

# **MODELOS DE ENERGÍA-ECONOMÍA-CAMBIO CLIMÁTICO**

## **en DINÁMICA de SISTEMAS**

**Informe para el debate de la política energética mundial y de España.**

**1ª Parte:**

**Modelos Energía-Economía para combustibles líquidos**

**Autor: Carlos de Castro Carranza. Departamento de Física Aplicada y Grupo de Energía y modelos de Dinámica de Sistemas. Universidad de Valladolid.**

## MODELOS ENERGÍA-ECONOMÍA PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Las proyecciones sobre producción y consumo de petróleo para las próximas décadas, suelen seguir dos caminos diferentes. Por un lado, están las proyecciones de las agencias nacionales e internacionales, como la IEA (Agencia Internacional de la Energía, WEO2007) y la EIA (Energy Information Administration, EIA2007), institutos de investigación de prestigio (IIASA1998) o el mismo IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, IPCC2001), que proyectan escenarios de futuro ricos en combustibles y determinados fundamentalmente por factores económicos y tecnológicos. Por otro lado, están las proyecciones de investigadores, recientemente casi todos ellos bajo el paraguas de distintas asociaciones “ASPO” ([The Association for the Study of Peak Oil and Gas](#)) - o centros de investigación (por ejemplo, Energy Watch Group, EWG2007), en la que los escenarios de futuro vienen limitados casi exclusivamente por la escasez de los recursos energéticos.

Entre los primeros, sorprende que la base de los escenarios se siga montando sobre unos niveles de reservas que los segundos han demostrado con suficiente claridad y contundencia que está mal fundamentada<sup>1</sup>.

Entre los segundos, sorprende que en las proyecciones no se tengan casi nunca en cuenta la reacción del sistema social, principalmente la economía, en los escenarios de consumo energético, cuando en el pasado han demostrado su clara influencia<sup>2</sup>.

Los primeros, suelen partir de escenarios de crecimiento económico que llevan a modelos de consumo energético también en crecimiento.

Los segundos, parten de escenarios de producción energética que llevan a escenarios –en general poco modelizados- de problemas económicos.

En realidad ambas visiones implícitamente relacionan poderosamente el consumo energético global y la marcha económica mundial, sin embargo, muy pocos –al menos desde los años 80- lo hacen dinámicamente y teniendo en cuenta ambos aspectos (Castro2007, Bassi2007).

Nuestro propósito es dar unos primeros pasos tratando de explorar esta brecha a partir de modelos de dinámica de sistemas, partiendo en principio, de una oferta de recursos de combustibles no renovables más bien escasa.

En esta primera parte, elaboramos en dinámica de sistemas modelos para los combustibles líquidos.

### **Hipótesis generales para los modelos:**

- La población mundial no se ve influenciada por la energía disponible ni por la economía (variable exógena).
- El progreso tecnológico será (casi)siempre a tasas de crecimiento crecientes.
- La intensidad energética es una variable endógena, no explícita en los modelos. Los modelos generarán la producción de energía y la renta mundial, de ahí que indirectamente generen el cociente entre ambos, que es la intensidad energética (puede servir de hecho para calibrar los modelos). (esto es una aportación más que una hipótesis, la intensidad emerge de los modelos, no tenemos que hacer hipótesis acerca de ella<sup>3</sup>).
- La economía se reducirá a la renta per cápita mundial y no va a reaccionar si existe crisis energética (ni para bien, ni para mal), sólo va a responder a la energía disponible.

---

<sup>1</sup> El ejemplo más claro son las reservas artificialmente infladas por los países de la OPEC en la “guerra de cuotas” de los años 80.

<sup>2</sup> El ejemplo más claro de nuevo lo da la OPEC, cuando generó las crisis del petróleo en los 70, que trastocó las previsiones del pico de petróleo.

<sup>3</sup> Es una ventaja de la realimentación propia de la dinámica de sistemas. Los modelos basados en escenarios como los del IIASA, EIA, IPCC, etc. tienen que hacer hipótesis sobre la evolución de la intensidad energética, ya que trabajan con escenarios preconcebidos del crecimiento económico. Luego estudian y proyectan la intensidad energética y la población mundial, para encontrar –poco más que despejando de la llamada identidad de Kaya- la producción energética o las emisiones de CO<sub>2</sub>.

- El mundo funciona como un todo agregado, como una unidad, sin conflictos entre regiones, o distorsiones motivadas por intereses estatales, etc.
- El cambio climático y otros problemas ambientales no van a realimentar al sistema energético, ni al económico.
- **Hipótesis de Hubbert:** la influencia geofísica (cantidad de recursos extraíbles, reservas, etc.) va a ser un factor de peso en la producción de recursos no renovables. Ante un recurso finito que se desgasta, podrá influir más en la producción que factores políticos, económicos y/o tecnológicos.

#### **Relato de futuro I (futuro proyectado)**

- La cantidad de recursos energéticos no renovables es finita y relativamente escasa –no hay abundancia de recursos. Esto hace coherente y pertinente a la hipótesis de Hubbert: la base de recursos existente será un factor muy importante en la producción energética futura.
- La producción energética y la renta per cápita van a estar mutuamente influenciadas, de tal manera, que la energía disponible va a determinar el crecimiento o retroceso económico y éste será un factor en el aumento o descenso de la demanda energética.
- Contemplamos la posibilidad de que un pico y posterior descenso en la producción de una energía o energías claves en el funcionamiento económico, generen un pico y posterior descenso en la renta per cápita mundial. En este caso, el mundo entraría en recesión económica. Si la renta per cápita desciende de forma continuada durante más de una década, entonces hablaremos de crisis económica. Si además, el descenso llega a estar por debajo de la que se disponía hace 20 años, entonces hablaremos de colapso económico. Aunque los modelos permiten avanzar temporalmente más allá del inicio de la crisis o colapso, entenderemos que las relaciones sociales, políticas y económicas pueden ser muy diferentes a las actuales, de tal forma que nuestros escenarios y modelos dejan de tener sentido: ¿Habrán guerras en grandes regiones por los recursos energéticos? ¿Hambrunas que limiten la población? ¿Cooperación internacional sin precedentes para resolver las crisis? Son preguntas que habría que responder e incorporar para poder afirmar que los escenarios y modelos son coherentes. Es decir, que aunque nuestro relato de futuro I trata de explorar precisamente la posibilidad de colapso energético y económico, una vez comenzado éste, pensamos que el sistema se hace prospectivamente caótico y por tanto impredecible.

#### **Relato de futuro II (futuro deseado)**

- La caída de producción de un recurso energético se intenta suplir con otras fuentes energéticas con el objetivo de que no decrezcan ni la energía mundial disponible, ni la renta per cápita, ni se disparen las emisiones de dióxido de carbono respecto a los escenarios medios del IPCC que conducirían a un cambio climático muy grave. Utilizaremos las hipótesis que necesitamos para cumplir con estos requisitos (aunque luego se analizará para alguna de ellas su posibilidad).

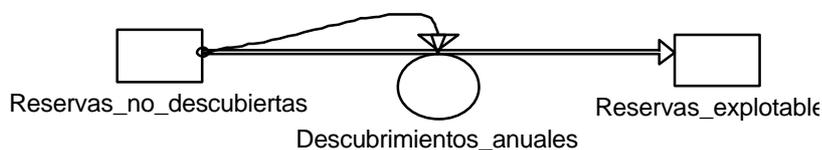
## 1º Escenarios de producción mundial de petróleo

### 1.1. Petróleo convencional<sup>4</sup>

#### 1.1.a. Modelo de dinámica de sistemas con la hipótesis de Hubbert

Nuestro primer paso será tratar de construir un modelo sencillo con herramienta de dinámica de sistemas, para comparar las hipótesis de Hubbert y la producción real.

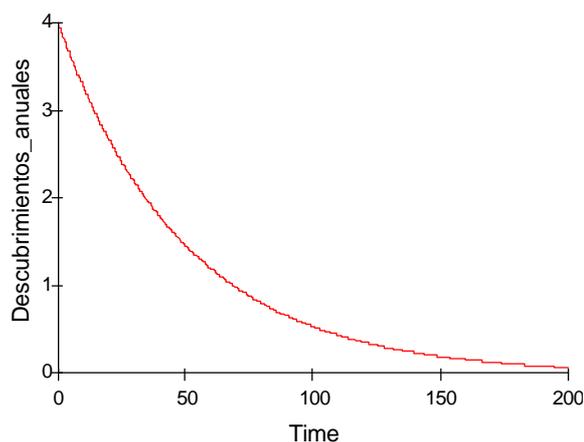
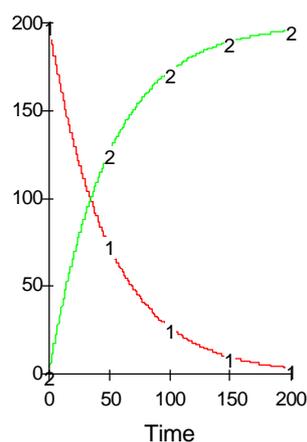
En un primer intento, realizamos un diagrama de stock-flujo con la herramienta de dinámica de sistemas (Powersim). Partimos de un stock de *Reservas\_no\_descubiertas* (aquellos recursos de petróleo aún no descubiertos en un año dado, del total de recursos últimos que se pueden descubrir o URR) y de un flujo de descubrimientos anual que “extrae” petróleo del stock de *Reservas no descubiertas* y lo “deposita” en el stock de *Reservas explotables* (aquellos recursos que se van descubriendo se acumulan como reservas). La flecha curvada que parte de las *Reservas no descubiertas* a los *Descubrimientos anuales*, representa que éstos dependen de aquellas:



Según, la hipótesis de Hubbert (1956), los *Descubrimientos anuales* serían proporcionales a las *Reservas no descubiertas*. Haciendo esto de forma cuantitativa, en el diagrama anterior:

```

init   Reservas = 0
flow   Reservas = +dt*Descubrimientos_anuales
init   Reservas_no_descubiertas = 200
flow   Reservas_no_descubiertas = -dt*Descubrimientos_anuales
aux    Descubrimientos_anuales = Reservas_no_descubiertas/50
  
```

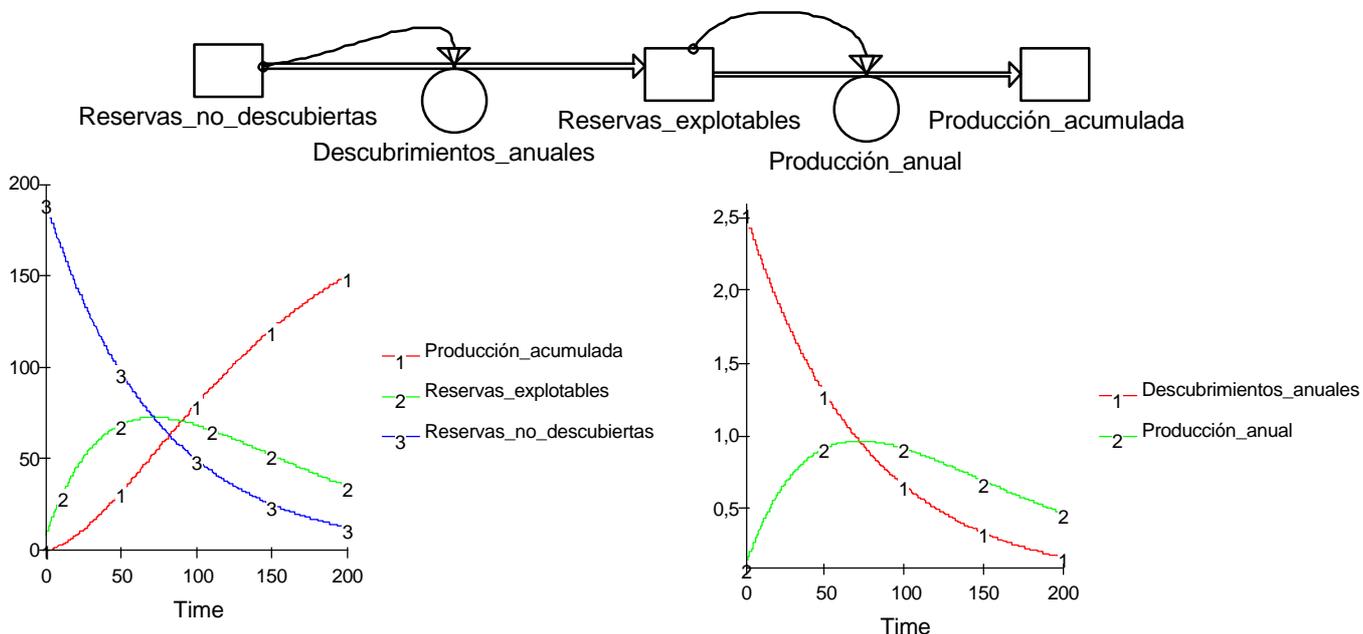


En los resultados de esta simulación, observamos caídas exponenciales tanto en las *Reservas no descubiertas* como en los *Descubrimientos anuales*. Comparada con la curva gaussiana de Hubbert

<sup>4</sup> El petróleo convencional aquí es la suma del llamado petróleo crudo y los líquidos del Gas Natural (NGL), tal y como los define el WEC2007

está claro que de representar algo, es la última parte de los descubrimientos, cuando estos caen rápidamente.

Si repetimos el esquema para la parte de la producción de petróleo a partir de las *Reservas explotables*, obtendríamos:

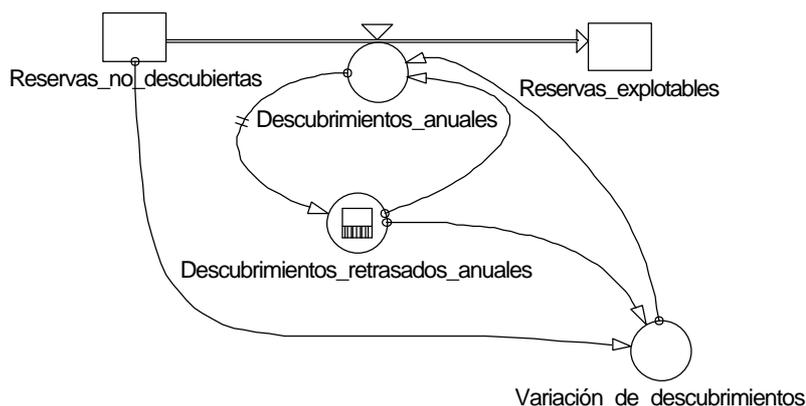


Como hemos dicho, de acuerdo a las tesis de Hubbert, la probabilidad de encontrar nuevos yacimientos (descubrimientos) sería proporcional a las reservas no descubiertas. Y si las curvas de descubrimientos y de producción son similares, entonces la *Producción anual* sería proporcional a las *Reservas explotables*. Sin embargo, las curvas obtenidas son: una caída exponencial en la tasa de descubrimientos (*Descubrimientos anuales*) y una curva en U invertida para la tasa de explotación (*Producción anual*).

Estas hipótesis de Hubbert hay que ponerlas en contexto temporal. En 1956 los descubrimientos en Estados Unidos estaban cayendo rápidamente (exponencialmente), lo que quedaría reflejado en la hipótesis y en este modelo. Así, las tasas de descubrimientos y explotación no serían muy diferentes a las observadas entre el pico de descubrimientos (1938) y el de producción (1970). Sin embargo, la curva de producción no es una gaussiana. Es decir que, para nuestros modelos, la parte de producción no nos sirve, y para la parte de descubrimientos sí, siempre que estemos en la fase de descenso exponencial.

Por tanto, tenemos que complicar un poco más el modelo.

En el siguiente diagrama, los *Descubrimientos anuales*, los ponemos como la suma de los del año anterior (*Descubrimientos retrasados anuales*) más la variación que experimente este año los descubrimientos anuales (*Variación de descubrimientos*):

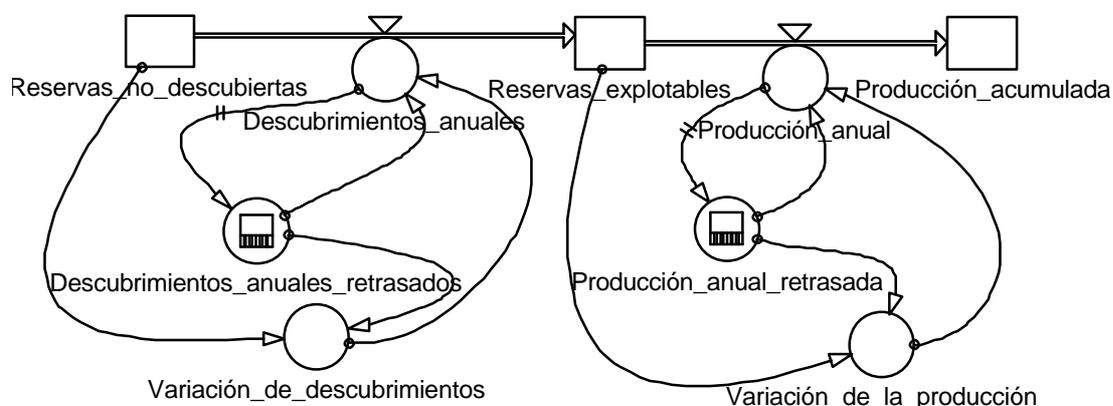


La *Variación de descubrimientos* la ponemos como una constante a la cual restamos lo que vamos a denominar "Esfuerzo" por un factor de ajuste "a" al que llamaremos "Factor de esfuerzo". El "Esfuerzo" es el cociente de los *Descubrimientos anuales retrasados* y las *Reservas no descubiertas*. La justificación de éste es por un lado, la propia hipótesis de Hubbert: los descubrimientos serán mayores cuanto más quede por descubrir, y por otro lado, la variación o incremento anual de los descubrimientos será mayor cuanto más quede por descubrir relativamente a lo descubierto; cuantos más *Descubrimientos anuales* se estén haciendo, más esfuerzo se estará haciendo y menos variación en los descubrimientos tendremos al año siguiente<sup>5</sup> (es más fácil aumentar un 10% el número de descubrimientos cuando los descubrimientos son por ejemplo de 0.5Gbarriles anuales que cuando estamos descubriendo 4Gbarriles).

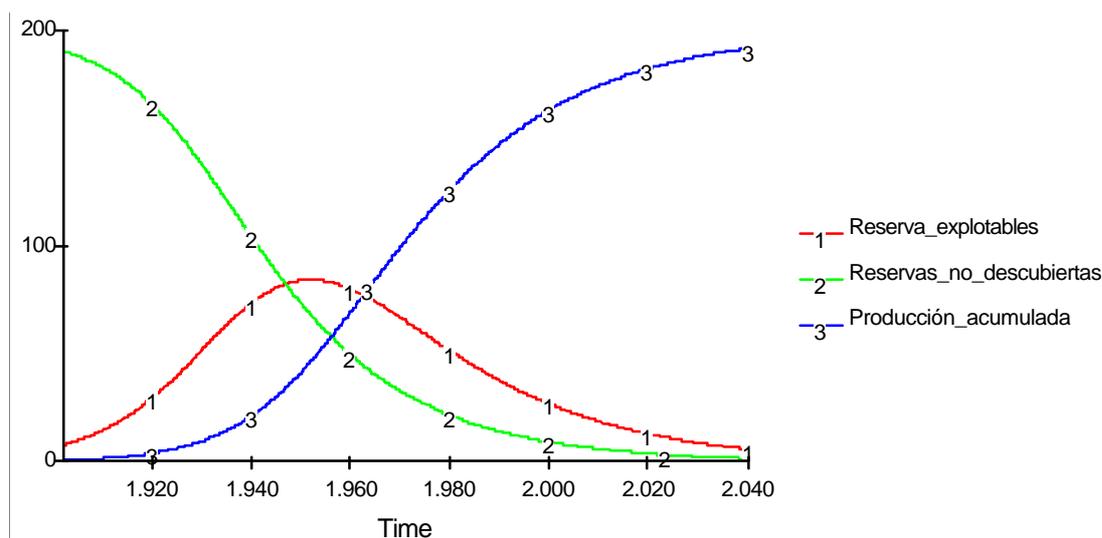
Es decir, la *Variación de los descubrimientos* = Cte. - "a" · "Esfuerzo". Y los *Descubrimientos anuales* quedarán:

$$\text{Descubrimientos anuales} = \text{Descubrimientos anuales retrasados} \cdot (1 + \text{Variación de descubrimientos})$$

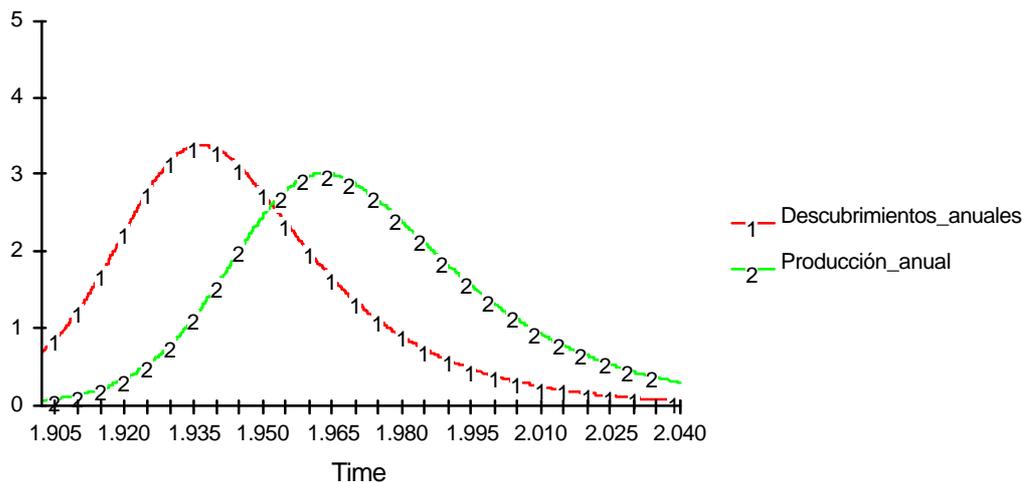
Si repetimos el mismo esquema que en el diagrama anterior para la parte productiva tendremos:



Nuestro pre-modelo queda:



<sup>5</sup> Este mismo concepto de esfuerzo lo aplicaremos a la producción y su variación. El esfuerzo productivo será P/R, la producción del año anterior entre las reservas extraíbles de petróleo. Curiosamente, P/R es el inverso de una magnitud clásica en la literatura de los recursos fósiles: el cociente R/P, que se suele dar como una idea (errónea) del tiempo que queda para acabar con las reservas.



Vemos como nuestro modelo, que solo tiene en cuenta factores geofísicos para la producción, reservas y descubrimientos, captura lo esencial de la teoría del pico del petróleo. La producción acumulada sigue una función que se parece a una sigmoideal, así como las reservas no descubiertas; y tanto los descubrimientos, como las reservas, como la producción anual, siguen funciones de incremento rápido, llegada a un máximo y caída rápida posterior. Sin embargo, claramente, no tenemos la simetría propia de las funciones gaussianas, habituales en los ajustes de los autores que siguen la teoría de Hubbert.

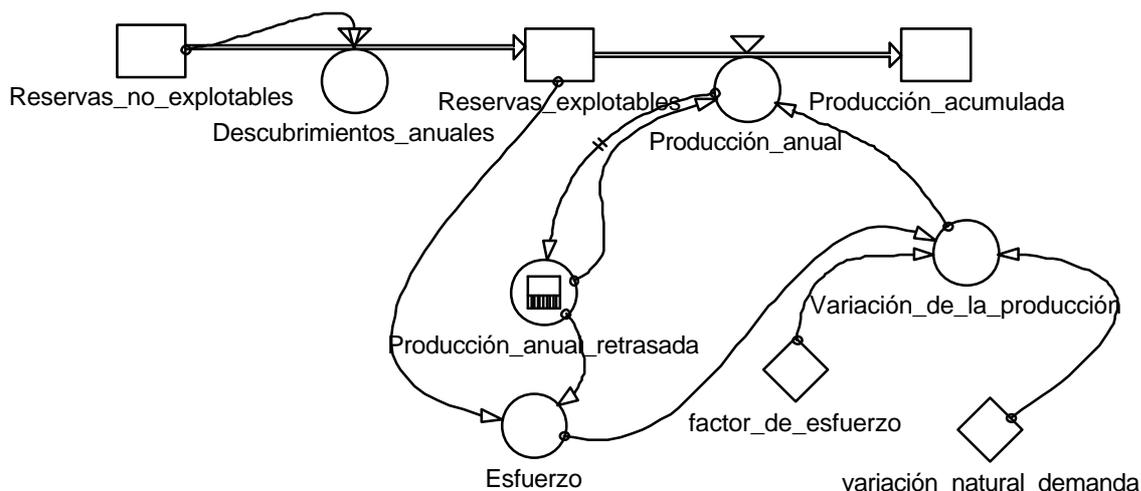
### 1.1.b. Modelos mundiales sin realimentaciones con la economía

Nuestro primer modelo mundial, explícito, va a ser similar al que acabamos de utilizar. Trabajaremos con los siguientes parámetros e hipótesis iniciales:

- Vamos a considerar el petróleo convencional nada más.
- Nuestro tiempo de inicio del modelo va a ser 1985, una vez superadas las crisis<sup>6</sup> de la OPEC de los años 70. La idea va a ser considerar que no va a haber restricciones a la demanda por problemas de oferta política sino económica, provocadas por la propia influencia de la oferta de petróleo en la marcha económica y de ésta sobre la demanda.

El diagrama de influencias de este primer modelo es el siguiente:

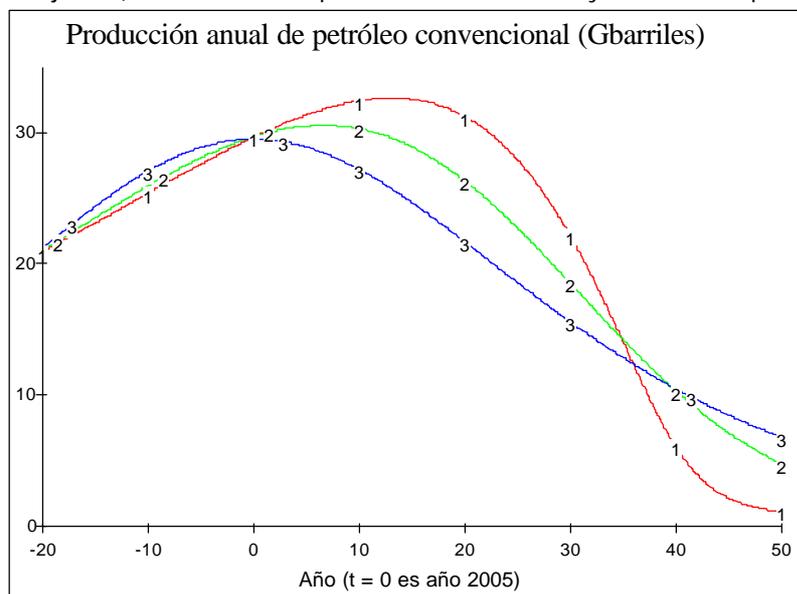
<sup>6</sup> Al modelizar desde 1985 tenemos solamente dos décadas del comportamiento pasado para ajustar nuestros parámetros. La ventaja es que no tenemos que incorporar a nuestros modelos las crisis de los 70, que nos obligarían a introducir nuevas hipótesis y parámetros.



Ahora hemos hecho explícitos los factores que influyen en la *Variación de la producción*: el *Esfuerzo* y su *factor de esfuerzo* y la *Variación natural de la demanda*<sup>7</sup>:

$$\text{Variación de la producción} = \text{Variación natural de la demanda} - \text{factor de esfuerzo} * \text{Esfuerzo}$$

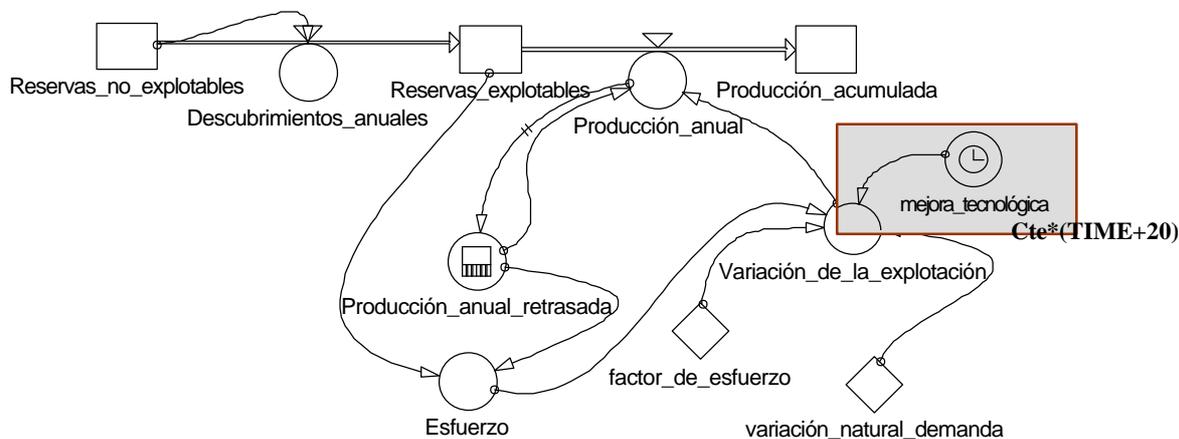
La siguiente gráfica es un modelo para la producción mundial de petróleo convencional suponiendo una URR de 2250Gbarriles y ajustando los "stocks" (rectángulos) y flujos de producción (círculos con el triángulo encima) a los valores "reales". La variación natural de la demanda es por ahora un parámetro de ajuste (la realidad de la producción entre 1985 y 2005 debe "predecirla" el modelo):



En rojo (1) para factor de esfuerzo 0.5, en verde (2) para factor de esfuerzo 1 y en azul (3) para factor de esfuerzo 2. Rojo y azul son los extremos que permiten ajustar el crecimiento real del primer lustro (1985-1990), fuera de ellos, el crecimiento real se aleja del del ajuste. Si comparamos con las reservas y la producción acumulada, la realidad se situaría entre el verde y el azul, si miramos las curvas de producción, la curva azul es la que más se aleja de lo que ha pasado y la curva roja se acercaría más. En conclusión la curva verde sería la preferida, con un factor de esfuerzo de 1. En ella, el decrecimiento de la producción entre el año 10 (2015) y el año 40 (2045), es de aproximadamente el 3% anual.

<sup>7</sup> Un rombo representa en el diagrama una constante.

El siguiente paso es añadir el efecto tecnológico para rebajar el esfuerzo con el tiempo. En nuestro caso, lo escogemos de una forma sencilla y optimista: la *Variación de la explotación* va a ser incrementada por la *mejora tecnológica* mediante una función lineal del tiempo creciente. Es decir, si nada más varía, la variación en la producción de petróleo aumenta con el tiempo lenta y linealmente. Observemos que esto supone un crecimiento más que exponencial en la producción anual (al ir aumentando el aumento de producción):



El efecto es retrasar ligeramente el pico de producción (un par de años) y aumentar su tamaño, pero la caída posterior es más rápida (la tecnología ayuda a extraer antes las reservas, pero no extrae más cantidad que la que existe extraíble).

### 1.1.c. Modelos mundiales con realimentaciones en la economía

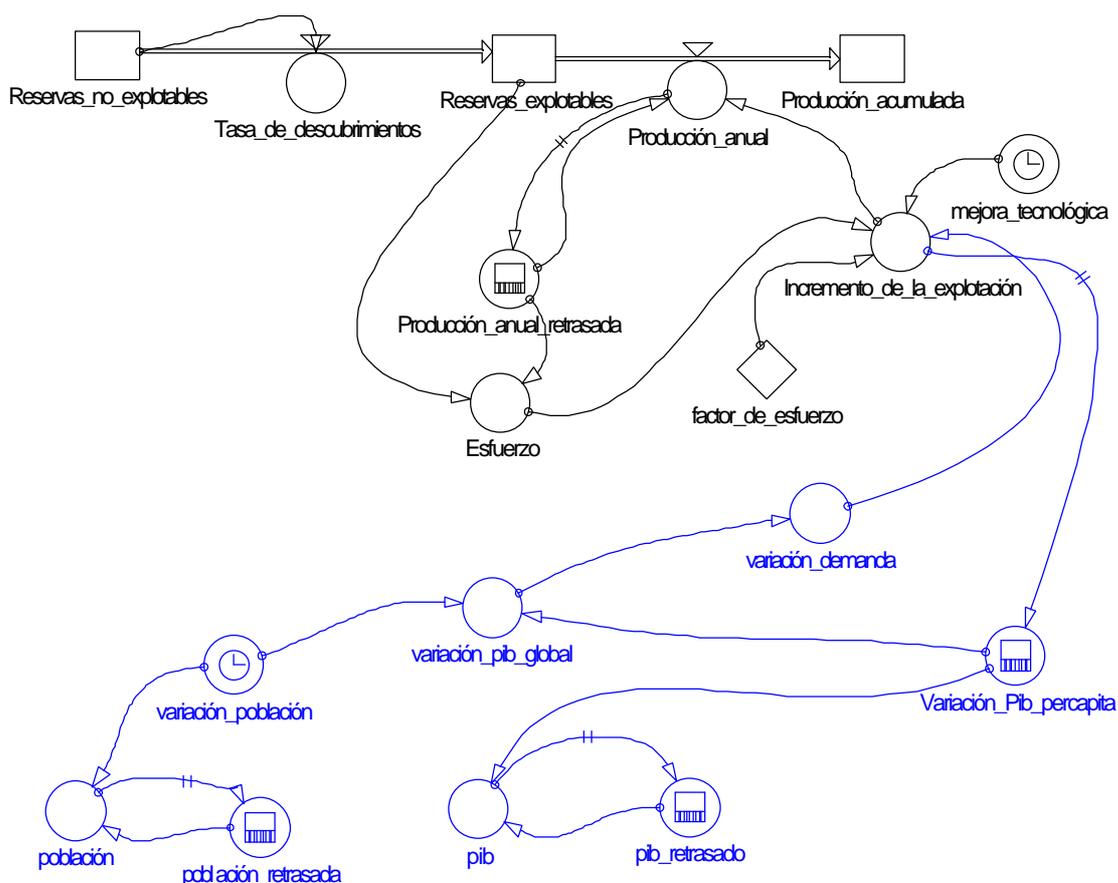
El paso siguiente es añadir el factor económico.

Vamos a hacerlo como efecto sobre la variación en la demanda de la producción (así esta deja de ser una constante "ad hoc"). A su vez, la variación en la demanda será suma de dos variaciones: la variación de la población y la del Producto Bruto mundial per cápita (PIB/per cápita). Ésta última deberá incorporar de forma implícita, como hemos dicho, la variación de la intensidad energética.

Nuestra hipótesis fundamental se basa en una realimentación mutua entre la variación del PIB per cápita y la variación en la demanda de petróleo.

La variación de la demanda de petróleo es la suma de la variación de la población y la variación del PIB per cápita.

Nuestro modelo se amplía (en azul):



Ahora la *variación de la demanda* es la *variación del PIB global*. Y ésta variación queda determinada a su vez por la suma de la *variación de población* (que tomamos en una proyección aproximadamente igual que las proyecciones medias de las Naciones Unidas) y la *variación del PIB per cápita*.

Lo más significativo es que hacemos a su vez, la *variación del PIB per cápita* dependiente de la propia variación de la producción de petróleo (*incremento de la explotación*), que depende como ya hemos visto, del *Esfuerzo*, de la *mejora tecnológica* y de la propia *variación de la demanda*. Obviamente, tenemos un lazo cerrado sobre sí mismo, imposible de modelizar si no metemos algún retraso. En la lógica causa-efecto, éste concepto se resiste: la variación del PIB depende de la variación de la producción del petróleo quien a su vez depende de la variación del PIB. Matemáticamente no podemos resolverlo sin retrasos. Nosotros escogemos en principio un retraso de un año (el PIB retrasado con respecto al petróleo), de tal forma, que en la lógica causa-efecto, la primera causa sería la variación del petróleo. Desde una visión más holista, esto no es tanto problema: partimos de la idea de que ambas se determinan mutuamente.

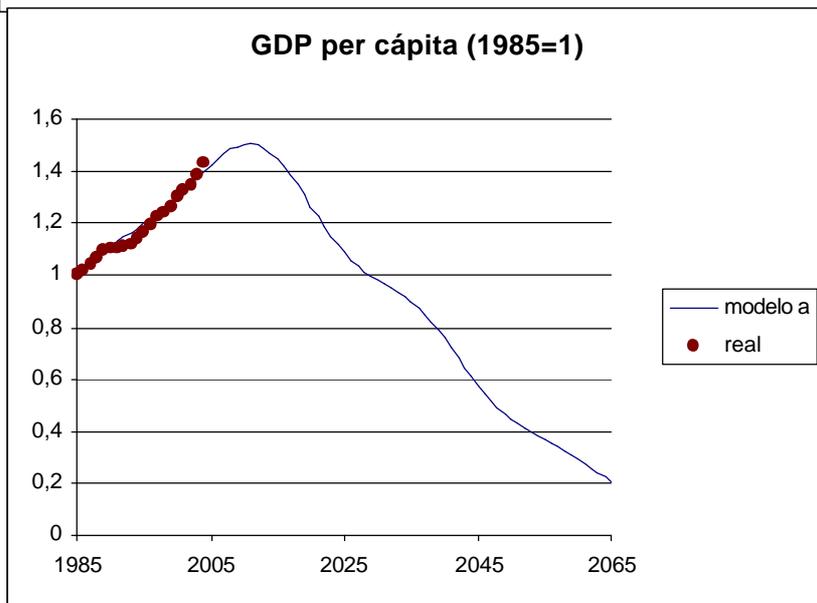
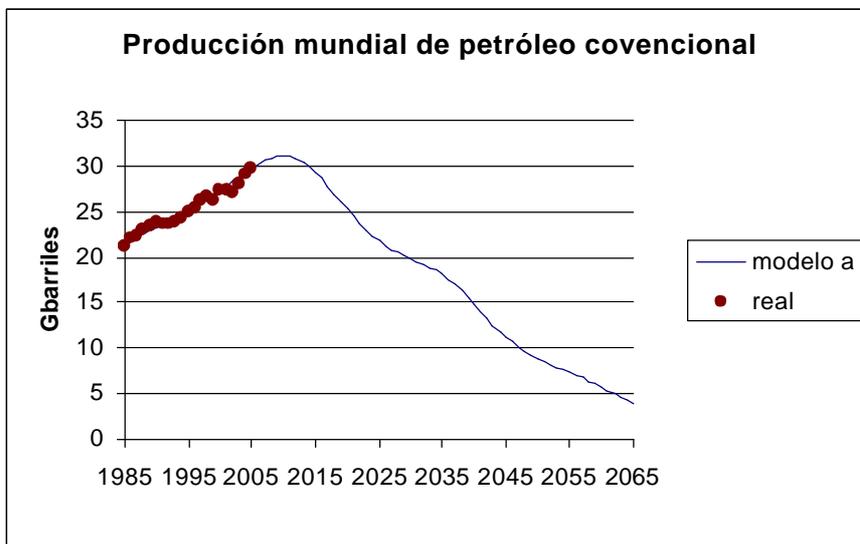
Por otro lado, Hirsch (2008) establece como primera estimación una relación bien directa:

$$\frac{\% \text{ cambio en el PIB}}{\% \text{ cambio en la oferta de petróleo}} \approx 1.$$

Esta igualdad que surge de aquí, es la que parcialmente utilizamos nosotros en nuestro modelo, pero teniendo en cuenta que en vez de la oferta de petróleo tomamos la demanda (para nosotros la oferta es la producción final de petróleo, que depende también del esfuerzo y de la mejora tecnológica). Además, en vez de tomar el %cambio en el PIB global, lo tomaremos per cápita. Así, nuestro modelo es un poco más optimista que el valor que toma Hirsch.

Ajustamos los parámetros de nuestro modelo con los siguientes criterios:

1. La producción de petróleo debe ajustar a la realidad aceptablemente bien entre 1985 y 2005.
2. La evolución del PIB per cápita también.
3. La producción de petróleo per cápita debe ser aproximadamente constante entre 1985 y 2005, como ha sido en realidad<sup>8</sup>.



El modelo anterior es optimista por varias razones:

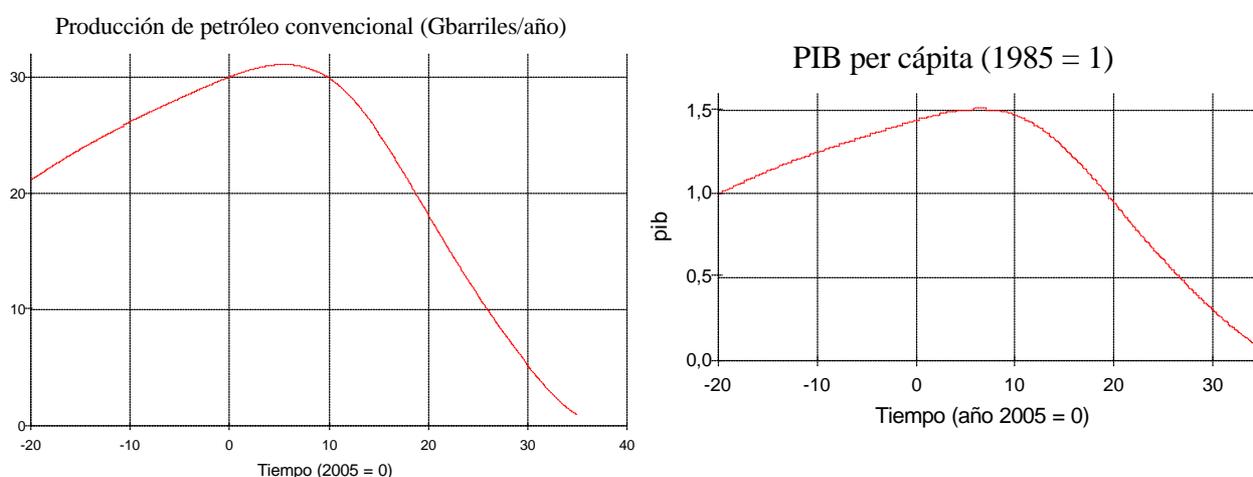
1. No hemos tenido en cuenta el TRE (Tasa de Retorno Energético) o la energía perdida para producir energía,  $E_p$ .
2. No hay realimentación en la población. Si hay crisis económica prolongada, puede haber tensiones mundiales. Tras el colapso económico la "barbarización" puede ser una consecuencia que diezme la población afectando ésta también a la propia economía.
3. No hay realimentación en la eficiencia tecnológica: Presuponemos que ésta siempre avanza cada vez a mayor ritmo (la variación aumenta siempre con el tiempo). Sin embargo, la eficiencia siempre tiene límites físicos, y, por supuesto, el avance tecnológico depende de inversiones que a su vez dependen de la economía. Si ésta entra en recesión, una primera reacción podría ser estimular el avance, pero, quizás, luego no será capaz de encontrar el

<sup>8</sup> Observemos que el cociente de los criterios 2 y 3 es la intensidad energética.

capital para la inversión en la mejora necesaria, y esta eficiencia no solo dejará de crecer cada vez a mayor ritmo, como presuponemos, sino que terminará creciendo a un ritmo constante, luego menor e incluso, podría llegar a decrecer.

Si pensamos ahora por un momento en estos criterios optimistas y los tratáramos de corregir en un modelo, el efecto intuitivo sería un descenso más rápido tanto de la producción como del PIB per cápita. El criterio del TRE no lo vamos a tratar hasta que no lleguemos a modelos de producción total energética pues la energía que se pierde en producir energía ( $E_p$ ) se "intercambia" con otras formas de energía: la  $E_p$  para extraer y refinar el petróleo viene en buena medida de otras formas energéticas, por lo tanto, no la podemos meter con coherencia en nuestros modelos aún.

En cuanto al criterio de que la mejora tecnológica debe tener alguna dependencia con la economía<sup>9</sup> si remodelamos el modelo de Hirsch ("A") y realimentamos nuestra variable "mejora tecnológica" con el PIB per cápita, de tal forma que sea<sup>10</sup>:  $cte \cdot (TIME+20) \cdot (1+\ln(PIB))$  en vez de  $cte \cdot (TIME+20)$ , nuestro modelo es totalmente catastrofista:



Vemos tanto a la producción de petróleo convencional como al PIB per cápita caer a cero antes del año 2045. De hecho, el modelo en dinámica de sistemas termina fallando a partir de esa fecha, pues el PIB y la producción de petróleo se llegan a hacer negativos.

Por ser tan pesimistas sus resultados, trabajaremos sin esta hipótesis a partir de aquí.

Aunque hemos dado una serie de razones para pensar que nuestros modelos son optimistas (salvo el último) también son pesimistas en los siguientes sentidos:

- No tienen en cuenta la posible contribución del petróleo no convencional para evitar, o retrasar, el pico del petróleo total.

<sup>9</sup> Tradicionalmente los economistas trabajan con mejoras tecnológicas que están ahí siempre, pero es intuitivo y creo que razonable, pensar que si la renta per cápita disminuye, las mejoras tecnológicas no serán tan rápidas, incluso podrían llegar a disminuir (ha habido civilizaciones que por colapso económico y social perdieron también capacidad tecnológica, el ejemplo paradigmático es la civilización de la isla de Pascua anterior a la llegada de los europeos –Castro2004-).

<sup>10</sup> La idea de utilizar el Logaritmo neperiano del PIB es porque la mejora tecnológica alimenta la variación de la producción de petróleo, de tal forma que un crecimiento lineal con el tiempo de esta variable tiende a dar una función exponencial en la producción. Así, un crecimiento logarítmico con el PIB tiende a dar una respuesta proporcional de la producción con el PIB a través de la mejora tecnológica: más PIB, más mejora tecnológica, más capacidad de oferta productiva, pero también al revés. La influencia negativa con un PIB decreciendo es siempre un descenso del crecimiento en la mejora tecnológica, hasta que el PIB se hace menor del 36% que teníamos en 1985, entonces el efecto del logaritmo neperiano hace negativa la mejora tecnológica. Esto no es ilógico si pensamos que para entonces, el mundo viviría con una renta per cápita propia de un siglo antes.

- No tienen en cuenta el papel que el resto de energías pudiera jugar a la hora de sustituir las necesidades de combustibles líquidos<sup>11</sup>.
- No tienen en cuenta una reacción del sistema social y económico racional y efectiva capaz de adaptarse rápidamente a la escasez de petróleo<sup>12</sup>.

El siguiente paso pues, será introducir en los modelos el uso de petróleo no convencional.

## 1.2. Modelos de la producción de combustibles líquidos

Dado que tenemos varias fuentes de petróleo no convencional y que éstas, en su conjunto, pueden tener reservas elevadas, podríamos pensar que el pico del petróleo convencional quedaría desdibujado por el uso de petróleo no convencional.

Las reservas extraíbles (URR) del petróleo no convencional podrían ser más del doble que las del convencional. Mientras que para el petróleo convencional, hemos explotado alrededor del 50% del extraíble, para el no convencional la explotación hasta la fecha no llegaría quizás ni al 1%. Esto, que puede parecer a priori una solución, es de hecho, uno de los problemas con el que se enfrenta la explotación del petróleo no convencional como sustituto del convencional. La producción anual de petróleo no convencional no llega a cubrir en la actualidad el 5% de todo el petróleo que consumimos. Es decir, la tasa de crecimiento del petróleo no convencional deberá crecer a ritmos sostenidos y elevados sólo para evitar el descenso de la producción total, y aún más altos para cubrir el aumento esperado de la demanda.

Greene2005 habla de incrementos del 7-9% anuales para el petróleo no convencional en escenarios optimistas para el petróleo convencional, si es que quieren jugar el papel de sustituir las necesidades de demanda de petróleo convencional.

El crecimiento del petróleo no convencional en las últimas dos décadas ha sido del 4-5% anual y en su mayor parte ese crecimiento se ha debido a ganancias en las refinerías (2/3). En estos últimos años, el crecimiento se da especialmente en las arenas bituminosas de Canadá y en el petróleo pesado de Venezuela. En cuanto a las pizarras (shale oil), CTL (coal to liquids) y GTL (gas to liquids) tienen un montante muy pequeño sobre el total.

Tenemos dos formas de enfrentarnos a modelizar el petróleo no convencional; por un lado, asumir que el crecimiento en las próximas décadas será como el observado y luego ver a qué tasa debe crecer para que no haya colapso económico, o bien, ver al detalle para las distintas tecnologías de explotación de petróleo no convencional lo que pueden dar de sí teóricamente en escenarios realistas y optimistas políticamente dirigidos.

En todos los casos, debemos tener presente que el TRE es bastante menor que el del petróleo convencional, por lo que las "necesidades" de explotación son mayores: 1Gbarril de producción proveniente de petróleo no convencional puede implicar 0,3Gbarriles (TRE = 3) o más de otras fuentes energéticas para extraerlo, transportarlo y refinarlo.

Nuestros modelos van a seguir los mismos criterios que ya hemos utilizado para el petróleo convencional y trabajaremos con la familia "A" (hipótesis de Hirsch).

El modelo que ahora construimos, separa nítidamente la producción de petróleo convencional del no convencional. La producción total de petróleo va a ser ahora la que tenga su influencia sobre la economía, y ésta realimentará sólo la producción de petróleo convencional. Es decir, supondremos de forma optimista, que la variación de petróleo no convencional es constante e independiente de la economía.

---

<sup>11</sup> Aunque a corto y medio plazo, no hay sustitutos para los combustibles líquidos que se usan en el sector transporte, el petróleo que se usa para calefacción o para ciertos usos industriales, podría sustituirse, sin grandes cambios tecnológicos, por otros combustibles.

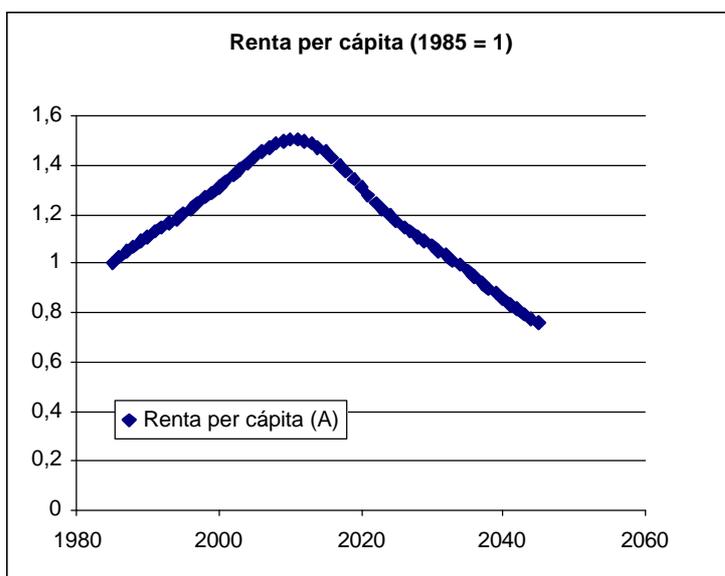
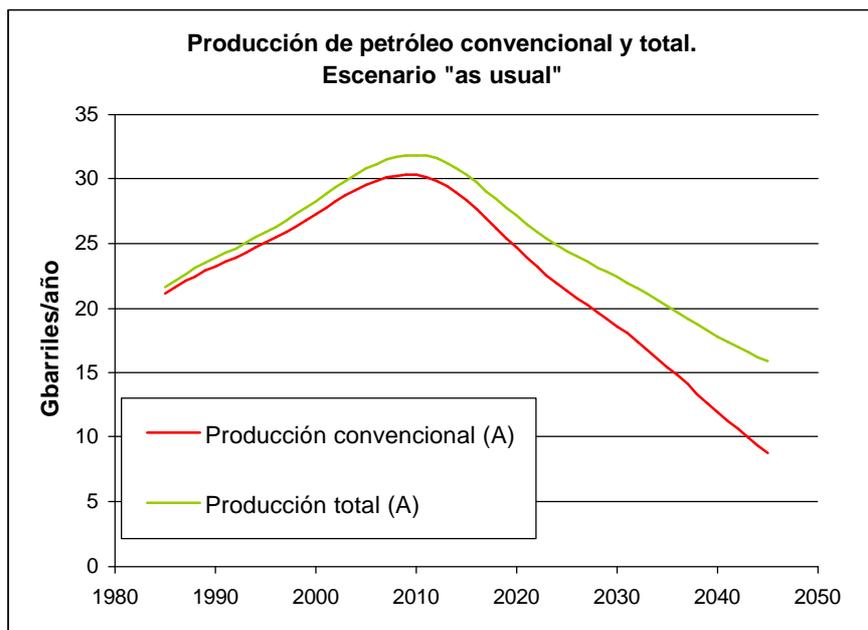
<sup>12</sup> Por ejemplo, ahorrando energía, promocionando el uso del transporte público (¿racionando el uso del transporte privado?).



En el diagrama anterior, hemos añadido en azul el petróleo no convencional y en granate la suma de ambas producciones. El esquema lógico que sigue el petróleo no convencional es el mismo que hicimos para el petróleo convencional pero sin la realimentación económica. Como partimos de unas reservas muy elevadas de petróleo no convencional (2000Gbarriles), el esfuerzo productivo lo consideramos muy pequeño (lo cual es muy optimista), además tampoco consideramos el TRE de este petróleo.

El primer modelo lo hacemos suponiendo que el crecimiento del petróleo no convencional es del 4,5% anual ("incremento de la demanda" en azul en el anterior diagrama). A este escenario lo podríamos llamar "usual" o "as usual".

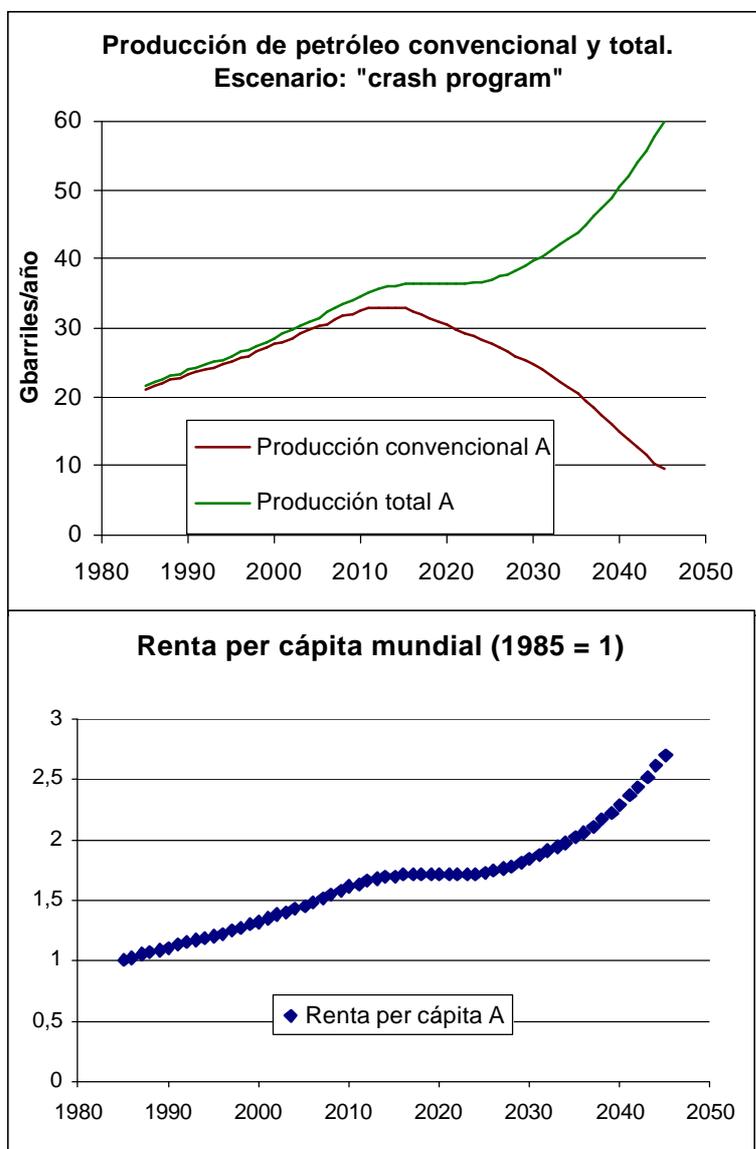
El resultado para la producción de petróleo (convencional y total) y para la renta per cápita mundial lo vemos en las siguientes gráficas:



Podemos concluir que las tasas de crecimiento del petróleo no convencional de las últimas dos décadas, no salvan la crisis de petróleo y la consiguiente crisis mundial (como mucho las retrasan un par de años).

Si queremos evitar que la renta per cápita descienda y/o que lo haga la producción de petróleo total, deberemos incrementar la tasa de crecimiento de la producción de petróleo no convencional; al menos un 10%. A este escenario lo podríamos llamar "programa de choque" o "crash program"<sup>13</sup>.

En las siguientes gráficas tomamos el incremento de la demanda de petróleo no convencional del 10% a partir de 2005 (hasta el año 2005 tomamos la real):



Observamos como la renta per cápita se estabiliza durante casi un par de décadas.

Es de destacar también, que la producción de petróleo convencional tiene un pico más alto (33Gbarriles) y retrasado (unos 4 o 5 años) respecto a los modelos anteriores. Esto es lógico si pensamos que el hecho de que la economía no entre en recesión, permite que se siga extrayendo este petróleo a tasas elevadas; al retrasar el pico, el descenso posterior es mayor, exigiendo más a la producción de petróleo no convencional.

Concluimos que para que la renta per cápita mundial pueda seguir creciendo en las próximas décadas (algo que contemplan todos los escenarios del IPCC, del EIA, WEO, etc.), el crecimiento del petróleo no convencional debe ser al menos del 10% anual, muy superior al que está teniendo (de hecho en

<sup>13</sup> La idea de llamarlo así proviene de Hirsch2005, que analiza el tiempo que requeriría un programa de choque en los combustibles no convencionales para evitar el pico del petróleo.

nuestros modelos suponemos este crecimiento a partir del año 2005, sin embargo, entre este año y el 2008 ya no ha sido así).

¿Es posible un crecimiento de esta magnitud?

1. Buena parte del crecimiento del no convencional en el pasado reciente ha sido debido a las llamadas "ganancias" en las refinerías. Ganancias que dependen entre otros factores de la propia producción global de petróleo. Si ésta se estanca como en los últimos 2 -3 años, estas ganancias tienden también a hacerlo (como ha sido).
2. Los flujos previstos y el crecimiento previsto por distintos expertos no suele llevar a escenarios tan optimistas, ni entre los interesados en su desarrollo (Mackenzie2007, Skinner2005, Mut2005, Soderbergh2005<sup>14</sup>). Buena parte del crecimiento posible se espera en las arenas bituminosas del Canadá, que han permanecido con producción estable en los últimos años, y en el petróleo pesado de Venezuela, que incluso descendió bruscamente su producción en 2006 (y hoy -2008- es menor que en 2005) (ASPO2008a).

Es decir, parece excesivamente optimista un escenario que evite la recesión económica mundial con los criterios que hemos manejado hasta ahora.

## **Bibliografía:**

- ASPO2008a: R. Koppelaar (2008). "Oil watch monthly". ASPO-Netherlands. 24 January 2008. [www.theoil drum.com](http://www.theoil drum.com)
- Bassi2007: A. M. Bassi, J. D. Shilling, H. R. Herren (2007): "Informing the U.S. Energy Policy Debate: How Can We Deal with Rising Demand and Constrained Supply?", Millenium Institute. [www.millennium-institute.org](http://www.millennium-institute.org)
- Castro2004: C. de Castro (2004): "Ecología y Desarrollo Humano Sostenible". Universidad de Valladolid
- Castro2007: C de Castro, LJ de Miguel (2007): "modelo de simulación con realimentaciones entre el sistema energético, el cambio climático y la sociedad". I Congreso nacional sobre Cambio Global. Abril. Universidad Carlos III. Madrid
- EIA2007: Energy Information Administration: "Internacional Energy Outlook 2007". U.S. department of energy
- EWG2007: Energy Watch Group: "Crude oil: the supply outlook" (2007). Alemania. [www.energywatchgroup.org](http://www.energywatchgroup.org)
- Hirsch2005 : R.L Hirsch et al. (2005): "Peaking of world oil production: impacts, mitigation, & risk management". DOE NETL, February 2005
- Hirsch2008: R L. Hirsch (2008): "Mitigation of maximum world oil production: Shortage scenarios" *Energy Policy* **36** 881-889
- Hubbert1956: MK Hubert: "Nuclear energy and the fossils fuels". Spring Meeting (Texas) of the American Petroleum Institute.
- IIASA1998: "Global Energy Perspectives" Editado por N. Nakicenovic, A. Grübler y A. McDonald. IIASA (Internacional Institute for Applied Systems Analysis).
- IPCC2001: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático: "IPCC special report: Emissions Scenarios". WMO. UNEP. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- Mackenzie2007: W. Mackenzie, "Canadian Oil Sands Developments: Will Cost Hyper-inflation Curb Attractiveness?" *Wood Mackenzie* Press Release Mar 2007.
- Mut2005: S Mut (2005). ASPO-USA Denver Conference. Nov. 12. (conference). S Mut is CEO of the Shell Unconventional Resources Unit. <http://www.theoil drum.com/story/2005/11/12/0150/4833#more>
- Skinner2005: Skinner, R., "Difficult Oil". Oxford Institute for Energy Studies Sep 2005
- Soderbergh2005: B Soderbergh (2005): "Canada's Oil Sands Resources and Its Future Impact on Global Oil Supply" Degree Project Master of Science Systems Engineering. Uppsala University
- WEC2007: World Energy Council (Consejo Mundial de la Energía) "2007 Survey of Energy Resources" [www.energy.org](http://www.energy.org)
- WEO2007: World Energy Outlook. Informe anual del Internacional Energy Agency (Agencia internacional de la energía). <http://www.worldenergyoutlook.org/>

---

<sup>14</sup> Cita a su vez a: "Canada's Oil Sands – Opportunities and Challenges to 2015" (NEB). The report was published by the National Energy Board of Canada in May 2004. "Alberta's Reserves 2003 and Supply/Demand Outlook 2004-2013 (EUB)" The report was published by the Alberta Energy and Utilities Board in May 2004. "Oil Sands Technology Roadmap – Unlocking the Potential (OSTRM)". The report was published by the Alberta Chamber of Resources in January 2004. "Canadian Crude Oil Production and Supply Forecast, 2004 – 2015 (CAPP)". The report was published by the Canadian Association of Petroleum Producers in July 2004