

## **Un nuevo modelo del mundo que incluye datos sobre recursos energéticos y cambio climático**

Por Dolores García

### **Resumen:**

**Un modelo del mundo que extiende el modelo original World3 (“Los límites del crecimiento”) al incluir el cambio climático y sus interacciones con la disponibilidad de recursos energéticos. Se obtienen resultados acerca del total de recursos energéticos, población humana, alimentos, consumo de productos industriales, actividad económica y otros parámetros. Los resultados a largo plazo se obtienen durante la secuencia de tiempo desde 1900 AD a 2100 AD, con decline en la población humana.**

### **1. Introducción**

Quizá el modelo global más conocido de todos es World3, popularizado en el libro *Los límites del Crecimiento. Un informe para el Club de Roma.* de Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jørgen Randers, y William W. Behrens III. He cogido algunas de las ecuaciones de la última versión del modelo World3 (World3-03) y he añadido algunos datos y lazos de realimentación adicionales para reflejar parte de nuestros conocimientos sobre cambio climático y problemas energéticos (no hay variables de energía en el modelo original, lo más aproximado es “recursos no renovables”). El objetivo es tener un modelo que es más útil para el propósito de comprobar en teoría distintas políticas que podrían aplicarse para resolver algunos de los desafíos actuales a los que se enfrenta el mundo, que están todos enraizados en el hecho de que estamos alcanzando los límites del crecimiento.

### **2. Los problemas en su contexto más amplio**

Antes de describir los detalles del modelo que propongo, merece la pena preguntarse si el ejercicio sirve para algo. Específicamente, hay dos preguntas que deben hacerse:

- 1) ¿Sirven para algo los modelos globales?
- 2) Si los modelos globales pueden ser útiles, ¿es adecuado usar las ecuaciones del modelo World3 como base para un nuevo modelo?

Estas son mis respuestas personales a estas preguntas:

#### **2.1. ¿Sirven para algo los modelos globales?**

Una de las críticas que se hicieron contra World3, que se ha repetido a menudo con otros modelos globales, es que hay tanta incertidumbre en tantas de las variables relevantes, que el ejercicio de modelización no sirve de nada. Aunque es cierto que hay mucha incertidumbre, merece la pena recordar que la gente no deja de hacer modelos del mundo por este motivo. Incluso si no hubiese ningún modelo del mundo por ordenador, la gente sigue teniendo modelos mentales, ideas aproximadas acerca de en qué dirección va el mundo en muchos aspectos distintos. Y lo que es más, las decisiones y políticas se basarán en esos modelos mentales. Así que hay una

justificación muy válida para cualquier intento de hacer esos modelos mentales tan correctos como sea posible, con las herramientas de que disponemos. Un modelo de ordenador que contenga los mejores datos disponibles y revisado por expertos es probable que produzca una visión del futuro de mejor calidad que las intuiciones de los políticos.

## **2.2. Si los modelos globales pueden ser útiles, ¿es adecuado usar las ecuaciones del modelo World3 como base para un nuevo modelo?**

La modelización ha avanzado mucho desde el modelo original World3, y hay buenos argumentos para decir que añadir nuevas ecuaciones y variables a World3 no es apropiado. Sin embargo, creo que este método tiene varias ventajas, la principal que muchos expertos ya han estudiado el modelo World3 y les resulta familiar, y sus observaciones también pueden ser relevantes en un nuevo modelo que contenga muchas de las mismas ecuaciones.

## **3. El modelo propuesto**

### **3.1. Variables energéticas**

Las variables energéticas están claramente ausentes en World3. Lo más aproximado a una variable energética es “recursos no renovables”, que pretende incluir no sólo los combustibles fósiles, sino también minerales y otros recursos. Al considerar de qué manera incluir la energía en el modelo, elegí eliminar la variable “recursos no renovables”, con el razonamiento de que, en un mundo de energía ilimitada, cualquier compuesto químico útil como materia prima pero no como fuente de energía se podría obtener fácilmente (si fuese necesario, los elementos que se encuentran en escasa cantidad en la Tierra se podrían minar en otras partes del Sistema Solar, o generar con las reacciones nucleares apropiadas). Los combustibles fósiles son los únicos auténticos recursos no renovables.

Para incorporar los problemas energéticos en el Nuevo Modelo del Mundo, tuve que crear tres nuevos conjuntos de ecuaciones: ecuaciones sobre el suministro de energía, ecuaciones sobre la demanda de energía, y ecuaciones sobre la asignación de recursos energéticos. La mayoría de los modelos que he visto modelan solamente la demanda o el suministro de energía, pero esto es claramente insuficiente. Modelar la demanda de energía y asumir que de alguna manera se satisfará ignora los importantes problemas del agotamiento de combustibles fósiles. Modelar el suministro de energía e ignorar la demanda no ayuda a juzgar la solidez de propuestas para sustituir el uso de combustibles fósiles por “electricidad limpia”, que a menudo barren debajo de la alfombra la cuestión de dónde puede venir la electricidad y las pérdidas energéticas de cualquier conversión de otras fuentes de energía a electricidad.

#### **3.1.1. Modelización del suministro de energía**

Para modelar el suministro de energía, distinguí siete tipos de fuentes de energía: carbón, petróleo, gas natural, energía nuclear, electricidad renovable, energía térmica renovable y biomasa. Las distinciones se hicieron basadas en las diferencias entre ellas en cuanto a ser renovables y ser utilizables para diferentes

tipos de demanda. Las fuentes de energía similares en ambos aspectos se agruparon juntas.

Las estimaciones acerca de las reservas últimas de combustibles fósiles se tomaron de Jean Laherrere. La producción de combustibles fósiles se determina mediante dos factores: demanda y posibilidad de suministro. Cuando es posible satisfacer la demanda, la producción es igual a la demanda. Cuando la demanda cae abruptamente, la producción bajará pero mantendrá algo de inercia. Cuando la demanda sube, la producción aumentará o no, dependiendo de la cantidad de combustible fósil restante. La ecuación que determina el máximo aumento en producción de combustibles fósiles es:

$$\text{Aumento de producción} = 0.2 * (\text{fracción de combustible fósil restante} - 0.5) * \text{producción actual}$$

Esto significa que al comienzo de la explotación de un recurso energético es posible aumentar la producción muy rápidamente, hasta un 10% al año. Cuando la mitad de las reservas se han explotado, la producción alcanza su máximo y no puede seguir aumentando. Desde ese punto en adelante, la producción siempre baja.

Un aspecto importante de la modelización del suministro de energía fue calcular el decline en TRE (Tasa de Retorno Energético) de los recursos energéticos no renovables. Los datos disponibles acerca de TRE son muy escasos, pero es un concepto tan crucial para explicar lo que puede pasar en el futuro con las fuentes de energía que creo que un modelo sería incorrecto si no lo incluyese de alguna manera. La fuente de energía que se ha estudiado más para ver el decline de TRE con el tiempo es el petróleo. Los datos disponibles para el petróleo en los EEUU son los siguientes (Charles Hall, 2008):

1930 – Aprox. 100:1

1970 – Aprox. 30:1

2000 – Aprox. 11-18:1

Esto sugiere una relación entre TRE y la fracción de petróleo restante que es aproximadamente proporcional al cuadrado de la fracción de petróleo restante:

$$\text{TRE del petróleo} = (\text{fracción de petróleo restante})^2 * 100$$

Una razón adicional para usar esta simple relación es porque tiene la siguiente propiedad: se necesita la misma cantidad de energía para extraer la primera mitad del petróleo como se necesita para extraer la mitad del petróleo restante (un cuarto), y así sucesivamente. Esto encaja bien con la idea intuitiva de decline de TRE.

Sin embargo, los datos son demasiado limitados para decir que esta fórmula se mantiene verdadera con un grado aceptable de certeza, y la estoy usando solamente como la mejor conjetura disponible. Los resultados del modelo son similares si se usan otras funciones decrecientes.

Una vez se han calculado las TREs de todas las fuentes de energía, se usa la media ponderada para estimar la fracción de capital industrial necesaria para obtener energía. De nuevo esto es en parte especulación, pero dos puntos son conocidos: con una TRE de 1:1, se necesitaría el 100% del capital industrial. Para TREs altas, parece que se usa 5% del capital industrial (del “modelo de cortaqueso” de Charles Hall, Robert Powers, and William Schoenberg, 2008). Los puntos intermedios se pueden estimar asumiendo que la fracción de capital industrial necesaria es aproximadamente proporcional a la cantidad de energía necesaria para la producción de energía.

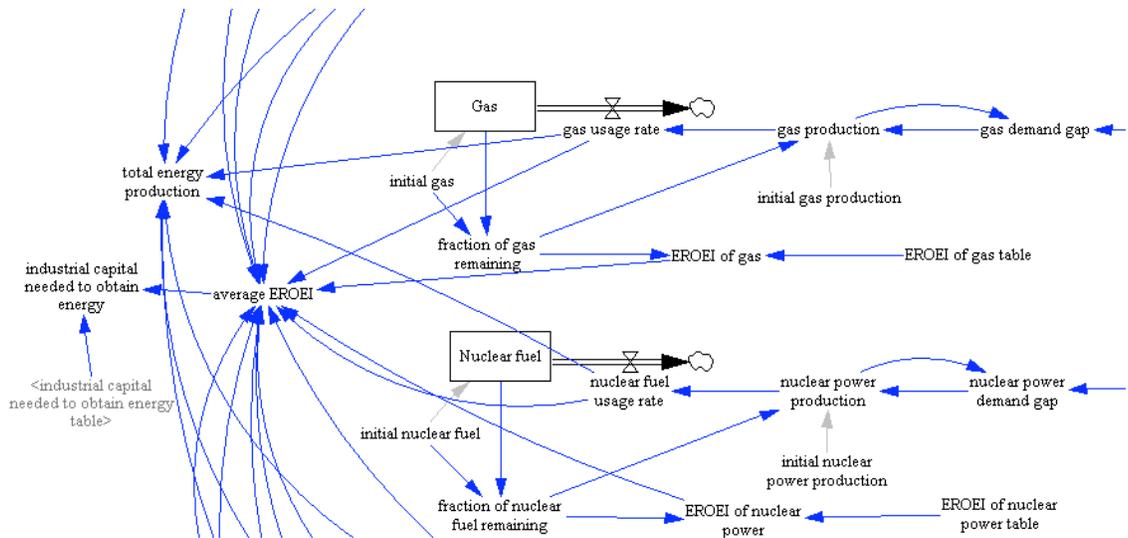


Gráfico 3.1.1.1 – Una sección del diagrama de flujo de las ecuaciones usadas para modelar el suministro de energía

### 3.1.2. Modelización de la demanda de energía

Un factor que muchos modelos energéticos parecen olvidar es que la gente no demanda fuentes de energía tales como petróleo, energía nuclear o hidroeléctrica. Lo que la gente demanda en realidad es electricidad, calefacción y transporte.

La demanda de electricidad se calcula en el modelo como una función del PNB, con los datos basados en datos históricos de consumo de electricidad de la Base de Datos Mundial de Indicadores del Desarrollo (World Development Indicators Database). La demanda de calefacción se estima como una constante de 400kg de equivalente de petróleo al año per cápita. La demanda de transporte se calcula como la suma de transporte de cargo y de pasajeros. No pude encontrar datos mundiales sobre transporte de cargo y de pasajeros, pero parece que tanto en los EEUU como en la Unión Europea alrededor de un 25% del uso de energía para transporte se usa para cargo y 75% para pasajeros. Así que asumí que la misma



todas las fuentes de energía. Asimismo, la reducción o aumento en el uso de cualquier fuente de energía es gradual.

Mi modelo refleja con éxito los cambios históricos en el uso de diferentes fuentes de energía sin usar más variables de entrada que la variación de TRE con el tiempo, lo que sugiere que el método no puede estar completamente desencaminado. Los datos de producción que genera el modelo son sólo una aproximación burda de los datos reales, pero claramente se aproximan bien, y más trabajo en los parámetros relevantes podría refinar los resultados. Para hacer la comparación, se pueden encontrar datos históricos de producción mundial de combustibles fósiles en los trabajos de la Agencia de Evaluación Medioambiental de los Países Bajos (Netherlands Environmental Assessment Agency).

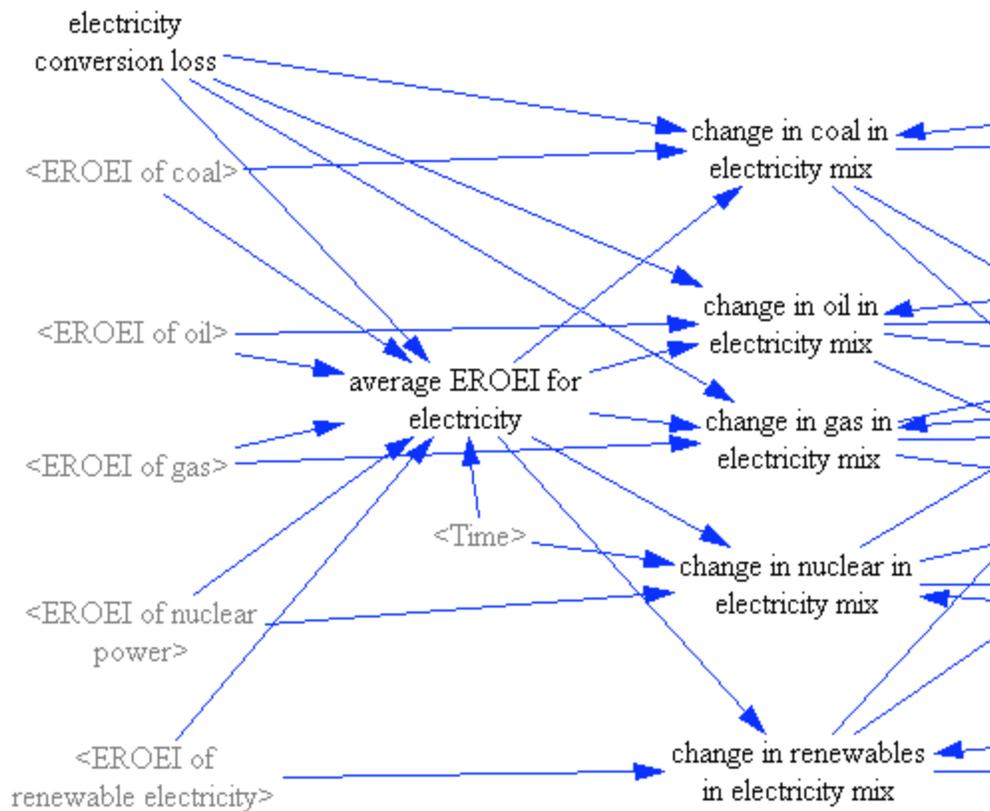


Gráfico 3.1.2.2 – Una sección del diagrama de flujo de las ecuaciones usadas para modelar la asignación de recursos energéticos

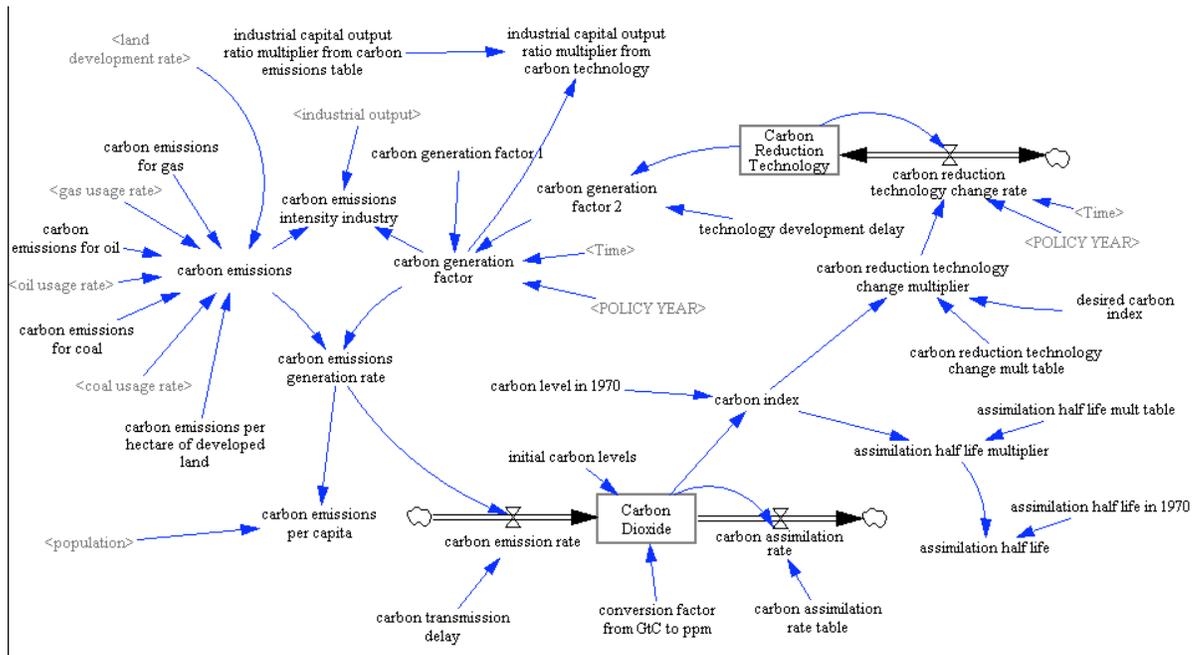
### 3.2. Emisiones de dióxido de carbono

Las emisiones de dióxido de carbono y el cambio climático están ausentes en el modelo World3, principalmente porque no había muchos conocimientos acerca de este tema en aquellos tiempos. Para los propósitos de incluir las emisiones de dióxido de carbono en el modelo, cogí las ecuaciones de contaminación de World3 y las modifiqué. Desgraciadamente, esto significa que el Nuevo Modelo del Mundo perdió

las ecuaciones de contaminación originales (claramente diseñadas para representar contaminación química), que pueden necesitar ser re-introducidas.

El cálculo de emisiones de dióxido de carbono es, por supuesto, fundamentalmente diferente del cálculo de contaminación, y se hace sumando las emisiones debidas a cada uno de los combustibles fósiles y al desarrollo agrícola (deforestación). Otra diferencia importante es la tasa de asimilación, que es claramente diferente para el dióxido de carbono y los contaminantes químicos. No pude encontrar información fiable sobre sumideros de dióxido de carbono, así que el modelo sólo contiene datos sobre los niveles históricos conocidos de asimilación de dióxido de carbono obtenidos del Equipo del Presupuesto Global de Dióxido de Carbono (Global Carbon Budget Team), y extrapola linealmente a partir de ahí, lo que es probablemente excesivamente conservador.

El modelo no intenta hacer ningún análisis detallado del cambio climático, sino sólo una estimación de los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera y sus posibles consecuencias para la producción de alimentos. Los modelos de cambio climático pueden proporcionar mucho más detalle acerca de las consecuencias específicas del cambio climático, pero no es éste el objetivo de este modelo. El objetivo, en cambio, es estimar cómo el cambio climático puede afectar otras variables importantes del mundo.



Graph 3.2.1 – Diagrama de flujo de las ecuaciones usadas para modelar las emisiones de dióxido de carbono

### **3.3. Producción de alimentos**

Las ecuaciones de agricultura se cogieron directamente del modelo World3, con dos cambios importantes:

- 1) La producción agrícola se ve afectada por los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera. Todavía hay mucha incertidumbre acerca de los efectos en las cosechas de alimentos de diferentes niveles de dióxido de carbono, pero hay bastante acuerdo en que el cambio climático reducirá la producción de las cosechas. El modelo asume un 2% en reducción de la producción a 370ppm, basado en datos actuales de reducción en la producción de las cosechas hasta ahora (David B Lobell and Christopher B Field, 2007). Todavía hay mucha discusión acerca de futuras reducciones en producción de las cosechas debido al cambio climático. Este modelo asume una reducción del 10% a 500ppm, lo que parece una cantidad razonable basada en los datos del IPCC. Si hay mejores datos disponibles, los tomaré en consideración.
- 2) La producción de alimentos se reduce proporcionalmente a la producción de biomasa.

### **3.4. Economía**

World3 tiene varias variables que se miden en dólares y algunas variables relevantes a la economía, como el empleo. Estas variables nunca pretendieron modelar la economía tal y como la entienden las instituciones financieras, sino la economía física, las cosas en la Tierra que tienen límites físicos.

Incluso así, es sorprendente que el modelo no contenía una variable de PNB, para representar de alguna manera el PNB “real”, queriendo decir con esto no ajustado con respecto a la inflación sino una representación agregada de la producción de agricultura, industria y servicios. He añadido esta variable al Nuevo Modelo del Mundo, lo que también ayuda al cálculo de otras variables menores que tradicionalmente se basan en el PNB pero que en World3 usaban producción industrial como aproximación del PNB.

### **3.5 Demografía y capacidad poblacional**

Como la población es una variable crítica en el modelo, se añadieron variables demográficas adicionales para seguir si los valores históricos de la población seguían la trayectoria correcta: la tasa de nacimientos cruda global y la tasa de mortalidad cruda global. Se hicieron ajustes siempre que las variables demográficas se alejaban demasiado de la realidad.

Se añadieron al Nuevo Modelo del Mundo dos cálculos de la capacidad poblacional de la Tierra:

- 1) La máxima población alimentable, que representa la máxima población que se podría alimentar a nivel de subsistencia con la producción de alimentos en un momento determinado.
- 2) La máxima población sostenible, que representa la máxima población que podría vivir en el planeta si la huella ecológica total se permitiera subir a 1 planeta. El cálculo de la huella ecológica se hace sumando la tierra cultivable, la tierra

urbanizada y la tierra necesaria para absorber la tasa presente de generación de emisiones de dióxido de carbono.

Ambos valores varían con el tiempo porque la producción de alimentos y la huella ecológica cambian con el tiempo.

#### 4. Los resultados del modelo en el escenario “todo como siempre”

##### 4.1. Variables principales: población, alimentos y producción industrial

En el escenario “todo como siempre” el patrón seguido es uno de colapso de la población humana, producción de alimentos y producción industrial, de forma similar a lo que ocurre en el escenario estándar de World3. El decline es gradual, empezando en algún momento alrededor del 2030:

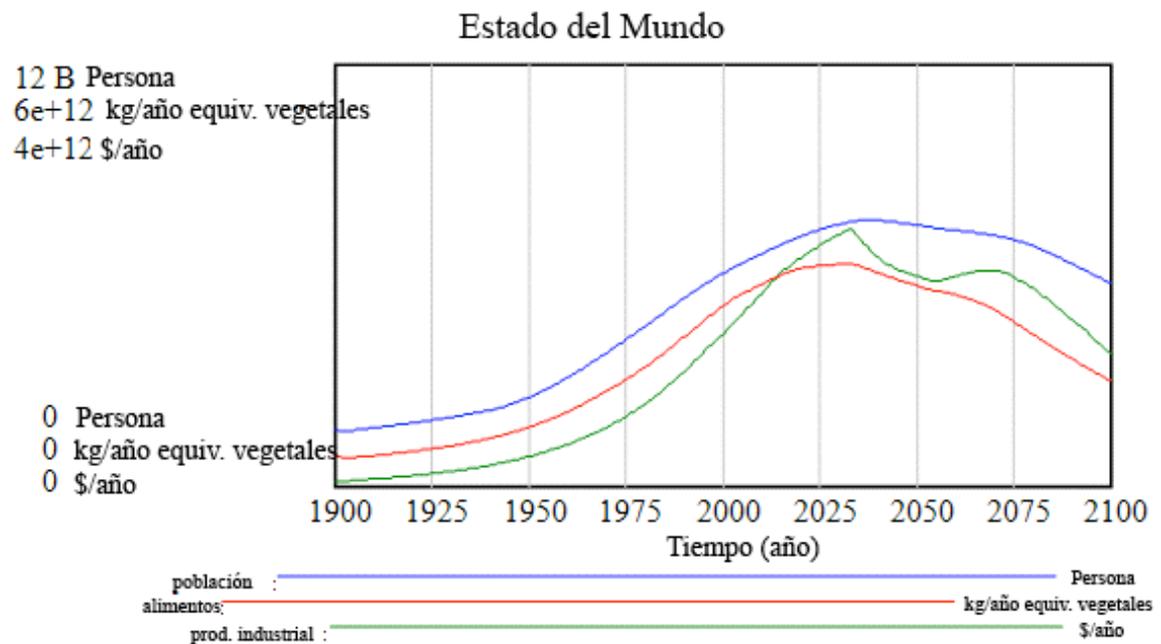


Gráfico 4.1.1 – Producción de alimentos y producción industrial en el Nuevo Modelo del Mundo

## 4.2 Uso de energía

Los suministros energéticos se sustituyen unos por otros según decae la TRE, pero al final todos los combustibles fósiles y nucleares se agotan. Las energías renovables no se usan hasta el final del siglo XXI, debido a su baja TRE:

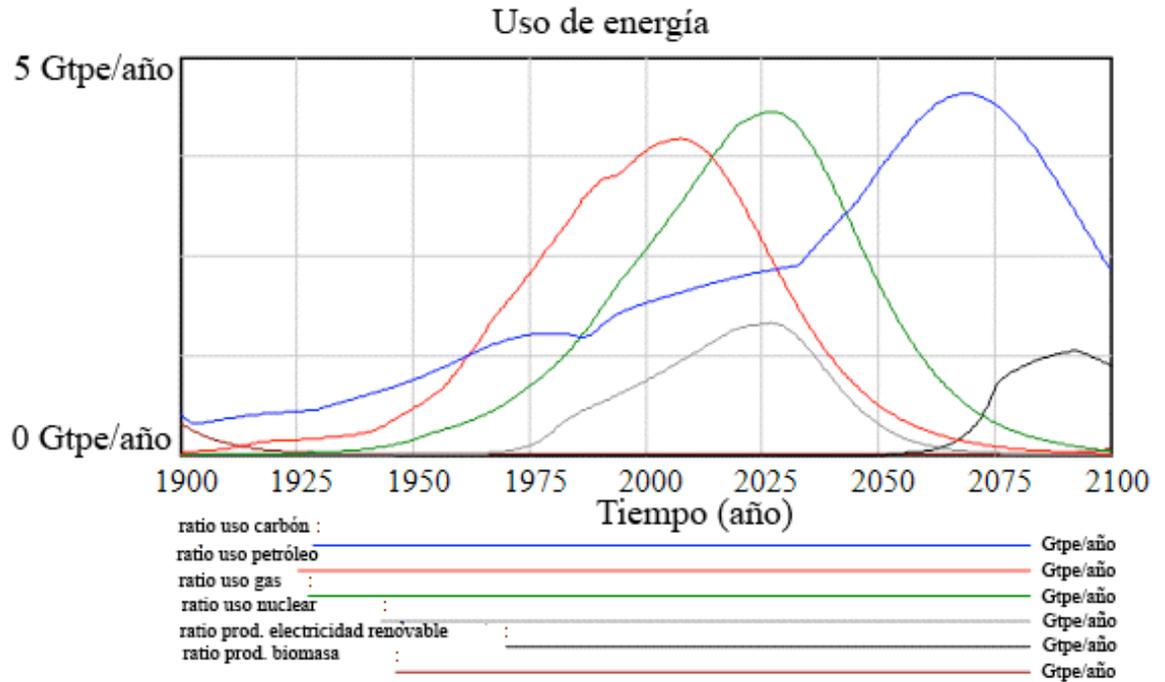


Gráfico 4.2.1 – Uso de energía

### 4.3 Dióxido de carbono

Un resultado notable del modelo en el escenario “todo como siempre” es que las emisiones de dióxido de carbono no suben muy alto, alcanzando el máximo a 510ppm, que es más bajo que algunos de los escenarios de emisiones del IPCC. La razón de esto es doble: En primer lugar, los límites en las reservas de combustibles fósiles hacen que no hay tanto dióxido de carbono que pueda soltarse en la atmósfera como asume el IPCC incluso cuando se han quemado todos los combustibles fósiles. Segundo, las estimaciones de sumideros de dióxido de carbono puede que sean demasiado favorables en el modelo.

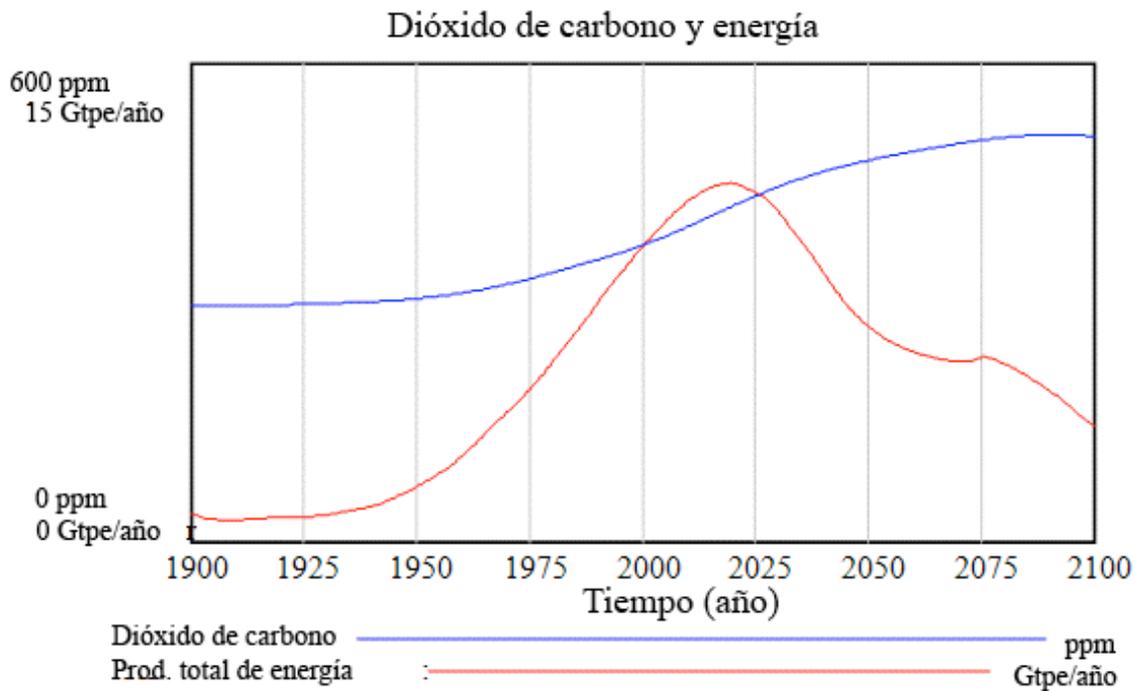


Gráfico 4.3.1 – Dióxido de carbono y energía

#### 4.4. Estándares de vida

Los estándares de vida decaen claramente según todas las medidas razonables que se pueden hacer en el modelo: alimentos per capita, producción industrial per capita, servicios per capita, esperanza de vida, índice de bienestar humano y mortalidad infantil. Los niveles de alimentos per capita a finales del siglo XXI son similares a los del comienzo del siglo XX y siguen en camino de un declive continuo. Sin embargo, esto no debe tomarse como ningún tipo de predicción, porque el modelo no puede incluir de ninguna manera todos los datos relevantes.

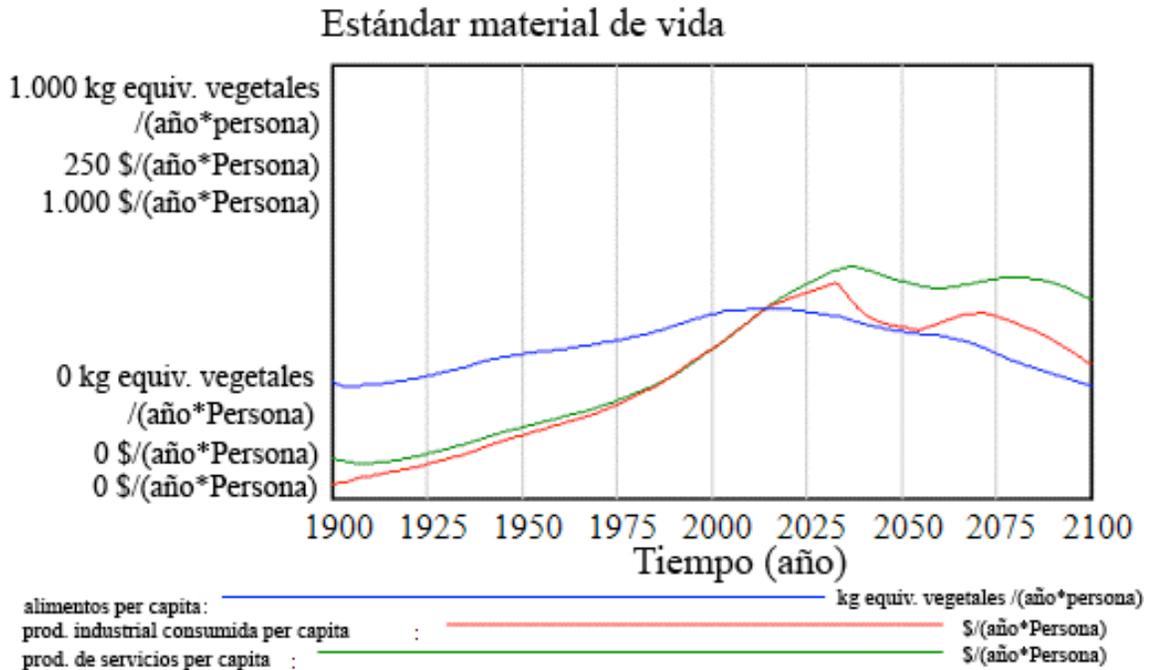


Gráfico 4.4.1 – Alimentos per capita, producción industrial per capita y servicios per capita en el Nuevo Modelo del Mundo

### Estándar material de vida

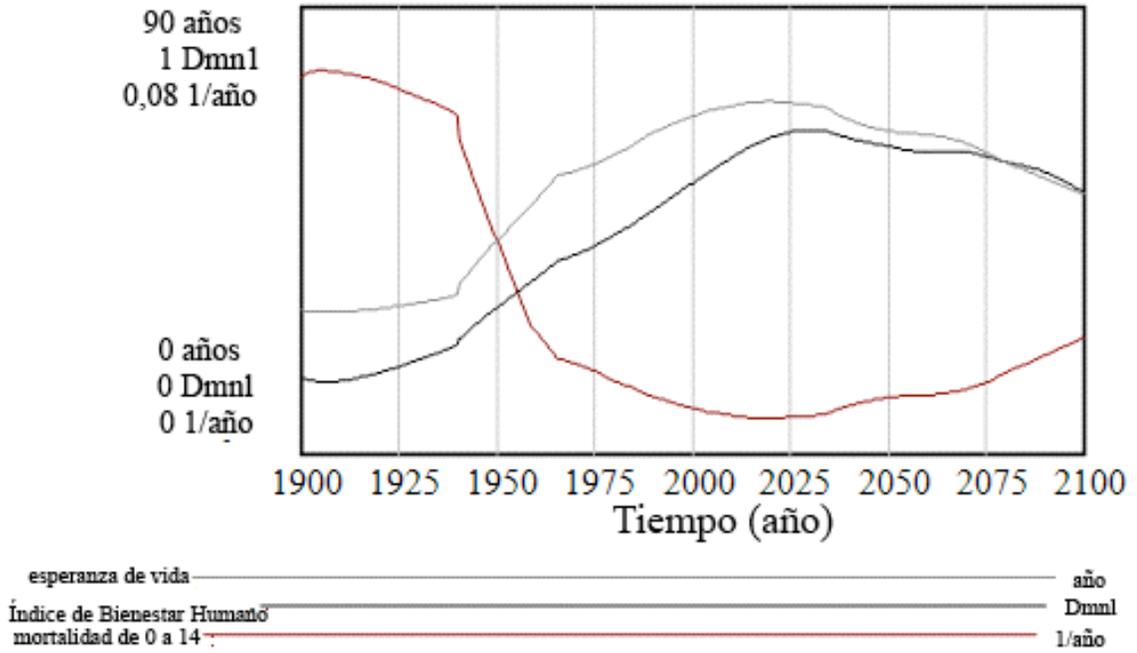


Gráfico 4.4.2 – Esperanza de vida, índice de bienestar humano y mortalidad infantil

#### 4.5. Crecimiento económico

El resultado más interesante de calcular el PNB es que permite estimar el crecimiento económico. Esto no debería entenderse como la cantidad que calculan los economistas, sino una estimación numérica del cambio de año en año en todos los bienes y servicios producidos en el mundo. De manera interesante, en el momento del colapso, cae de forma espectacular, pero empieza a declinar muchos años antes, proporcionando una señal de aviso temprana.

También merece la pena notar que el punto en el que se alcanza el pico del petróleo está marcado por una caída en el crecimiento económico. Es muy tentador, aunque no totalmente justificado, relacionar este hecho con la actual crisis económica. Ciertamente, si estuviésemos en los primeros estadios del colapso en crecimiento económico que estima el modelo, es de esperar que ocurriese una crisis económica importante, y una de las maneras lógicas en las que podría suceder es un incremento significativo en el nivel de deudas de la población en general, como resultado de un esfuerzo por parte de los bancos centrales en mantener un nivel de crecimiento económico que no está justificado por los factores fundamentales. Pero no tengo suficientes datos en estos momentos para confirmar o rechazar si estamos al comienzo de la gran contracción calculada por el Nuevo Modelo del Mundo.

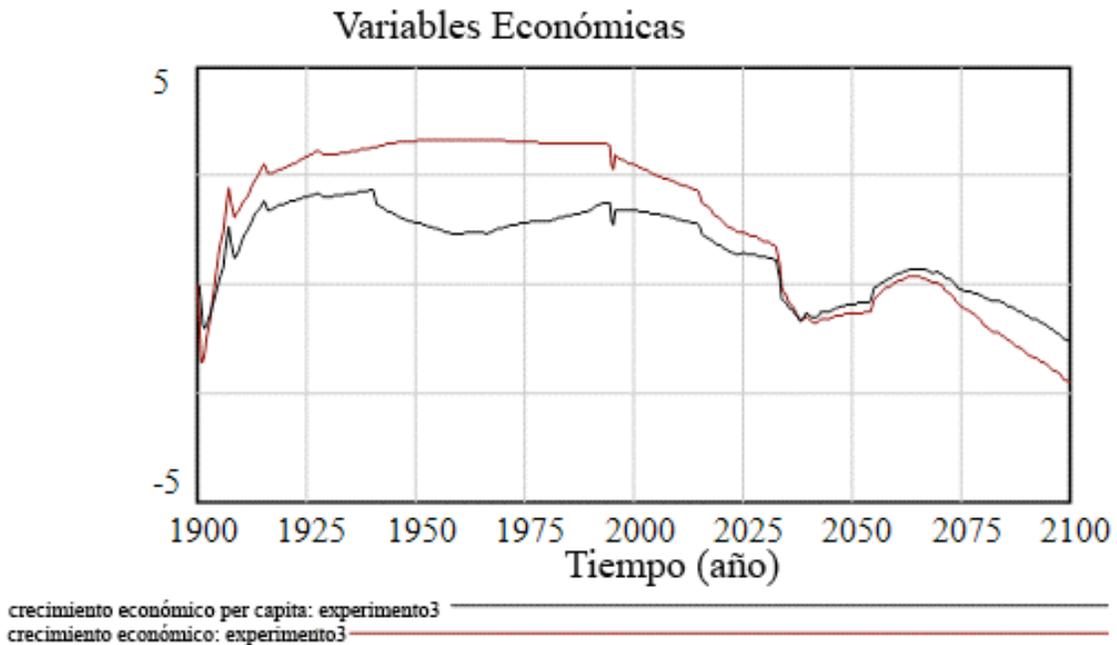


Gráfico 4.5.1 – Crecimiento económico en el Nuevo Modelo del Mundo

## 5. Conclusiones

La principal conclusión de los resultados del Nuevo Modelo del mundo es que, si el mundo continúa comportándose como hasta ahora, a largo plazo es inevitable el declive. Esto no es una sorpresa y el hecho de que estamos en una trayectoria insostenible se puede deducir de cálculos mucho más simples y fiables. Lo que este modelo proporciona son ideas algo más refinadas acerca de cómo podría suceder esto y, lo que es más importante, es una herramienta donde podemos experimentar con ideas acerca de cómo resolver este problema.

Soy consciente de que puedo haber cometido muchos errores al producir este modelo, y he podido usar datos antiguos o incorrectos. Por favor, consideren esto como un primer esbozo, y le doy la bienvenida a cualquier comentario que quieran darme. Me gustaría que esto fuese una colaboración. Pueden bajar el modelo completo de:

<http://www.uploading.com/files/NSTMFGEG/WRLD3-03-energy-sources.mdl.html>

El software para ejecutar el modelo es Vensim PLE, que se puede bajar de:

<http://www.vensim.com/freedownload.html>

Finalmente, me gustaría mucho recibir comentarios acerca de posibles políticas para evitar el declive y colapso final (cuando se han consumido todos los combustibles fósiles) que se podrían incluir en este modelo para ver qué resultados podrían producir. La Red Transición (<http://transitiontowns.org/TransitionNetwork/TransitionNetwork>) ya ha expresado su interés en usar este modelo para la línea temporal que están escribiendo para todas las Ciudades Transición para ayudarles a diseñar sus propios Planes de Descenso Energético. Por supuesto, esto sólo sería útil si el modelo incluye las políticas que necesitan ponerse en práctica para hacer una transición con éxito a un mundo sostenible.

## Referencias

Charles Hall, 2008, "Provisional results from EROI assessments"

<http://www.theoildrum.com/node/3810>

Charles Hall, Robert Powers, and William Schoenberg, 2008, "Peak Oil, Investments, and the Economy in an Uncertain Future"

<http://www.theoildrum.com/node/3412>

World Bank, World Development Indicators Database

<http://www.worldbank.org/>

Netherlands Environmental Assessment Agency, Production Data on Fossil Fuels

<http://www.mnp.nl/en/themasites/hyde/productiondata/index.html>.

Global Carbon Budget team, 2006, "Recent carbon trends and the global carbon budget"

<http://www.docstoc.com/docs/4117648/Recent-Carbon-Trends-and-the-Global-Carbon-Budget-updated>

David B Lobell and Christopher B Field, 2007, "Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming"

[http://www.iop.org/EJ/article/1748-9326/2/1/014002/er17\\_1\\_014002.html](http://www.iop.org/EJ/article/1748-9326/2/1/014002/er17_1_014002.html)