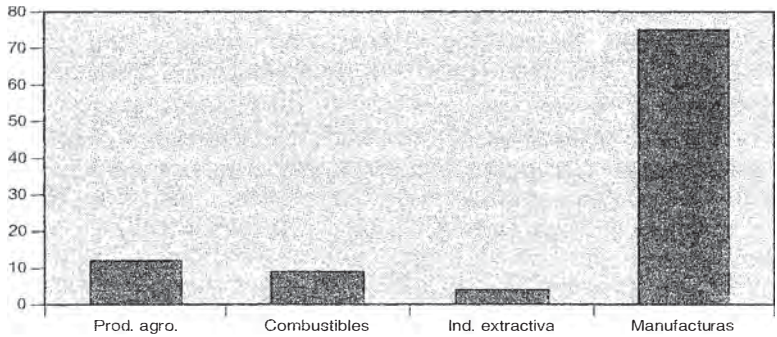
ESTRUCTURA DEL COMERCIO EN TONELAJE, 1995
(Porcentaje)



Fuente: *Ibid.*

Gráfico 25.3

ESTRUCTURA DEL COMERCIO EN VALOR, 1995



Fuente: *Ibid.*

tivos, el peso conjunto de las industrias extractivas y de los combustibles ha pasado de significar el 71,36% en 1981 –con una valoración equivalente del 14%– , a representar el 52,49% en tonelaje –con una valoración del 10,84%–, eso no significa que las cantidades *absolutas* intercambiadas hayan descendido. Éstas, en contra de lo que se pudiera pensar, se han incrementado en un 75%, pasando de los tres mil millones de toneladas en 1981 a los casi cinco mil quinientos millones en 1995.

Cuadro 25.3

EVOLUCIÓN DE LAS EXPORTACIONES MUNDIALES EN TONELAJE, 1981-1995
(Miles tm)

	1981	*1985*	*1990*	*1995**
Prod. agríc.	479.052	427.845	939.737	1.148.670
Combustibles	1.666.025	1.499.580	1.895.868	2.341.215
Ind. extractivas	563.304	555.082	650.962	887.563
Manufacturas	415.605	556.519	811.355	1.104.207
TOTAL	3.123.986	3.039.026	4.297.922	5.481.655

* Estimación en base a las tasas de crecimiento anual del volumen por grupo de mercancías.
Fuente: Elaboración propia en base a datos de ONU, *International Trade Statistics Yearbook*, Varios años; GATT y OMC, *El Comercio Internacional*, Varios años.

2.º A diferencia del comportamiento aludido antes, en el caso de las manufacturas se observa justamente la tendencia contraria. Con apenas el 10% del tonelaje total de las exportaciones mundiales, en 1981 acaparaban *más de la mitad* del valor monetario, alcanzando más de las tres cuartas partes en 1995, para unas cantidades que llegaban escasamente a la quinta parte del total.

Tradicionalmente, los análisis sobre el patrón del comercio han dado mayor relevancia a las manufacturas en la composición de los flujos comerciales por tener el mayor peso desde el punto de vista monetario. No obstante, si lo que nos interesa es ver la composición *real* en términos de flujos de materiales intercambiados, parece más razonable elegir como explicación de la importancia relativa aquellas mercancías que acaparan mayor tonelaje, cambiando significativamente el panorama a representar.

A la vista de los datos, no puede mantenerse con rigor que la asignación de recursos en estos casos haya respondido a criterios de eficiencia y valoración fijados por la escasez, pues en el grupo concreto y más llamativo de los combustibles y productos derivados de las industrias extractivas –dada su naturaleza fundamentalmente *no renovable*–, su escasez aumenta proporcionalmente a su utilización, lo que en pura lógica debería de aumentar su valoración. Si se postulan los precios como un mecanismo de asignación eficiente de los recursos y como señal o incentivo a la sustitución y la innovación tecnológica, henos aquí ante un ejemplo de la ineficacia de este instrumento. El siguiente cuadro avala la anterior afirmación.

Cuadro 25.4

EVOLUCIÓN DEL VALOR UNITARIO DE LAS EXPORTACIONES MUNDIALES, 1981-1995
($/tm)

	1981	*1985*	*1990*	*1995*
Prod. agro.	1.270	603	547	504
Ind. extract.	138	133	223	
Combustibles	109	205	173	158*
Manufacturas	2.360	1.880	3.149	3.296
Val. Uni. total	**519**	**421**	**822**	**863**

* Incluidas las industrias extractivas.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de ONU, *International Trade Statistics Yearbook,* Varios años; GATT y OMC, *El Comercio Internacional,* Varios años.

Los datos en porcentajes del valor de las exportaciones del cuadro 25.2 se explican en parte por la evolución del valor unitario medio por grupos de productos (cuadro 25.4). Aquí también se observa la escisión entre, por un lado, la tendencia *decreciente* presentada por los productos agropecuarios y las industrias extractivas y, de otro, el comportamiento o tendencia *ascendente* de las manufacturas.

25.4.2. Análisis por grupos de países: el desequilibrio Norte-Sur

La explicación de los gráficos anteriores alude, en lo fundamental, a la profundización, bajo nuevas formas, de la ya clásica división internacional del trabajo, a saber: los países pobres de la periferia siguen, básicamente, especializados en la producción y exportación de productos primarios, ya sean agropecuarios o procedentes de las industrias extractivas, mientras que los países ricos se ocupan de centrar su actividad comercial en aquel grupo de mercancías que genera comparativamente mayor valor añadido, es decir, las manufacturas. La consecuencia es un reforzamiento general de los rasgos de dependencia económica que basculan sobre la problemática característica del comercio de los productos básicos en los mercados internacionales: la inestabilidad de los precios, la tendencia decreciente de la relación real de intercambio respecto de los productos manufacturados y la incidencia de las empresas transnacionales en las fases de comercialización y financiación. Hasta aquí nada que no haya sido puesto ya de manifiesto por la mayoría de los teóricos del subdesarrollo. A efectos del presente trabajo, nos interesa destacar la siguiente

circunstancia: a la dominación económica que implica el escaso valor añadido proporcionado por las mercancías exportadas desde los países empobrecidos en relación con la alta valoración monetaria que se le procura a los productos exportados desde el «centro», se añade el hecho del deterioro y expoliación de recursos naturales en términos físicos y ecológicos. Así, se da la paradoja de que los países empobrecidos no sólo están únicamente especializados en la exportación de aquellos productos que generan menor valor añadido monetario, sino que son precisamente estas mercancías las que, por el contrario, suponen mayor coste físico de reposición y por ende más energía y materiales (recursos naturales). Si a las cifras convencionales en términos monetarios sobre el origen y el destino de las exportaciones e importaciones mundiales por grupos de países, les añadimos los flujos físicos en tonelaje a los que esas cifras monetarias corresponden, la representación que obtendremos resultará mas clarificadora de lo que tratamos de decir.

Cuadro 25.5

FLUJOS COMERCIALES NETOS DE LOS PAÍSES DESARROLLADOS EN TÉRMINOS FÍSICOS, 1981 Y 1990

	Valor (Miles millones $)			*Tonelaje (Miles de tm)*		
	Exportación	*Importación*	*Neto*	*Exportación*	*Importación*	*Neto*
Prod. agro.						
1981	40,9	43,4	–2,5	64.305	59.876	4.239
1990	50,6	72,1	–21,5	71.457	114.219	–42.762
Ind. extract.						
1981	5,4	15,7	–10,3	18.592	184.842	–166.249
1990	11,3	23,4	–12,1	25.863	208.110	–182.247
Combustibles						
1981	7,4	24,5	–233,1	33.633	868.793	–835.159
1990	10,9	151,0	–140,1	47.951	995.250	–947.298
Manufacturas						
1981	248,4	63,5	184,9	64.048	19.447	44.600
1990	353,8	155,8	198	71.218	35.312	35.906
Saldo total						
1981	302,1	363,1	–61	180.568	1.132.958	–952.569
1990	426,6	402,3	24,3	216.490	1.352.891	–1.136.401

Fuente: Elaboración propia en base a *op. cit.* en cuadro 25.4. La serie de datos en tonelaje desaparece a partir de 1990, por lo que no se ha podido actualizar el cuadro.

Cuadro 25.6

VALOR UNITARIO POR GRUPOS DE PRODUCTOS, 1981 Y 1990
($/tm)

	Exportaciones de países desarrollados (1981)	*Importaciones de países desarrollados (1981)*	*Exportaciones de países desarrollados (1981)*	*Importaciones de países desarrollados (1981)*
Productos agrope.	879,4	725,5	708,1	631,2
Industrias extractivas	365,7	98,9	436,9	112,4
Combustibles	245,2	309,2	227,3	151,7
Manufacturas	4.475,5	4.124,0	4.967,8	4.412,0
Valor unitario medio total	**1.673,0**	**369,91**	**1.970,5**	**297,3**

Fuente: *Ibid.* cuadros anteriores.

En el cuadro 25.5 se han representado los flujos en tonelaje agregados para los diferentes flujos de productos. Este cuadro muestra, a nuestro juicio, y de modo muy gráfico, el actual deterioro y dominación ecológica a que se ve sometido el Tercer Mundo a través del mecanismo del comercio internacional. Como se puede observar, a los países industrializados no les es suficiente, para mantener su modelo de producción y consumo actual, con la utilización de los recursos procedentes de la corteza terrestre que están bajo su jurisdicción, sino que necesitan importar ingentes toneladas de energía y materiales de los países empobrecidos. He aquí el reverso del argumento relativo a las «ganancias derivadas del comercio» manejado con frecuencia por la teoría del comercio internacional. Resulta difícil, a la vista de los datos, seguir manteniendo que, ante este drenaje de recursos físicos sujetos a degradación irreversible en los procesos productivos, el resultado final arroje beneficios económicos en forma de aumento de las posibilidades de consumo y producción para aquellos territorios que se ven obligados a deshacerse de estos recursos. Siendo rigurosos hay que decir que el comercio internacional, desde el punto de vista ecológico, se presenta como un juego de suma cero *con tendencia negativa*[38]. Las pérdi-

[38] Esta afirmación requiere de alguna aclaración. Desde el momento en que la mayoría de los recursos implicados en el comercio de industrias extractivas son *no renovables,* es lógico que el comercio detraiga de una parte lo que proporciona a la otra. Es en este sentido en el que el comercio internacional supone un juego de suma cero. Ahora bien, la acción de la ley de la entropía sobre la energía y los materiales intercambiables y su consiguiente cambio de estado (de disponibles a no disponibles) hace que en términos físicos el comercio acabe en un juego de suma negativa.

das, en este caso, pueden muy bien materializarse a través de esos *mil millones de toneladas de entrada neta de materiales* que van a parar a los países desarrollados procedentes del resto del mundo. El grueso de este flujo lo constituyen los combustibles, cuyo volumen ascendía al 87% del total de las entradas netas en 1981, manteniéndose en niveles similares en 1990. El segundo lugar en importancia recae sobre las importaciones netas procedentes de las industrias extractivas, cerrándose de esta manera un ciclo comercial que presiona sobre los recursos procedentes de la corteza terrestre de la mayoría de los países pobres en beneficio de los países industriales.

Conviene recordar que el mecanismo de la balanza lleva implícito la consecución del equilibrio. La cuestión ahora es dilucidar cómo el Norte –los países industrializados– consigue nivelar una relación tan deficitaria en términos físicos. Como ya se ha puesto de manifiesto en el capítulo 15, el juego económico acostumbra a hacer que la revalorización monetaria supere las pérdidas físicas observadas en los procesos, operándose el grueso de esta revalorización en el grupo manufacturas. En este caso, van a ser las manufacturas las que desempeñen ese papel equilibrador a nivel internacional, generando, a pesar de su menor tonelaje, un mayor valor unitario. El único grupo de mercancías con el que los países desarrollados equilibran al menos en parte, *en lo monetario*, ese déficit físico será, pues, el de las manufacturas. Es cierto que en 1981 la balanza comercial de los productos agropecuarios era levemente excedentaria para los países industriales, tendencia ésta que cambiará a lo largo de la década de los ochenta, quedándose así las manufacturas como único asidero por donde paliar, a través de su mayor valor unitario, el déficit de energía y materiales. Acentuando la evolución de la tendencia monetaria apuntada, se observa la existencia de un comportamiento discriminante en los valores unitarios pagados, respecto de los recibidos respectivamente por los flujos comerciales con origen y destino en los países ricos. En efecto, la remuneración unitaria por grupos de productos es siempre favorable (salvo en el caso de los combustibles en 1981, fácilmente explicable al calor de la subida del petróleo de 1979) a los países desarrollados respecto del valor unitario pagado por las importaciones para los mismos grupos de productos. En promedio, el valor unitario por tonelada exportada recibido por los países desarrollados con destino al resto del mundo fue cinco veces mayor que el equivalente pagado por las importaciones con destino a los mismos países industriales. Este hecho se agrava una década más tarde cuando la proporción aumenta a seis en 1990, que corre paralela a una pérdida en el valor unitario de las exportaciones de los países pobres. Fruto de esta asimetría, en 1990, persistiendo un déficit comercial aún mayor que en 1981 en términos físicos, éste se salda en el ámbito de lo monetario con un superávit comercial neto para los países industriales que esconde la ascendente

entrada de energía y materiales del resto del mundo. Cabe advertir que estamos razonando sólo para los 230 grupos de mercancías considerados en nuestra estimación (ver Anexo Metodológico), por lo que este saldo monetario difiere del de la balanza comercial en su conjunto, que se mantuvo deficitaria en ese año para los países ricos, según la estadística de balanza de pagos de Naciones Unidas, como se verá en el capítulo 26.

Lo apuntado hasta el momento resulta coherente con otros desarrollos que han incidido hasta la fecha en el objetivo de cuantificar los desequilibrios territoriales a que lleva el actual modo de producción y consumo. Si ahondando en el punto de vista ecológico, interpretamos la capacidad de carga de un territorio variando el tono convencional –desde el lado de la población hacia el extremo del consumo de recursos– no resulta difícil llegar a la conclusión de que los países industrializados han sobrepasado su capacidad de carga (o límite de consumo que marcan las posibilidades de obtención de recursos y emisión de residuos en el propio territorio) y utilizan el comercio internacional para *importar* capacidad de carga excedente de otros territorios. Esta idea supone la plasmación internacional de un concepto utilizado para medir la sustentabilidad territorial de determinadas ciudades en la búsqueda de hacerlas más sostenibles. El resultado de la interpretación económica de la capacidad de carga ha estado también en el origen de la definición del concepto de «huella ecológica» *(ecological footprint)* como un indicador del territorio en el que un país ha excedido su capacidad de carga utilizando otros que le sirven como fuente de recursos y sumidero de residuos[39].

25.5. Comercio y desmaterialización

Una consecuencia interesante que se puede obtener siguiendo por el mismo camino es ver hasta qué punto el mecanismo comercial actúa contra la corriente de la polémica «desmaterialización» de la economía. Desde hace unos años se ha venido hablando, al calor de la potenciación de las sociedades «terciarizadas», de economías postindustriales o en proceso de desmaterialización. Con este concepto se quería llamar la atención sobre dos aspectos. Por un lado, la creciente importancia de los servicios en relación al PNB y, por otro, la tendencia decreciente en la utilización de energía y materiales por unidad de PNB[40]. Este debate ya ha sido objeto de tra-

[39] REES, W. y M. WACKERNAGEL (1996), Our Ecological Footprint. Reducing Human Impact on the Earth, Gabriola Island, BC, New Society Publishers.

[40] Esta propuesta y la controversia suscitada a su alrededor han sido el caldo de cultivo fundamental de lo que se ha llamado ecología industrial. Una aproximación a los resultados de esta propuesta teórica puede econtrarse en: AYRES, R. U. y L. W. AYRES (1996), *Industrial Ecology,* RU, Edward Elgar Publish. Para una síntesis crítica sobre el alcance y los aspectos ocultos de la misma: BUNKER,

tamiento en otros capítulos del presente volumen, por lo que no lo desarrollaremos aquí. Baste decir que nos limitaremos a apuntar cómo el comercio, lejos de colaborar en la propugnada tendencia hacia la desmaterialización, facilita el abastecimiento creciente de energía y materiales que observan los países ricos, con cargo a los recursos del resto del planeta, con la consiguiente presión por devolverlos en forma de residuos.

Las tendencias apuntadas van en consonancia con la idea de que el crecimiento económico experimentado por los países desarrollados en las últimas décadas, lejos de apoyarse en factores endógenos, se ha basado en una intensiva utilización de los recursos proporcionados por la corteza terrestre, *procedentes, en gran medida, de otros territorios*, más que en avances en la desmaterialización de los modos de producción y consumo nacionales. En cualquier caso, y a pesar de que hubiera descendido el uso de energía y materiales por unidad de PNB, no hay que olvidar que lo «ecológicamente significativo es el volumen material absoluto de materias primas consumidas y no el volumen en relación al PNB»[41]. Así, el tonelaje que mueve el comercio internacional se ha doblado casi durante el período de estudio, pasando de algo más de tres mil millones de toneladas en 1981 a alrededor de las cinco mil quinientos millones en 1995. En términos relativos, y si se tiene en cuenta que la producción mundial moviliza anualmente más de cuarenta mil millones de toneladas, podemos deducir que el comercio internacional representa, aproximadamente, algo más del 10% del movimiento total de mercancías.

NOTA METODOLÓGICA

La elaboración de los cuadros 25.1-25.6 se ha realizado a partir de la agregación de los datos en toneladas proporcionados por ONU, *International Trade Statistics Yearbook*, Nueva York, Varios años (hasta 1990 para las cifras en tonelaje). En teoría, los datos de importaciones y exportaciones totales para el mundo, en toneladas, deben necesariamente coincidir, por lo que en aquellos casos en que no ha sido así, se ha elegido la cifra mayor por entender que contiene a la menor. El cuadro 25.4 ha requerido la elaboración de una matriz entre los países desarrollados y el resto del mundo, de tal modo que nos dieran los resultados netos con origen y destino en estos países, con el fin de obtener una cifra de entrada neta de materiales. Dentro de los países desarrollados se han considerado lo que el FMI y, en general, las estadísticas oficiales denominan Países Industriales,

S. (1996), «Materias primas y la economía global: olvidos y distorsiones de la ecología industrial», *Ecología Política*, n.º 13, pp. 81-89.

[41] BUNKER, S (1996), «Materias primas y la economía global...», *op. cit.*, p. 81.

a saber: Alemania, Australia, Austria, Bélgica-Luxemburgo, Canadá, Dinamarca, España, Estados Unidos, Finlandia, Francia, Grecia, Holanda, Irlanda, Islandia, Italia, Japón, Noruega, Nueva Zelanda, Portugal, Reino Unido, Suecia y Suiza. Para cada uno de ellos y para cada mercancía se ha realizado el cálculo del flujo de exportaciones a los países no industriales y el flujo de importaciones procedentes de los mismos, evitando en todo momento los flujos intrarregionales. El cálculo se ha realizado para cada una de las 230 mercancías contenidas en la STCI (revisión 2) distribuyéndose del siguiente modo:

a) Productos agropecuarios: 64 mercancías.

b) Industrias extractivas: 10 minerales y metales ferrosos más 8 metales no ferrosos.

c) Combustibles: 6 productos.

d) Manufacturas: 142 productos.

Capítulo 26
RIQUEZA REAL Y RIQUEZA FINANCIERA: EL PAPEL DE LOS FLUJOS FINANCIEROS EN LA GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LA CAPACIDAD DE COMPRA SOBRE EL MUNDO

Óscar Carpintero, Sara Echeverría y José Manuel Naredo

26.1. Introducción

En el capítulo anterior hemos visto que el grupo de países ricos o *desarrollados* se abastecía del resto del mundo mediante una entrada neta de materiales que se cifraba en 1990 en más de mil millones de toneladas. Entrada que estaba compuesta por combustibles fósiles (casi mil millones de toneladas), por otros derivados de actividades extractivas (casi doscientos millones de toneladas) y más escasamente por productos agroforestales y pesqueros. Siendo este conjunto de países sólo exportador neto de productos manufacturados, por un tonelaje muy inferior (menos de cuarenta millones de toneladas) al de los productos primarios importados. Llama la atención que no exista un seguimiento estadístico serio de estas cuestiones tan elementales y que, a la vez que se emiten toneladas y toneladas de literatura sobre la «sostenibilidad», se cierren los ojos del análisis hacia estas cuestiones, salvo honrosas excepciones, como a las que hicimos referencia a lo largo de este trabajo. No obstante, según nuestras estimaciones, la importación neta de combustibles fósiles por este grupo de países siguió aumentando durante la presente década de los noventa, superando en 1995 los mil millones de toneladas, al igual que la derivada de otras actividades extractivas, que superó los doscientos millones de toneladas. Podemos afirmar, así, que la importación neta de materiales del resto del mundo ha seguido manteniendo en esta década la tendencia al crecimiento que venía observando con anterioridad, sin que por el momento se adviertan atisbos de «desmaterialización» en el comportamiento agregado de los países ricos.

Esta enorme entrada neta de recursos tarde o temprano acaba convirtiéndose en residuos que rara vez son objeto de recuperación o reciclaje,

haciendo que la acumulación de residuos sea el primer problema de «política ambiental» en estos países: no preocupa tanto la causa (el manejo tan masivo de recursos traídos de todo el mundo y el daño que causa en los países de origen), sino sus efectos (los residuos y el deterioro que ocasionan en los países receptores). Bajo la divisa NIMBY (*«not in my backyard»:* no en mi patio), se trata de alejar la incidencia negativa de los residuos de sus propios territorios, existiendo una presión creciente para devolverlos al resto del mundo. En el caso de la quema de combustibles, son los vientos los que se ocupan de redistribuirlos por la atmósfera planetaria. Y en el de los vertidos líquidos, son los cauces de agua los que acaban llevándolos al sumidero común de los mares. Así, las discusiones se centran más bien en los residuos sólidos y muy particularmente en los considerados tóxicos o peligrosos. Parece lamentable que no exista un control estadístico serio de la emisión y transporte de estos residuos a escala planetaria (*Greenpeace* promovió un inventario obligadamente incompleto de los mismos[42], sumándose después otros intentos igualmente parciales o incompletos por parte de algunos organismos internacionales): la política NIMBY prima entre los principales países emisores, sobre los que recayó, con escasas excepciones, el calificativo de «los siete siniestros» que esta organización ecologista aplicó a los siete países que se opusieron en la convención de Basilea, en 1989, a prohibir la exportación de residuos. Esta polémica sobre la libre exportación de residuos volvió a aflorar en diversas ocasiones, incluida la cumbre de Río de Janeiro, en 1992, originando peticiones de cese de este tipo de actividades. No obstante, lo reiterado de estas discusiones y demandas denota que prohibir que los países ricos exporten residuos al resto del Planeta, resulta incoherente con la lógica dominante: una vez que el comercio ha puesto los recursos planetarios a disposición de los países ricos, se pide ahora que la «política ambiental» establezca las reglas del juego económico necesarias para que el comercio pueda poner también a su disposición los sumideros planetarios.

La creciente presión de los países ricos para desembarazarse por vías baratas y efectivas de los residuos que generan ha llevado a considerar la posibilidad de enviarlos a las grandes profundidades de los mares, como la solución ecológica y socialmente menos problemática: los grandes fondos marinos pueden constituir así el basurero ideal de acuerdo con la lógica dominante de no exigir a los agentes económicos que se responsabilicen de reciclar, o al menos de «neutralizar», *in situ,* los residuos que originan. Como apunta Ramón Margalef[43], resulta altamente previsible que la polí-

[42] Greenpeace (1991), *The International Trade in Wastes. A Greenpeace Inventory,* Washington.

[43] MARGALEF, R. (1998), «En busca de un marco conceptual en el que situar las realidades y perspectivas que aquejan a nuestra sociedad actual», en *Economía, ecología y sostenibilidad en la sociedad actual,* Naredo, J. M. dir., Universidad de Verano de Castilla y León, Segovia, 27-31 de julio de 1998.

tica ambiental acabe regulando la utilización de estas zonas como sumidero común, para garantizar legalmente, mediante el pago de ciertas tasas, el derecho a contaminar de los países ricos.

Pero, ¿cuáles son los mecanismos económicos que otorgan a ciertos países, o más concretamente a los «agentes económicos» domiciliados en ellos, suficiente capacidad de compra para adquirir no sólo los recursos, sino también para utilizar los sumideros planetarios? En el capítulo anterior hemos visto cómo los criterios actuales de valoración, regidos por la Regla del Notario (*vid.* capítulo 23), tienden a equilibrar en términos monetarios el desequilibrio que globalmente plantea el comercio en términos físicos. Pero a la propia incidencia de la valoración monetaria regida por la Regla del Notario se superpone el juego de los flujos financieros. Aunque el tratamiento a fondo de las cuestiones financieras escapa al propósito de este libro, no podemos rematar nuestro análisis sin referirnos a ellas, aunque sólo sea sumariamente, ya que contribuyen poderosamente a ampliar y concentrar ese poder de compra sobre el mundo y, por ende, a acelerar las tendencias que apuntan hacia la polarización social y el deterioro ambiental.

26.2. El papel de los flujos de capital en el equilibrio de las balanzas de pagos de los países

La balanza de pagos es un documento contable que informa sobre los ingresos y pagos de los países con el exterior, con sus posibles desfases y el modo en el que se saldan en el campo de lo financiero. El análisis de la evolución de las balanzas de pagos de los países a escala planetaria plantea dos tipos de problemas. Uno derivado de la mala calidad de la información, que aflora en forma de discrepancias estadísticas a la hora de agregar los datos a escala mundial. Las balanzas de pagos recogidas por el Fondo Monetario Internacional (FMI) en su *Balance of Payments Statistics YearBook* de 1996 «revelan, según esta entidad, discrepancias apreciables en las sumas globales de las cuentas de transacciones corrientes, de capital y financieras. En principio las cuentas mundiales de operaciones corrientes, de capital y financieras deberían de sumar cero, pero ello no ocurre así de hecho, porque las prácticas de registro de los países difieren en cobertura, criterios de valoración, clasificación, periodificación, etc. Para la transacción mundial de bienes, donde las cifras registradas de

Sobre las ventajas e inconvenientes del uso como sumidero de las grandes profundidades marinas, véase (1998), *Journal of Marine Systems*, n.º 20, sobre el tema monográfico «Abyssal Seafloor Waste Isolation: A Technical, Economic, and Environmental Assessment of Waste Management Option», 210 pp. (refs. en Margalef, *ibid.*).

exportaciones exceden a las de importaciones, la discrepancia se ha ampliado sustancialmente en los últimos años, aumentando desde sólo 16 mil millones de dólares en 1990 hasta 115 en 1995[...y] entre los componentes habituales de la cuenta financiera, los datos muestran crecientes discrepancias, sobre todo para las inversiones en cartera, donde las entradas registradas (pasivos) exceden de las salidas (activos) en casi 150 mil millones de dólares»[44]. El otro problema viene dado por la ruptura en las series que originó la adopción de la nueva metodología para elaborar la balanza de pagos introducida por el FMI en 1992, para adecuar sus clasificaciones a los enfoques del Sistema de Cuentas Nacionales internacionalmente acordado en el marco de Naciones Unidas, que vio la luz en 1993 (SCN 93).

Así, cuando en este trabajo hemos tratado de comparar la evolución del agregado de las balanzas de pagos de los países ricos con el del resto del mundo, al que por exclusión hemos denominado a veces países pobres, nos hemos encontrado con que los saldos de un grupo, no sólo rara vez se veían compensados como debieran por los del otro, sino que en ocasiones eran del mismo signo, agravando una discrepancia estadística global cuya corrección y redistribución entre los países no podíamos abordar. Tal cosa ocurrió en algunos años para la balanza corriente, para la de operaciones financieras o para el propio comercio exterior de mercancías. Así, hemos estimado preferible centrar el análisis en ver cómo saldan sus balanzas de pagos los países ricos, cuyos datos estimamos más fiables, ateniéndonos para ello a la evolución de las grandes cifras y tendencias, para cuyo seguimiento consideramos que los datos disponibles son sobradamente representativos. El cuadro 26.1 refleja la evolución de los saldos de las principales partidas de las balanzas de pagos de los países ricos, que darán pie a los comentarios que siguen.

26.2.1. El comercio de mercancías

Las balanzas comerciales del colectivo de países ricos acusaron saldos sistemáticamente deficitarios durante toda la década de los ochenta, denotando que la Regla del Notario no llegó a trastocar en términos monetarios la imagen tan deficitaria que, como hemos visto, ofrecía en términos físicos este grupo de países con respecto al resto del mundo. No obstante, hay que matizar que este grupo de países alberga resultados muy diferentes en el equilibrio monetario del comercio de mercancías. Por una parte, destacan los resultados sistemática y crecientemente deficitarios de Estados Unidos

[44] IMF (1997), Committee on Balance of Payments Statistics, *Annual Report 1996*, IMF, Statistics Department.

Cuadro 26.1

EVOLUCIÓN DE LOS SALDOS DE LAS BALANZAS DE PAGOS DE LOS PAÍSES RICOS
(Miles de millones de dólares)

	1980	*1985*	*1990*	*1995*
(1) Mercancías	–47,8	–35,8	–37,1	124,6
(2) Servicios y rentas	26,1	18,6	–1,0	–8,6
(3) Transferencias corrientes	–21,9	–31,1	–81,5	–105,5
(4) B. Cuenta Corriente (1+2+3)	**–43,6**	**–48,3**	**–119,6**	**10,5**
(5) Inversión directa	–8,8	–22,1	–54,8	–69,4
(6) Inversión en cartera	13,3	17,9	44,5	143,1
(7) Otros mov. de capital a largo pl.	–16,5	–10,6	(7)+(8) 163,6	(7)+(8) –15,7
(8) Otros mov. de capital a corto plazo	20,2	34,9		
(9) Reservas y otros	12,1	6,6	–57,5	–80,4
(10) Errores y omisiones	23,3	21,6	23,8	11,9

Fuente: *Elaboración propia a partir de las Estadísticas de Balanzas de Pagos del FMI.*

(cuyo déficit comercial pasó de 18 mil millones de dólares en 1980 a los 172 mil millones en 1995) y, en menor medida, del Reino Unido (cuyo déficit de mil millones de dólares en 1983 alcanzó los 18 mil millones en 1995). Por otra, los sistemática y crecientemente excedentarios de Japón (cuyo superávit comercial pasó de mil millones y medio de dólares en 1980 a 132 mil millones en 1995) y en menor medida de Alemania (con superávit que osciló desde los 6 mil millones en 1980 hasta los 66 mil millones en 1995), ocupando posiciones intermedias el resto de los países ricos. En este último grupo de países, la Regla del Notario se encarga de saldar la balanza comercial sin problemas, transmutando un comercio exterior claramente deficitario en términos físicos en holgadamente excedentario en términos monetarios. Sin embargo, al primer grupo de países no le basta la Regla del Notario para enderezar en términos monetarios su comercio deficitario de mercancías, sino que ha de apoyar su equilibrio exterior en el campo de lo financiero, por los caminos que a continuación expondremos sumariamente. Como consecuencia del juego de las dos tendencias antes indicadas, influidas por políticas más restrictivas que en la década precedente, el comercio de mercancías empezó a observar superávits en el mencionado grupo de países durante la década de los noventa[45].

[45] En cualquier caso, habría que tomar con cautela los datos más recientes, habida cuenta de las mayores discrepancias observadas entre las exportaciones y las importaciones agregadas a escala plane-

26.2.2. Balanza de servicios, rentas y de transferencias corrientes

La balanza de servicios y rentas se había saldado tradicionalmente en favor de los países ricos en función, sobre todo, de los ingresos derivados de sus inversiones directas en el extranjero y de la exportación de determinados servicios, que compensaban los saldos deficitarios de otras partidas, pero en los últimos tiempos se ha mostrado globalmente deficitaria. Entre los servicios, ha aumentado el saldo deficitario que origina el pago de transportes y servicios asociados al gran tonelaje de mercancías importadas por este grupo de países. También los viajes se saldan deficitariamente, aunque su resultado varíe notablemente con la atracción turística de los países. Pero el principal cambio ocurrido en los últimos años se debe al espectacular aumento del pago neto de rentas que retribuían a las inversiones en cartera recibidas por este grupo de países, haciendo que el pago neto mencionado empezara a superar, en la década de los noventa, al ingreso neto de rentas derivadas de la inversión extranjera directa. Entre 1970 y 1980 las inversiones directas de los países ricos les facilitaban ingresos netos por un montante cuatro veces superior al conjunto de sus pagos netos en concepto de remuneración de las inversiones en cartera que recibían; sin embargo, en 1995 estos pagos netos sobrepasaron en cerca de 20 mil millones de dólares a aquellos ingresos, forzando así una situación globalmente deficitaria de la balanza de rentas de estos países. Por el contrario, la balanza de transferencias se sigue saldando normalmente en favor del resto del mundo, en virtud de las tradicionales «ayudas al tercer mundo» y de las remesas de emigrantes (anticipemos que lo mismo ocurre con las transferencias de capital: éstas observan una salida neta de los países ricos hacia el resto del mundo. No obstante, como se advierte en el documento metodológico del FMI antes mencionado, estas transferencias de capital se solapan a veces con las transferencias corrientes, haciendo que su separación teóricamente fundada sea un problema estadístico difícil de resolver en la práctica).

26.2.3. Balanza de cuenta corriente

Como consecuencia de lo anterior, la llamada balanza de cuenta corriente, que resulta de saldar las balanzas de operaciones corrientes a las

---

taria. Precisamente es en estos últimos años cuando más habría que depurar a la baja el superávit mundial del comercio de mercancías, pues, como se ha indicado, la cifra de exportaciones mundiales ha sobrepasado absurdamente a la de importaciones en 1995 en 115 mil millones de dólares (decimos absurdamente, porque hoy por hoy no existe comercio interplanetario, debiendo de coincidir lo que unos países exportan con lo que otros importan).

que hemos hecho referencia[46], se ha mostrado sistemáticamente deficitaria para el conjunto de los países ricos durante los últimos quince años (sólo en 1993 y 1995 llegó a cerrarse con superávit). Evidentemente, tal balanza escondía entre los países situaciones tan marcadamente diferentes como las antes indicadas.

Sin duda, el principal protagonista de la evolución deficitaria de la balanza por cuenta corriente de los países ricos ha sido el comportamiento experimentado por la economía estadounidense. No obstante, merece la pena hacer referencia a las otras dos economías más importantes (Japón y Alemania), ya que juntas, las tres, suponían en 1995, el 75% del PIB mundial[47].

Desagregando las cifras por países, encontramos que, por ejemplo, después de arrastrar un déficit durante toda la década de los ochenta, Estados Unidos comienza la década del noventa con un déficit por cuenta corriente de 94 miles de millones de dólares, que llegaría a los 148 miles de millones de dólares en 1995, creciendo un 57% en el quinquenio. Como es sabido, esa situación acabó llevando al dólar hacia posiciones de depreciación, reorientando el continuo trasiego de capitales encauzados a nivel internacional para financiar esos desequilibrios. Anticipemos que este déficit se apoyó básicamente en la afluencia de inversiones en cartera hacia la economía estadounidense, que se fueron transmutando cada vez más en un flujo de «dinero caliente» que se colocaba a corto plazo, alentado por las expectativas de rentabilidad y unos tipos de interés norteamericanos en continuo crecimiento en la década de los ochenta, permitiendo que este flujo cubriera, en 1995, el 44% del déficit por cuenta corriente[48].

Las balanzas comerciales y corrientes excedentarias de Japón y Alemania venían contribuyendo a paliar el déficit estadounidense dentro del propio grupo de los países ricos, al orientar hacia el área del dólar sus inversiones. No obstante, su desahogado equilibrio comercial externo, unido a la progresiva acumulación de activos exteriores, hizo que el marco y el yen desempeñaran el papel de monedas refugio, ante la necesidad de los inversores internacionales de diversificar sus riesgos frente al excesivo peso del dólar en la liquidez internacional, favoreciendo la apreciación de dichas monedas. Lo cual acabó arrastrando hacia el déficit a la balanza corriente alemana a partir de 1991, en parte también como consecuencia de la reunificación, y originando en la economía japonesa los desequilibrios que acabaron llevando a la corrección a la baja de la cotización del yen y al prolon-

[46] La balanza de cuenta corriente engloba la balanza de mercancías, la de servicios, la de rentas y la de transferencias corrientes.

[47] IMF (1996), *World Economic Outlook*,. Washington, D.C.

[48] IMF (1996), *Balance of Payments Statistics Yearbook*, Washington, D.C.

gado período de ajuste de la economía japonesa, que redobló el saldo excedentario de sus operaciones comerciales y corrientes de este país a partir de 1992, lo que en ningún caso se observa en la de Estados Unidos, que se mantiene deficitaria cualesquiera que sean los procesos de ajuste interno.

Valgan estos comentarios al comportamiento de las finanzas internacionales para subrayar la marcada diferencia que se observa en el grupo de los países ricos entre el ejemplo de Estados Unidos, como principal país deudor, que soluciona su equilibro externo en el campo de lo financiero, y el de Japón, como principal país acreedor, que resuelve su equilibrio externo apoyándose en la Regla del Notario. Lo que no quiere decir que los países ricos con balanzas corrientes excedentarias no se beneficien, al igual que los deficitarios, del ahorro que atraen gracias a su posición privilegiada en el campo de lo financiero: como veremos, ambos atraen el ahorro del mundo en busca de inversiones financieras que ofrezcan a la vez seguridad y rentabilidad, y ambos hacen inversiones directas a través de empresas transnacionales que extienden su gestión sobre el mundo.

26.2.4. Balanza financiera[49]

El saldo agregado de las balanzas de bienes y servicios, de rentas, de transferencias corrientes y de capital de cada país se ha de corresponder, evidentemente, con el saldo de sus operaciones financieras, recogido en la balanza financiera: por ejemplo, si el primer saldo es deficitario, este déficit ha de sufragarse con la disminución neta de ciertos activos financieros que eran propiedad de los residentes (disminución de activos) o con la adquisición de determinados compromisos de pago futuro (aumento de pasivos) por parte de éstos, coincidiendo el saldo de las operaciones comerciales, de rentas y transferencias antes indicadas con el de la balanza financiera, salvo errores u omisiones. Pero también las operaciones financieras internacionales pueden tener vida propia: por ejemplo, puede haber operaciones de compraventa de títulos o de colocación de dinero en depósitos que no estén directamente relacionadas con el comercio, los pagos por determinados servicios o las transferencias: la balanza financiera recoge

[49] La antigua metodología de balanza de pagos completaba la balanza corriente con la denominada balanza de capitales, que se desglosaba en la de capital a largo plazo (que incluía básicamente la inversión extranjera, las transferencias de capital y los préstamos a largo plazo) y la de capital a corto (con depósitos bancarios y otras colocaciones a corto plazo), apareciendo saldadas ambas balanzas con el movimento de las reservas de oro y divisas y la obligada partida de ajuste de errores u omisiones. La nueva metodología segrega las transferencias de capital en una cuenta específica de capital, reuniendo en la denominada cuenta financiera el resto de las operaciones financieras que antes figuraban en la balanza de capitales, así como el movimiento de reservas y otros compromisos de las autoridades monetarias, además de la partida de errores u omisiones.

también estas operaciones meramente financieras. De esta manera, hay países que pueden atraer capitales deseosos de comprar los pasivos que emiten (divisas, deuda pública...) o de invertir en compra de empresas o terrenos propiedad de sus residentes.

Cabe distinguir dos grandes grupos de operaciones financieras que se han saldado tradicionalmente de forma diferente entre los países ricos y el resto del mundo. Uno es el compuesto por la llamada inversión extranjera directa y los préstamos, que ha supuesto normalmente una salida neta de capitales de los países ricos hacia los países pobres. Así, la llamada balanza de capital a largo plazo, que englobaba estas partidas en la antigua metodología de balanza de pagos, se vino saldando negativamente para los países ricos durante la pasada década de los ochenta. Con lo cual, si al déficit tradicional de la balanza de cuenta corriente que venían acusando estos países se añade este otro déficit, hemos de preguntarnos cómo se resolvía esta situación doblemente deficitaria. El otro grupo de operaciones financieras al que queríamos referirnos tiene la respuesta: el de la inversión en cartera (o compra de títulos en los mercados financieros internacionales) y el de los movimientos de capital a corto en general (por ejemplo, colocaciones en cuentas bancarias en divisas acreditadas). Siguiendo la antigua metodología, era la balanza de capital a corto la que al final equilibraba la situación financiera de los países ricos, principalmente por la recepción del dinero del resto del mundo para colocarse en activos tan poco sofisticados como son los simples depósitos bancarios. Por ejemplo, en 1990 la balanza básica (que resultaba de agregar los saldos de la balanza corriente y la de capital a largo) de los países ricos arrojaba un déficit de 80 mil millones de dólares, a la vez que su balanza de capital a corto mostraba un excedente de 81 mil millones de dólares, cifrándose en una cantidad similar el aumento de los depósitos bancarios recibidos del resto del mundo en ese año. Algo parecido ocurría diez años antes, en 1980. Los datos recogidos conforme a la nueva metodología de la balanza de pagos confirman estos mecanismos, pero muestran un claro desplazamiento del protagonismo equilibrador de las balanzas de pagos de los países ricos, desde los depósitos bancarios hacia la inversión en cartera, durante la década de los noventa, y de su mecanismo inversor desde la concesión de créditos hacia la inversión extranjera directa. Veamos con un poco más de detalle el comportamiento de la inversión extranjera directa y de la inversión en los mercados financieros internacionales.

26.3. Evolución e implicaciones de la inversión extranjera directa

Recordábamos en el capítulo anterior que la Teoría de la Ventaja Comparativa apoyaba su explicación del carácter benéfico de los intercambios

comerciales a nivel internacional en la supuesta ausencia de movilidad factorial entre los países que comercian. Según esta hipótesis, ni la mano de obra ni el capital pueden emigrar de un país a otro, ya que, en caso contrario, no existirían las ganancias preconizadas por la teoría. En efecto, desde el momento en que el capital (como actualmente ocurre) atraviesa libremente las fronteras en busca de la máxima rentabilidad y modifica, de esta forma, la dotación de factores productivos entre los diferentes países, la inversión comercial no se conduce por criterios de rentabilidad relativa, sino que, al contrario, acudirá a la llamada de la rentabilidad absoluta. Han desaparecido casi por completo aquellos tiempos en los que los capitalistas, además de toparse con las barreras aduaneras, al decir de David Ricardo, se guiaban por «la fuerza de la comunidad» que los impulsaba a mantener su dinero en el país natal aunque en el extranjero pudieran obtener mayores beneficios. Hoy día el intercambio de paño de Inglaterra por vino de Portugal, utilizado para ejemplificar el carácter universalmente beneficioso del librecambio, podría desembocar, no sólo en la instalación por la firma inglesa de la fábrica de paño en Portugal, sino también en la adquisición de las propias bodegas portuguesas por capitales de la metrópoli: en régimen de librecambio, todo depende de la posibilidad que tengan los agentes económicos de uno u otro país para financiar tales inversiones y compras.

De la emancipación que el capital ha experimentado respecto de las ligaduras que lo retenían en los territorios nacionales dan cuenta los datos sobre el origen y destino de la inversión extranjera en lo que va de siglo. En los comienzos, el grueso de la inversión extranjera directa se dirigía hacia los países pobres o antiguas colonias, concentrándose básicamente en sectores relacionados con la obtención de productos primarios y con el transporte. Así, en 1914, el 84% de los flujos de inversión directa con origen en el Reino Unido se colocaron prioritariamente en dichos sectores, mientras que, en el caso de Estados Unidos, el porcentaje de inversión que fue a parar a los mismos alcanzó también un tamaño considerable: el 68%[50]. Desde entonces, los flujos de inversión privada han sido un punto clave en las relaciones entre los países pobres y ricos, pero, a la vez, las empresas transnacionales se han extendido en el seno de estos últimos, reorientando para ello buena parte de esta inversión dentro del propio grupo de los países ricos.

[50] HOUSTON J. y J. DUNNING (1976), *U.K Industry Abroad*, Londres, Financial Times Books; WILKINS, M. (1970), *The Emergence of Multinational Enterprise: American Bussines Abroad from the Colonial Era to 1914*. Cambridge Mas., Harvard University Press. Citado en GRAHAM, E. M. (1995), «Foreing Direct Investment in the World Economy», en IMF (1995), *Staff Studies for the World Economic Outlook*, Washington, D.C., p. 123.

Tradicionalmente, las estadísticas económicas han clasificado estos flujos de capital en dos grandes apartados: inversión directa e inversión en cartera. La diferencia fundamental estriba en que, en la inversión extranjera directa, las adquisiciones se orientan a controlar o gestionar empresas y recursos, mientras que en la inversión en cartera, a la que más adelante nos referiremos, las adquisiciones no buscan intervenir en la gestión de las entidades emisoras de los títulos, sino que responden, en lo esencial, a una estrategia a corto plazo de diversificación de riesgos entre diferentes activos financieros[51]. Por tanto, no deben de confundirse ninguna de estas dos «inversiones» con el agregado de inversión o formación bruta de capital que recogen las Cuentas Nacionales: aquéllas son inversiones financieras, mientras que ésta presupone la construcción física de instalaciones, artefactos o mejoras materiales duraderas.

En los últimos quince años se ha producido un salto cualitativo en el peso que los flujos de inversión extranjera directa (IED) representan en las corrientes de capital privado a nivel internacional. Al cobijo de un marco institucional caracterizado por la ausencia progresiva de controles sobre los movimientos internacionales de capital, la tasa de crecimiento de la IED ha superado también ampliamente a la de los agregados de producción, de comercio exterior o, incluso, de la Formación Bruta de Capital Fijo (inversión bruta).

Cuadro 26.2

TASAS DE CRECIMIENTO DE LA IED
Y DE LA FORMACIÓN BRUTA DE CAPITAL
FIJO EN EL MUNDO
(% de variación media anual)

	Tasa de variación anual (%)	
	1986-1990	*1990-1994*
Formación bruta de capital fijo	10,6	4,0
IED (*stock* de salidas)	19,8	8,8

Fuente: GATT, UNCTAD y elaboración propia.

[51] La OMC, en su informe de 1996, define la IED como aquella en que «[...] un inversor radicado en un país (el país de origen) adquiere un activo en otro país (el país receptor) *con la intención de administrar ese activo.* El elemento de administración es lo que diferencia a la IED de una inversión en cartera de acciones, obligaciones y demás instrumentos financieros extranjeros» (p. 56).

Resulta importante subrayar que, durante los últimos quince años, la tasa de crecimiento de los flujos de IED no sólo ha superado a la de los agregados mundiales de producción o consumo, sino que ha venido doblando a la correspondiente a la formación bruta de capital en su conjunto[52]. El mayor crecimiento de la inversión financiera con relación a la inversión «real», que recogen las Contabilidades Nacionales, permite intuir el hecho de que la mayor parte de aquélla no se orienta a nuevas instalaciones productivas, sino a adquirir o controlar activos preexistentes (empresas, inmuebles, terrenos, concesiones...), además de revelar el mayor dinamismo que caracteriza a la economía financiera con respecto a los agregados de la economía «real», temas éstos sobre los que volveremos más adelante.

Cuadro 26.3

FLUJOS DE INVERSIÓN DIRECTA
(Miles de millones de dólares y porcentajes)

	Países industriales		*Países en desarrollo*		*Europa Central y del Este*		*Mundo*	
Año	*Entradas*	*Salidas*	*Entradas*	*Salidas*	*Entradas*	*Salidas*	*Entradas*	*Salidas*
				Valor (miles de millones de dólares)				
83-87	58,7	72,6	18,3	4,2	0,02	0,01	77,1	76,8
88-92	139,1	193,3	36,8	15,2	1,36	0,04	177,3	208,5
1990	169,8	222,5	33,7	17,8	0,30	0,04	203,8	204,3
1991	114,0	201,9	41,3	8,9	2,45	0,04	157,8	210,8
1992	114,0	181,4	50,4	21,0	3,77	0,10	168,1	203,1
1993	129,3	192,4	73,1	33,0	5,59	0,20	207,9	225,5
1994	132,8	190,9	87,0	38,6	5,89	0,55	225,7	230,0
1995	203,2	270,5	99,7	47,0	12,08	0,30	314,9	317,8
				Porcentaje (%)				
83-87	76	95	24	5	0,02	0,01	100	100
88-92	78	93	21	7	0,77	0,02	100	100
1993	62	85	35	15	2,70	0,09	100	100
1994	59	83	39	17	2,60	0,24	100	100
1995	65	85	32	15	3,80	0,09	100	100

Fuente: UNCTAD, *World Investment Report*, 1996.

[52] UNCTAD (1996), *World Investment Report 1996: Investment, Trade and International Policy Arrangments*, Nueva York.

La información del cuadro 26.3 permite apreciar que, si bien los países industrializados o ricos generan, y también reciben, la mayor parte de la inversión extrajera directa (IED), son inversores netos en el resto del mundo. Los países ricos están emitiendo durante los últimos años cerca del 85% del total mundial de la IED y reciben una parte inferior de la misma (entre el 60 y 65%), por lo que envían en términos netos hacia el resto del mundo entre el 20 y el 25% de la IED mundial. La misma lectura puede hacerse desde los países pobres, y los empobrecidos de Europa Central y del Este, que están recibiendo durante los últimos años una entrada que se sitúa entre el 37 y el 40% de la IED mundial, e invierten fuera de sus territorios cerca del 15%, por lo que, como hemos dicho, reciben una entrada neta que oscila entre el 20 y el 25% de la IED mundial. En resumidas cuentas, que la IED bruta que se canaliza hacia los países pobres o «en desarrollo» superaba en los últimos años los cien mil millones de dólares, constituyendo el principal concepto de entrada de capitales en los mismos: del total de flujos de inversión privada que acudieron a los países llamados «emergentes» en 1995, el 54% lo hizo en forma de IED, con las características ya mencionadas, un 33% entró como créditos comerciales y el 13% restante acudió en forma de inversión en cartera[53], y en 1996 el valor de la IED siguió multiplicando por más de tres al de los préstamos bancarios y superando ampliamente al de la inversión en cartera.

Pero el reparto de este tipo de inversiones entre los países dista mucho de ser homogéneo. En efecto, los diez mayores receptores de IED absorben dos tercios del total de los flujos, dejando para los 100 países más pequeños tan sólo el 1% de esta corriente de capitales[54]. De la misma forma, y por el lado de los proveedores de capitales, la distribución tampoco en este caso mejora: los cinco principales (Estados Unidos, Alemania, Reino Unido, Japón y Francia) acumularon también en 1995 dos tercios de todos los flujos. También entre los países pobres se repite la concentración de los flujos en torno a un puñado de territorios. Los diez principales receptores acumulaban el 70% de los flujos de entrada, siendo China un caso paradigmático, que absorbía el 37% del total de capitales llegados a los países pobres por este concepto en 1995.

Evidentemente, la distribución de la inversión extranjera entre los países está íntimamente relacionada, por una parte, con las facilidades y garantías que se ofrecen a la entrada de capitales y, por otra, con las ventajas que desde el punto de vista ambiental y laboral presentan normativas y prácticas más permisivas que las de los países ricos. El fenómeno de la búsqueda de *«pollution heaven»*, es decir, de paraísos o refugios donde las regulaciones socioambientales son más laxas –o, simplemente, son inexis-

[53] World Bank (1996), *World Debt Tables:1996*, Washington, D.C.
[54] *Ibid.*

tentes– está en la base de buena parte de las corrientes de capital privado inversor que se dirige hacia los países del «Tercer Mundo»[55]. Este es el caso de la mayoría de los territorios del sudeste asiático y de algunos países latinoamericanos.

Como apuntamos anteriormente, el crecimiento de la IED a tasas muy superiores a las de la formación bruta de capital fijo hacía intuir que buena parte de aquélla se canalizaba hacia la compra de activos preexistentes y no hacia el aumento del *stock* de capital físico de los países receptores. Los datos sobre el destino de la IED recogidos en el cuadro 26.4 así lo confirman, sobre todo en la destinada a los países pobres o «en desarrollo». En efecto la parte de la IED dirigida a financiar adquisiciones y fusiones transfronterizas de empresas, con participación extranjera mayoritaria (con lo que cabría hablar más bien de absorciones), ha venido suponiendo más de la mitad de los fondos destinados por este concepto a los «países en desarrollo». Así, el montante de la IED orientado a financiar fusiones y adquisiciones transnacionales (excluidas las inversiones en cartera) se incrementó en un 84%, entre 1988 y 1995, ascendiendo en este último año a 135 mil millones de dólares (y si incluimos las inversiones en cartera asociadas a ese proceso de fusiones y adquisiciones, el montante de la inversión se duplica, alcanzando los 229 miles de millones de dólares, en 1995)[56]. Este mecanismo de adquisición de propiedades de entidades locales ha permitido extender, por encima de los Estados nacionales, la creciente participación y control de grandes compañias transnacionales en sectores estratégicos de las economías de los países, como son la distribución de energía, las telecomunicaciones, la industria farmacéutica o los servicios financieros. Esta circunstancia concuerda plenamente con la expansión, anunciada en la primera parte de este libro, de una economía de la *adquisición* de riqueza, en detrimento de aquella otra economía de la *producción* que se sigue enseñando en los manuales (ver cuadro 26.4).

La creciente importancia económica de las empresas transnacionales (ETN) aparece reflejada en el creciente porcentaje del Producto Nacional Bruto (PNB) mundial generado por filiales de empresas transnacionales: este porcentaje se triplicó en una década, pasando de representar el 2% en 1982 a significar el 6% en 1991[57]. Además, si, como ya se puso de manifiesto en el capítulo anterior, las transacciones entre filiales de ETN repre-

[55] Es conocido el hecho de empresas que han modificado (deslocalizado) su implantación y trasladado sus instalaciones a países con normativas socioambientales más permisivas y costes laborales menores, así como de la existencia de nuevos proyectos de inversión en actividades con gran impacto territorial y socioambiental que, en vez de llevarse a cabo en suelo de «primer mundo», deciden canalizarse hacia los países pobres más o menos emergentes, para evitar conflictos en sus países de origen.

[56] UNCTAD (1996), *World Investment Report, 1996.*

[57] UNCTAD (1996), *World Investment Report, op. cit.* Por otro lado, y como dato complementario, el peso de las *ventas totales*, con origen en las ETNs y sus filiales, sobre el PNB mundial, alcanzó en 1995, el 25%.

Cuadro 26.4

PARTE DE LA IED QUE SE DESTINA A FINANCIAR FUSIONES Y ADQUISICIONES DE EMPRESAS EN LOS «PAÍSES EN DESARROLLO» 1981-1993
(Miles de millones de dólares)

Concepto	*1987*	*1988*	*1989*	*1990*	*1991*	*1992*	*1993*
– Fusiones y adquisiciones transfronterizas mundiales (con participación extranjera mayoritaria)	71	113	123	115	49	74	75
– Entradas de IED en los países en desarrollo	113	134	171	177	120	100	107
– Fusiones y adquisiciones transfronterizas como porcentaje de las entradas de IED en los países en desarrollo	63	84	72	65	41	74	61

Fuente: UNCTAD (1995), «Acontecimientos recientes en la esfera de las inversiones internacionales y las empresas transnacionales», p. 20.

sentan cerca de un tercio de los flujos comerciales internacionales, no cabe pensar que esto ocurra sin inversiones directas destinadas a sostener y ampliar esa parte del mercado internacional. Por otro lado, ya desde el ámbito de la esfera «productiva», la capacidad de control de estas corporaciones transnacionales no sólo llega al punto de que el valor de las ventas totales de algunas ETN superen con creces el PIB de países pequeños o medianos, sino a que el valor total de las ventas de las cinco principales compañías sea diez veces mayor que el PIB total del conjunto de los cuarenta y cuatro países más pobres (ver cuadro 26.5).

26.4. La expansión de la inversión en cartera y el movimiento de los capitales «a corto»

Hemos visto que al déficit con el que se han venido saldando normalmente las operaciones corrientes del grupo de los países ricos, arrastrado por el comportamiento crónico extremadamente deficitario de algunos de ellos, se suma la necesidad adicional que tiene este grupo de países de financiar sus «inversiones directas» sobre el resto del mundo. ¿Cómo se ha

Cuadro 26.5

PODER ECONÓMICO ESTATAL Y EMPRESARIAL, 1994
(Miles de millones de dólares)

País/Empresa	*PIB total o ventas totales de la empresa*
Indonesia	174,6
General Motors	**168,8**
Turquía	149,1
Ford	**137,1**
Sudáfrica	123,3
Toyota	**111,1**
Exxon	**110,0**
Royal Dutch/Shell	**109,8**
Noruega	109,6
Polonia	92,8
Portugal	91,6
IBM	**72,0**
5 primeras empresas	**871,4**
44 países menos desarrollados	76,5
Asia meridional	451,3
África subsahariana	246,8

Fuente: *Fortune Magazine, 1996.* Citado en PNUD (1997), *Informe sobre el Desarrollo Humano, 1997.*

podido salvar esta situación a menudo doblemente deficitaria?[58]. Anticipemos que esta situación se ha salvado hasta el momento por estos países a base de emitir pasivos financieros que resultan atractivos y que, por ende, son demandados por el resto del mundo. En principio, las colocaciones en cuentas de bancos acreditados y en divisas sólidas de las metrópolis eran el instrumento más socorrido, en el que se plasmaba el conocido proceso de «evasión de capitales», unido tradicionalmente a las elevadas tasas de inflación, al deterioro de las monedas y a la inestabilidad política de los países que le daban origen. Pero, en los últimos tiempos, la diversificación de activos financieros y la globalización de sus mercados hace que la compra de títulos en mercados financieros internacionales esté desbancando esas otras vías tradicionales de salida de capital hacia los países ricos.

[58] Tal sería el caso, sobre todo, de Estados Unidos, en el que, además de tener la balanza de mercancías y la balanza por cuenta corriente extremadamente deficitarias, sus empresas son inversoras netas directas en el resto del mundo.

Los caminos de la inversión en cartera han corrido, en cierta medida, parejos a los de la IED hasta comienzos de la década de los noventa. Sin embargo, en el período 1990-1995, la inversión extranjera en cartera (IEC) ha crecido a una tasa media anual próxima al 20%, doblando a aquélla de la IED. A la hora de detallar la evolución de esta rúbrica, cuya importancia se multiplica a partir de la última década, resulta de utilidad saber que el nuevo modelo de balanza de pagos elaborado a partir de 1992 empezó a incorporar sistemáticamente los instrumentos financieros «derivados» negociables[59].

Las cifras agregadas de las variaciones anuales netas de activos y pasivos que recogen en concepto de IEC las estadísticas de balanza de pagos nos pueden informar sobre el trasvase de recursos que, a través de este mecanismo, se opera entre los países. A la vista de la evolución de la ID y de los procesos de diversificación de activos y de globalización o mundialización de los mercados financieros que han tenido lugar durante la última década, no deberían sorprendernos las altas tasas de expansión antes mencionadas de los activos y pasivos financieros vinculados a la IEC. Sin entrar en un análisis detallado de la evolución de esta rúbrica, interesa subrayar ahora que, a diferencia de la IED, la inversión en cartera se ha venido saldando comúnmente en favor de los países ricos, que reciben así una entrada neta de capitales que se dirige a financiar los pasivos que, en forma de títulos, colocan sus administraciones o empresas en los mercados financieros internacionales. Es decir, que se benefician de una entrada neta de capitales, que aumenta su posición deudora respecto del resto del mundo. Los datos recogidos en el cuadro 26.1 y detallados en el cuadro 26.6 dan cuenta de esta situación en la medida en la que la fiabilidad de la información lo permite[60]. Como hemos indicado, el aumento de activos financieros de un país frente al exterior supone una salida de capital para adquirirlos (por lo que figura con signo menos), y lo contrario ocurre con

[59] «Cuando el Sistema de Cuentas Nacionales de 1993 (SNA 93) y el de Balanza de Pagos (BPM5) fueron esbozados en 1992, sólo un limitado número de estadísticos eran conocedores de los instrumentos financieros «derivados», y entre ellos sólo pocos, si es que alguno, tenían experiencia en la toma de estos datos», reconoce el documento del Comité sobre Estadísticas de Balanza de Pagos de FMI (*Annual Report 1996*) antes citado: la clarificación y ampliación en este campo de los textos del SNA 93 y de la BPM5 requirieron una experiencia más profunda y ampliada de los expertos en el seguimiento del tema, que llevó a la creación, en 1994, de un Grupo informal (Informal Group on the Measurement of Financial Derivatives) del mencionado Comité, que originó a finales de 1996 un documento con recomendaciones sobre el tema, que podrían acabar modificando la metodología del SCN 93.

[60] Como nos indicaba la advertencia metodológica del FMI citada al inicio de este capítulo, entre los componentes de la balanza financiera, «los datos muestran amplias discrepancias, especialmente en las inversiones en cartera, donde las entradas (pasivos) excedieron a las salidas (activos) en cerca de 150 mil millones de dólares en 1995». Probablemente, esta discrepancia se deba en buena medida a la ocultación de las salidas de capitales de los países pobres para colocarse en los mercados financieros internacionales, donde sí se registra su entrada.

el aumento de pasivos. En el cuadro 26.6 se observa que el saldo usualmente positivo de la IEC para el conjunto de los países ricos, aunque indica la entrada neta de capitales por este concepto y su progresivo endeudamiento respecto al resto del mundo, esconde situaciones muy diferentes dentro del grupo. Estados Unidos presenta un ejemplo extremo de captación de recursos a base de aumentar su pasivo: así, en 1995, este país acumuló el 24% del aumento de activos del grupo, mientras que contribuyó a explicar el 43% del aumento de los pasivos. Lo contrario ocurre con Japón, cuyos saldos excedentarios en la balanza comercial y por cuenta de renta le permiten ser inversor neto en el resto del mundo, no sólo en inversión directa, sino también en inversiones en cartera (comportamiento éste que se corresponde con una tasa de ahorro interno muy superior a la de los otros países ricos, como veremos más adelante).

Cuadro 26.6

FLUJOS DE INVERSIÓN EN CARTERA, 1990-1995
(Miles de millones de dólares)

	Variación neta de activos				*Variación neta de pasivos*			
	1990	*1995*	*90/95*	*Tasa var. anual*	*1990*	*1995*	*90-95*	*Tasa var. anual*
P. industriales	–169,0	–398,4	–389,6	18	213,6	541,4	413,4	20
EE.UU.	–28,8	–98,9	–80,0	27	22,0	236,8	106,3	60
Japón	–40,2	–88,0	–71,9	16	35,3	51,9	46,3	8
Alemania	–15,7	–30,2	–36,8	13	13,4	56,9	61,1	33
P. pobres	–17,2	–11,4	–11,7	–0,9	22,4	42,4	59,9	13
TOTAL	–186,4	–412,5	396,3	21	250,7	593,2	486,5	18

Fuente: IMF, *Balance of Payments (1996).*

La tasa de expansión de los pasivos estadounidenses (que triplica la tasa de expansión de sus activos en el exterior) no tiene una correspondencia razonable en la tasa de crecimiento de variables reales tales como las exportaciones o la producción, lo cual demuestra que se le está concediendo a esta economía un volumen de crédito que carece de un referente real. Este hecho sería insólito si no fuera porque este país dispone de una moneda de aceptación generalizada como es el dólar y cuenta con empresas transnacionales de reconocido prestigio que colocan sin problemas sus títulos en

los mercados financieros internacionales, captando así el ahorro no sólo de países ricos como Japón, sino también de países pobres que, paradójicamente, tienen mayores tasas de ahorro que la mayoría de los países ricos, tal y como se observa en el cuadro 26.7.

Cuadro 26.7

TASAS DE AHORRO, 1980-1995
(% del PNB)

	1980	*1985*	*1990*	*1995*
Países pobres	28,5	25,3	25,7	27,2
Países ricos	23,0	21,2	20,9	20,0
Japón	31,3	31,5	33,5	30,8
EE UU	19,3	17,2	15,7	15,9

Fuente: World Bank, *World Tables.* IMF, *World Economic Outlook.*

Como consecuencia de ello, a los flujos de capital procedentes de aquellos países industriales con una balanza corriente saneada, se han unido los procedentes de los países pobres hacia los países ricos. En efecto, con las limitaciones que comportan los datos disponibles, se ha estimado que en 1980 las transferencias netas de recursos financieros desde el «tercer mundo» hacia los países industriales alcanzó el 3,6% del PNB de los países pobres. Esta tendencia continuaba en 1990, cuando el porcentaje ascendía todavía al 0,6%[61]. El excedente de ahorro sobre la inversión interna en algunos de los países pobres, motivado por la «falta» de expectativas que ofrece en ellos el binomio seguridad-rentabilidad o por el simple empeño de diversificar riesgos[62], se materializa en esa transferencia neta que sale para financiar el endeudamiento de los agentes económicos de los países ricos.

Así las cosas, muchos países tratan de conseguir que el resto del mundo los financie, siguiendo el ejemplo de Estados Unidos, pero pocos lo consiguen, aunque la situación en ocasiones los arrastre a ello, con resultados más o menos favorables, dependiendo del apoyo internacional que reciban. Tal es el caso de determinados países que, tras basar

[61] ONU (1997), *Estudio económico y social mundial, 1997,* Nueva York, p. 232.

[62] A lo que se une la necesidad de hacer frente al pago de intereses y devoluciones de la deuda contraída por muchos de estos países durante la década de los setenta.

en su capacidad exportadora la solvencia originaria de sus divisas, atraen corrientes de capital que las demandan y sobrevaloran, junto con los pasivos que estos países emiten, haciendo que la afluencia de capitales y la sobrevaloración de las divisas y pasivos que ponen en circulación puedan acabar erosionando los equilibrios reales que en principio sostenían la buena cotización de los mismos. Se plantean así por lo común situaciones de inestabilidad en las cotizaciones que los mercados inflan y desinflan. Los casos de México y los países «emergentes» del sudeste asiático constituyen ejemplos en este sentido. Las buenas condiciones que inicialmente presentaron estos países para que afluyera hacia ellos la IED, favorecieron también la afluencia de créditos, de inversiones en cartera y de depósitos, generando en ellos, como premio añadido a su buen comportamiento económico, mercados financieros importantes que, junto con los de las metrópolis, compartían el negocio de captar el ahorro del mundo. De esta manera, la burbuja financiera se infló al calor de las buenas perspectivas de negocio en estos países con el beneplácito de todo el mundo, hasta que el aumento del riesgo empezó a no compensar las altas rentabilidades que prometían y los operadores empezaron a perder confianza en estos mercados y a escapar de ellos, contribuyendo al derrumbe de sus cotizaciones y a la crisis subsiguiente, denotando que la superestructura financiera se había extendido muy por encima del apoyo que la «economía real» podía darle. La crisis financiera del sudeste asiático afectó negativamente, como era de prever, a las entidades inversoras de los países ricos en función del riesgo que tenían comprometido en esa zona, pero presionó también, de forma menos previsible, al alza sobre las cotizaciones de las divisas y las bolsas de valores de los países occidentales, al ser utilizados como refugio por los capitales huidos de los mercados en crisis, brindando nuevas perspectivas de negocio a los capitales que pudieron abandonar a tiempo esos mercados en crisis. El peso creciente de este juego financiero en la economía mundial, en el que los operadores mejor informados y más hábiles en su manejo logran realizar pingües beneficios, mientras las pérdidas recaen sobre el común menos advertido de ahorradores, es lo que ha promovido recientemente el calificativo de «economía casino»[63] para designarlo.

Una cosa se desprende con claridad de lo anteriormente expuesto: que la desigual capacidad que poseen los países para emitir pasivos que sean aceptados en el actual sistema financiero internacional, amplifica las desigualdades entre países pobres y ricos. Esta capacidad, que está en relación con la riqueza del país y con su poder económico (y político), arrastra la paradoja de que los

[63] *Vid.* STRANGE, S. (1986), *Casino Capitalism*, Oxford, Basil Blackwell, Reed., 1989.

países más ricos y poderosos sean a la vez los más endeudados[64]. Precisamente, estos países y las empresas transnacionales que albergan apoyan su creciente capacidad de compra sobre el mundo en el crédito que éste les otorga.

26.5. La «burbuja financiera» mundial

Hemos visto que las reglas del juego del sistema financiero internacional ofrecen a los países ricos, a través de las instituciones financieras y las empresas transnacionales en ellos domiciliadas, un poder económico adicional al que ya les ofrecía la Regla del Notario mediante el intercambio mercantil ordinario. Reflexionemos ahora sobre la naturaleza y la tendencia expansiva de este universo de lo financiero. Para ello recordemos que, si bien la valoración económica incide sobre los flujos físicos que moviliza a través del comercio de mercancías, el mundo financiero incide sobre la valoración económica, redistribuyendo la capacidad de financiación de los agentes económicos y, con ello, su capacidad de compra sobre el mundo (que va más allá de las mercancías ordinarias para afectar también a empresas y territorios, con todos sus recursos).

Si en el anterior capítulo hacíamos notar que las diferencias entre las tasas de crecimiento de la producción y el comercio mundial permitían afirmar la existencia de una cierta *burbuja comercial* con los efectos ecológicos ya reseñados, ese proceso se ve empequeñecido por el surgimiento y consolidación de una importante *burbuja financiera*, cuyo valor crece a tasas muy superiores al incremento de las variables «reales», mediante un proceso de emisión y revalorización de activos financieros que, en general, mantiene escasa relación con el sustrato físico que, en teoría, debería respaldarlos[65].

[64] Esta circunstancia ya fue meditada por el propio Quesnay, quien en 1758, en la séptima observación a su *Tableau* argumentaba del siguiente modo: «[...] las naciones pobres necesitan una intervención mayor de dinero en el comercio, ya que en ellas se suele pagar todo al contado porque nadie puede confiar en las promesas de cualquiera. Pero en las naciones ricas existen muchos hombres reputados por su fortuna cuya promesa por escrito es aceptada como garantía segura a causa de su riqueza, de modo que todas las ventas importantes se hacen a crédito, es decir, por medio de recibos que reemplazan al dinero, facilitando considerablemente el comercio». QUESNAY, F. (1758), «*Le Tableau Economique» y otros escritos económicos*, Ediciones de la Revista de Trabajo, 1974, p. 78.

[65] Sorprende la falta de información que existe sobre la composición y distribución de la propiedad del patrimonio mundial, así como su relación con los activos financieros. Por ejemplo, sería importante, además de distinguir en qué medida contribuyen a la expansión de los activos financieros mundiales la simple revalorización de los que ya existían y la emisión de otros nuevos, aclarar hasta qué punto el valor de los nuevos activos emitidos se apoya en la simple titulación de riquezas preexistentes que eran propiedad de personas físicas, administraciones u otras entidades absorbidas por las empresas que sacan los nuevos títulos a cotizar en los mercados financieros. A lo que se añadiría la necesidad de aclarar también la variada relación que los nuevos instrumentos financieros «derivados» mantienen con los activos reales y financieros ordinarios. Esperemos que el nuevo sistema de Cuentas Nacionales acordado internacionalmente (el SCN 93), al incluir a la vez cuentas financieras y de patrimonio, permita ir iluminando estos aspectos tan importantes para poder interpretar cómo evoluciona y se comporta la economía mundial.

Cuadro 26.8

EVOLUCIÓN DE LOS PRINCIPALES AGREGADOS REALES Y FINANCIEROS A ESCALA MUNDIAL
(Miles de millones de dólares)

	Población (millones)	*PIB p.c. ($/hab.)*	*PIB*	*Exportaciones*	*Inversión (FBCF)*	*Activos financieros**
1982	4.586	2.426	11.130	1.752	2.911	13.864
1988	5.112	3.525	18.159	2.279	3.876	36.512
1995	5.666	5.003	28.352	4.890	5.681**	77.812
Tasa de var.: 1982-1995 (%)	1,6	5,7	7,5	8,2	5,3	14,2

Promemoria:
Territorio habitable: 133 millones km²

* Excluidos los productos financieros «derivados» negociables.
** 1994.
Fuente: World Bank, *World Economic Outlook;* World Trade Organization, *Annual Report;* Bank For International Settlements, *Annual Report.* United Nations, *Demographic Yearbook.* Global Financial Data.

El cuadro 26.8 cuantifica el fenómeno apuntado, pudiéndose observar cómo, durante los últimos tres lustros, el ritmo de crecimiento de los activos financieros mundiales alcanzó una tasa media anual del 14,2%, doblando a aquélla del agregado de producto o renta nacional. Lo cual hizo que, mientras en 1982 el valor de los activos financieros mundiales apenas sobrepasara al del agregado de producto o renta nacional, en 1995 casi llega a triplicarlo, evidenciando la creciente desproporción entre las variables «reales» y las financieras, en la que aquéllas van perdiendo peso vertiginosamente. Desde esta perspectiva, quizás sea más importante poner de manifiesto el alejamiento progresivo que se observa entre la contribución de la Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF o inversión de Cuentas Nacionales) al aumento del *stock* de capital físico y el aumento de los activos financieros, máxime cuando, tradicionalmente, la teoría económica ha venido presuponiendo que las dos variables deberían evolucionar paralelamente a medio plazo. Pues bien, lejos de acercar posiciones, la expansión de los activos financieros a un ritmo casi tres veces superior al de la FBCF hace que ésta pasara de suponer el 21% de aquéllos en 1982, al 11 en 1988 y a sólo el 7 en 1995. El cuadro 26.9 detalla la composición de los activos financieros totalizados en el cuadro anterior.

Cuadro 26.9

EVOLUCIÓN DEL TAMAÑO Y ESTRUCTURA DE LOS ACTIVOS FINANCIEROS MUNDIALES, 1982-1995
(Miles de millones de dólares)

	1982		*1988*		*1995*	
	Activos	*% del total*	*Activos*	*% del total*	*Activos*	*% del total*
Activos bancarios	8.887	64,1	17.005	46,6	30.300	38,9
Nacionales	6.218	44,8	11.500	31,5	20.914	26,8
Internacionales	2.669	19,3	5.505	15,1	9.386	12,1
Mercados de capitales	4.977	35,9	19.507	53,4	47.512	61,1
Euroacciones	–	–	40	0,1	–	–
Mercado de bonos inter.	259	1,9	1.085	3,0	3.225	4,2
Mercado de acciones	1.591	11,5	9.563	26,2	20.177	25,9
Mercados de obligaciones	3.127	22,5	8.819	24,1	24.110	30,9
Total	13.864	100,0	36.512	100,0	77.812	100,0

Fuente: Bank for International Settlements, *Annual Report;* Salomon Brothers International; Global Financial Data, UNCTAD; *Trade and Development Report, 1990.*

Llama la atención observar cómo, a pesar de la importancia que aún mantienen los activos bancarios en la estructura de los mercados financieros mundiales, van relegando poco a poco su preeminencia en favor de los activos no bancarios negociados en los mercados de capitales. Esta circunstacia se observa con la progresiva reducción en la participación de los activos bancarios en el total, que pasa de representar en 1982 el 64%, a disminuir su peso hasta el 38% en 1995 (cuadro 26.9). Esta circunstancia pone de manifiesto el fuerte crecimiento experimentado tanto por los mercados de obligaciones (con una fuerte base nacional en la década de los ochenta, pero cada vez más «internacionalizados») y los mercados de acciones, tradicionalmente más permeables al capital extranjero que los anteriores.

Como es sabido, la importancia que han cobrado en los últimos tiempos los fondos de inversión y de pensiones favoreció el espectacular crecimiento de los mercados financieros, ya que, al ofrecer mayor rentabilidad, canalizaron hacia ellos una parte del ahorro que tradicionalmente engrosaba los pasivos de la banca en forma de depósitos. Este traslado del ahorro desde los pasivos bancarios hacia los «emergentes» fondos de inversión

mobiliaria y de pensiones ha determinado tasas de crecimiento de estos activos muy superiores a las del resto. El cuadro 26.9 muestra cómo el tamaño de los mercados de obligaciones casi se ha triplicado en menos de una década (1988-1995), mientras que el volumen de los mercados de acciones ha doblado su tamaño en el mismo período de tiempo. Así, por ejemplo, en la década de los ochenta los fondos de inversión y de pensiones, que han sido la variable clave en esta progresión, crecieron a una tasa anual del 22% en EE UU, del 31% en Japón y del 17% en Alemania. El volumen representado por estos activos en relación con el PNB no ha dejado tampoco de aumentar. En efecto, de representar a comienzos de 1980, el 59,3% del producto estadounidense, en 1990 esta cifra alcanzaba ya el 100%, para colocarse en 1993 en el 125%[66]. Lo más importante de este ascenso no estriba únicamente en la dimensión cuantitativa, sino en la especial naturaleza que rodea la gestión de estos activos. El proceso de concentración del ahorro mundial en mercados financieros cada vez más globalizados otorga un poder sin precedentes a las entidades que manejan ese ahorro. Como muestra de ese poder, a comienzos de la presente década, cien fondos de inversión en Europa y otros cien en Estados Unidos controlaban 8 billones (10^{12}) de dólares, lo cual significaba entonces aproximadamente un tercio de PIB mundial[67]. Junto al auge de los mercados financieros, han ido adquiriendo también especial importancia las actividades llevadas a cabo en los mercados de divisas. Así, según el Banco Internacional de Pagos de Basilea, el volumen medio *diario* de transacciones en estos mercados ascendió, en 1995, a 1.230 miles de millones de dólares. Este fenómeno ilustra la importancia que tiene esta economía de *papel,* así como su posible incidencia sobre los aspectos reales y sobre las economías nacionales[68].

Hay que advertir, como hicimos a partir de la estadística de balanzas de pagos, que si se razona sólo sobre la variación anual de activos y pasivos financieros, se pierden de vista las ganancias (o pérdidas) derivadas de las compra-ventas de esos activos-pasivos financieros realizadas a lo largo del año. Lo cual es importante en la medida en la que estas operaciones de compraventa lo sean y, con ello, los resultados de los operadores en los mercados financieros internacionales, más vinculados a los países ricos, que quedarían al margen del cómputo macroeconómico tradicional de las Cuentas Nacionales. Para hacerse una idea de la creciente importancia de

[66] IMF (1995), *International Capital Markets.* p. 163.

[67] IMF (1993), *International Capital Markets.* p. 3.

[68] Quizás sea conveniente mencionar un dato más como muestra de la «impotencia» de la política económica de los Estados frente a las grandes corrientes de capital financiero privado: en 1995, el volumen medio anual de reservas acumuladas por los diferentes Bancos Centrales era de 1.517 miles de millones de dólares. Frente a esta cantidad anual, los «mercados» estaban moviendo *diariamente* 1.230 miles de millones de dólares. *Vid.* Bank For International Settlements, (1997), *Annual Report,* Basilea.

estos flujos, baste mencionar (cuadro 26.10) el volumen que representan en determinados países las transacciones internacionales de dos tipos concretos de activos financieros: las acciones y las obligaciones (prescindiendo de momento de los instrumentos de financiación derivados, cuya importancia veremos más adelante).

Cuadro 26.10

TRANSACCIONES INTERNACIONALES DE ACCIONES Y OBLIGACIONES
(% del PNB)

País	*1975*	*1980*	*1985*	*1989*	*1990*	*1991*	*1992*	*1993*	*1994*	*1995*
Estados Unidos	4	9	35	101	89	96	107	129	131	135
Japón	2	8	62	156	119	92	72	78	60	65
Alemania	5	7	33	66	57	55	85	171	159	172
Francia	2	5	21	52	54	79	122	187	201	180
Italia	1	1	4	18	27	60	92	192	207	253
Canadá	3	10	27	55	64	81	113	153	212	194

Fuente: Bank for International Settlements (1997), *Annual Report*. Basilea.

Siguiendo con la misma tónica, el ámbito de los productos financieros *derivados*, que se negocian también en los mercados internacionales, ha sufrido asimismo un espectacular crecimiento en la última década. Fruto de esta tendencia, el *stock* acumulado por estos títulos en 1995 representaba el 60% del PNB mundial para ese mismo año, ascendiendo en 1996 al 82%[69]. Si en vez de fijarnos en los saldos vivos, nos remitimos al volumen de transacciones efectuadas en los mercados financieros en torno a estos productos derivados, las cifras que se obtienen arrojan un resultado aún más elocuente, superando el montante total en casi doce veces al PIB mundial en 1995 (ver cuadro 26.11).

Una vez esbozados la dimensión y el fuerte ritmo de expansión mundial que observa esa «burbuja» de «valores virtuales» que constituyen el universo de lo financiero, dedicaremos las siguientes páginas a reflexionar sobre los cambios cualitativos que conlleva la evolución cuantitativa antes expuesta. Cambios que están llamados a influir, por fuerza, sobre los procesos de explotación y deterioro de los recursos planetarios.

[69] *Ibid.*

Cuadro 26.11

VOLUMEN DE TRANSACCIONES DE PRODUCTOS DERIVADOS EN LOS MERCADOS FINANCIEROS
(Billones [10^{12}] de dólares)

Instrumento	*1993*	*1994*	*1995*
Futuros sobre tipos de interés	177,3	271,7	266,3
Opciones sobre tipos de interés	32,8	46,7	43,3
Otros	17,6	22,0	24,1
TOTAL	227,8	340,4	333,8
PIB	23,0	25,0	28,2
Ratio: Total/PIB	9,86	13,6	11,8

Fuente: Bank for International Settlements, *Annual Report, 1997.*

26.6. Reflexiones finales sobre las nuevas dimensiones que alcanza el juego económico y su incidencia sobre el proceso de explotación y deterioro de los recursos planetarios

Empecemos recordando que la emancipación de lo económico como dominio autónomo desgajado de lo político, se apoyó en un desplazamiento de la noción de riqueza, que recortó la importancia de los «bienes raíces», antes ligados al poder sobre los hombres, en favor del predominio de la riqueza mobiliaria y de los valores pecuniarios[70]. Si la ruptura del vínculo entre riqueza inmobiliaria y poder permitió que lo económico se desgajara de lo político y posibilitó el desarrollo del capitalismo, el Estado mantuvo, a través de la recaudación de impuestos y del derecho de acuñación de moneda, su control sobre lo económico. En los últimos tiempos estamos asistiendo a la ruptura del estrecho vínculo que unía al Estado con el dinero, al permitir a las empresas privadas su creación, en un sentido amplio. Este cambio más o menos sordo y paulatino está llamado a tener tanta importancia o más que el anterior, al despojar ahora al Estado del poder privativo que mantenía sobre el dinero y, con ello, de un medio básico para reforzar su poder político. Este cambio se encuentra en la base

[70] Como señala Louis Dumont, «al romperse el vínculo entre la riqueza inmobiliaria y el poder, la riqueza mobiliaria devino plenamente autónoma, no sólo en sí misma, sino como forma superior de la riqueza en general [...]: en suma, se vio emerger una categoría autónoma y relativamente independiente de riqueza. Solamente a partir de aquí pudo hacerse una distinción clara entre lo que llamamos «político» y aquello que denominamos «económico. Distinción que no conocían las sociedades tradicionales». DUMONT, L. (1977), *Homo aequalis. Genèsse et épanuissement de l'idéologie économique*, París, Gallimard (hay traducción de Taurus, Madrid, 1982).

del nuevo predominio de la economía sobre la política y de las organizaciones empresariales sobre las estatales.

Siendo, según Smith, el enriquecimiento el objetivo que orienta la actividad económica de toda empresa e individuo, hay que reconocer que la creación de dinero brinda la forma más directa de conseguirlo, a la que se añade la compra-venta de activos en fase de rápida revalorización. Durante largo tiempo, la creación de dinero constituyó un privilegio exclusivo de la autoridad política, lo que evidenciaba el predominio de ésta sobre los «agentes económicos»[71]. La posibilidad de mantener inmovilizada sólo una pequeña parte de los depósitos otorgó a los bancos privados la posibilidad de crear «dinero bancario», bajo la tutela del Estado y cumpliendo la normativa dictada por éste. No obstante, en los últimos tiempos hemos astistido a la eclosión de un sinnúmero de activos financieros líquidos que se suman al «dinero bancario» en el ejercicio de las funciones que venía desempeñando el dinero propiamente dicho. Las estadísticas financieras ya no pueden definir la «oferta monetaria» de los países con una sola cifra inequívoca, sino que se ven obligadas a ofrecer diferentes versiones de la misma, según se incluya una gama más o menos amplia de activos financieros en función de su grado de liquidez.

Hoy día son las empresas privadas en general las que contribuyen, ya al margen de la banca, a la diversificación de activos mencionada, emitiendo «papel» en los mercados financieros, que trascienden las fronteras nacionales para tejer el proceso de «globalización» económica del que tanto se habla. Lo cual está modificando la cultura empresarial, desde el modelo tradicional todavía presente en los manuales, que se orientaba a competir en la fabricación de determinados productos de calidad, hacia aquel otro en el que predomina la consideración meramente instrumental de la empresa para conseguir medios de financiación y de presión. Así como a la sustitución de los antiguos fines de acumular capital a partir de actividades económicas ordinarias, por las de la acumulación de información y beneficios vía la operativa en los mercados financieros para realizar, en términos de liquidez, plusvalías o beneficios anteriores no distribuidos o para conseguir medios de financiación. El dinero mismo, y su acumulación, están perdiendo el papel tan determinante que habían adquirido: el imperio del dinero se extendió, en principio, facilitando las transacciones y haciendo obsoleto el trueque; pero la expansión y diversificación de los activos líquidos, y la transferencia electrónica de fondos, tiende a hacer obsoleta la

[71] Los códigos penales de los países han venido aplicando así penas durísimas a los falsificadores de moneda, que se presuponía atentaban contra la comunidad al utilizar en beneficio propio esta prerrogativa que se consideraba exclusiva del Estado (y que sigue siendo privativa de éste, pero que tiene una importancia hoy minimizada por la enorme multiplicación de otros activos financieros líquidos y medios de pago electrónicos a la que estamos asistiendo).

tenencia de dinero por motivos de transacción y precaución; todo va camino de reducirse a anotaciones de activos (y pasivos) financieros, es decir, de no dinero; el consumo conspicuo, desenfrenado y ostentoso puede apoyarse así en un endeudamiento crónico; lo mismo que el poder se apoya hoy más en la capacidad de emitir pasivos o «valores virtuales» que todo el mundo acepta (y que son por tanto convertibles en dinero) que en la acumulación del dinero mismo mediante actividades «productivas» ordinarias.

Es sabido que la expansión y el crecimiento económico *real* de un país aparece ligado, en pura teoría, al aumento de los activos y pasivos *financieros* que emite ese país para reflejar, en el ámbito financiero, el crecimiento del *stock* de capital físico[72]. Sin embargo, la fuerte discrepancia antes observada entre el crecimiento de las magnitudes económicas «reales» y las financieras, llevó ya a F. Soddy a argumentar, a principios de siglo, que razonando de este modo se estaba cayendo en el error de confundir la vara de medir la riqueza (el dinero como pasivo financiero) con la riqueza material y, de esta manera la expansión de la deuda con el crecimiento de la riqueza[73]. A través del dinero no sólo hemos asignado un «equivalente» financiero a la riqueza real, sino que hemos dejado atrás las restricciones impuestas al aumento de la riqueza, para razonar en términos de valores monetarios, que, al no tener una dimensión física, pueden expandirse ilimitadamente. Pero el dinero, al igual que los otros activos financieros, constituye un pasivo para aquella institución que lo emite. Por tanto, más que ser un signo de riqueza, el dinero se convierte en «[...] un símbolo de endeudamiento» –una deuda. El dinero es una forma de deuda de la comunidad o de la nación, poseída por el individuo y debida por la comunidad, intercambiable a la demanda en riqueza por transferencia voluntaria de otro individuo que quiere separarse de la riqueza a cambio de dinero. El valor del *stock* total de dinero no es determinado por el *stock* de riqueza en existencia (o por el flujo de la nueva producción), sino, de una manera curiosa, por la riqueza que los individuos piensan que existe pero que en realidad no existe: es lo que F. Soddy llamó *"riqueza virtual"*»[74]. El problema, desde luego, es que la riqueza física carece de las atractivas «vir-

[72] «El crecimiento económico va acompañado de una paralela expansión de los activos y pasivos financieros. Así se genera una superestructura financiera conexionada con la riqueza material del país». ROJO, L. A. (1976), *Renta, precios y balanza de pagos*. Madrid, Alianza, p. 59.

[73] SODDY, F. (1926), *Wealth, Virtual Wealth and Debt*, Londres Allen and Unwin. (Una versión sintética de las aportaciones de Soddy a este respecto puede encontrarse en la selección de textos editada por J. MARTÍNEZ ALIER: *Los principios de la economía ecológica. Textos de P. Geddes, S. Podolinsky y F. Soddy*, Madrid, Fundación Argentaria-Visor Dis., 1995.) Abundando en esos aspectos, ha sido H. Daly quien recientemente ha efectuado una relectura de las propuestas de Soddy en el epílogo a su libro, en colaboración con J. Cobb, *For the Common Good*. La versión castellana de este epílogo tiene por título: «Dinero, deuda y riqueza virtual», *Ecología Política*, n.º 9, pp. 51-75.

[74] DALY, H., *op. cit.*, p. 61.

tudes» del interés compuesto, que axiomáticamente acompaña a la riqueza monetaria; o también que, frente al crecimiento siempre limitado o transitorio de la riqueza física, se antepone el crecimiento exponencial característico del mundo financiero. Uno de los problemas fundamentales que surge con la expansión incontrolada del dinero o de los activos financieros líquidos, en general, es que la relación deuda/riqueza se acaba quebrando. En efecto, el poder de las empresas para crear dinero en sentido amplio, o para emitir pasivos financieros que los mercados aceptan, facilitando así su liquidez, está escapando cada vez más al control de la sociedad, lo que permite la expansión de los activos (pasivos) financieros a un ritmo que los distancia cada vez más del *stock* de riqueza física disponible y, dentro de ésta, del «capital natural» a cuya regresión asistimos día a día. Por ejemplo, estimaciones como la del valor monetario medio de los servicios prestados por los ecosistemas, realizada por Constanza y otros[75] en 33 billones (10^{12}) de dólares (de 1994), están llamadas a irse quedando pequeñas, no ya con relación al PIB agregado de los países, que crece a una tasa anual media del 7,5%, alcanzando en 1995 a 28 billones de dólares corrientes, sino sobre todo con relación al total de activos financieros planetarios que, como vimos, crecían a una tasa anual del 14% y alcanzaba en ese mismo año los 78 billones de dólares (excluidos los productos financieros «derivados»). Lo que supone una presión creciente de la capacidad de compra sobre los recursos naturales, ambientales o territoriales planetarios, que tiende además a utilizarlos atendiendo a su simple coste de extracción o uso y no al de reposición. Lo cual se agrava, si se tiene en cuenta que la distribución del patrimonio se concentra más que la de la renta y que ambas tienden a empeorar y a polarizarse cada vez más a escala planetaria.

[75] CONSTANZA *et al.* (1997), «The Value of World's Ecosystem Services and Natural Capital», *Nature*, vol. 387, pp. 81-89. También publicado en *Ecological Economics*, 25 (1998), junto con artículos críticos de otros autores. En un epílogo incluido en este número, Constanza y los otros autores de la estimación reconocen haberse confundido al tomar como punto de comparación un PIB planetario de hace diez años cifrado en sólo 18 billones. Sorprende que semejante error de bulto pasara desapercibido, no sólo con motivo de su publicación en una revista tan acreditada como *Nature*, sino de su divulgación por toda la prensa mundial. Ello es significativo de la ambigüedad que comportan tales ejercicios valorativos, que insensiblemente propicia un manejo poco riguroso de los otros agregados que deberían ser punto obligado de comparación. También refleja que no son muy habituales los razonamientos agregados a escala planetaria con un instrumental económico que pierde buena parte de su sentido a este nivel, al mostrar asimetrías tan manifiestas en su comparación con el mundo físico como las que se desprenden de las tasas de crecimiento antes mencionadas.

Bibliografía

ADAMS, J. (1997), «Globalization, Trade and Environment», *Globalization and Environment,* París, OCDE.

ANDERSON, K. y R. BACKHURST (dirs.) (1992), *El comercio mundial y el medio ambiente,* Madrid, Mundiprensa.

AYRES, R.U. y L.W. AYRES (1996), *Industrial Ecology,* R.U., Edward Elgar Publishing Ltd.

Bank for International Settlements (1997), *Annual Report,* Basilea.

BARRATT-BROWN, M. (1993), *Fair Trade. Reform and Realities in the International Trading System,* Londres, Zed Books.

BATTELLE COLUMBUS, H. HALLE, W. T. HANNA y otros (1975), *Evaluation of the Theoretical Potential for Energy Conservation,* USA, Dept. of Energy.

BOUSTED, I. y G. F. HANCOCK (1981), *Energy and Packaging,* Chichester, Ellis Horwood, ISBN 0-085312-206-7.

BOUSTEAD, I. y G. F. HANCOCK (1979), *Handbook of Industrial Energy Analysis,* Chichester, Ellis Harwood, ISBN 0-085312-064-1.

BUNKER, S. (1996), «Materias primas y la economía global: olvidos y distorsiones de la ecología industrial», *Ecología Política,* n.º 13, pp. 81-89.

Centro de Estudios de la Energía (1980), *Técnicas energéticas en la industria,* Madrid, Ministerio de Industria y Energía.

CHIOGIOJI, M. H. (1979), *Industrial Energy Conservation,* Nueva York, Marcel Dekker, ISBN 0-8247-6809-4.

CLEVELAND, C. J. y R. K. KAUFMANN (1997), «Forcasting Ultimate Oil Recovery and its Rate of Production: Incorporating Economic Forces into the Models of M. King Hubbert», en R. Constanza, Ch. Perrings y C. J. Cleveland, eds., *The Development of Ecological Economics,* Cheltenham, RU, Edward Elgar Publishing Ltd., pp. 316-345.

CONSTANZA *et al.* (1997), «The Value of World's Ecosystem Services and Natural Capital», *Nature,* vol. 387, pp. 81-89. También publicado en *Ecological Economics* (1998), núm. 25.

CORDEN, W. (1974), *Trade Policy and Economic Welfare,* Weatsheaf, Hewel Hampstead.

DALY, H. (1995), «Dinero, deuda y riqueza virtual», *Ecología Política, n.º* 9, pp. 51-75.

DALY, H. E. y Jr. COBB (1989), *Para el bien común. Reorientando la economía hacia la comunidad, el ambiente y un futuro sostenible,* México, FCE.

DALY, H. E. y R. GOODLAND (1994), «An Ecological-Economic Assessment of Deregulation of International Commerce under GATT», *Ecological Economics, n.º* 9.

DÍAZ-MIER, M. A. (1995), *Del GATT a la Organización Mundial de Comercio,* Madrid, Síntesis.

DUMONT, L. (1977), *Homo aequalis. Genèsse et épanuissement de l'idéologie économique*, París, Gallimard (hay traducción de Taurus, Madrid, 1982).

EBERLE, W. D. y F. G. HAYDEN (1991), «Critique of Contingent Valuation and Travel Cost Method for Valuating Natural Resources and Ecosystems», *Journal of Economic Issues*, Vol. XXV, n.º 3. (Traducción española en AGUILERA, F. y V. ALCÁNTARA, eds. (1995), *De la economía ambiental a la economía ecológica*, Barcelona, Icaria.

EKINS, P. (1995), «Tradding off the Future: Making World Trade Environmentally Sustainable», en B. Krishnan, N. Goodwin y J. Harris, eds. (1995), *A Survey of Ecological Economics*, Washington D.C, Island Press.

EKINS, P., *et al.* (1994), «Trade, Environment and Development: The Issues in Perspective», *Ecological Economics,* núm. 9

FITZGERALD, V. K. (1994), «Las finanzas internacionales y el problema de la regulación de los flujos de capital a escala internacional», en BERZOSA, C. (coord.), *La economía mundial en los 90: tendencias y desafíos,* Barcelona, Crítica.

FMI (1996), *Estadísticas financieras internacionales,* Washington, D.C.

FRENCH, H. (1991), «La reconciliación del comercio y el medio ambiente», en Worldwatch Institute (1991), *La situación del mundo,* Madrid, CIP-Apóstrofe.

GATT y OMC, *El Comercio Internacional,* Varios años.

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1983), «La teoría energética del valor económico: un sofisma económico particular», *El Trimestre Económico,* n.º 198, abril-junio.

GLADWIN, Th. (1987), «Environment, Development, and Multinational Enterprise», en Ch. PEARSON, ed., *Multinational Corporations, Environment, and the Third World,* Duke University Press.

GRAHAM, E. M. (1995), «Foreing Direct Investment in the World Economy», en IMF (1995), *Staff Studies for the World Economic Outlook,* Washington, D.C.

Greenpeace (1991), *The International Trade in Wastes. A Greenpeace Inventory,* Washington.

GYFTOPOULOS, E. P., L. J. LAZARIDIS y T. F. WIEDMER (1974), *Potential Fuel Effectivenes in Industry*, ISBN 0-88410-309-9-HB, Massachusetts, Ballinger Pub. Co.

HOUSTON J. y J. DUNNING (1976), *U.K Industry Abroad*, Londres, Financial Times Books.

IMF (1993), *International Capital Markets,* Washington, D.C.

IMF (1995), *International Capital Markets*, Washington, D.C.

IMF (1996), *Balance of Payments Yearbook*, Washington, D.C

IMF (1996) , *World Economic Outlook,* Washington, D.C.

IMF (1997), Committee on Balance of Payments Statistics, *Annual Report 1996*, IMF, Statistics Department.

INE, *Encuesta Industrial 1989-1992,* Madrid.

Journal of Marine Systems (1998), n.º 20, «Abyssal Seafloor Waste Isolation: A Technical, Economic, and Environmental Assessment of Waste Management Option», 210 pp.

KAPP, K. W. (1950), *The Social Costs of Private Enterprise.* (1963: 2.ª Ed. revisada y ampliada con el título *Social Costs of Business Enterprise*, Londres: Asia Publishing House (Traducción española en Barcelona, Oikos, 1966).

KRUGMAN, P. (1987), «Is Free Trade Passé?», *Journal of Economic Perspectives.* (2), 1.

KRUGMAN, P. (1995), «Growing World Trade: Causes and Consequences», *Brookings Papers on Economic Activity*, núm. 1

KRUGMAN, P. y M. OBSTFIELD (1994), *Economía internacional: teoría y política*, Madrid, MacGraw-Hill.

LEACH, G. (1976), *Energy and Food Production*, Londres, IPC Science and Technology. Hay versión en castellano del Servicio de Publicaciones del Ministerio de Agricultura (1981).

MARGALEF, R. (1998), «En busca de un marco conceptual en el que situar las realidades y perspectivas que aquejan a nuestra sociedad actual», en NAREDO, J. M. dir., *Economía, ecología y sostenibilidad en la sociedad actual*, Universidad de Verano de Castilla y León, Segovia, 27-31 de julio de 1998.

MARTÍNEZ ALIER, J. y K. SCHLÜPMANN (1991), *La economía ecológica*, México, FCE.

MARTÍNEZ ALIER, J. y K. SCHLÜPMANN (1991), *La ecología y la economía.* México, FCE.

NAREDO, J. M. (1987, reed. 1996), *La economía en evolución*, Madrid, Siglo XXI.

NAREDO, J. M. (1994), «El proceso industrial visto desde la economía ecológica», *Economía Industrial*, núm. 297, mayo-junio 1994.

NAREDO, J. M. (1996), *La burbuja inmobiliario-financiera en la coyuntura económica reciente (1985-1995),* Madrid, Siglo XXI.

NAREDO, J. M. (1997), «Configuración y crisis del mito del trabajo», en varios autores, *¿Qué crisis? Retos y transformaciones de la sociedad del trabajo*, San Sebastián, Gakoa Liburuak, pp. 51-73.

OCDE (1996), *The Global and Environmental Goods and Services Industry*, París.

OCDE, *Economic Outlook* (1997), París.

OCDE, *Financial Statistics* (1997), París.

ONU (1983), *Las empresas transnacionales en el desarrollo económico*, Nueva York.

ONU (1997), *Estudio económico y social mundial, 1997*, Nueva York
ONU, *International Trade Statistics Yearbook*, Nueva York, varios años.
PNUD (1997), *Informe sobre el Desarrollo Humano, 1997.*
QUESNAY, F. (1758), *«Le Tableau Economique» y otros escritos económicos,* Ediciones de la Revista de Trabajo, 1974, p. 78.
ROJO, L. Á. (1976), *Renta, precios y balanza de pagos,* Madrid, Alianza
Secretaría General Técnica (1995), «El comercio mundial en 1995», *BICE,* n.º 2498.
SODDY, F. (1926), *Wealth, Virtual Wealth and Debt,* Londres, Allen and Unwin.
SUBIELA, V. (1995), *Análisis de la energía incorporada en diversos sectores industriales*, Zaragoza, Fundación CIRCE.
UNCTAD (1995), *Acontecimientos recientes en la esfera de las inversiones internacionales y las Empresas Transnacionales,* Ginebra.
UNCTAD (1996), *World Investment Report 1996: Investment, Trade and International Policy Arrangments,* Nueva York.
United Nations, *Demografic Yearbook*, Nueva York.
VEBLEN, T. (1899), *The Theory of Leissure Class. An Economic Study of Institutions*, Londres, Mac Millan Co. (Traducción en español del FCE, México, 1995).
WACKERNAGEL, M. (1996), *Our Ecological Footprint. Reducing Human Impact on the Earth*, Gabriola Island, BC, New Society Publishers.
WEIZÄCKER, E. U., A. LOVINS y L. H. LOVINS (1996), *Factor 4. Informe al Club de Roma,* Barcelona Galaxia Gutemberg/Círculo de Lectores.
WILKINS, M. (1970), *The Emergence of Multinational Enterprise: American Bussines Abroad from the Colonial Era to 1914.* Cambridge Mass., Harvard University Press.
World Bank (1994), *World Development Report,* Nueva York, Oxford University Press.
World Bank (1996), *World Debt Tables: 1996,* Washington, D.C.
World Bank (1997), *World Economic Outlook,* Washington, D.C.

EPÍLOGO

José Manuel Naredo y Antonio Valero

Hemos visto que la civilización industrial, al utilizar el razonamiento monetario –que sintetiza el agregado de Renta o Producto Nacional– como guía suprema de la gestión, resalta la dimensión creadora de valor y utilidad del proceso económico, pero cierra los ojos al análisis de los deterioros que infringe en su entorno físico y social. La economía estándar, al circunscribir su reflexión al universo de los valores monetarios, deja de lado lo que ocurre con los recursos naturales, antes de ser valorados, y con los residuos artificiales generados, que también carecen de valor. Se privilegia así el análisis de los flujos monetarios, desatendiendo la dimensión física y la incidencia patrimonial de los procesos. Estamos así en presencia de un instrumental teórico que gobierna la gestión sin procesar de modo sistemático la información sobre los deterioros que dicha gestión infringe en el patrimonio natural, ya sea por extracción de recursos o por emisión de residuos; de un instrumental que registra solamente el coste de extracción y de manejo de los recursos naturales y no el de reposición, favoreciendo así dichos deterioros.

La presente investigación aporta el instrumental teórico necesario para llenar de forma clara y cuantitativa el vacío de información físico y patrimonial antes mencionado en lo tocante al uso de los recursos minerales que –como se analiza en el capítulo 6– aporta el principal *input* en tonelaje del que se nutre la civilización actual. No se trata de imputar sin más valores monetarios al «capital mineral» de la Tierra, sino de ofrecer puntos de apoyo físicos capaces de orientar dicha valoración con conocimiento de causa de los costes físicos que ocasiona su uso y dispersión. Difícilmente cabe valorar solventemente un *stock* de capital físico cuando se desconoce su coste de reposición. La metodología de cálculo del coste físico de reposición de los recursos minerales que aquí se propone, supone el primer paso para hacer que la analogía entre «capital natural» y el *producido* por el hombre sea, en este caso, algo más que una metáfora vacía de contenido cuantitativo concreto. La información ofrecida sobre el coste físico de reposición del *stock* del «capital mineral» de la Tierra, constituye también un paso necesario para orientar solventemente los instrumentos económi-

cos que inciden sobre su valoración, teniendo en cuenta el deterioro físico ocasionado.

Además, la metodología propuesta permite completar los enfoques de la *economía ecológica* que analizan «desde la cuna hasta la tumba» el «ciclo de vida» de los productos, al razonar también «desde la tumba hasta la cuna», considerando la posibilidad y el coste de cerrar el ciclo completo de materiales, reponiendo los recursos naturales utilizados. Pues tal y como venían aplicándose dichos análisis tampoco alcanzaban a dar cuenta del deterioro completo que ocasiona el proceso económico sobre el patrimonio natural, siendo necesario ampliarlos así para restablecer el circuito de información, roto por el análisis económico ordinario, sobre las implicaciones del comportamiento material de la sociedad actual. Es evidente que desarrollar un sistema de contabilidad energética global, que incluya un análisis sistemático de los costes de reposición de los recursos naturales e integre todos los productos derivados, sería un paso importante para superar el oscurantismo sobre el deterioro ecológico en el que nos tiene sumidos el análisis económico estándar. Valga nuestra propuesta para incentivar tal desarrollo, cuya materialización exigiría la puesta en marcha de grupos de trabajo que permitieran unificar consensuadamente, mediante convenciones y acuerdos internacionales (como los que dieron lugar a los sistemas de Cuentas Nacionales), los presupuestos metodológicos y las reglas de aplicación de los nuevos sistemas contables. Ello exigiría una voluntad política firme de ampliar los criterios económicos que han venido orientando el funcionamiento de la sociedad industrial y una dotación de medios en consonancia. Haría falta promover estas realizaciones con un apoyo similar al que se otorga, por ejemplo, en el proyecto GENOMA a la búsqueda de los componentes bioquímicos últimos del ser humano, por no hablar de otros empeños internacionales más dotados y extravagantes.

Con todo, incluir la información sobre los «costes sombra» de reposición de los recursos naturales en el cálculo económico es condición necesaria, pero no suficiente, para alterar los mecanismos que en la sociedad actual apuntan hacia el creciente deterioro del patrimonio natural. La Tercera Parte de este libro analiza estos mecanismos, concluyendo que el uso de los recursos naturales, teniendo en cuenta únicamente el coste de extracción y no el de reposición, es sólo el primer eslabón de una asimetría creciente que relaciona la valoración monetaria y el coste físico en la cadena de procesos que conduce a la venta final del producto, a la vez que los ingresos tienden a distribuirse en proporción inversa a la penosidad del trabajo que retribuyen. La tasa de revalorización creciente por unidad de coste físico que se observa como regla general de comportamiento a medida que los procesos avanzan hacia las últimas fases de elaboración y comercialización, unida a la creciente especialización que se observa, arrastran irremisiblemente hacia un panorama territorial y social creciente-

mente polarizado. El sistema de flujos financieros interaccionales amplifica esta polarización al ofrecer a las naciones y entidades más prósperas posibilidades adicionales de financiación que crecen a tasas muy superiores a las de los agregados de producto o renta. De esta manera, habría que cambiar las reglas del juego que informan el funcionamiento de los sistemas de valoración y de financiación actuales si queremos evitar que sigan configurando, dentro y fuera de los países, una geografía cada vez más escindida entre núcleos de atracción de capitales y productos y áreas de apropiación y vertido y alimentando simultáneamente procesos de *desarrollo económico* y de *deterioro ecológico*.

Estimamos que conocer las causas de nuestros males es el primer paso para resolverlos, así como tener clara conciencia de los conflictos es el primer paso para gestionarlos. Por ello hemos orientado la reflexión hacia aspectos fundamentalmente aclaratorios de la antinomia que enfrenta economía y ecología y el evidente conflicto entre *desarrollo económico* y *deterioro ecológico*, así como hacia la elaboración constructiva de propuestas que apuntan a superarlos. Hemos preferido, en suma, enunciar con crudeza las causas, los conflictos y los remedios, llevando nuestro discurso más allá de las soluciones eclécticas y de la desgana de revisión conceptual propias del medioambientalismo banal en boga.

NOTA SOBRE LOS AUTORES

OSCAR CARPINTERO REDONDO. Licenciado en Ciencias Económicas por la Universidad de Valladolid, es postgraduado en Economía de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente por la Universidad de Alcalá-Fundación Argentaria. Actualmente es Becario de Investigación del Ministerio de Educación de la Facultad de Económicas de la Universidad de Valladolid así como colaborador del Programa «Economía y Naturaleza» de la Fundación Argentaria y del área de Medio Ambiente de la Fundación 1.º de Mayo.

SARA ECHEVERRÍA GALAÑENA. Licenciada en Ciencias Económicas y Empresariales por la Universidad de Deusto y Máster en Economía de los servicios por la Universidad Autónoma de Madrid. Actualmente es coordinadora de los Programas «Igualdad» y «Economía y Naturaleza» de la Fundación Argentaria. Asimismo ha trabajado también en el Departamento de Planificación Estratégica de la Central Corporativa de Argentaria.

JOSÉ MANUEL NAREDO PÉREZ. Doctor en Ciencias Económicas y Estadístico Facultativo, trabaja como Director del Programa «Economía y Naturaleza» en la Fundación Argentaria. Destacado especialista en economía ambiental y de los recursos naturales, cuenta con una amplia experiencia en estudios macroeconómicos que combinan reflexiones de fondo sobre los fundamentos de la ciencia económica con análisis concretos sobre el funcionamiento de los sistemas agrarios, urbanos e industriales y sobre su relación con los recursos naturales.

ANTONIO ORTIZ RAMOS. Doctor Ingeniero de Minas por la Escuela Técnica Superior de Madrid. Ha pertenecido a la Empresa Nacional ADARO de Investigaciones Mineras (1963-1993). En ese periodo trabajó en las áreas de prospección minera dirigiendo equipos y proyectos de investigación sobre diferentes sustancias minerales en territorio nacional. Ha participado como experto en las reuniones del Comité de Naturaleza Consultiva (CAN) de la Dirección General XII de la Comisión

de las Comunidades Europeas, en Bruselas, en el Programa de I+D sobre Materias Primas y Reciclado para valoración y supervisión de los proyectos presentados a este Programa. Es socio fundador de Economía de los Recursos Naturales S.L. (ECONATURA), en la que continúa relacionado con trabajos de investigación minera y de protección del medio ambiente. Desde esta empresa ha estado colaborando, hasta 1996, con el Gabinete Técnico de la Línea de Ayuda a la Investigación Minera (LEIM) en Argentaria.

LIDIA RANZ VILLARINO. Licenciada en Ciencias Físicas por la Universidad de Zaragoza. Desde 1994, forma parte de la Fundación CIRCE, donde ha trabajado en el desarrollo de indicadores exergéticos que permitan abordar una cuantificación exergética de los recursos naturales terrestres. Éste ha sido el objetivo central de la tesis doctoral que está a punto de concluir. También ha investigado las relaciones entre el análisis exergético y el análisis económico, aplicando el primero para evaluar la sostenibilidad de complejos urbano-industriales.

VICENTE SUBIELA ORTÍN. Ingeniero Industrial por la Universidad de Zaragoza. Ha realizado investigaciones sobre Medio Ambiente y Energía, costes energéticos de productos y análisis de ciclos de vida. Ha seguido cursos de doctorado y postgrado de la Universidad de Alcalá sobre Energía, Medio Ambiente y Economía. En la actualidad trabaja como Técnico de Proyectos de Desalación y Energías Renovables.

DOLORES ROMANO MOZO. Ingeniero Agrónomo por la Universidad Politécnica de Madrid. Especialista en cuestiones ambientales, ha trabajado como Asesora de Greenpeace en temas relacionados con productos tóxicos y peligrosos.

ANTONIO VALERO CAPILLA. Catedrático de Energética –Máquinas y Motores Térmicos– de la Universidad de Zaragoza. Es director de la Fundación CIRCE, un centro de investigación compuesto por sesenta investigadores dedicados al ahorro y la optimización energéticas así como al fomento de las energías renovables. Desde 1982 está trabajando en los fundamentos de la Termoeconomía, relacionando la idea de irreversibilidad con la de coste. Su labor investigadora ha sido galardonada con la medalla de oro ASME Internacional «James H. Potter» (la Sociedad de Ingeniería Mecánica más importante y prestigiosa del mundo). También ha recibido tres premios «Edward F. Obert» de ASME en sistemas Energéticos Avanzados y el premio Pedro Cerbuna al mejor grupo de investigación de la Universidad de Zaragoza.

libro aborda el análisis de la sociedad actual desde un enfoque ómico más amplio del habitual, con el fin de cuantificar los costes fuente de «deterioro ecológico» en relación con los logros *mone-* del «desarrollo económico» estudiados por el enfoque económi- *ndard*. Tras precisar y contextualizar la orientación metodológica investigación, se empieza por estudiar el metabolismo de la so- d industrial, constatando que se apoya básicamente en la extrac- le rocas y minerales de la corteza terrestre. Se propone después etodología que permite cifrar el coste de reposición del «capital al» de la Tierra y plantear, así, en términos meridianamente itativos, el conflicto entre eficacia parcial y sostenibilidad global o de la sociedad actual. También se estudia la asimetría que se va entre el coste físico y la valoración monetaria a medida que a el proceso económico hasta las fases de comercialización y de los productos finales, que es, a su vez, fuente de deterioro ntal y de desigualdades sociales y territoriales. Por último, se a el papel que desempeña el comercio internacional y la globali- a económica en estos procesos.

ISBN 84-7774-981-7

9 788477 749813

11

J. M. Naredo y A. Valero

Desarrollo económico y deterioro ecológico