

AGOTAMIENTO DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES Y EMISIONES DE CO₂: ALGUNOS POSIBLES ESCENARIOS FUTUROS DE EMISIONES

STÉPHANE SALAET FERNÁNDEZ / JORDI ROCA JUSMET
Universidad de Barcelona

Recibido: 19 de noviembre de 2009

Aceptado: 24 de marzo de 2010

Resumen: La dependencia con respecto al uso de combustibles fósiles ha generado dos tipos de preocupaciones: por un lado, los impactos ambientales asociados y, en especial, sus efectos en el cambio climático; por otro, la limitación de reservas y su futuro agotamiento. Las dos preocupaciones han dominado en diferentes momentos históricos.

En cualquier caso, las emisiones de CO₂ y el uso masivo de unos recursos no renovables y muy limitados son dos caras de la misma moneda y que hay que analizar conjuntamente.

En este trabajo se plantean posibles escenarios para el siglo XXI suponiendo que el petróleo y el gas natural se agoten siguiendo comportamientos tipo "pico del petróleo", aunque contemplando diferentes variantes e hipótesis sobre el tamaño de los recursos finalmente recuperables. Para el carbón se suponen reservas suficientemente abundantes como para mantener la oferta energética total procedente de los combustibles fósiles. El futuro de las emisiones de CO₂ dependerá sobre todo del resultado de las fuerzas que, por un lado, inducirán a un uso creciente del carbón a medida que se agotan el petróleo y el gas natural y, por el otro, las que presionan para limitarlo desde la política ambiental.

Palabras clave: Agotamiento de combustibles fósiles / Cambio climático / Pico del petróleo / Curva de Hubbert.

FOSSIL FUEL DEPLETION AND CO₂ EMISSIONS: SOME POSSIBLE FUTURE SCENARIO EMISSIONS

Abstract: The dependency on fossil fuels has arisen two kinds of worries: firstly, its linked environmental impacts, especially the climate change effects; secondly, the depletion of the finite reserves. Each concern has prevailed in different historical moments.

In any case, CO₂ emissions and massive use of non renewable and limited resources are both sides of the same coin and should be analyzed together.

In the present work several possible XXIst scenarios are developed assuming oil and natural gas are depleted following peak oil theory although considering several hypothesis on recoverable resource size. It is also supposed carbon resources are plentiful enough to keep total energy supply from fossil fuels. CO₂ future emissions will rely upon the result arising from forces pushing to an increased coal use as oil and gas are depleted and those stemming from environmental politics and trying to limit its expansion

Keywords: Fossil fuel depletion / Climate change / Peak oil / Hubbert curve.

1. INTRODUCCIÓN

La base de la industrialización de los países ricos fue el uso masivo de combustibles fósiles y hoy sigue siendo un elemento principal de los procesos de cambio económico que caracterizan a los países más poblados del mundo. Desde hace mucho tiempo, en términos cuantitativos los combustibles fósiles aportan el grueso de la energía exosomática utilizada por los humanos (y la propia obtención de la energía endosomática –la de los alimentos– se ha hecho cada vez más dependiente del uso de combustibles fósiles). En las últimas décadas (con una ligera inflexión debi-

da a la crisis actual) se ha utilizado más petróleo, más carbón y más gas natural que nunca en la historia.

Esta gran dependencia con respecto al uso de combustibles fósiles ha generado dos tipos de preocupaciones muy diferentes que han dominado en diferentes momentos históricos. En las últimas décadas –y especialmente desde el año 1992– ha dominado la preocupación por los impactos ambientales de la quema masiva de combustibles fósiles y, sobre todo, por sus efectos en el cambio climático. Las actividades que generan gases de efecto invernadero son diversas, pero hoy el factor más importante es sin duda la emisión de CO₂ asociada a la obtención de energía. El futuro de las emisiones de gases de efecto invernadero irá directamente ligado a la evolución en el uso de los combustibles fósiles (con la única excepción de la posible captura de una parte de las emisiones generadas en grandes instalaciones, una posibilidad técnica que no consideraremos en este artículo y que genera controversia sobre sus costes y riesgos).

En contraste, la preocupación por la limitación y el futuro agotamiento de las reservas ha oscilado mucho según las tendencias en los precios. En los años setenta y en los primeros años ochenta sí que dominó en el debate público la preocupación por la limitación (y aún más la extrema concentración) de las reservas de petróleo (que tanto entonces como ahora –aunque con una pérdida de peso relativo– es la principal fuente energética): eran los años de los *shocks* del petróleo que tanto afectaron a las economías ricas. Después vino lo que se ha llamado el *contrashock* del petróleo, con un hundimiento de los precios, y no fue hasta entrado el siglo XXI que se generaron nuevos debates públicos sobre el agotamiento del petróleo en una coyuntura en la que en pocos años los precios escalaron de los 50\$ por barril de crudo a los 100\$ y casi a los 150\$ (para volver a bajar a mediados del año 2008 en el contexto del estallido abierto de la crisis financiera).

Por lo tanto, las preocupaciones sobre el cambio climático y el agotamiento de los combustibles fósiles han tenido historias muy diferentes y han dominado en diferentes momentos históricos. En cualquier caso, las emisiones de CO₂ y el uso masivo de unos recursos no renovables y muy limitados son dos caras de la misma moneda y parece necesario analizarlos conjuntamente. Sin embargo, son pocos los trabajos que discuten explícitamente escenarios futuros de emisiones –como haremos aquí para el siglo XXI– teniendo en cuenta las perspectivas de agotamiento de los combustibles fósiles¹.

2. EL “PICO DEL PETRÓLEO” Y LOS MODELOS DE AGOTAMIENTO DE RECURSOS NO RENOVABLES

Existen algunos autores que desde hace tiempo han advertido que las reservas de combustibles fósiles son, en términos históricos, muy limitadas y que la dispo-

¹ Excepciones son los trabajos de Kharecha y Hansen (2007), Brecha (2008) y Nel y Cooper (2008).

nibilidad masiva de energía fácilmente accesible y muy concentrada que en una etapa histórica (y para una parte de la humanidad) han posibilitado estas fuentes de energía primaria no durará para siempre.

Ya en el año 1956 el geólogo M. King Hubbert predijo (¡y acertó!) un declive en la extracción de petróleo en EE.UU. en torno al año 1970 y previó que la extracción seguiría una curva en forma de campana. Hubbert y sus seguidores –representados ahora por la asociación ASPO (*Association for the Study of Peak Oil*)– han señalado que –como el petróleo en EE.UU.– el creciente uso de petróleo y gas natural a nivel mundial vendrá seguido por una tendencia opuesta en un futuro no lejano (Campbell y Laherrère, 1998). Cuando, como ya hemos señalado, los precios se dispararon hacia los 150\$ por barril de petróleo y no parecían tener un techo claro, la “curva de producción” (utilizando el lenguaje de Hubbert, aunque preferimos hablar de curva de extracción) se convirtió en un punto de referencia claro en el debate sobre el futuro del petróleo –y del gas natural²–.

En sucesivos trabajos Hubbert y otros estudiosos utilizaron una curva logística –usualmente llamada curva de Hubbert– para ajustar los datos y hacer proyecciones sobre la futura extracción de petróleo. Esa curva de extracción se caracteriza por tener un único máximo de extracción –el llamado *peak oil*, pico o cénit del petróleo– y un comportamiento simétrico en la fase ascendente y en la descendente. Sin embargo, no hay que confundir lo accesorio con lo esencial y, como Hubbert (1956, p. 9) planteaba, “para cualquier curva de producción de un recurso finito de cantidad fijada, dos puntos son conocidos desde el principio, esto es, que en $t=0$, y de nuevo en $t=\infty$, la tasa de producción debe empezar en cero, y después pasar a través de uno o de diversos máximos, y declinar de nuevo a cero”. Por lo tanto, Hubbert no predeterminaba ninguna forma funcional específica. En palabras de Brandt (2007, p. 3085), “sería más productivo para los teóricos de Hubbert moverse de una «estrecha» metodología de Hubbert... a una más «amplia» metodología de Hubbert. Una metodología amplia de Hubbert presentaría evidencia de que el agotamiento del petróleo convencional es inevitable y está rápidamente convirtiéndose en más importante, sin enfocar sus energías sobre una forma funcional única para las curvas de producción”.

Los elementos para determinar las posibles sendas de extracción de un recurso son dos: la *cantidad última de recursos recuperables* (URR) y la forma funcional específica. Dado el elevado grado de incertidumbre sobre el futuro, los escenarios basados en diferentes supuestos sobre estos dos factores deben verse no como previsiones, sino simplemente como ejercicios sobre posibles “estilos” de agotamiento compatibles con estimaciones razonables de los recursos finalmente explotables (URR). La magnitud de URR no es conocida, puesto que depende de las restricciones geológicas pero, por supuesto, depende también de la evolución de los factores tecnológicos y económicos, que harán que una mayor o menor recuperación de los

² Tres diferentes ejemplos de interesantes libros dedicados al tema y aparecidos de forma casi simultánea en nuestro país son los de Sempere y Tello (2008), Bermejo (2008) y Fernández Durán (2008).

recursos sea factible; además, los factores políticos y sociales también son importantes ya que, por ejemplo, pueden permitir que zonas con dotaciones de recursos especialmente sensibles desde el punto de vista ambiental sean o no explotables³.

En todo caso, cualquier ejercicio de escenarios futuros sobre uso de combustibles fósiles debe respetar la restricción de que la extracción acumulada debe ser menor que la cantidad estimada de URR. Parece poco pero, como es sabido, muchos modelos económicos de crecimiento no consideran explícitamente el papel de los recursos naturales y, en particular, de la energía, lo que supone o bien olvidar el papel crucial de dichos recursos o bien suponer que el acceso a estos recursos está asegurado en el futuro sin ninguna limitación física. Sin embargo, también sería muy equivocado caer en el extremo opuesto y pensar que la geología y una función inevitable de agotamiento determinarían de forma directa el futuro de la extracción: algunos debates sobre si se ha superado ya o no el pico del petróleo parecen caer en ese error (especialmente cuando dicho pico se asocia mecánicamente a la mitad de la extracción de la cantidad de URR)⁴.

Al elaborar escenarios es casi inevitable acudir a modelos matemáticos simplificados aunque, sin duda, la realidad siempre será mucho más compleja. Estos modelos deben ser compatibles con las realidades geológicas, pero no son, desde luego, únicamente geológicos: la geología es clave para determinar la tasa de agotamiento en un determinado campo de petróleo (dadas unas instalaciones de extracción), pero difícilmente puede explicar el ritmo de agotamiento de un recurso a nivel mundial, ya que este depende de forma decisiva del ritmo de inversión en capacidad de extracción del recurso. Por lo tanto, podríamos decir que, aunque las curvas como la de explotación logística u otras de la “metodología de Hubbert en sentido amplio” nos pueden parecer formas estilizadas de describir plausibles ritmos de agotamiento de un recurso como el petróleo, sin duda lo hacen sobre la base de algún tipo de “intuición” económica. De hecho, algunos autores que han trabajado con modelos de este tipo ya han planteado algún criterio “económico” para seleccionar unos modelos u otros. Así, Kaufmann y Shiers (2008, p. 406) descartan modelos

³ El debate ecológico y de protección de determinadas poblaciones podría llevar a renunciar a la explotación de determinadas áreas ricas en petróleo. Un interesante ejemplo es la propuesta defendida por el Gobierno de Ecuador de dejar en el subsuelo el petróleo pesado de la zona del Parque del Yasuní, área especialmente rica en biodiversidad y en donde viven poblaciones indígenas. Se ha estimado que la explotación podría suponer para el Estado un ingreso de cerca de 5.000 o 6.000 millones de dólares, aunque el valor sería muy dependiente de la evolución futura de los precios del petróleo. La condición que pone el Gobierno para renunciar a la explotación es que una parte importante del coste de oportunidad de la conservación no sea asumida por el país, sino por la comunidad internacional con donaciones a un fondo de conservación que permitiría generar ingresos para llevar a cabo políticas sociales y ambientales (Acosta, 2009). Desde el punto de vista del cambio climático, la mejor noticia sería, por supuesto, que se renunciase a explotar voluntariamente la mayor parte de las reservas de petróleo y del resto de los combustibles fósiles (en especial del carbón).

⁴ En realidad, ya ha habido como mínimo dos picos del petróleo determinados por conflictos políticos y por cambios en las condiciones del mercado: un pequeño pico en el período 1973-1974 y un importante pico en el año 1979. La extracción mundial no volvió a los niveles del año 1979 hasta el año 1986. Ahora, en el contexto de la crisis económica, se ha dado una reducción en la demanda mundial de petróleo. ¿El pico de demanda anterior a la crisis será el máximo histórico? Quizás, pero no es probable.

basados en una súbita caída de la extracción después del pico del petróleo con los argumentos de que ello implicaría que “grandes inversiones en las infraestructuras de producción y transporte son usadas para un único año”, de forma que los costes de esas infraestructuras no serían justificables económicamente, y de que una “gran reducción en el output después del pico es también inconsistente con las más rudimentarias formas de comportamiento previsor requerido para maximizar el valor neto actual de un recurso no renovable” (p. 406).

A pesar de las consideraciones anteriores, lo que para un economista puede resultar más sorprendente de los modelos de agotamiento “tipo Hubbert” es que no incorporan explícitamente ninguna variable económica. Lo cierto es que dichos modelos son compatibles (lo que les da flexibilidad, y entendemos que es más bien una ventaja) con escenarios económicos muy diferentes: por ejemplo, la necesaria caída de la demanda asociada a la fase descendente de esos modelos podría resultar de una planeada transición hacia otro modelo energético o podría ser resultado de un gran aumento de precios; esa caída podría ser compatible con el crecimiento económico o podría asociarse a un decrecimiento económico; además, tanto el crecimiento como el decrecimiento podrían tener impactos sociales muy diferentes dependiendo de qué países y grupos sociales se viesen afectados por una disminución de ingresos: uno puede incluso considerar que el “decrecimiento económico” en los países ricos es deseable y que se podría dar sin una disminución en el bienestar de la mayoría de la población⁵.

Podemos preguntarnos si los modelos económicos disponibles han tenido hasta el momento mayor capacidad de predicción sobre la evolución de la extracción de recursos no renovables, y en particular de los combustibles fósiles.

La teoría económica de los recursos no renovables se ha basado en un artículo de Hotelling publicado en el año 1931 en el *Journal of Political Economy*. En palabras de Devarajan y Fisher (1987, p. 670), “sólo hay unas pocas áreas en economía cuyos antecedentes puedan ser situados en un único, seminal artículo. Una de tales áreas es la economía de los recursos naturales (...); su origen es ampliamente reconocido en el artículo del año 1931 de Harold Hotelling”. Según la regla de Hotelling, los precios (precios netos de costes de extracción) de un recurso no renovable deberían crecer a un ritmo equivalente al tipo de interés y, además, los recursos deberían agotarse exactamente en el momento en que el precio es tan elevado que la demanda se vuelve nula. Estas condiciones serían las que determinarían la única trayectoria de precios de “equilibrio” compatible con la maximización intertemporal de los beneficios totales (adecuadamente “descontados”) por parte de los agentes económicos en condiciones de competencia perfecta. La regla de Hotelling no nos dice directamente nada sobre la evolución de las cantidades extraídas y vendidas a lo largo del tiempo. Con las restrictivas hipótesis de funciones de demanda y costes de extracción invariables, las cantidades extraídas disminuirían a lo largo del tiempo pero, con otros supuestos tales como demanda creciente y/o una

⁵ Sobre el debate sobre el decrecimiento, véase Roca (2007).

fase inicial de disminución de los costes de extracción debido al cambio tecnológico, la regla sería consistente con un pico en la extracción que podría situarse, dependiendo de la evolución concreta de la demanda y de los costes, en cualquier nivel de extracción acumulada (Holland, 2008).

El modelo de Hotelling tiene su importancia histórica y tiene sus méritos. Remarca que los precios tenderían a exceder los costes de extracción incluso en situaciones muy competitivas, y que cualquier estrategia de maximización de beneficios tiene que tener en cuenta cómo extraer el recurso a lo largo del tiempo y, por lo tanto, depende de las condiciones futuras de precios. Sin embargo, los problemas al aplicar el modelo para explicar los comportamientos efectivos de los precios son enormes. Cuando los agentes económicos toman sus decisiones, no pueden basarse en cuáles son los precios actuales y futuros, sino en cuáles son los precios actuales y las expectativas sobre los precios futuros; en otras palabras, el coste de oportunidad de no vender hoy en términos de renuncia a ingresos futuros es desconocido; incluso en el modelo más simple, este hecho elemental provocará que los precios puedan caracterizarse mucho más por la inestabilidad que por trayectorias muy previsibles (Mishan, 1981; Roca, 1991). No debería extrañarnos, ya que el modelo trata los recursos como activos financieros y, ¿qué decir de la estabilidad de los precios de los activos financieros? Además, hay otro hecho elemental. Los recursos no renovables no están inmediatamente disponibles para ser usados a voluntad ahora o en el futuro en cualquier cantidad sólo con la restricción de que no superen las reservas totales; en realidad, la extracción está restringida por las inversiones previas en capacidad de extracción (Thompson, 2001; Cairns, 2001; Banks, 2004). Los inversores deciden cuánto invertir en la industria extractiva (y también en exploración) cuando las condiciones futuras del mercado son inciertas, de forma que las decisiones pasadas determinan la máxima cantidad de recurso que podrá ser extraído y vendido para su uso. Dado que los costes hundidos suelen ser una parte muy importante de los costes, en una situación competitiva se tendería a extraer todo lo posible, a menos que los precios sean extremadamente bajos: ello puede generar comportamientos cíclicos en los precios que resulten de cambios importantes en los niveles de inversión.

Si a lo anterior le sumamos el hecho de que los mercados de recursos no renovables están en muchos casos extremadamente alejados de las condiciones de competencia perfecta –por ejemplo, la organización de países exportadores de petróleo (OPEP) ha tenido un papel muy relevante en algunos períodos en el mercado de petróleo (Slade, 1991)–, no resulta nada sorprendente que la “regla de Hotelling” sea incapaz, ni siquiera de forma estilizada, de explicar las tendencias históricas de los precios de los combustibles fósiles (Krautkramer, 1998). La gran concentración geográfica de las reservas de petróleo y de gas natural hará que las decisiones estratégicas de unos pocos actores clave sean aún más relevantes en el futuro (como también pueden ser aún más relevantes los potenciales conflictos geopolíticos en determinadas zonas).

Existen también algunos modelos que han considerado explícitamente las interacciones entre el sistema económico y la extracción de recursos no renovables. El más famoso es el modelo World3, usado en *Los límites al crecimiento*, de Meadows *et al.* (1974) y, con pequeños cambios, en Meadows *et al.* (2004). La modelización de su sector de recursos no renovables “*está basada en material de Energy Resources de M. King Hubbert*” (Meadows *et al.*, 1974, p. 381), aunque el sistema dinámico de World3 para tratar de los recursos no renovables es mucho más complicado que el modelo logístico, ya que considera relaciones entre la economía y el uso de recursos no renovables pero, a la vez, una fracción creciente de la producción industrial se tiene que destinar a extraer estos recursos (y formar parte del “capital extractivo” no disponible como “capital industrial”) a causa de la mayor dificultad de obtener recursos a medida que se van agotando. Finalmente, la dinámica global de todo el sistema depende de un gran número de ecuaciones, incluso aunque se hagan simplificaciones enormes como, por ejemplo, tratar –como el World3– todos los recursos no renovables como un único recurso conjunto sin distinguir entre diferentes combustibles fósiles, ni siquiera entre combustibles fósiles y otros minerales. El modelo World3 tuvo un papel fundamental –y muy positivo a nuestro entender– en estimular el debate sobre los problemas ecológicos asociados al crecimiento de la población y de la producción industrial. Sin embargo, el objetivo de simular a la vez el futuro de variables demográficas, económicas y ecológicas es muy ambicioso y se sitúa siempre entre la disyuntiva de simplificar radicalmente las funciones que relacionan las variables o multiplicar sin límites las variables consideradas; aunque pueden hacerse ejercicios de sensibilidad, los escenarios resultantes cuando actúan muchas relaciones entre distintas variables pueden ser difíciles de interpretar en el sentido de saber qué papel desempeñan en los resultados las especificaciones concretas de cada una de las funciones. No es este, en todo caso, el lugar para evaluar este tipo de modelos.

3. POSIBLES ESCENARIOS DE EXTRACCIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES PARA EL SIGLO XXI: UN EJERCICIO DE SIMULACIÓN

La estrategia que aquí seguiremos no es la de desarrollar ningún modelo económico, sino que el propósito –mucho más modesto– es plantear algunos escenarios futuros de extracción que sean compatibles con las estimaciones dominantes sobre las cantidades de URR de los diferentes combustibles fósiles. Aquí, a nuestro entender, hay que hacer una diferenciación importante entre, por un lado, el petróleo y el gas natural y, por otro lado, el carbón⁶.

⁶ En el caso del petróleo nos referimos al petróleo “convencional”. El petróleo “no convencional” no se considera en nuestras previsiones. Ver posteriormente.

3.1. PETRÓLEO Y GAS NATURAL

Para estos recursos es imposible que durante muchas décadas la explotación aumente o que incluso se mantenga en los niveles actuales. Por lo tanto, es inevitable hacer alguna hipótesis sobre cuándo y cómo se producirá la reducción en la explotación durante el período analizado. Nuestra hipótesis será siempre tipo Hubbert en sentido amplio, ya que no consideraremos sólo el caso logístico, sino también otras variantes o estilos de agotamiento. Por otro lado, propondremos, tanto para el petróleo como para el gas, dos hipótesis diferentes con respecto al tamaño de URR.

En concreto, hemos hecho los siguientes supuestos con respecto a las reservas de petróleo convencional. Como supuesto “bajo” tomamos 2.100 Giga (2.100 × 10⁹ bp) barriles de petróleo (Gbp), medida que es algo superior a la que han venido considerando los autores más destacados de la asociación ASPO –Campbell y Laherrère (1998, p. 81) sugerían 1.800; Campbell (2002) sugería en torno a los 1900 Gbp–, que utilizan una definición de petróleo convencional más restrictiva que la de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), que aquí tomaremos como referencia⁷. El supuesto “alto” lo hemos situado en un valor de 3.300 Gbp, que es un valor que supera la estimación media del US Geological Survey (2000), para quien la estimación elevada –que parece muy improbable– sería de 3.900 y la estimación media sería de 3.000 Gbp (Cleveland *et al.*, 2003, p. 321). Otras estimaciones elevadas –pero más moderadas– son las de Mohr y Evans (2007), que las sitúan entre los 2.234 y los 2.734 Gbp. Por lo que respecta al gas natural, los recursos no han sido tan analizados, aunque parece haber bastante acuerdo en que son más bajos que los de petróleo⁸. Nel y Cooper (2009) escogen un valor de 2.038 Gbpe. Brecha (p. 3498) sugiere tres escenarios: 1.116 Gbpe, un 50% mayor y el doble del primer valor; el valor más elevado que hemos hallado es de 2.968 Gbpe (BGR, 2006). A pesar de las incertidumbres, fijamos los valores en 1.700 (“bajo”) y 3.000 Gbpe (“alto”).

La tabla 1 resume los supuestos que hemos adoptado en diferentes escenarios. Teniendo en cuenta la extracción acumulada, estos supuestos representarían que en el año 2007 ya se habrían extraído entre algo más de la mitad (supuesto bajo) y

⁷ La frontera entre petróleo convencional y no convencional no es en absoluto nítida y parte de las diferencias en las estimaciones de los recursos dependen de donde se establezca. Aquí seguimos a la AIE y consideramos dentro del concepto “petróleo convencional” los gases naturales líquidos y también los depósitos marinos de elevadas profundidades. En cambio, las arenas, los asfaltos bituminosos y los petróleos muy pesados (de menos de 20° API) se clasifican como petróleo no convencional. Los combustibles líquidos derivados del carbón y del gas natural tampoco están incluidos en el petróleo convencional. En realidad, desde el punto de vista energético, lo relevante es la energía requerida para disponer de energía (“coste energético” de la extracción, transporte y tratamiento), mientras que desde el punto de vista económico lo relevante es el coste monetario: ambos costes están, obviamente, muy relacionados, y en ambos casos no hay una frontera clara entre diversos tipos de petróleo, sino un continuo.

⁸ Las reservas y la extracción de gas natural normalmente no se expresan en barriles de petróleo equivalente (bpe), pero aquí es la unidad que utilizaremos para que sea comparable con los datos del petróleo, igual que después haremos con el carbón. Pare ello aplicamos los factores de conversión habituales.

aproximadamente la tercera parte (supuesto alto) de los recursos totales de petróleo convencional que se extraerán; para el gas natural los valores son muy inferiores: entre algo más de la tercera y la quinta parte del total.

Tabla 1.- Supuestos de URR: cantidad última de recursos recuperables (en 10⁹ barriles de petróleo equivalente) (Gbpe)

| | BAJO | ALTO |
|-----------------------|-------|-------|
| Petróleo convencional | 2.100 | 3.300 |
| Gas natural | 1.700 | 3.000 |

Por lo que respecta al “estilo” o variante de agotamiento, las posibilidades son muchas, incluso sin moverse del enfoque de Hubbert tomado en sentido amplio⁹. Así, por ejemplo, dado un supuesto sobre la cantidad de URR, retrasar el año –o años– de máxima extracción supone que la curva de decrecimiento de la extracción deberá ser más pronunciada, con lo que la adaptación a una menor oferta de combustibles fósiles puede ser más difícil.

Aquí hemos optado por limitarnos a tres posibilidades: 1) un comportamiento caracterizado por un pico o cénit único (*peak*) y unas curvas de extracción creciente y decreciente simétricas; 2) un comportamiento “meseta” (*plateau*), según el cual el máximo de extracción se mantiene durante todo un período (en concreto supondremos veinte años), y las curvas de extracción creciente y decreciente son simétricas; 3) un comportamiento asimétrico, según el cual se alcanza un pico único, pero en el que las curvas de crecimiento y decrecimiento no son simétricas; en concreto supondremos que el ritmo de agotamiento es más rápido que el ritmo de crecimiento anterior al pico.

La tabla 2 resume los casos considerados y las funciones matemáticas concretas adoptadas. En el primer caso se trata una función logística; en el segundo caso la meseta es precedida y seguida por dos curvas gaussianas con la misma desviación típica; en el tercer caso consideramos dos curvas gaussianas con diferente desviación (una desviación típica de la curva decreciente con valor igual a la mitad de la curva creciente) y con el supuesto de continuidad (aunque no el de derivabilidad) en el máximo de extracción.

⁹ Ver, por ejemplo, para diferentes especificaciones, Deffeyes (2005); Caithamer (2008); Brecha (2008); Feng, Li y Pang (2008); Kaufmann y Shiers (2008); Wood *et al.* (2003); y Brandt (2007).

Tabla 2.- Supuestos de funciones de agotamiento para el petróleo convencional y el gas natural

| | FUNCIÓN | CARACTERÍSTICAS ADICIONALES |
|------------------|---|---|
| Pico simétrico | $\dot{P} = rP \left(1 - \frac{P}{P_\infty} \right)$ | |
| Meseta simétrico | $\pi(t) = \begin{cases} \frac{e^{-\frac{(t-\tau_{peak\ up})^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}} & t \leq \tau_{peak\ up} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} & \tau_{peak\ up} \leq t < \tau_{peak\ down} \\ \frac{e^{-\frac{(t-\tau_{peak\ down})^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}} & t \geq \tau_{peak\ down} \end{cases}$ $\dot{P}(t) = \frac{P_\infty}{\left(\frac{\tau_{peak\ down} - \tau_{peak\ up}}{\sqrt{2\pi\sigma}} \right) + 1} \pi(t)$ | Tamaño de la meseta: $\tau_{peak\ up} - \tau_{peak\ down} = 20$ |
| Pico asimétrico | $\pi(t) = \begin{cases} \frac{e^{-\frac{(t-\tau_{peak})^2}{2\sigma_1^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} & t \leq \tau_{peak} \\ \frac{e^{-\frac{(t-\tau_{peak})^2}{2\sigma_2^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma_2}} & t \geq \tau_{peak} \end{cases}$ $\dot{P}(t) = \frac{P_\infty}{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)} \pi(t)$ | Relación entre ritmos de crecimiento y agotamiento: $\sigma_2 = 0,5\sigma_1$ |

NOTA: $P(t)$ simboliza la extracción acumulada hasta el instante t , su derivada es la extracción anual, P_∞ simboliza URR, τ_{peak} es el año en el que se alcanza el pico, $\tau_{peak\ up}$ y $\tau_{peak\ down}$ son los años inicial y final de la meseta.

La combinación de supuestos sobre URR y de las anteriores funciones da lugar a los escenarios de la tabla 3.

Tabla 3.- Escenarios considerados para el petróleo convencional y el gas natural

| FUNCIÓN DE EXTRACCIÓN | URR BAJO | URR ALTO |
|-----------------------|-----------------|-----------------|
| Pico simétrico | Simétrico bajo | Simétrico alto |
| Meseta simétrico | (*) | Meseta alto |
| Pico asimétrico | Asimétrico bajo | Asimétrico alto |

(*)Este escenario no se ha considerado porque es inviable, dado que en el supuesto bajo ya se han consumido la mitad de URR.

3.2. CARBÓN, ¿SERÁ EL SIGLO XXI EL SIGLO DEL CARBÓN?¹⁰

El caso del carbón es diferente al de los otros combustibles fósiles. Existe aún más polémica que en los otros recursos sobre la cantidad de recursos potencialmente explotables; en palabras de Laherrère (2004, p. 6) “*las estimaciones sobre los recursos de carbón son muy poco frecuentes*”. Aunque algunos estudios recientes han cuestionado la idea de que los recursos de carbón son extremadamente abundantes (EWG, 2007; Rutledge, 2008), en general se consideran muchísimo más abundantes (y son geográficamente mucho menos concentrados) que los de los otros combustibles fósiles, e incluso podrían ser de un orden de magnitud superior. La extracción acumulada según BP (2007) sería de 1.189 Gbpe. El IPCC (2007, p. 264) habla de unas reservas de 17.452 Gbpe, mientras que el BGR da la casi increíble cifra de 46.686 Gbpe para el carbón, con un poder calorífico superior a los 16.500 kJ/kg y 8.204 Gbpe para el lignito. De hecho, entre los años 2000 y 2007 el uso de carbón creció más que el del petróleo e incluso que el del gas natural, por lo que tiene sentido preguntarse si seguirá esta tendencia que, sin duda, puede prolongarse al menos por bastantes décadas, y cuáles serían las consecuencias en términos de emisiones. Nuestra hipótesis es que las limitaciones geológicas no desempeñarán un papel decisivo en las tendencias en el uso del carbón durante el siglo XXI: la clave serán los factores económicos y políticos, incluyendo, obviamente, la política ambiental y, en particular, las restricciones que pueda imponer la política frente al cambio climático.

En concreto, en nuestros escenarios supondremos una evolución extremadamente negativa en términos ambientales según la cual el agotamiento del petróleo y del gas natural va acompañado de un uso creciente de carbón para compensar ese agotamiento. Asumimos que cuando empieza a disminuir la oferta conjunta (en términos energéticos) de petróleo y de gas natural, la extracción de carbón aumenta de forma que se mantenga exactamente la energía primaria total procedente de los tres combustibles fósiles. Esto implica, como veremos, que en los diversos escenarios

¹⁰ Algunos autores, como Mariano Marzo, especialista en recursos energéticos, han advertido en artículos y conferencias que la tendencia más probable es a un uso cada vez mayor –y no menor– de carbón.

la extracción de carbón aumenta de forma importantísima. Sin embargo, adviértase que durante los últimos siglos la tendencia ha sido de una disponibilidad creciente de energía primaria procedente de los combustibles fósiles a nivel mundial, y en nuestra hipótesis esa disponibilidad se estabilizaría en un futuro próximo. Además, si, como es esperable, las extracciones futuras se dan de media en lugares de más difícil extracción, e incluso en algunos casos se dan procesos de transformación energéticamente costosos (como obtención de líquidos a partir de carbón o de gas), podemos esperar un aumento en la energía requerida para disponer de energía¹¹, de forma que la energía neta disponible procedente de los combustibles fósiles disminuiría, rompiendo la tendencia histórica.

4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Para determinar los valores de los parámetros no definidos en las funciones lo que hacemos es minimizar en cada caso la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores que toman las funciones para los diferentes valores y los datos históricos. Para ello utilizamos los datos de petróleo de Caithamer (2008) desde el año 1857 hasta el año 2003, mientras que los años siguientes se calculan restando a los datos suministrados por BP (2007) los valores de petróleo no convencional proporcionados en IEA (2006, p. 94). Para los datos de carbón y gas natural utilizamos las series 1965-2007 procedentes de BP (2007).

Los resultados sobre los años en que se producirá la máxima extracción de petróleo y gas natural se resumen en la tabla 4.

Tabla 4.- Máxima extracción de los diferentes recursos (Gbpe)

| ESCENARIO | PETRÓLEO CONVENCIONAL | GAS NATURAL | PETRÓLEO + GAS NATURAL |
|-----------------|-----------------------|-------------|------------------------|
| Simétrico bajo | 2005 | 2019 | 2010 |
| Simétrico alto | 2022 | 2041 | 2030 |
| Meseta alto | 2016-2036 | 2037-2057 | 2036 |
| Asimétrico bajo | 2011 | 2031 | 2013 |
| Asimétrico alto | 2031 | 2052 | 2034 |

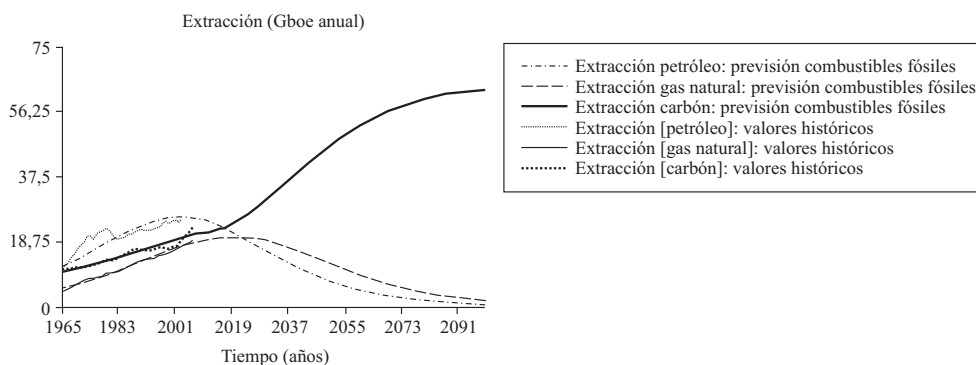
Por lo tanto, según los diferentes supuestos, el máximo de energía primaria procedente del petróleo y del gas natural se situaría en el período 2010-2034¹². Es a partir de este máximo cuando suponemos que la extracción de carbón aumenta para

¹¹ O, visto a la inversa, una disminución de lo que se llama *Energy Return On Investment* (EROI) o energía obtenida por unidad de energía invertida.

¹² Puede resultar extraño que en el escenario simétrico bajo el pico del petróleo ya se haya producido hace unos años. Sin embargo, los datos de petróleo "convencional" que utilizamos sí que muestran que el máximo de extracción se produjo en el año 2006; además, como se trata de un ajuste de una fórmula matemática, el máximo de la curva teórica no tiene por qué coincidir exactamente con el máximo observado. En cualquier caso, el escenario corresponde a una situación en la que la curva de extracción es simétrica y en el que suponemos que se han explotado más o menos la mitad de reservas, por lo que el pico ha de estar en torno al momento actual.

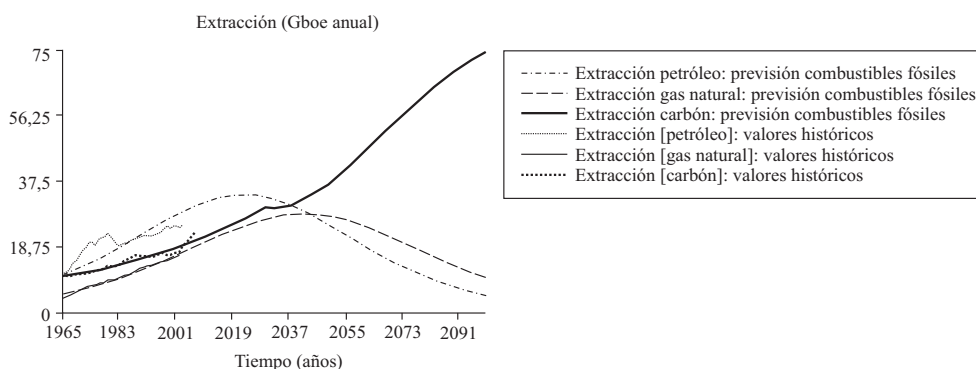
compensar la caída, tal y como se refleja en los gráficos 1 a 5¹³, que corresponden a los cinco escenarios considerados. Esto implicaría –suponiendo que no se diesen antes signos claros de agotamiento– enormes aumentos del uso del carbón, que en conjunto llevarían a una extracción acumulada total que se situaría entre cerca de los 4.700 Gbpe (en el escenario meseta) y algo más de los 6.000 Gbpe (en el escenario asimétrico bajo): valores enormes –y nefastos desde el punto de vista ambiental–, pero que están muy lejos de los recursos disponibles según muchas estimaciones, aunque, insistimos, hay fuertes desacuerdos con respecto al tema y para algunos autores serían cifras inviables.

Gráfico 1.- Extracción de combustibles fósiles en el escenario simétrico bajo



NOTA: Gboe = 10⁹ barriles de petróleo equivalente.

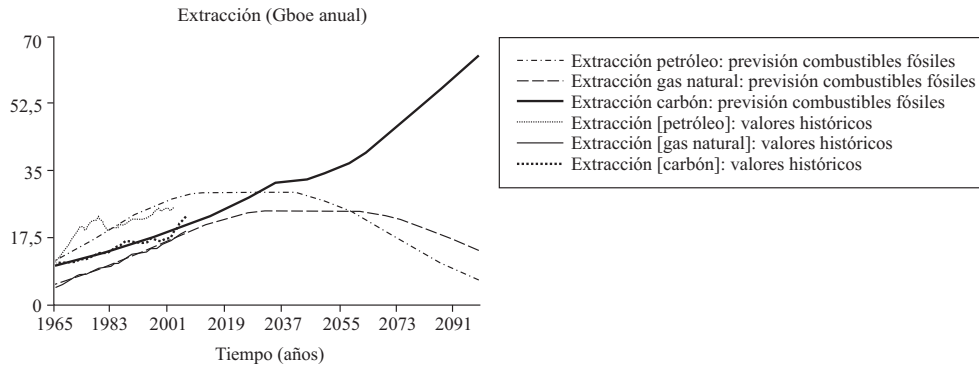
Gráfico 2.- Extracción de combustibles fósiles en el escenario simétrico alto



NOTA: Gboe = 10⁹ barriles de petróleo equivalente.

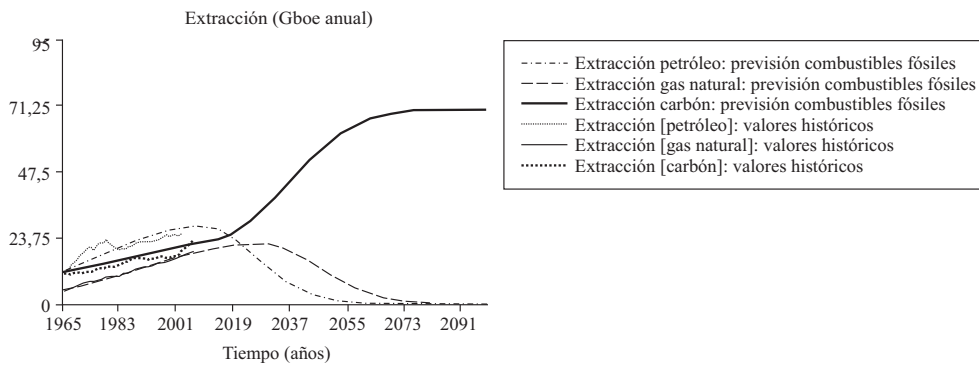
¹³ También es necesario hacer algún supuesto sobre la extracción de carbón antes de ese momento. Lo que suponemos es un ajuste logístico como si la cantidad de URR fuese tan grande como la estimación de BGR (2006) comentada anteriormente.

Gráfico 3.- Extracción de combustibles fósiles en el escenario meseta alto



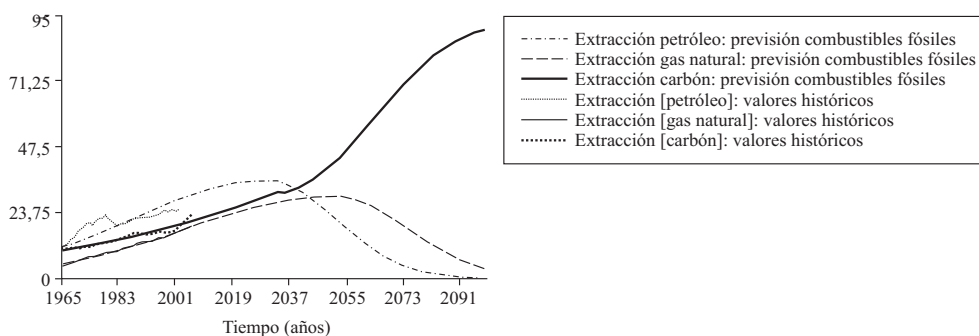
NOTA: Gboe = 10⁹ barriles de petróleo equivalente.

Gráfico 4.- Extracción de combustibles fósiles en el escenario asimétrico bajo



NOTA: Gboe = 10⁹ barriles de petróleo equivalente.

Gráfico 5.- Extracción de combustibles fósiles en el escenario asimétrico alto

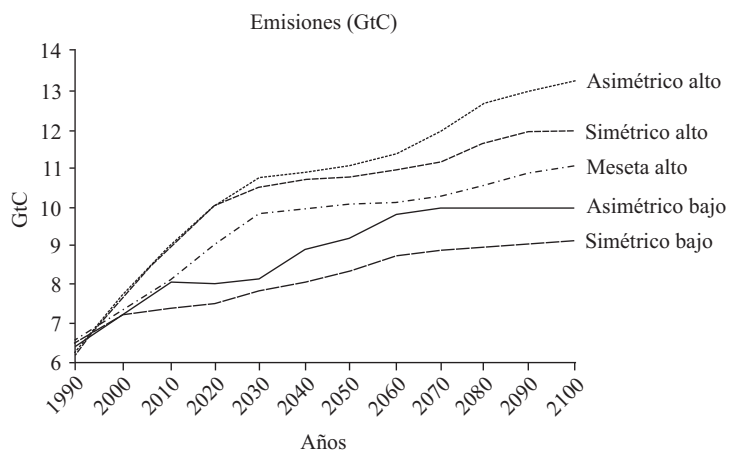


NOTA: Gboe = 10⁹ barriles de petróleo equivalente.

5. IMPLICACIONES EN TÉRMINOS DE EMISIONES DE CO₂

En el gráfico 6 representamos las emisiones de CO₂ que los anteriores escenarios de explotación de recursos fósiles supondrían (siempre sin considerar la posible captura de una parte del carbono). En todos ellos se observa un muy elevado aumento de las emisiones. En los escenarios en los que el máximo de extracción de petróleo y gas natural se produce antes, el total máximo de uso de combustibles fósiles es menor pero, por otro lado, antes se produce un creciente peso relativo del carbón con sus efectos sobre el aumento de las emisiones medias por unidad de energía. Las emisiones para el año 2100 con respecto al año 1990 aumentan casi el 50% en el mejor de los casos (escenario simétrico bajo) y alcanzan más del doble en el peor de los casos (asimétrico alto).

Gráfico 6.- Emisiones de CO₂ derivadas del uso de combustibles fósiles en los diferentes escenarios



NOTA: GtC significa gigatoneladas de carbono.

Una observación es que las emisiones, a pesar de su elevado crecimiento, son inferiores a las de los peores escenarios contemplados en el último informe del IPCC (IPCC, 2007); por ello, estos peores escenarios parecen “poco realistas”, teniendo en cuenta las limitadas reservas de petróleo y gas natural, una crítica que se ha hecho desde algunos círculos preocupados por el agotamiento de los combustibles fósiles. Son poco realistas a menos que se esté suponiendo un uso del carbón aún superior al considerado en nuestros escenarios. En cualquier caso, parece claro que en los escenarios sobre futuras emisiones sería interesante hacer más explícitos los supuestos sobre uso de los diferentes combustibles fósiles y contrastarlos con las informaciones sobre disponibilidad de recursos explotables.

De todas formas, lo que hay que destacar es que el hecho de que las emisiones crezcan menos que en los peores escenarios del IPCC no es en absoluto tranquili-

zador, ya que todos nuestros escenarios llevarían, con toda probabilidad –según los modelos habituales¹⁴ que muchos consideran demasiado prudentes–, a concentraciones de CO₂ claramente superiores a las 450 ppm y a aumentos en la temperatura media superiores a los 2,5° y, en el peor de nuestros escenarios, a los 3°. Nuestros escenarios representan unas emisiones mucho más grandes que los mejores escenarios del IPCC y, por supuesto, muy superiores a lo que recomiendan la mayoría de los científicos, es decir, reducirlas drásticamente lo antes posible.

Si, además, tenemos en cuenta la elevada incertidumbre, la posibilidad de comportamientos peores, y aplicamos el principio de precaución, la conclusión aún es más clara: el agotamiento del petróleo y del gas natural no sólo será un reto para el cambio de modelo energético, sino que puede ir acompañado de escenarios de emisión que pueden tener efectos dramáticos.

6. LIMITACIONES Y CONCLUSIONES

Para acabar, debemos señalar las limitaciones de nuestros ejercicios de simulación. En los escenarios no se han considerado dos factores muy polémicos. El primero, la explotación –que ya se lleva a cabo y que, sin duda, será creciente– de petróleo “no convencional”. Las posibilidades de obtener muchos recursos por esta vía son muy debatidas, aunque parece claro que en cualquier caso serían de magnitud muy inferior a las del resto de combustibles fósiles. En la modelización podríamos haber optado por utilizar un concepto más amplio de petróleo para incluir el petróleo “no convencional”, con el resultado de que el pico o meseta de petróleo se hubiese atrasado, o podríamos haber optado por suponer que parte de la compensación de la decreciente oferta de petróleo y de gas natural vendría no sólo del carbón, sino también del petróleo no convencional, lo que “aliviaría” la necesidad de extraer carbón y, desde luego, facilitaría la sustitución del petróleo, ya que este se utiliza sobre todo como combustible líquido. De todas formas, hay que tener en cuenta el elevado coste energético –el bajo EROI– que caracteriza en general a los petróleos no convencionales. En cualquier caso, la inclusión en los escenarios de estos petróleos no creemos que hubiese dado un resultado significativamente más optimista en términos de emisiones. El segundo factor no considerado –también muy polémico, y al que ya nos hemos referido– es el de la aplicación de técnicas de captura de CO₂: ciertamente, si se es optimista respecto de este tema, las trayectorias futuras de emisión podrían ser muy inferiores, aunque también hay que tener en cuenta el coste energético de las actividades de captura (Page *et al.*, 2009).

Por otro lado, se puede pensar que los escenarios sobre explotación futura de carbón son bastante impensables, ya que aparecerán síntomas de agotamiento del recurso. En cualquier caso, sí que parece claro que esto no se producirá antes de

¹⁴ Hemos utilizado el modelo MAGICC, *software* desarrollado por uno de los principales autores de los modelos simples del IPCC (Wigley, 2008).

varias décadas, por lo que las posibles restricciones geológicas limitarían las emisiones dando escenarios climáticos algo menos dramáticos pero, sin duda, esto sería demasiado poco y se produciría demasiado tarde como para confiar mucho en este factor.

Finalmente, insistimos de nuevo en que no hemos pretendido ni mucho menos hacer ejercicios de previsión (¡a casi cien años vista!), sino de explorar las relaciones entre disponibilidad de combustibles fósiles y trayectorias futuras de emisiones para destacar el papel clave que el carbón podría desempeñar en el futuro y para ilustrar lo que, a nuestro entender, puede representar una gran tensión futura a nivel mundial: la tensión entre la sed de combustibles fósiles como fuente energética concentrada y fácilmente accesible y la necesidad –y conciencia creciente– de que hay que frenar las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que significa principalmente frenar de forma rápida el uso de combustibles fósiles¹⁵. Nuestros escenarios pueden verse como una ilustración de las trayectorias de energía-emisiones que podrían darse si la tensión anterior se resolviese básicamente a favor de mantener la oferta de combustibles fósiles el máximo tiempo posible, respecto de lo cual puede discutirse si es o no probable pero, en nuestra opinión es, sin duda, indeseable.

BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA, A. (2009): “El proyecto ITT en Ecuador: dejar el crudo en tierra o el camino hacia otro modelo de desarrollo” (entrevista), *CIP-Ecosocial- Boletín ECOS*, núm. 8 (agosto-octubre).
- BANKS, F.E. (2004): “Beautiful and Not So Beautiful Minds: An Introductory Essay on Economic Theory and the Supply of Oil”, *OPEC Review*, vol. 28, núm. 1 (March), pp. 27-62.
- BENTLEY, B.; BOYLE, G. (2008): “Global Oil Production: Forecasts and Methodologies”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 35, pp. 609-626.
- BERMEJO, R. (2008): *Un futuro sin petróleo. Colapsos y transformaciones socioeconómicas*. CIP-Ecosocial / La Catarata.
- BRANDT, A.R. (2007) “Testing Hubbert”, *Energy Policy*, vol. 35, pp. 3074-3088.
- BRECHA, R.J. (2008) “Emission Scenarios in the Face of Fossil-Fuel Peaking”, *Energy Policy*, vol. 36, pp. 3492-3504.
- BRITISH PETROLEUM (BP) (2007): *Statistical Review of World Energy 2007*.
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR) (2006): *Reserves, Resources and Availability of Energy Resources 2006*.
- CAIRNS, R.D. (2001): “Capacity Choice and the Theory of the Mine”, *Environmental and Resource Economics*, vol. 18, núm. 1 (January), pp. 129-148.
- CAITHAMER, P. (2008): “Regression and Time Series Analysis of the World Oil Peak of Production: Another Look”, *Mathematical Geosciences*, vol. 40, pp. 653-670.

¹⁵ Y, quizás, complementariamente avanzar en la captura de carbono, aunque en ningún caso pensamos que esta posibilidad tecnológica pueda sustituir la reducción en el uso de combustibles fósiles.

- CAMPBELL, C.J.; LAHERRÈRE, J.H. (1998): "The End of Cheap Oil", *Scientific American*, (March).
- CAMPBELL, C.J. (2002): *Forecasting Global Oil Supply 2000-2050*. (Hubbert Center Newsletter, 2002/3).
- CLEVELAND, C.; HALL, C.; HALLOCK, H.; JEFFERSON, M.; THARAKAN, P. (2003): "Hydrocarbons and the Evolution of Human Culture", *Nature*, vol. 426, pp. 318-322.
- DEFEYES, K.S. (2005): *Beyond Oil*. New York: Hill & Wang.
- DEVARAJAN, S., FISHER, A.C. (1981): "Hotelling's Economics of Exhaustible Resources: Fifty Years Later", *Journal of Economic Literature*, vol. XIX (March).
- ENERGY WATCH GROUP (EWG) (2007): *Coal: Resources and Future Production*. (EWG-Series, 1/2007).
- FENG, L.; LI, J.; PANG, X. (2008): "China's Oil Reserve Forecast and Analysis Based on Peak Oil Models", *Energy Policy*, vol. 36, pp. 4149-4153.
- FERNÁNDEZ DURÁN, R. (2008): *El crepúsculo de la era trágica del petróleo: pico del oro negro y colapso financiero (y ecológico) mundial*. Virus / Ecologistas en Acción.
- HOLLAND, S. (2008): "Modeling Peak Oil", *Energy Journal*, vol. 29, núm. 2, pp. 61-79.
- HOTELLING, H. (1931): "The Economics of Exhaustible Resources", *Journal of Political Economy*, vol. 22, núm. 9, pp. 137-175.
- HUBBERT, M.K. (1956): *Nuclear Energy and the Fossil Fuels*. (Shell Development Company, Exploration and Production Research Division, Publication, 95). Houston, TX.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2006): *World Energy Outlook 2006*.
- IPCC (2007): *Energy Supply*. (IPCC, Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the AR4 of the IPCC).
- KAUFMANN, R.K.; SHIERS, L.D. (2008): "Alternatives to Conventional Crude Oil: When, How Quickly, and Market Driven?", *Ecological Economics*, 67, pp. 405-411.
- KHARECHA, P.A.; HANSEN, J.E. (2007): *Implications of Peak Oil for Atmospheric CO₂ and Climate*. (www.theoil drum.com).
- KRAUTKRAEMER, J.A. (1998): "Nonrenewable Resource Scarcity", *Journal of Economic Literature*, XXXVI (December).
- LAHERRÈRE, J.H. (2004): "Perspectives Energetiques et Scientifiques. Presentation au Club des Jeunes Dirigeants de Quimper", *Brouillon*, (Avril).
- MEADOWS, D.L.; BEHRENS III, W.W.; MEADOWS, D.H.; NAILL, R.F.; RANDERS, J.; ZAHN, E.K.O. (1974): *Dynamics of Growth in a Finite World*. Cambridge, MA: Wright-Allen Press.
- MEADOWS, D.L.; RANDERS, J.; MEADOWS, D.H. (2004): *Limits to Growth. The 30-Year Update*. Chelsea Green.
- MISHAN, E.J. (1981): *Introduction to Normative Economics*. New York: Oxford University Press.
- MOHR, S.; EVANS, G. (2007): "Mathematical Model Forecasts Year Conventional Oil Will Peak", *Oil & Gas Journal*, vol. 105, núm. 17.
- NEL, W.P.; COOPER, C.J. (2009): "Implications of Fossil Fuel Constraints on Economic Growth and Global Warming", *Energy Policy*, vol. 37, pp. 166-180.
- PAGE, S.C.; WILLIAMSON, A.G.; MASON, I.G. (2009): "Carbon Capture and Storage: Fundamental Thermodynamics and Current Technology", *Energy Policy*, vol. 37, pp. 3314-3324.

- ROCA JUSMET, J. (1991): “La teoría económica sobre el precio de los recursos no renovables: un comentario crítico”, *Cuadernos de Economía*, vol. 19, núm. 54 (enero-marzo), pp. 111-123.
- ROCA JUSMET, J. (2007): “La crítica al crecimiento económico desde la economía ecológica y las propuestas de decrecimiento”, *Ecología Política*, núm. 33.
- RUTLEDGE, D. (2008): *The Coal Question and Climate Change*. (www.theoildrum.com).
- SEMPERE, J.; TELLO, E. [cord.] (2008): *El final de la era del petróleo barato*. Icaria.
- SLADE, M.E. (1991): “Market Structure, Marketing Method, and Price Instability”, *Quarterly Journal of Economics*, vol. 106, pp. 1309-1340.
- THOMPSON, A.C. (2001): “The Hotelling Principle, Backwardation of Futures Prices and the Values of Developed Petroleum Reserves - The Production Constraint Hypothesis”, *Resource and Energy Economics*, vol. 23, núm. 2, pp. 133-156.
- WIGLEY, T. (2008): *MAGICC/SCENGEN 5.3*.
- WOOD, J.H.; LONG, G.R.; MOREHOUSE, D.F. (2003): “World Conventional Oil Supply Expected to Peak in 21st Century”, *Offshore*, vol. 90.