

# TEMA DEL DÍA

## RECURSOS GEOLÓGICOS, SOSTENIBILIDAD Y MEDIO AMBIENTE *Geological resources, sustainability and environment*

*José Antonio Pascual Trillo (\*)*

### RESUMEN

*Se analizan algunas cuestiones sobre la relación entre economía, recursos geológicos y sostenibilidad. Se sugiere para ello la adecuación de una perspectiva sistémica que permita identificar los recursos naturales con flujos de materia y energía que circulan desde los sistemas naturales hacia los sistemas humanos. Finalmente, se introduce un esquema sencillo para simular la toma de decisiones sobre la gestión de recursos minerales, con fines didácticos.*

### ABSTRACT

*Some questions are analyzed on the relation between economy, geological resources and sustainability. The adequacy of a systemic perspective that might help to identify the natural resources with flows of matter and energy circulating from the natural systems towards the human systems is suggested. Finally, a simple scheme that simulates the complex decision making system on the minerals resources management is presented with didactic targets.*

**Palabras clave:** *Recursos geológicos, Economía Neoclásica, Economía Ecológica, uso sostenible, sostenibilidad.*

**Keywords:** *Geological resources, Neoclassic Economy, Ecological Economy, sustainable use, sustainability.*

### “ES LA ECONOMÍA, ESTÚPIDO”

En 1992, uno de los asesores de la campaña presidencial de Bill Clinton resumió en tres puntos los mensajes electorales, pinchándolos en los lugares más visibles de sus oficinas electorales. Uno de aquellos mensajes decía textualmente: “*La economía, estúpido*”. Era un recordatorio sobre la falta de atención que su oponente -y aún presidente-, Bush padre, concedía a los problemas personales de los votantes: aspectos que tenían básicamente que ver con la economía doméstica. Como es sabido, a pesar del empeño de Bush por centrar los debates en los sentimientos patrióticos aprovechando la primera Guerra del Golfo y la idea de una potencia todopoderosa en la escena internacional, las urnas dieron finalmente la victoria al candidato demócrata. “*Es la economía, estúpido*”, pasó a ser, desde entonces, un eslogan afortunado a la hora de recordar la importancia que los temas económicos tienen para las personas.

Los recursos forman parte del bagaje de conceptos originalmente económicos, nacidos cuando la economía se sentía más próxima a las ciencias de la naturaleza. Sin embargo, la refundación episte-

mológica de la economía en la teoría neoclásica de William Stanley Jevons y Leon Walras surgida en el transcurso del siglo XIX al XX terminará arrinconando buena parte de las ideas de los economistas fisiócratas anteriores (Naredo, 1987). Los nuevos economistas conciben la noción de la riqueza –el objeto esencial de sus preocupaciones– desde una concepción ligada al valor del intercambio. La idea ya había comenzado a fraguarse con la llegada de los economistas clásicos (Adam Smith, Thomas Malthus, John Stuart Mill, David Ricardo,...), un pelotón de pensadores situados entre medias de los fisiócratas y los neoclásicos. El definitivo empuje de los últimos y su concepción del valor y la utilidad quedarán dirigiendo casi en solitario, con diferentes versiones y enfoques, el timón de la economía durante el siglo XX.

Así, los recursos naturales, tan importantes para los fisiócratas que veían en ellos el factor principal sobre el que se erguía la riqueza de las naciones, perderán importancia entre las preocupaciones de la economía posterior. De pensarse, con Quesnay, que la producción de bienes y la generación de riqueza eran producto de la transformación de los materiales y los alimentos procedentes de la tierra (algo

(\*) Departamento de biología y geología, IES El Escorial, Avda La Fresneda s/n, 28280 El Escorial (Madrid).  
jpascual@aepect.org

que mantuvieron, con matices, los economistas clásicos; de hecho, John Stuart Mill fue el primero en plantear la necesidad del estado estacionario), se saltará al otro extremo. En 1874, Leon Walras, refiriéndose a los fisiócratas, escribía: “para ellos, la idea de riqueza estaba esencialmente ligada a la idea de materialidad (...) Pero es precisamente este punto de vista el que es erróneo. Hay que designar con el nombre de riqueza social toda cosa, material o inmaterial, que vale y que se intercambia”. La tradicional adscripción de los factores de producción a los tres conceptos clásicos de tierra, trabajo y capital –agrupando el primero a los recursos naturales– se abandonará al considerarse la tierra como un factor sustituible y producible a partir del capital. Así, para W. S. Jevons los recursos naturales “no se incluyen bajo el término riqueza, tal y como es usado en economía, excepto incidentalmente”.

Toda la economía del siglo XX ha seguido los derroteros de aquella senda, por más que lúcida y demolidoramente nuestro buen Antonio Machado nos advirtiera con aquello de que “todo necio confunde valor y precio”. Así, hoy, los recursos naturales solo ejercen cierto atractivo sobre el economista moderno si demuestran un valor de cambio que sea calculable con los instrumentos económicos al uso, integrándose así entre los “legítimos” factores de riqueza económica.

Es indudable que sobre esa base conceptual se ha erigido una compleja maquinaria de pensamiento y prácticas económicas que han acompañado a la multiplicación vertiginosa del valor de una riqueza económica estimada mediante indicadores a menudo sospechosos, como el PIB (Producto Interior Bruto); pero no es menos cierto que las lacras generadas, en términos de degradación ambiental y de desigualdad social, están haciendo volver los ojos a algunos hacia los abandonos conceptuales del pasado. Y entre estos abandonos destaca el del valor intrínseco de los recursos naturales.

Así, buena parte de las críticas planteadas por la economía ecológica o economía de la sostenibilidad se han centrado en la falacia de los supuestos “avances” del cambio de visiones e intereses de la economía neoclásica. Por su parte, la más moderada y reformista economía ambiental reconoce también ciertos excesos cometidos por el sesgo utilitarista, buscando su reparación con la integración de los costes ambientales en la valoración económica, a los efectos de que se tengan en consideración y se valoren en algún grado cosas tan fundamentales como los servicios ecológicos que, de puro esenciales, son considerados como externalidades por la teoría neoclásica (es decir, como algo externo y extraño al sistema económico). El empeño de arreglo por esta vía reformista, sin embargo, está resultando más difícil de lo esperado.

Ya hace tiempo, Nicholas Georgescu-Roegen (1975) acusaba con pruebas a la economía neoclásica de ignorar la segunda ley de la termodinámica en su afán obsesivo por construir “una ciencia que se ajustara al modelo mecanicista” (Jevons declaró

que pretendía construir “una mecánica de la utilidad y el lucro”). Para Georgescu-Roegen, la economía neoclásica ejerce desde entonces el papel del ingenuo y patético inventor encantado con su prototipo de “móvil perpetuo”, a todas luces fraudulento (Fig. 1).

En el actual ámbito de preocupación por el fracaso de la economía al tratar con la naturaleza, la

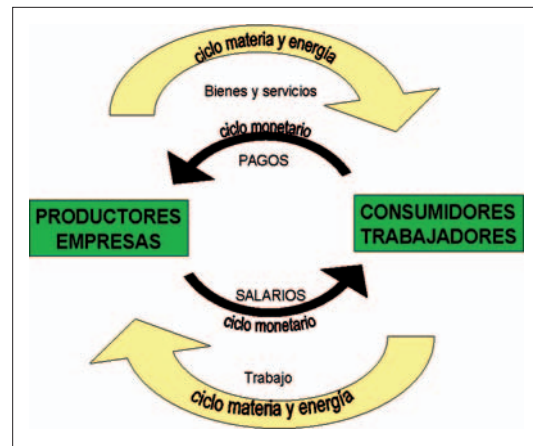


Fig. 1. La economía interpreta las relaciones entre productores (empresas) y consumidores (trabajadores) como el intercambio de dos ciclos que giran en sentido contrario: el ciclo de movimientos monetarios (compras y salarios) y el de materia y energía (trabajo y bienes). Esta visión simplificada representa los dos ciclos sin fin y sin entorno (no existe el medio ambiente), lo que ha sido criticado como un esquema contradictorio con las leyes de la termodinámica (segunda ley de la entropía) y enfrentado a cualquier concepción sistémica y ambiental.

diferencia que media entre quienes apuestan por la ruptura (la economía ecológica) y los que se alinean en un campo más reformista (los economistas ambientales) está en la esperanza de los segundos de poder salvar muchos muebles del edificio neoclásico con la invención de nuevos métodos de valoración económica dentro del proclamado intento de “internalizar las externalidades”, mientras que los primeros creen que solo queda empezar a construir el nuevo edificio de una economía que incluya entre sus cimientos los conocimientos generados por las ciencias naturales.

Tal vez hoy la exitosa frase de aquel avisado asesor electoral de Clinton debiera verse reemplazada por otra que dijera: “es la naturaleza, estúpido”, advirtiéndonos con ello que de nada sirve tejer un enjambre luminoso de teorías y prácticas económicas si a la vez se ignora olímpicamente la obstinada tendencia del mundo por cumplir con sus propias leyes naturales. Como nos dejara escrito hace un cuarto de siglo el que fuera nuestro ecólogo más influyente: “Si prescindieramos de la crítica de la ecología, podemos llegar a empeñarnos en proyectos vanos de inventar un mundo nuevo que difícil-

mente funcionaría” (Margalef, 1983). Donde pone “ecología” podemos escribir de forma más genérica: “ciencias naturales”.

En otro caso, tal vez la debatida frase finalmente desemboque en una aún más directamente hiriente: “es la estúpida economía”.

## LOS RECURSOS GEOLÓGICOS COMO RECURSOS NATURALES

Los recursos geológicos son, obviamente, recursos naturales procedentes de la geosfera, esa ilusión conceptual que se identifica con todo lo inerte y natural de la Tierra. La Real Academia de la Lengua define recurso como “conjunto de elementos disponibles para resolver una necesidad o llevar a cabo una empresa”. Aparece ya ahí la noción esencial e inseparable del término: la utilidad. Es bueno detenerse algo en esta reflexión, ya que a menudo se presentan los recursos naturales desde una perspectiva aparentemente esencialista, como si la categoría de recurso fuera determinada por la condición misma del objeto y no por su utilidad para una sociedad y un momento dados. Esta claro que, por ejemplo, el petróleo no ha sido un recurso ni de la importancia ni tampoco de la utilidad que tiene en la actualidad para la sociedad industrial (aunque se haya usado en muchas culturas desde tiempos inmemoriales para calafatear barcos) y aún es más evidente la relatividad utilitaria de la expresión “recurso natural” al aplicarla al caso del uranio.

Desde una perspectiva algo más técnica se pueden observar dos tipos de conceptos relacionados entre sí y amparados bajo la expresión de *recursos naturales*: de un lado, la concepción más económica, en la que son contemplados como un tipo de recursos económicos o factores de producción, junto al capital y el trabajo, cuyo sentido reside en su papel de productores de bienes y servicios; de otro, la concepción más ecológica y tal vez más ligada al origen etimológico del término, que desde el *recurrere* latino viene a querer decir “volver al lugar de origen” (Ramos et al., 1998). Esta segunda concepción enlaza particularmente con la noción de los recursos naturales renovables y, en especial, de los biológicos y permite un uso aplicado a cualquier tipo y nivel de agrupamiento de los seres vivos (poblaciones, especies, comunidades) y no sólo al caso humano.

Los ejemplos de recursos geológicos que más inmediatamente acuden a la cabeza tienen, no obstante, un carácter no renovable: son los recursos minerales y las rocas. Poseen un indudable sesgo de utilidad económica. Sin embargo, desde una concepción más amplia, los recursos geológicos también incluyen las aguas subterráneas y superficiales, la energía del oleaje o la del viento; todos los cuales conllevan la idea de renovabilidad. Para revisar este concepto es bueno dar un paso más en la definición conceptual de los recursos naturales y penetrar en el territorio de los enfoques de sistemas que permiten una concepción dinámica y ambiental (Pascual, 2000).

Desde esta perspectiva, los recursos vienen a ser flujos de materia o energía (e incluso de información) que circulan desde los sistemas naturales (geosfera, ecosfera,...) hacia los subsistemas humanos. Estos flujos son dirigidos y gestionados por los mismos sistemas humanos, de manera que los recursos son la respuesta real a demandas de materia y energía que tienen las sociedades humanas. Esta matización es importante ya que existe otro tipo de interacción muy diferente entre los sistemas naturales y los humanos: los efectos (indeseados) que ejercen los primeros sobre los segundos, es decir, los riesgos o peligros naturales.

La contrapartida de los recursos -entendidos así, como flujos de entrada desde los sistemas naturales- son los residuos, que constituyen los flujos de salida o retorno. De hecho, ambos flujos, junto a la expansión del espacio ambiental, originariamente natural, ocupado y alterado por el sistema humano, constituyen las tres fuentes principales de agresiones y deterioro ambiental, pudiendo representarse como acciones o efectos acometidos por las sociedades humanas sobre los sistemas naturales. Tienen, por tanto, un sentido inverso al de los riesgos o peligros naturales: son los impactos ambientales (Fig. 2).



Fig. 2. Visión sistémica de las relaciones entre los sistemas naturales y los sistemas humanos donde tiene cabida los recursos como flujos de materia o energía que pasan de los primeros a los segundos.

Una importante fracción de los recursos naturales es la representada por los recursos geológicos. Aunque no hay un acuerdo unánime a la hora de considerar el ámbito exacto aludido con el concepto de recursos geológicos, en este texto optaremos por una interpretación amplia, que engloba no solo los recursos minerales y las rocas, sino también las aguas y las diversas formas de energía relacionadas con el movimiento de las capas fluidas y sólidas de la Tierra. Excluiremos, sin embargo, los recursos geológicos de carácter cultural, que no son utilizados de forma consuntiva (no se “consumen”) sino que actúan como elementos del medio que aportan información científica y cultural pero que, aunque pueden presentar interés económico (Fig. 3), no encajan en la definición de tipo sistémico propuesta.



Fig. 3. Icnita tridáctila de dinosaurio terópodo. Cornajo (Rioja). Este tipo de recursos geocultural y científico tienen un elevado interés añadido de tipo económico como atractores de un turismo culto y de naturaleza. Sin embargo, al igual que los recursos espaciales o el paisaje, no forman parte de la concepción sistémica de recursos entendidos como flujos de entrada de materia o energía al sistema humano.

Así considerados, los recursos geológicos pueden subdividirse en tres grandes grupos. De un lado están los minerales y las rocas, relacionados con el aporte de materias primas o la generación de energía por combustión o radiactividad. De otro, el agua, que, como materia, ofrece un amplio abanico de usos que exige una diferenciación en tipos o calidades (agua potable, agua para regar, agua como soporte o receptáculo para la liberación de sustancias residuales, etc.). Finalmente, queda un tercer lugar para los recursos geológicos de tipo energético no derivados de la combustión de materiales y que, básicamente, pueden ser dispuestos en otros tres subgrupos de acuerdo a su origen: los recursos geotérmicos procedentes del calor del interior de la Tierra, los recursos energéticos ligados al movimiento de las capas fluidas por calentamiento diferencial de la Tierra (que son, por tanto, meras transformaciones de la energía solar, como es la energía eólica -Fig.4-, la del oleaje, la hidráulica, etc.) y los recursos, también energéticos, debidos directamente a la atracción gravitatoria de otros cuerpos solares (fundamentalmente la energía mareomotriz).

La condición de renovabilidad que presentan estos recursos es variada: unos son claramente no renovables, habida cuenta de la extrema lentitud de sus procesos de regeneración (el concepto de renovabilidad es utilitario y debe aplicarse a una escala temporal humana), mientras otros sí entran en la amplia categoría de los recursos renovables (como es el caso del agua potable), aunque en realidad muchos pertenecen a lo que se debe denominar de forma estricta como “recursos de flujo continuo”, es decir, recursos que fluyen en una dimensión o cantidad más o menos constante y permanente y sobre cuya génesis no tenemos realmente capacidad de actuación (son debidos a procesos del tipo de la radiación solar o del gradiente geotérmico). Esta distinción es



Fig. 4. Los aerogeneradores aprovechan la energía del viento, que tiene un carácter renovable ligado al calentamiento diferencial de la superficie terrestre por la radiación solar, lo que permiten un uso sostenible. La energía del viento puede considerarse un recurso geológico o geoclimático cuya explotación, en sustitución de las energías procedentes de combustibles fósiles, constituye un paso hacia una sociedad más sostenible. Otra cosa es la posible inadecuación de algunos enclaves en los que puedan ubicarse los aerogeneradores. Su ubicación, en cualquier caso, requiere una evaluación de impacto ambiental.

importante, puesto que en los recursos verdaderamente renovables (los debidos a mecanismos rápidos de generación encuadrados en los ciclos biogeoquímicos, como ocurre con los recursos biológicos), la alteración o degradación de las fuentes de regeneración (derivados del stock de recurso) sí tienen efectos sustanciales sobre la capacidad de renovación, por lo que existe riesgo de alterar la propia condición de renovabilidad del recurso. Además, la capacidad de explotación humana puede superar las tasas naturales de renovación, lo que lleva en algún momento a la desaparición del recurso, por muy renovable que éste nos pareciera (este es un concepto que en ocasiones se define mal en algunos manuales). No sucede esto en el caso de los recursos de flujo continuo, ya que, habitualmente, no pueden ser explotados por encima del flujo constante que presentan y tampoco se suelen ver especialmente afectados por la alteración o la degradación de la naturaleza. En el caso del agua, la condición del uso al que se destine determinará el sentido de la aplicación de conceptos como el de flujo o renovabilidad, de manera que, por ejemplo, aunque la cantidad de agua de escorrentía continental sea difícilmente alterable a una escala global, sí lo será la cantidad disponible para determinados usos, como el consumo humano (agua potable) o el regadío.

## LOS PROBLEMAS AMBIENTALES DERIVADOS

Los flujos de recursos naturales hacia las sociedades humanas causan dos tipos directos de efectos ambientales, así como algunos indirectos. Los directos derivan de la propia extracción de los recursos y tienen que ver con su reducción o desaparición del



Fig. 5. Frecuentemente las labores de extracción de los recursos geológicos alteran y transforman el territorio. En algunas ocasiones, pueden generarse nuevos paisajes que llegan a adquirir un valor ambiental y cultural considerable cuando la explotación se integra en la dinámica natural de los ecosistemas asentados. Salinas de Castro Marim, en Portugal, un lugar de gran importancia cultural y ecológica.

sistema natural, o con la alteración ambiental producida por las labores de extracción (Fig. 5 y 6). A menudo, las labores de explotación ejercen transformaciones enormes del paisaje, los ecosistemas y el territorio sobre el que se asientan, con generación de impactos diversos y en ocasiones muy graves. Los efectos indirectos se relacionan con el abandono de los restos de materiales o de energía una vez utilizados y su consiguiente retorno a la naturaleza en forma de residuos. En conjunto, los efectos determinan la aparición de problemas ambientales.

El agotamiento de los recursos geológicos claramente no renovables (minerales y rocas) ha constituido tradicionalmente una cuestión polémica desde la advertencia original lanzada por el primer informe al Club de Roma, realizado empleando la metodología de dinámica de sistemas creada por Jay Forrester (Meadows *et al.*, 1972). La polémica suscitada centró sus críticas en la acusación de constituir una suerte de neomalthusianismo catastrofista luego no avalado por los hechos en cuanto al inminente agotamiento de los recursos que preconizaba. Sin embargo, a menudo se olvida referir que las previsiones ambientales realiza-



Fig. 6. El impacto ambiental y paisajístico de la mayoría de las explotaciones mineras a cielo abierto es considerable. Cantera próxima al valle del río Leza, en Rioja.

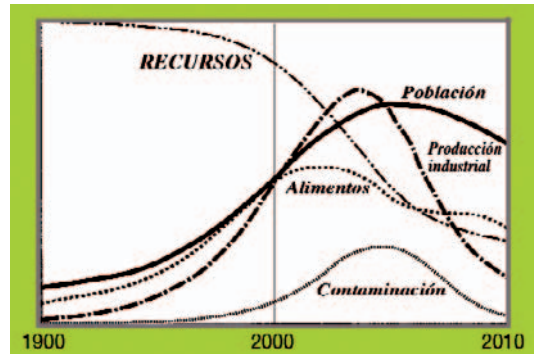


Fig. 7. Diagrama de agotamiento de los recursos geológicos según Meadows *et al.*, 1992.

das por el informe han ido empeorando de forma destacada a lo largo de los más de treinta años transcurridos al ser contemplados desde el lado de los problemas generados por los residuos, particularmente en el caso de la contaminación y el cambio climático. Posteriores análisis realizados por el mismo equipo (Meadows *et al.*, 1992; 2006) han mantenido las tesis fundamentales del primer informe, actualizando tanto datos como previsiones. La conclusión esencial se refiere a lo que los autores denominan “sobrepasamiento” (un término, no demasiado afortunado en castellano, que trata de traducir el “overshoot” de la jerga de dinámica de sistemas), refiriéndose con ello a la idea de ir más allá de los límites que tolera la Tierra para la explotación de sus recursos y la asimilación de desperdicios (Fig. 7).

En la economía de los recursos naturales se utiliza la llamada regla de Hotelling (Pearce y Turner, 1995) (Fig. 8) como ecuación fundamental para el análisis y la gestión de los recursos no renovables. La idea esencial, en su forma más sencilla, reside en pensar que el recurso no renovable debe explotarse de manera que la tasa de crecimiento que experimenta el precio del recurso extraído sea igual a su tasa de descuento (la tasa de descuento se calcula como la cantidad que hay que restar a un valor futuro para obtener el valor actual). En realidad esta primera aproximación ignora los gastos de extracción. De contemplarse éstos, como debe ser, se deduce que el precio óptimo de un recurso no renovable ha

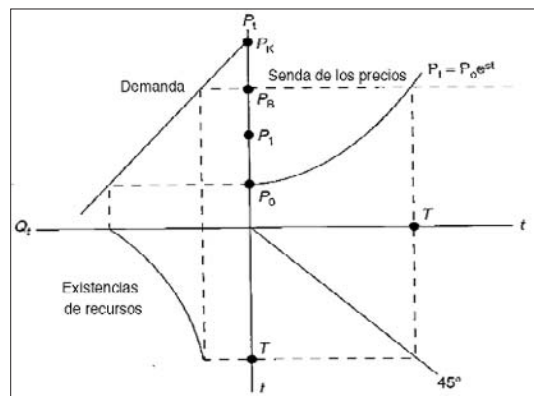


Fig. 8. Expresión gráfica de la regla de Hotelling.

de hacerse igual al coste marginal de su extracción más el coste marginal de su uso (el coste marginal es el incremento de coste que se produce al añadir una unidad más). La cosa se puede seguir complicando con la introducción de variaciones diversas como la cantidad del recurso, la demanda, los costes de extracción, etc.

La aplicación de la regla de Hotelling permite observar el comportamiento previsible de los precios del recurso no renovable (conocida como “*senda de los precios*”) según avanza la explotación, pudiendo calcularse el precio inicial óptimo que debe tener el recurso para que el proceso de agotamiento coincida con su reemplazo gradual por una tecnología sustitutiva, cuyo precio habrá de considerarse en los cálculos, que habrá marcado el ritmo de explotación del recurso hasta su extinción.

Puede advertirse que para la economía convencional, incluida la que se preocupa por la gestión de los recursos naturales, los cálculos de explotación de los recursos presuponen siempre adoptar una opción “optimista” sobre la existencia de tecnologías y recursos sustitutivos, con un escaso acento o preocupación por los efectos y costes ambientales derivados, a menudo catalogados como externalidades de difícil integración (internalización) en los procesos de toma de decisiones y valoración económica. Es cierto que los primeros análisis sobre el agotamiento de los recursos subestimaron los efectos del descubrimiento de nuevas reservas, las variaciones de la demanda, la sustitución parcial de materiales y ciertas mejoras en las eficiencias de uso, pero no es menos cierto que detrás del optimismo tecnológico hay siempre una ligereza en el análisis de situaciones que no son meras repeticiones de un pasado superado, sino que en ocasiones son absolutamente novedosas (nunca anteriormente en la historia de la humanidad ha existido un grado de degradación ambiental como el actual, nunca ha habido una masa de población como la actual, nunca tuvimos una demanda de materiales y energía comparable a la actual, etc.), así como una desatención del papel funcional y el consiguiente valor total de los recursos naturales (valores intrínsecos, de existencia, de opción, etc.).

En realidad, a diferencia de aquel primer aviso lanzado hace treinta años por el informe Meadows, hoy preocupa menos la cuestión del agotamiento de los recursos (Fig. 9) que la degradación de los siste-



Fig. 9. Ciudad fantasma de Kolmanskop, en Namibia. Se trata de los restos de las instalaciones y casas que sirvieron de alojamiento a los buscadores de diamantes y trabajadores que extraían los diamantes entre 1908 y poco después de la Primera Guerra Mundial, cuando el agotamiento del recurso hizo abandonar la explotación y la ciudad.

mas naturales y la acumulación y sinergia de los efectos negativos procedentes de los residuos. Y no tanto por la levedad de la primera, sino por el agravamiento de la segunda. En líneas generales, la recomendación se dirige hacia la necesidad de analizar de una forma conjunta y completa los ciclos de vida de los recursos, incluyendo la liberación final de los residuos resultantes y los efectos de alteración de los sistemas naturales durante los procesos de extracción, uso y liberación o retorno al medio. Desde esa perspectiva, no puede decirse que el tiempo transcurrido haya dado la razón a los críticos que pretendían desprestigiar las advertencias aportadas por el equipo de los Meadows, sino más bien al contrario.

Hoy, la solución parece exigir la introducción de cambios importantes en la forma de hacer las cosas; algo que, para algunos, debe limitarse a impulsar una serie de reformas sin afectar el núcleo duro del pensamiento y la toma de decisiones económicas, mientras que para otros exige un cambio de paradigma en toda regla (Costanza *et al.*, 1997; Martínez Alier y Roca Jusmet, 2000; Jimenez Herrero, 2000). En cualquier caso, parece recomendable partir del análisis de las evidencias de insostenibilidad que presenta el actual modelo socioeconómico para avanzar así hacia la adopción de decisiones acordes con su solución (Pascual, 2008).

Además de comprobar la degradación directa y palpable de ecosistemas y geosistemas, es importante también reparar en la generación de tendencias y procesos dinámicos que afectan al funcionamiento de la naturaleza y que, sin duda, tendrán consecuencias a medio o largo plazo. En el ámbito concreto de los recursos geológicos, es importante observar el grado de distorsión que afecta ya a ciertos ciclos biogeoquímicos, de los que la acumulación de anhídrido carbónico en la atmósfera es sólo un exponente (Solomon *et al.*, 2007), aunque desde luego no el menos importante. Para hacernos una idea del grado de alteración ejercido sobre algunos de ellos puede bastar comprobar que la erosión por causas humanas debida al incremento de la meteorización en los suelos agrícolas ha duplicado al menos su valor mundial respecto a los estándares naturales, originando intensos efectos transformadores de la dinámica y la morfología de numerosos estuarios y deltas (Milliman y Syvitski, 1992). La alteración humana de algunos ciclos globales de metales valiosos es mucho más llamativa: tomando el caso del plomo como ejemplo se advierte que, ya en los años setenta, los ríos transportaban cantidades alrededor de diez veces superiores de este metal debido a los procesos de contaminación industrial, o que el plomo de origen antropogénico presente en la atmósfera era ya unas 3,5 veces superior al que aportaba la naturaleza a través del polvo continental y los procesos volcánicos (Schlesinger, 2000).

Ante esta situación, el economista ecológico Herman Daly (1990) propuso una serie de criterios operativos desde los que orientar las formas de uso de los recursos naturales hasta hacerlos sostenibles. Todos ellos han de someterse a la máxima de no al-

canzar ningún punto de no retorno, es decir, no superar la irreversibilidad de los sistemas naturales en su alteración estructural, funcional o dinámica; algo sin duda difícil de precisar en la práctica, pero en cualquier caso imprescindible de tener en cuenta. De ahí que la aplicación real del llamado Principio de Precaución, consagrado a nivel internacional en la Declaración de Río de Janeiro de 1992, suponga un criterio esencial en el camino hacia la sostenibilidad.

En el caso concreto de los recursos renovables, los criterios operativos se resumen en dos ideas sencillas y fundamentales: que las tasas de extracción o explotación no deben superar las de renovación o regeneración (criterio del límite de explotación) y que las tasas de emisión o liberación de residuos no deben superar las capacidades de asimilación de la naturaleza (criterio del límite de emisión). En ambos casos, las capacidades de regeneración y de asimilación deben contabilizarse como parte del llamado capital natural, por lo que su constante pérdida o reducción han de considerarse como insostenibles.

La aplicación de estos sencillos principios al caso de los recursos geológicos que presentan un perfil de tipo renovable es sencilla, dado que la mayoría son, como vimos antes, de flujo constante, por lo que no pueden ser explotados por encima del valor que presenta dicho flujo (no se puede obtener más energía del viento de la que posee).

El caso del agua resulta más complejo, al constituir tanto un recurso material como un (eco) sistema, un medio de transporte, un almacén de energía, etc. Contemplando el ciclo del agua y la capacidad de renovación o regeneración del agua potable (o de agua adecuada para ciertos usos, como el riego), lo esencial es que la explotación no menoscabe las fuentes de renovación, es decir, que no reduzca el volumen del flujo constante disponible (Fig. 10). Un paso no menos esencial es asegurar el suministro al resto de los seres vivos y los procesos naturales que lo requieran (caudales ecológicos mínimos en los ríos, calidad ambiental de los cursos de agua, etc.).

La sostenibilidad en el uso de estos recursos reside así, fundamentalmente, en aprovecharlos permitiendo que se mantengan los mecanismos naturales que los regeneran y dejando que cubran las necesidades de perpetuación de los procesos naturales de los que dependemos todos (biodiversidad, servicios ecológicos, etc.).

### SI NO HAY RENOVABILIDAD EN MUCHOS RECURSOS GEOLÓGICOS, ¿CÓMO HABLAR DE SOSTENIBILIDAD?

¿Pero qué ocurre con esa otra amplia fracción de los recursos geológicos (minerales y rocas) de naturaleza fundamentalmente no renovable? Realmente no parece posible usar a la vez de forma sostenible y consuntiva un recurso que no se renueva a una velocidad suficiente a escala humana. Para ello, Daly propuso sustituir en estos casos la idea de sostenibilidad del recurso por la de la sostenibilidad del uso generado por el recurso. Se trata, pues, de asegurar



Fig. 10. El agua es un recurso complejo, ya que dependiendo del uso al que se destine y la consideración que se le dé presenta diferentes tipos de stocks o flujos de cara a su utilidad para usos humanos. El calentamiento global y la reducción de la superficie cubierta por glaciares pueden alterar el suministro de recursos hídricos y las características ecológicas y hasta geomorfológicas de muchas regiones. El glaciar del Angel de las Montañas Rocosas de Canadá muestra el fuerte retroceso experimentado en el último siglo.

de una forma prácticamente indefinida (para las generaciones presentes y para las futuras) un uso que hoy es suministrado o alcanzado gracias a un recurso natural no renovable, pero que mañana puede ser obtenido mediante otro recurso diferente. La idea es que el nuevo recurso sustitutivo sea renovable (se buscaría, pues, la sustitución de recursos no renovables por renovables). Eso sí, sin menoscabo de la estructura y la funcionalidad natural (es decir, sin deterioro ambiental irreversible). Para lograrlo es preciso habilitar un mecanismo técnico-económico que asegure la creación de la sustitución renovable a la par que se produce el agotamiento del recurso no renovable. En palabras de Daly (1990): “El uso cuasi-sostenible de recursos no renovables exige que toda inversión en la explotación de un recurso no renovable lleve aparejada una inversión compensatoria en un sustituto renovable (por ejemplo, la extracción de petróleo comportaría la plantación de árboles para la obtención de alcohol a partir de madera). La idea es dividir los ingresos netos procedentes de recursos no renovables en un componente de renta que puede ser consumido regularmente cada año y un componente de capital que debe invertirse en el sustituto renovable. La división se efectúa de tal modo que al término de la vida del recurso no renovable, el renovable esté rindiendo un producto anual sostenible equivalente al componente de renta de los ingresos no renovables.”

Lamentablemente, el mayor problema actual para mantener el uso de algunos recursos geológicos no renovables, especialmente el petróleo, radica en la insostenibilidad creada por la emisión de residuos, que superan con creces las capacidades de asimilación natural. En definitiva: el fin de la era del petróleo como combustible ha de venir marcada por la necesidad de evitar los graves perjuicios de las emisiones de CO<sub>2</sub> que amenazan la sostenibilidad del planeta con mucha más premura que la que marcan los calendarios de agotamiento de las reservas de crudo.

### LAS CUESTIONES ECONÓMICAS, SOCIALES Y ÉTICAS TAMBIÉN EXIGEN SOSTENIBILIDAD

La noción de sostenibilidad no solo tiene una componente ecológica, sino que también implica consideraciones sociales y éticas (Daly, 1989). En este sentido, son tres los objetivos u óptimos de sostenibilidad: la escala óptima (donde radica el objetivo de sostenibilidad ecológica: tamaño máximo sostenible del sistema económico como “parásito” del sistema geocológico), la distribución óptima (que apunta a un objetivo de equidad, en el que destaca la eliminación de la pobreza y la marginalidad) y la asignación óptima (que se dirige a alcanzar un objetivo de eficiencia a través de la asignación de los recursos a los usos para los que resultan más eficientes).

En el caso concreto de los recursos minerales y rocas, los factores de falta de sostenibilidad ética y social se ponen bien de manifiesto al observar las turbias políticas y maniobras económicas que caracterizan buena parte del mundo de los negocios del petróleo y de la misma seguridad mundial, pero también en los mecanismos de control de los recursos minerales estratégicos, en los que la explotación de minerales en África puede llevarse la palma en materia de ausencia de escrúpulos y violación de derechos humanos. Ahí están casos tan repugnantes como los que rodean la explotación del coltán (los minerales de columbita y tantalita, fundamentales para la industria electrónica moderna) en la República Democrática del Congo (que cuenta con el 80% de las reservas mundiales) y su conexión con la financiación de las interminables guerras, genocidios y masacres en una región en la que operan más de un centenar de empresas multinacionales interesadas en sus recursos minerales o la implicación de la explotación y comercio de diamantes en los sangrientos conflictos de Angola o Sierra Leona.

Es evidente que el orden de importancia que los economistas ecológicos plantean para encarar adecuadamente la resolución de los problemas de la actual insostenibilidad global (primero, asegurar una escala sostenible; luego, una distribución equitativa; y, finalmente, alcanzar una asignación eficiente) (Fig. 11) no está precisamente marcando la agenda de prioridades en la adopción real de decisiones políticas y económicas en el mundo.

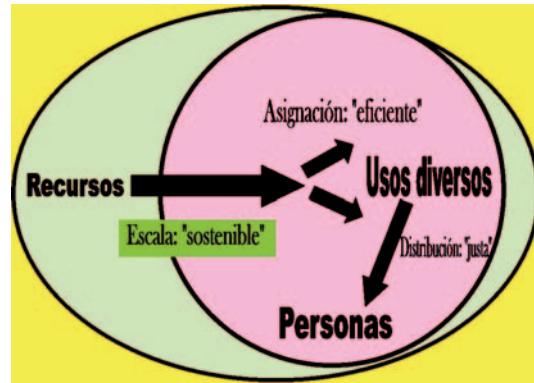


Fig. 11. Las cuestiones esenciales en la economía ecológica y social son resolver el problema de la escala “sostenible”, la distribución “equitativa” y la asignación “eficiente” de los recursos naturales entre la población y los usos diversos.

### UN DIAGRAMA DIDÁCTICO PARA JUGAR A LA GESTIÓN

Las cuestiones relativas a la gestión de los recursos constituyen una trama compleja de aspectos científicos, técnicos, económicos, ambientales y sociales. Eso supone una dificultad conceptual importante para su análisis, pero también presenta un interés didáctico parejo. Algunos de esos aspectos entrelazados pueden abordarse de forma sintética y sencilla mediante el empleo de modelos sistémicos que simplifican y hacen accesible la realidad compleja sin perder la riqueza conceptual de muchos de los factores determinantes en la toma de decisiones y en sus consecuencias.

Un ejemplo de lo anterior es el siguiente caso de utilización didáctica de un diagrama sistémico basado en una simplificación de la llamada caja de McKelvey que distribuye el stock de un recurso mineral de acuerdo a los ejes de conocimiento o certidumbre sobre la existencia del recurso y a su rentabilidad o explotabilidad (Fig. 12). El diagrama



Fig. 12. La caja de McKelvey (simplificada en la imagen) representa el reparto de un recurso no renovable (por ejemplo recursos minerales) en función del grado de conocimiento sobre su existencia y su explotabilidad (por razones tecnológicas, legales o económicas).



permite ser usado didácticamente en un proceso simulado de toma de decisiones, en el que las posibles actuaciones y situaciones (como el incremento de inversiones en prospección, la variación de los gastos de explotación o en el precio de los productos, la aprobación de leyes ambientales, etc.) son representadas mediante grifos o válvulas que actúan sobre los flujos que conectan los distintos compartimentos, depósitos o stocks en que se distribuye conceptualmente el recurso y que pueden accionarse de acuerdo a la simbología convencional de la dinámica de sistemas (Aracil, 1997). Se decide así la evolución que adoptarán los diferentes compartimentos, que en el modelo simplificado son cuatro:

- Conocidos, pero no rentables.
- Conocidos y de explotación rentable.
- Desconocidos, pero rentables si se conocieran.
- Desconocidos y no rentables o no explotables cuando se descubran.

A los que hay que sumar el compartimento definitivo del sistema industrial o de consumo humano (que figura como el “sumidero” final del esquema: recurso en uso).

Las principales decisiones o actuaciones a adoptar para la gestión global del recurso se pueden concretar en las siguientes:

- Inversiones y esfuerzos en prospección de nuevos yacimientos.
- Inversiones o avances en tecnologías de extracción.
- Cambios en los precios del recurso (bien vía fluctuaciones del mercado, bien por actuación correctora sobre él: impuestos, subvenciones, etc.).
- Aprobación de nuevas leyes ambientales o que inciden en las condiciones de explotación del recurso.
- Gestión de la demanda humana del recurso (y consiguiente efectos sobre la explotación real de las reservas).

Las decisiones adoptadas pueden ser identificadas en el esquema básico de la caja de McKelvey, ya que afectarán a uno o varios de los flujos que conectan entre sí los compartimentos. Así, por ejemplo, puede observarse que un incremento de las inversiones y esfuerzos en prospección determinarán un mayor tránsito desde los almacenes de tipo “no descubiertos” a los de tipo “descubiertos”, mientras que los cambios en los precios del recurso pueden tener efectos contrapuestos en los flujos que comunican los compartimentos “explotables” con los “no explotables”. Lo mismo sucede con las decisiones de tipo legislativo (el endurecimiento de las leyes ambientales puede suponer la reducción de la explotabilidad de algunos yacimientos, bien de forma directa o bien indirectamente por el encarecimiento que representa un mayor nivel de exigencia ambiental, etc.). Los avances tecnológicos (resultado de decisiones de inversión en dicho sentido) determinarán aumentos del flujo desde los almacenes no explotables a los explotables, y así...

Una vez identificados en el diagrama los “grifos” o válvulas que se ven afectados por cada una

de las decisiones posibles, se pueden analizar sus consecuencias sobre cada uno de los compartimentos existentes, así como reflexionar sobre el tiempo de existencia del recurso total que, al presentar un carácter no renovable (lo que en el diagrama se concreta en la ausencia de una “fuente” de suministro) se deslizará siempre en dirección hacia el sumidero final (la entrada al sistema humano), salvo aquella parte que permanezca refugiada en depósitos de escasa explotabilidad (por razones de desconocimiento o de tipo económico, tecnológico o legal). Esta cuestión es importante porque permite apreciar bien la diferencia que hay entre el concepto de recurso total (la cantidad total) y el de reserva (la cantidad conocida y explotable de recurso), así como analizar las posibilidades y dificultades que existen a la hora de trasvasar materia de uno a otro lado (Fig. 13).

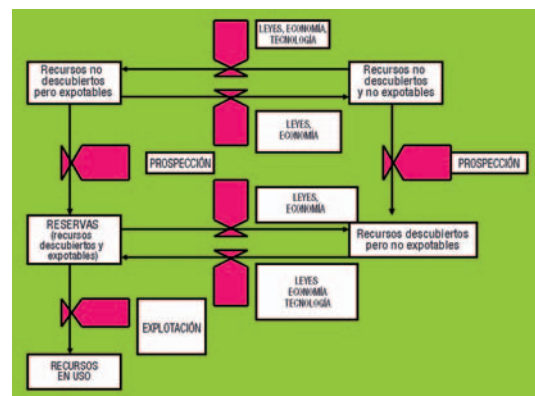


Fig. 13. Considerando los cuatro cuadrantes resultantes de la caja, puede establecerse un diagrama de flujos cuyas válvulas representan diferentes criterios de toma de decisiones (establecer leyes ambientales que restrinjan formas de explotación impactantes, inversiones en prospección, mejoras tecnológicas, etc.), permitiendo visualizar de una forma sencilla el funcionamiento de un modelo global de gestión de un recurso mineral e interactuar con él.

Finalmente, la visualización en el diagrama de la conclusión final que tiene toda explotación de un recurso no renovable (el agotamiento de las reservas), así como su dependencia de los ritmos de explotación en relación a las cantidades existentes, permiten también introducir conceptos interesantes y relacionados, como la posibilidad de la sustitución del uso de un recurso no renovable por otro de carácter renovable (criterio operativo de Daly para el uso sostenible de recursos no renovables) con ritmos de generación de lo nuevo acoplados al agotamiento de lo viejo. El efecto de la “gestión de la demanda” (es decir, el control de la demanda de recursos no renovables por las sociedades industriales modernas) mediante acciones como el aumento de la eficiencia de uso del recurso o la reutilización y el reciclado de la materia encajan también en el diagrama al verse representados por una moderación en el flujo de entrada desde el compartimento de las reservas hasta el sistema socioeconómico humano.



Fig.14. Antiguas instalaciones de las minas de oro de Rodalquilar, en el actual Parque Natural de Níjar-Cabo de Gata (Almería). La explotación empezó a ser viable con un avance tecnológico en 1887 (la invención del método de cianuración), mientras que en 1966 se cerró por falta de rentabilidad. En 1989 se reanudó la minería en la zona, gracias a la subida del precio del oro en los años setenta, utilizándose una nueva tecnología, la lixiviación en pilas. Se volverán a cerrar, ya de forma definitiva, en 1990, debido a una nueva bajada en los precios del oro. Razones ambientales exigirían hoy, además, nuevos costes para la reanudación de la explotación (los suelos y las aguas subterráneas de la zona presentan importantes contenidos de contaminantes procedentes de residuos mineros, particularmente As y Pb, que exigieron algunos tratamientos de descontaminación en algunas de las zonas más afectadas).

A pesar de la sencillez del modelo, las situaciones reales que determinan la explotación o no de determinados recursos o yacimientos, así como numerosos otros conceptos de ciencias ambientales encuentran en él un buen acomodo didáctico (Fig. 14).

## BIBLIOGRAFÍA

Aracil, J. (1997). *Dinámica de sistemas*. Alianza editorial. Madrid

Costanza, R.; Cumberland, J.; Daly, H.; Goodland, R. y Norgaard, R. (1997). *Introducción a la economía ecológica*. AENOR. Madrid

Daly, H. E. (comp.).(1989). *Economía, ecología, ética. Ensayos hacia una economía en estado estacionario*. FCE. México.

Daly, H. E. (1990). Towards some operational principles of sustainable development". *Ecological Economics*, 2: 1-6.

Georgescu-Roegen, N. (1975). Energy and economic myths. *Southern Economic Journal*, 41: 347-381.

Jiménez Herrero, L. (2000). *Desarrollo sostenible. Transición hacia la coevolución global*. Ediciones Pirámide. Madrid.

Margalef, R. (1983). *La ciencia ecológica y los problemas ambientales, técnicos, sociales y humanos*. En: Diez años después de Estocolmo. Desarrollo, medio ambiente y supervivencia. CIFCA. Madrid. 177-220.

Martínez Alier, J. y Roca Jusmet, J. (2000): *Economía ecológica y política Ambiental*. PNUMA-FCE. México

Meadows, D. H.; Meadows, D.L.; Randers, J. y Behrens III, W.W. (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books. New York.

Meadows, D. H.; Meadows, D.L. y Randers, J. (1992). *Más allá de los límites del crecimiento*. El País - Aguilar. Madrid

Meadows, D. H.; Randers, J. y Meadows, D.L. (2006). *Los límites del crecimiento 30 años después*. Galaxia Gutenberg. Barcelona.

Milliman, J. D. y Syvitski, P. M. (1992). Geomorphic / tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers. *Journal of Geology*, 100: 525-544.

Naredo, J. M. (1987). *La economía en evolución. Historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico*. Siglo XXI de España Editores-Ministerio de Economía y Hacienda. Madrid.

Pascual Trillo, J. A. (2000). *El teatro de la ciencia y el drama ambiental. Una aproximación a las Ciencias Ambientales*. Miraguano Ediciones. Madrid.

Pascual Trillo, J. A. (2008). La insostenibilidad como punto de partida del desarrollo sostenible. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS)*, n° 11, vol. 4: 81-94. <http://www.revistacts.net/4/11/006>

Peace, D. W. y Turner, R. K. (1995). *Economía de los Recursos Naturales y del medio ambiente*. Colegio de Economistas de Madrid-Celeste Ediciones. Madrid.

Ramos, A; Cifuentes, P.; González, S. y Matas, L. (1998). *Diccionario de la naturaleza*. Espasa Calpe, S. A. Madrid.

Schlesinger, W. H. (2000). *Biogeoquímica. Un análisis del cambio global*. Editorial Ariel. Barcelona.

Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Marquis, M.; Averyt, K.; Tignor, M. M. B.; Le Roy Miller Jr., H. y Chen, Z. (2007). *Cambio climático 2007. Base de Ciencia Física*. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cambridge University Press. Cambridge. ■

*Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 18 de noviembre de 2008 y aceptado definitivamente para su publicación el 8 de mayo de 2009.*