

# **Agotamiento de los combustibles fósiles y escenarios socio-económicos: un enfoque integrado**

*Septiembre 2014*

Iñigo Capellán-Pérez<sup>a\*</sup><sup>1</sup>, Margarita Mediavilla<sup>b</sup>, Carlos de Castro<sup>c</sup>, Óscar Carpintero<sup>d</sup>, Luis Javier Miguel<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Low Carbon Programme. Instituto de Economía Pública, Universidad del País Vasco, Avd. Lehendakari Aguirre, 48015 Bilbao (España).*

<sup>b</sup>*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingenierías Industriales, Paseo del Cauce s/n, Universidad de Valladolid, 47011 Valladolid (España).*

<sup>c</sup>*Departamento de Física Aplicada, Escuela de Arquitectura, Av Salamanca, 18, Universidad de Valladolid, 47014 Valladolid.*

<sup>d</sup>*Departamento de Economía Aplicada, Facultad de Ciencias Económicas, Paseo del Cauce, s/n, Universidad de Valladolid, 47011 Valladolid.*

## **Abstract**

El agotamiento gradual de los recursos energéticos fósiles, especialmente de aquellos llamados convencionales o de fácil extracción, es un proceso en marcha ampliamente reconocido. Los estudios acerca de las perspectivas de agotamiento de los diversos combustibles fósiles son relativamente abundantes en la literatura científica, pero pocos ofrecen una perspectiva global de todas las fuentes energéticas y de sus posibles sustitutos tecnológicos, y aún menos tienen en cuenta la demanda asociada al sistema socioeconómico.

Este artículo presenta un modelo Economía-Energía-Medio Ambiente basado en Dinámica de Sistemas (World Limits Model o WoLiM) que integra todos estos aspectos: las restricciones físicas derivadas del agotamiento de los principales recursos energéticos (con estimaciones de los picos del petróleo, gas, carbón y uranio), los potenciales tecnológicos sostenibles de las energías renovables (estimados por medio de una novedosa metodología top-down), la estimación de las demandas requeridas por el sistema socioeconómico, el posible desarrollo de políticas alternativas y las emisiones netas de CO<sub>2</sub> relacionadas con el sistema energético.

En este artículo, los resultados de este modelo son comparados con las estimaciones representativas de estudios de asesoramiento ambiental (Global Environmental Assessment, GEA). Los resultados muestran que una transición energética dirigida por la demanda, como las realizadas en el pasado, no parece posible: si las tendencias de demanda continúan se prevé una fuerte escasez antes de 2020,

---

<sup>1</sup> Las opiniones expresadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor, y no reflejan, necesariamente, los puntos de vista del Low Carbon Programme.

especialmente en el sector del transporte, mientras la generación de electricidad parece incapaz de cubrir la demanda a partir de 2025-2040. Para poder encontrar escenarios que sean compatibles con las restricciones derivadas de los picos de los combustibles fósiles es preciso aplicar hipótesis que raramente son contempladas por las instituciones internacionales o los estudios GEA como crecimiento económico cero o negativo.

*Palabras clave:* Renewable limits; Fossil fuel depletion; Global Warming; System dynamics; Peak oil; Global Environmental Assessment.

## **Abstract**

The progressive reduction of high-quality-easy-to-extract energy is a widely recognized and already ongoing process. Although depletion studies for individual fuels are relatively abundant, few of them offer a global perspective of all energy sources and their potential future developments, and even fewer include the demand of the socio-economic system.

This paper presents an Economy-Energy-Environment model based on System Dynamics which integrates all those aspects: the physical restrictions (with peak estimations for oil, gas, coal and uranium), the techno- sustainable potential of renewable energy estimated by a novel top-down methodology, the socio-economic energy demands, the development of alternative technologies and the net CO<sub>2</sub> emissions.

We confront our model with the basic assumptions of previous Global Environmental Assessment (GEA) studies. The results show that demand-driven evolution, as performed in the past, might be unfeasible: strong energy-supply scarcity is found in the next two decades, especially in the transportation sector before 2020. Electricity generation is unable to fulfill its demand in 2025-2040, and a large expansion of electric renewable energies move us close to their limits. In order to find achievable scenarios, we are obliged to set hypotheses which are hardly used in GEA scenarios, such as zero or negative economic growth.

Este artículo es una traducción del artículo publicado en la revista *Energy*:

*Capellán-Pérez, Iñigo, Margarita Mediavilla, Carlos de Castro, Óscar Carpintero, and Luis Javier Miguel. "Fossil Fuel Depletion and Socio-Economic Scenarios: An Integrated Approach." Accepted for publication in Energy, September 2014.*

## 1. Introducción

Recientemente la preocupación por el agotamiento de los recursos energéticos y materiales (ej. pico del petróleo) así como de los límites de los ecosistemas para servir de sumidero de nuestros residuos (ej. cambio climático) está emergiendo en la escena política y económica. Todos los combustibles fósiles son finitos y no renovables a escala humana y, por ello, limitados desde un punto de vista físico. Sin embargo, existen diferentes puntos de vista sobre este fenómeno que enfrentan a los “geólogos” (u pesimistas) con los “economistas convencionales” (u optimistas).

Los primeros (Hubbert, 1956) argumentan que los factores geológicos determinan un céntesis o pico en la extracción de cada recurso, que sólo puede ser parcialmente variado por la tecnología (ver, por ejemplo, (Campbell and Laherrère, 1998; Laherrère, 2006; Sorrell et al., 2009) y la actividad de ASPO en <http://www.peakoil.net>). Además, apuntan a que estas restricciones pueden tener importantes repercusiones económicas (Brown et al., 2011; Hamilton, 2009; Hirsch, 2008; Murphy and Hall, 2011; Tverberg, 2012). Sin embargo, la visión de los “economistas convencionales”, basada en la teoría neoclásica del crecimiento (Solow, 1974), argumenta que los mecanismos del mercado y el ingenio humano son capaces de transformar las reservas en recursos y encontrar fuentes de energía alternativas a un ritmo suficientemente rápido como para evitar restricciones de suministro, con lo cual el crecimiento económico no se vería afectado (Adelman, 1990; Maugeri, 2012; Odell, 2004; Simon, 1996; Thielemann, 2012). Este artículo intenta arrojar luz sobre esa controversia usando un modelo de dinámica de sistemas que incluye tanto los datos de los recursos energéticos como los de las tecnologías alternativas y la demanda de energía derivada del crecimiento económico.

El hecho de que el cenit del petróleo convencional se alcanzó en torno al año 2006 es un dato ampliamente admitido, tanto en círculos científicos (ej. (Murray and King, 2012)) como por algunas agencias internacionales -admitiendo también que es una metodología apropiada- (Benes et al., 2012; WEC, 2010; WEO, 2012, 2010). Asimismo, algunas declaraciones gubernamentales (por ejemplo, el Comisario Europeo de la Energía<sup>2</sup> en 2009) y compañías petrolíferas se han manifestado en este sentido (Mosconi, 2008). En 2012, el ratio del consumo de petróleo respecto del consumo global cayó a su nivel más bajo de los últimos 50 años (BP, 2013). Los descubrimientos anuales de petróleo a nivel mundial alcanzaron su máximo histórico en la década de los años 60 y, desde entonces, ningún incremento del precio del barril ha sido capaz de invertir esta tendencia. Debido a la similitud entre los pozos de petróleo y gas natural, el comportamiento de los yacimientos de ambos combustibles es muy similar. Por otra parte, aunque la idea de que las reservas de uranio y carbón son muy abundantes está muy

<sup>2</sup> El post original ha sido eliminado. Se puede encontrar una transcripción en <http://europe.theoldrum.com/node/5397>.

extendida en la opinión pública, algunos estudios la están cuestionando y hablando de problemas de suministro de uranio y carbón antes de mediados del siglo XXI (Dittmar, 2013; EWG, 2007; Heinberg and Fridley, 2010; Mohr and Evans, 2009; Rutledge, 2011).

Por todo ello, las energías renovables, y en especial la eólica y la solar, aparecen como las principales fuentes de energía capaces de sustituir el declive de los combustibles fósiles (Smil, 2010). Sin embargo, algunos estudios recientes muestran que sus potenciales de explotación máximos a nivel global pueden ser sensiblemente menores que el consumo actual de energía procedente de combustibles fósiles (de Castro et al., 2013a, 2013b, 2011). Esto significa que la sociedad global se enfrentaría a una escasez estructural de energía a medio/largo plazo -como ya han sugerido anteriormente otros estudios (Meadows et al., 1993, 1972, Barney, 1980, de Castro, 2009; Maggio and Cacciola, 2012; Nel and Cooper, 2009; Valero and Valero, 2010) – lo que nos colocaría ante una situación sin precedentes en la historia moderna. Esta situación se vería agravada, a su vez, por el hecho de que las transiciones tecnológicas son lentas (requieren del orden de décadas (Fouquet, 2010)), y los ritmos de cambio que se están observando en la actualidad no son elevados.

Por otra parte, el consumo de energía es el principal factor generador de emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2007a), pero pocos estudios hasta la fecha han estudiado el efecto que estas restricciones podrían tener sobre las emisiones (Brecha, 2008; Höök and Tang, 2013; Ward et al., 2012)).

A pesar de que los estudios sobre perfiles de agotamiento de diversos recursos energéticos empiezan a ser relativamente frecuentes en la literatura (ver (Maggio and Cacciola, 2012; Mediavilla et al., 2013) para un resumen), pocos estudios hasta la fecha han intentado ofrecer un panorama global que incluya las estimaciones de todos los combustibles fósiles y aún menos (de Castro, 2009; Nel and Cooper, 2009; Zerta et al., 2008) se han centrado en el sistema completo incluyendo las diferentes tecnologías alternativas, como se ha hecho en el modelo WoLiM, que describimos en el presente artículo.

Este artículo describe y muestra los resultados del modelo que hemos desarrollado: *WoLiM* (World Limit Model), que es una continuación de modelos de dinámica de sistemas realizados por el mismo equipo de investigación (De Castro, 2009; Mediavilla et al., 2013). *WoLiM* es un modelo estructuralmente simple y transparente que compara gran cantidad de datos de procedencia muy diversa y ayuda a visualizar panorámicas globales. El enfoque de la dinámica de sistemas permite la integración de variables de diferentes campos de estudio: socio-económicas, geológicas o tecnológicas. *WoLiM* incluye los patrones de agotamiento de recursos no renovables, las estimaciones de desarrollo de tecnologías alternativas, la demanda de energía mundial bajo diferentes escenarios socio-

económicos y las estimaciones de emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el consumo de combustibles fósiles, todo ello en un enfoque dinámico.

Por otra parte, la metodología de escenarios ofrece una herramienta útil para lidiar con la complejidad e incertidumbre inherente a la evolución futura de los asuntos socio-económicos y es habitual en los estudios basados en los estudios de asesoramiento ambiental (GEA), como por ejemplo los Informes del IPCC (IPCC, 2007a, 2001; IPCC SRES, 2000), o los estudios del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2012, 2007, 2004) o la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005). La filosofía es que se estudian una diversidad de escenarios, cada cual representando una descripción plausible y relevante de cómo el futuro puede evolucionar. Juzgamos que esta metodología es adecuada para determinar y agrupar en escenarios las variables socio-económicas y tecnológicas que requiere WoLiM como variables exógenas. Así, en este artículo se cuantifican y describen cinco escenarios que imitan los desarrollados en los informes GEA (van Vuuren et al., 2012). *De esta forma conseguimos replicar en nuestro modelo las visiones de futuro que son utilizadas por estas agencias internacionales, confrontándolas con las restricciones energéticas derivadas de los fenómenos de agotamiento de los combustibles fósiles, fenómenos que estas agencias, hasta la fecha, han ignorado (Aleklett et al., 2010; Dale, 2012; Höök and Tang, 2013)*<sup>3</sup>.

El artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se introduce el modelo con sus principales hipótesis, la sección 3 describe cómo se han modelado los recursos energéticos y sus limitaciones, la sección 4 explica la estimación de la demanda energética mientras la sección 5 describe la estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub>. La sección 6 explica la filosofía de los escenarios utilizados y su implementación práctica. Finalmente los resultados y conclusiones pueden verse en las secciones 7 y 8.

## 2. Descripción del modelo WoLiM

En las últimas décadas se han desarrollado muchos modelos globales de Energía-Economía-Medio Ambiente, la mayor parte de ellos centrados en el problema del cambio climático: MESSAGE (Nakicenovic and Riahi, 2003), IMAGE (Bouwman et al., 2006), MERGE (Manne and Richels, 2004), etc.), algunos de ellos basados en dinámica de sistemas (Bassi and Shilling, 2010; Davies and Simonovic, 2010; Fiddaman, 2002). Sin embargo estos modelos tienden mayoritariamente a considerar estimaciones de

<sup>3</sup> Por ejemplo, algunas organizaciones económicas internacionales como la (OECD, 2012) proyectan que el GDP mundial crecerá a ritmos de entorno al 3% anual durante el próximo medio siglo. Así, prácticamente se triplicaría en los años 2010-2060, aunque la distribución del GDP por países sería muy diferente de la de ahora: China e India supondrían el 46% del GDP en 2050, un incremento de 13% respecto de los valores actuales. Sin embargo, no se menciona en qué medida el conocimiento actual sobre las restricciones energéticas y otras incertidumbres podrían afectar estas previsiones.

recursos naturales muy elevadas (ej. (McCollum et al., 2014)) con un sesgo importante hacia la adopción de hipótesis fuertemente optimistas en este sentido (Dale, 2012; Höök and Tang, 2013; Rutledge, 2011). Así, pocos modelos reconocen explícitamente límites en los recursos como el céntit del petróleo o relacionan la escasez de energía con el crecimiento económico (de Castro, 2009; García, 2009; Meadows et al., 1993, 1972; Mediavilla et al., 2013). El modelo WoLiM sí reconoce estos límites y adopta un enfoque basado en la noción de los recursos recuperables o URR (Ultimately Recoverable Resources), que es una estimación realizada por expertos de la cantidad total de recursos que pueden ser realmente extraídos y producidos.

El modelo WoLiM,<sup>4</sup> que continúa el trabajo realizado previamente por los autores (de Castro, 2009; de Castro et al., 2009; Mediavilla et al., 2013), incluye los siguientes aspectos dentro de un marco dinámico:

- Los patrones de agotamiento de los recursos energéticos no renovables (usando URR y curvas de extracción máximas),
- La sustitución de las energías no renovables por energías renovables,
- La demanda mundial de energía bajo diferentes escenarios socio-económicos,
- El potencial máximo sostenible de las energías renovables,
- Las emisiones netas de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía.

WoLiM está basado en una estructura lineal (ver Figura 1) que comienza con la elección de un escenario que consiste en una serie de supuestos sobre las variables socio-económicas y tecnológicas, integradas de forma coherente (esta metodología se explica en la sección 6).

Estas variables socio-económicas determinan la demanda mundial de energía, que es desagregada por sectores de acuerdo a los usos más importantes (electricidad, industria, residencial, transporte). La demanda de cada sector es desagregada en demandas de los diferentes recursos energéticos (combustibles líquidos, gas, electricidad, etc.). Estas demandas son comparadas con la producción de cada recurso particular, el cual está limitado por los picos determinados por la geología y los ritmos de sustitución tecnológica. Finalmente las emisiones netas de CO<sub>2</sub> son calculadas y los niveles de concentración en la atmósfera son computados.

---

<sup>4</sup> Para una descripción completa del modelo ver (Capellán-Pérez et al., 2014).

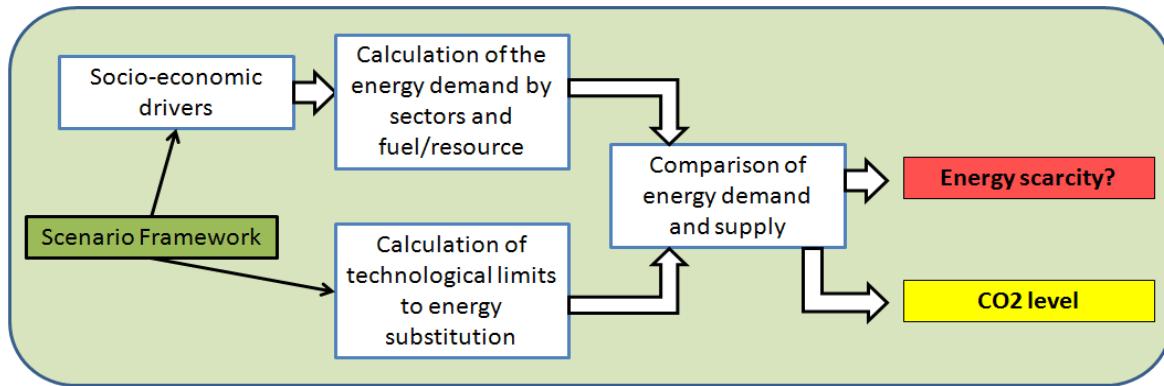


Figura 1: Funcionamiento básico del modelo WoLiM.

Aunque el modelo está basado en dinámica de sistemas, esta versión del mismo no es tan rica en realimentaciones como suelen ser este tipo de modelos. Uno de los lazos de realimentación más importantes ha sido omitido: no se considera que la escasez de energía tenga influencia en el crecimiento económico (como consideran, por ejemplo (Ayres et al., 2013; Hirsch, 2008)). Esto hace que WoLiM sea, básicamente, un modelo dinámico de tendencias de demanda energética y tecnología versus restricciones físicas<sup>5</sup>.

La razón de esta simplificación en la versión actual se debe a la falta de consenso que existe en la literatura económica acerca la cuantificación del impacto que la escasez de energía tiene en el crecimiento económico. Aunque algunos autores han analizado esta relación (Hirsch, 2008) no hay una teoría bien desarrollada y ampliamente aceptada sobre este aspecto. A pesar del creciente desacuerdo de una parte de los economistas (Ayres et al., 2013; Bithas and Kalimeris, 2013), la mayor parte de los modelos macroeconómicos prestan poca atención a los recursos naturales, y, desde nuestro punto de vista, sobreestiman la capacidad de sustitución tecnológica. Nuestros estudios están mostrando que la sustitución tecnológica, en particular la del petróleo en esta misma década, es muy complicada y una transición BAU basada en la demanda no parece posible (Mediavilla et al., 2013; de Castro et al., 2009). Por otra parte, la integración de esta realimentación energía-economía en este tipo de modelos tiende a acentuar las dinámicas de colapso (de Castro et al., 2009; Nel and Cooper, 2009). Por ello, antes de modelar una realimentación inadecuada, se ha decidido no incluirla. Desde este punto de vista se puede decir que nuestro modelo es optimista.

<sup>5</sup> Otra de las realimentaciones importantes, el impacto del cambio climático en la economía, tampoco se considera, pero sí existen lazos de realimentación que hacen que WoLiM sea un modelo de dinámica de sistemas, como los que describen la extracción de combustibles fósiles y la dinámica del establecimiento de las energías renovables (ver apéndices B y C para más explicaciones).

Por ello la relación entre economía y energía en nuestro modelo se puede describir como dual:

- **Dirigida por la demanda** si no hay restricciones en el acceso a los recursos. En este caso se asume que el suministro de energía se ajusta a la demanda.
- **Dirigida por la oferta** si la demanda de energía es superior a la producción posible. En este caso el suministro de energía se hace igual a la producción y aparece escasez de energía. Evidentemente, en la realidad esta situación llevaría a un ajuste a través del precio que equilibrarse oferta y demanda alcanzando un nuevo equilibrio con una demanda menor. Sin embargo nuestro modelo no puede simularlo porque ese lazo de realimentación se ha omitido y simplemente se observa una discrepancia entre demanda y producción.

Por ello los resultados del modelo WoLiM sólo se pueden considerar realistas mientras no exista un desequilibrio entre la demanda y la extracción de energía en ningún sector. A partir de ese momento el sistema podría evolucionar por una variedad de caminos diferentes que harían que las tendencias pasadas se rompieran y el modelo dejara de ser realista. Por ello la mayor contribución del modelo es el hecho de que permite detectar los años en los cuales la oferta no puede satisfacer la demanda estimada bajo diferentes escenarios y en cada sector (son los llamados "puntos de escasez" en la sección 7).

### Variables clave del modelo

Las variables exógenas del modelo son determinadas por medio de la interpretación de los escenarios, mientras que las endógenas son calculadas *en* del modelo. Las variables exógenas (también llamadas políticas) con que contamos son:

- Evolución del PIB per capita (GDP)
- Evolución de la población
- Mejoras sectoriales de la eficiencia energética (mejora de la intensidad energética en los siguientes sectores económicos: transporte, electricidad, industria y edificios).
- Curvas de extracción de recursos no renovables: petróleo, gas, carbón y uranio.
- Potencial máximo sostenible de extracción de energías renovables.
- Crecimiento de las energías renovables para la producción de electricidad (eólica, solar fotovoltaica y termoeléctrica, hidroeléctrica, geotérmica, biomasa-residuos y oceánica) y el crecimiento de las infraestructuras de generación nuclear.

- Crecimiento del uso de energía renovable para usos térmicos y ahorro energético relacionado con la eficiencia en la industria y los edificios.
- Penetración en el mercado de alternativas de transporte como los vehículos eléctricos, híbridos y alimentados por gas.
- Penetración en el mercado de combustibles líquidos no derivados del petróleo como los extraídos del carbón (CTL), gas (GTL) y biocombustibles de primera y segunda generación.
- Programas de reforestación para captación de CO<sub>2</sub>.

El número de variables endógenas del modelo es elevado (por encima de 420), pero las principales son:

- Intensidades energéticas de los siguientes sectores económicos: transporte, electricidad e industria y edificios.
- Demandas de cada fuente de energía (combustibles líquidos, gas, electricidad, etc.) para cada sector. Para estimar el porcentaje de demanda de un sector que se cubre con cada combustible particular se han extrapolado las tendencias históricas (ratios que varían al aplicar políticas específicas de cada escenario al modelo).
- Stocks y flujos de los recursos no renovables (petróleo, gas, uranio y carbón) sujetos a unas dinámicas de agotamiento que están descritas en el Apéndice B.
- Stocks que describen las infraestructuras de energías renovables (solar, eólica, hidroeléctrica, etc.) cuyo crecimiento está determinado por las políticas aplicadas (ver Apéndice C para una descripción).
- Stocks que representan el desarrollo paulatino de tecnologías alternativas (políticas del modelo) como los biocombustibles, vehículos eléctricos, medidas de eficiencia, etc. (descrito en Apéndice D).
- Emisiones netas y concentración de CO<sub>2</sub> relacionadas con el uso de combustibles fósiles.

En el Apéndice A se puede ver una descripción gráfica general del modelo.

## Hipótesis básicas del modelo

Las hipótesis en las que se basa el modelo son las siguientes:

- La extracción de energías no renovables está sujeta a restricciones geológicas (teorías del pico del petróleo y similares).
- Los cambios tecnológicos, como la sustitución de energías no renovables por renovables, requieren tiempo. Los ritmos de sustitución utilizados en el modelo están

determinados por las tendencias observadas en décadas pasadas (y son acelerados bajo determinadas políticas).

- La demanda mundial de energía está determinada por la intensidad energética, cuya evolución se considera que también posee cierta inercia. La variación de la intensidad energética está basada en las tendencias observadas en décadas pasadas y es acelerada en algunos escenarios.

### Tendencias de las variables clave

La evolución de las variables clave varía según el escenario aplicado, que especifica los valores de las variables exógenas (o políticas) del modelo (ver Figura 2). Una descripción detallada de los escenarios se da en la sección 6.

Una vez que se ha elegido un escenario, la demanda energética es calculada como el producto del PIB estimado (determinado en función de su crecimiento, que es una variable exógena) por la intensidad energética. La demanda se organiza en 3 sectores agregados: **Transporte, Electricidad e IB** (industria y edificios sin consumos eléctricos). La demanda energética de cada sector se genera por medio de las intensidades energéticas sectoriales (ver detalles en Sección 4). Estas demandas sectoriales son divididas en demandas de diferentes recursos siguiendo las tendencias observadas en pasadas décadas.

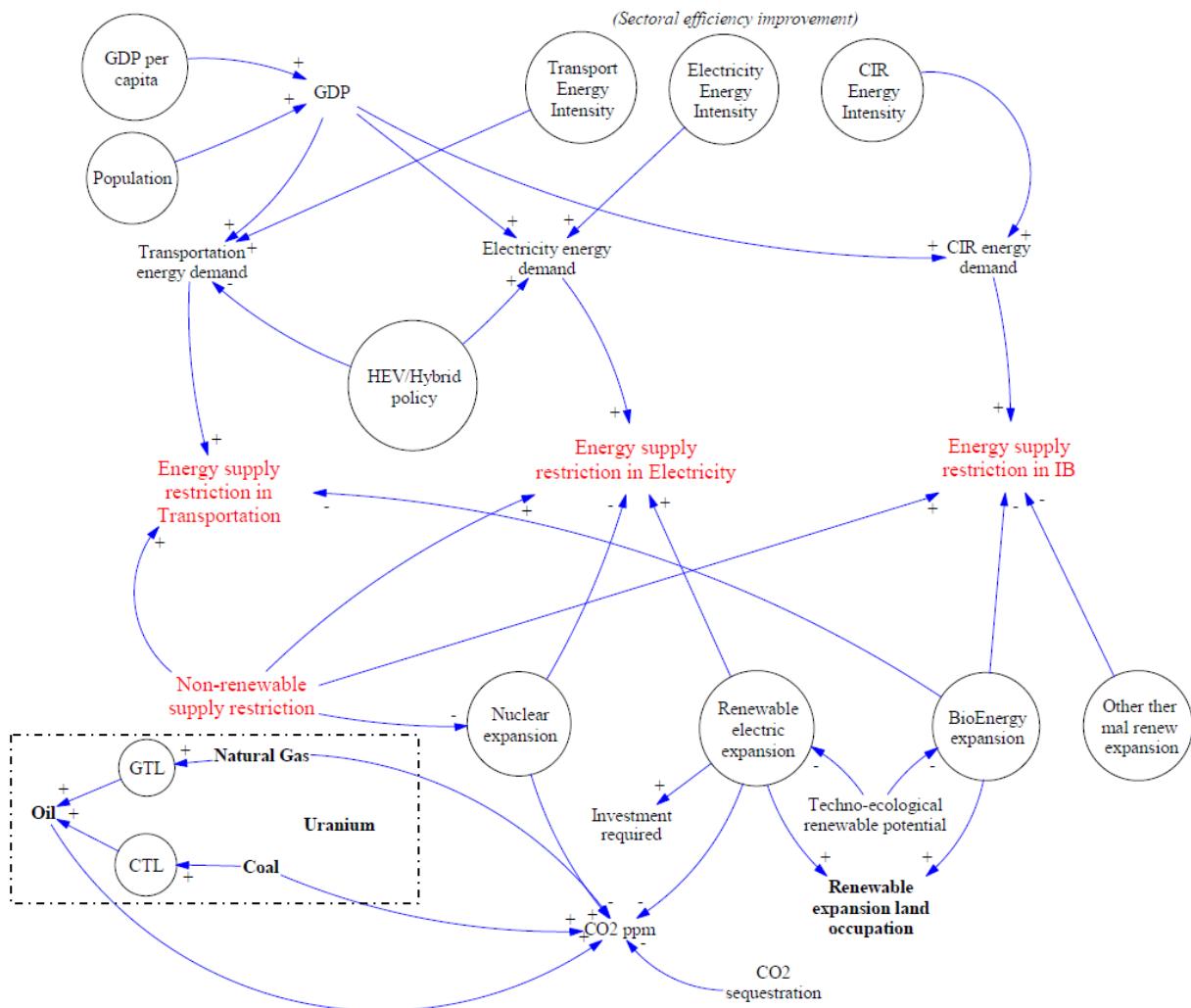
La extracción de energía no renovable (petróleo, carbón y gas) es comparada con la demanda, teniendo en cuenta que la extracción está restringida por las curvas de extracción máxima (ver Apéndice B). El modelo incluye la expansión de algunas tecnologías (electricidad renovable, bioenergía, nuclear, CTL y GTL, etc. –ver apéndice C). Las políticas de los diferentes escenarios determinan la expansión de cada tecnología. Finalmente las emisiones netas y concentraciones de CO<sub>2</sub> en el horizonte de 2100 son computadas.

En el consumo de electricidad se da prioridad a las energías renovables (es decir, una vez que la infraestructura está construida toda la energía que genera es usada) y el resto de la demanda se divide proporcionalmente entre el resto de las fuentes no renovables siguiendo los ratios observados en el pasado (medias de los últimos 20 años según los datos del *International Energy Outlook*). De esta forma, la comparación demanda versus producción se realiza para cada combustible. Puesto que las transiciones energéticas en el pasado han sido lentas (Fouquet, 2010), y los ratios de reparto de consumo de energía por combustibles han variado poco en los últimos años (ej. WEO, 2012), consideramos que esta forma de modelar la demanda es válida en el medio plazo (2050).

### Limitaciones del modelo

En el Apéndice E se discuten algunas omisiones del modelo, como la ausencia de algunos lazos de realimentación, la no inclusión de la TRE (Tasa de Retorno Energética o *EROEI*), la competición entre diferentes fuentes de energía o los límites de la extracción de minerales. En este sentido se puede decir que nuestro modelo es conservador y sus resultados optimistas, puesto que todos los factores que han sido obviados tienden a empeorar las consecuencias socio-económicas de los límites energéticos. El desarrollo de un modelo energía-economía-cambio climático más sofisticado y con más realimentaciones sería deseable. En estos momentos los autores están estudiando las posibilidades la Economía Ecológica para proporcionar un marco teórico que permita mejorar y ampliar el actual modelo y determinar cuál es la repercusión de los recursos naturales en el proceso económico.

A pesar de esas simplificaciones, *la principal virtud de WoLiM es ser un modelo estructuralmente sencillo y transparente pero que integra una gran cantidad de datos de diversa naturaleza*, lo que le hace una herramienta muy potente y a la vez sencilla de entender. *No es un modelo que intente predecir el futuro sino decir qué futuro no es posible por no ser compatible con las restricciones físicas y temporales*. A fin de cuentas el objetivo de la Dinámica de Sistemas no es predecir sino comprender los sistemas analizados (Meadows et al., 1972; Sterman, 2001).



**Figura 2:** Diagrama causal del modelo con sus elementos básicos. Los escenarios y políticas se especifican con un círculo. CIR es el acrónimo del sector Comercial Industrial y Residencial, que también se especifica en otros lugares del texto como Industrial y Edificios (IB).

### 3. Modelado de los recursos energéticos

En las siguientes sub-secciones se describe el modelado de los recursos energéticos: la sección 3.1 para los no-renovables y la 3.2 para los renovables. El modelo estudia los recursos energéticos en el horizonte del año 2050, por ello no se ha tenido en cuenta la **energía nuclear de fusión**, ya que los propios proyectos ITER y DEMO estiman que los primeros reactores de fusión comercial no estarán en marcha antes de 2040.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> < <http://www.iter.org> >.

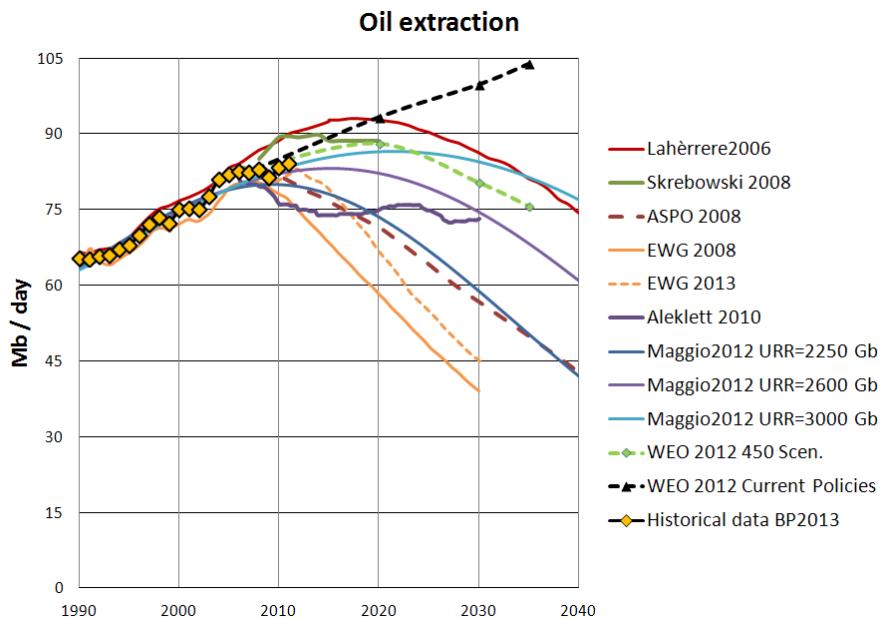
### **3.1 Recursos no renovables**

En (Mediavilla et al., 2013) se discute extensamente acerca de los perfiles de extracción de los diferentes combustibles utilizados para el modelo previo a WoLiM. Para este nuevo modelo se han actualizado los perfiles con nuevos datos encontrados en la literatura y, en base a ello, se proporcionan estimaciones de perfiles de extracción que llamamos “mejor estimación” (“best guess”) y “estimación alta” (“high case”) para las que consideramos como curva de extracción más probable y curva de valores más elevados respectivamente, teniendo en cuenta el estado del arte en la literatura.

#### **Petróleo**

Las estimaciones sobre las reservas y curvas de extracción del petróleo convencional tienden a converger en la literatura en los últimos años (de Castro, 2009; Maggio and Cacciola, 2012; Sorrell et al., 2009). Para este tipo de petróleo hemos utilizado la estimación más elevada para el petróleo convencional que hemos encontrado (ver Figura 3), lo cual permite que las conclusiones de este estudio se vean reforzadas.

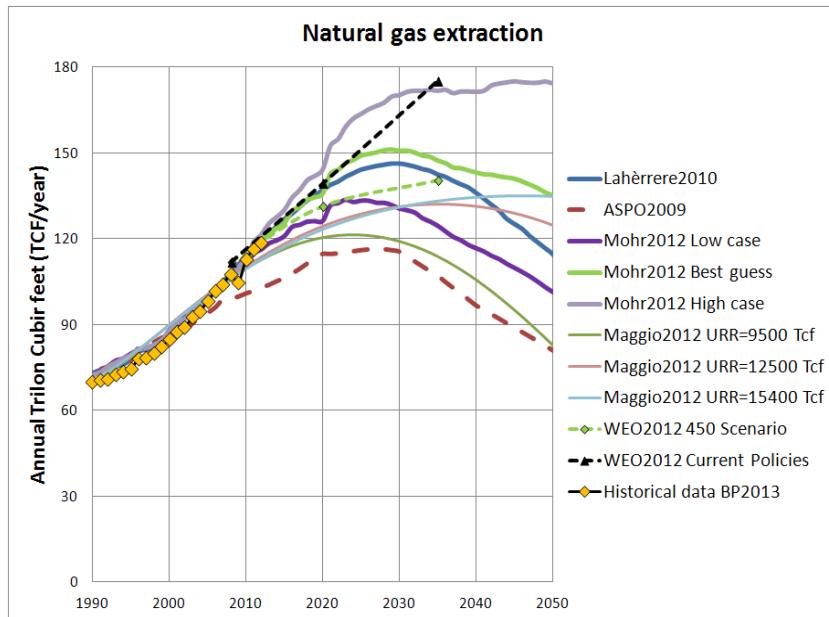
Para el caso del petróleo no convencional hemos utilizado el enfoque utilizado en (de Castro et al., 2009) a base de extraer el 4,5% de crecimiento anual que se observa en las tendencias pasadas o bien un 6,6% de crecimiento anual para los escenarios más optimistas como estiman (Grushevenko and Grushevenko, 2012; Söderbergh et al., 2007). Se considera una URR de 750 Gboe para el petróleo no convencional después de la revisión de varios estudios (ASPO, 2009; de Castro, 2009; Guseo, 2011; Laherrère, 2006).



**Figura 3:** Estimaciones de máxima extracción de petróleo dadas por diferentes autores. Existe falta de estandarización en la literatura respecto a lo que se considera “petróleo”. Por petróleo se entiende sólo el crudo (incluyendo NGLs) en (Maggio and Cacciola, 2012); petróleo crudo y no convencional en (ASPO, 2009; EWG, 2013, 2008); crudo, no convencional y ganancias en refinerías en (Aleklett et al., 2010; Skrebowski, 2010; WEO, 2012); petróleo crudo, no convencional, ganancias en refinerías y biocombustibles en (Laherrère, 2006); finalmente BP en sus datos históricos incluye petróleo crudo, shale oil y arenas asfálticas. (Aleklett et al., 2010) ajusta el volumen total al contenido energético puesto que 1 barril de NGL contiene en realidad un 70% de la energía de un barril de petróleo.

### Gas Natural

En (Mediavilla et al., 2013) el perfil de extracción de gas que se seleccionó fue el de (Laherrère, 2006). En este estudio se han usado los datos actualizados de este mismo autor en la mayor parte de los escenarios (Laherrère, 2010), los cuales asumen una URR combinada para el gas convencional y no convencional de 13.000 tcf (13,6 ZJ) (Figura 4). En algunos de los escenarios se considera una “estimación alta” que asume que la extracción de gas no convencional podría expandirse significativamente más bajo ciertas condiciones favorables. En estos casos se utiliza la estimación “Best Guess” de Mohr 2012, que asume casi 13,000 tcf de gas convencional y más de 7,000 tcf (7.3 ZJ) de gas no convencional disponibles (usando, de hecho una URR un 50% más elevada que la de (Laherrère, 2010)).



**Figura 4:** Estimaciones de extracción de gas convencional y no convencional de diferentes autores.

### Carbón

Aunque en los últimos años hay mucho interés en el fenómeno del pico del petróleo y del gas, hay muchos menos grupos de investigación que estén estudiando el carbón y ofrezcan curvas futuras de extracción. Todavía menos investigadores realizan estimaciones teniendo en cuenta que el carbón es un mineral sólido, lo que implica restricciones geológicas técnicas de minería diferentes (el enfoque más utilizado es el de las curvas de Hubbert). Esta es la razón por la cual la curva que se ha elegido en este estudio para el carbón es la llamada "High case" en (Mohr, 2012; Mohr and Evans, 2009) que se basa en un modelo de minería que consideramos más realista (Figura 5).

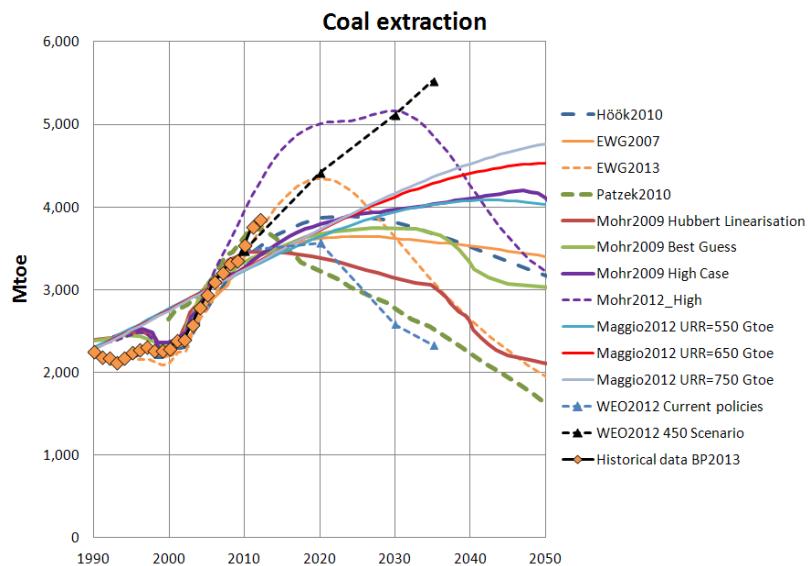


Figura 5: Estimaciones de carbón de diferentes autores. (1 Mt = 0,482 Mtoe (Höök et al., 2010)).

## Uranio

El dato de la extracción de uranio que se ha usado está tomado de (Zittel, 2012), con datos actualizados que incluyen más reservas (de menor concentración y más caras) que las usadas en (Mediavilla et al., 2013) (EGW, 2006), de forma que la URR se eleva y el pico de producción de uranio supera los 100Kt (ver Figura 6).<sup>7</sup>

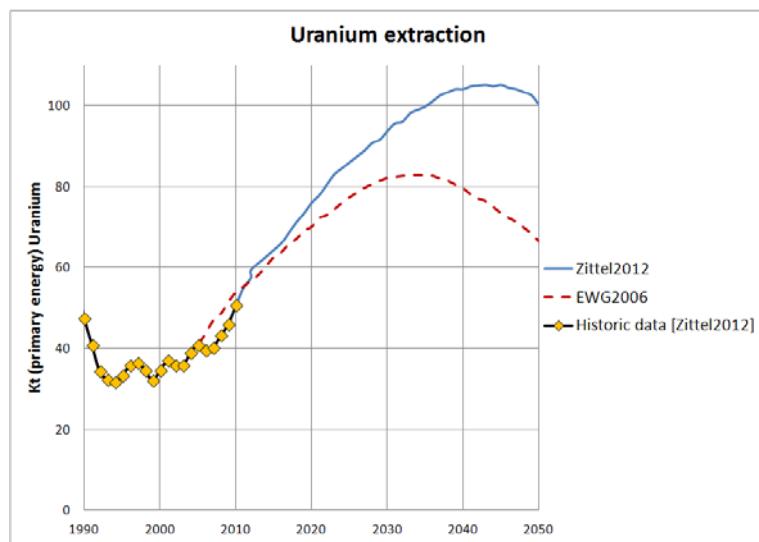


Figura 6: Estimaciones de extracción máxima de uranio.

<sup>7</sup> Un artículo reciente es incluso más restrictivo, estimando que el pico del uranio ocurrirá en este década a un valor de  $58 \pm 4$  ktons (Dittmar, 2013). El modelo no incluye los recursos secundarios de uranio (tailings, stocks y antiguas armas nucleares), porque considera que se agotarán en pocos años (Dittmar, 2013; EGW, 2006).

Un resumen de todas estas estimaciones puede verse en la Tabla 1.

Recurso		Referencia	Descripción	URR	
Oil	Conv.	(Maggio and Cacciola, 2012) high scenario.	Hubbert method.	3,000 Gb	16.71 ZJ
	Unconv.	Best Guess: Own projection based on (de Castro et al., 2009)	Extrapolation of past trends deployment (+ 4.5 %/yr)	750 Gb	4.2 ZJ
Natural gas		High case: (Grushevenko and Grushevenko, 2012)	High deployment rate (+ 6.6 %/yr)	13,000 tcf	13.6 ZJ
		Best Guess: (Laherrère, 2010) Best Guess	Hubbert method: "creaming curve".		
Coal		High Case: Best Guess from (Mohr, 2012)	12,900 tcf of conventional + 7,200 tcf of unconventional.	19,100 tcf	19.9 ZJ
		(Mohr, 2012)	High Case, static. Mining model extraction.	670 Gtoe	27.8 ZJ
Uranium	(Zittel, 2012)	Hubbert method, considering RAR (<260 \$/KgU) and IR of NEA. <sup>a</sup>		19,500 KtU	8.2 ZJ

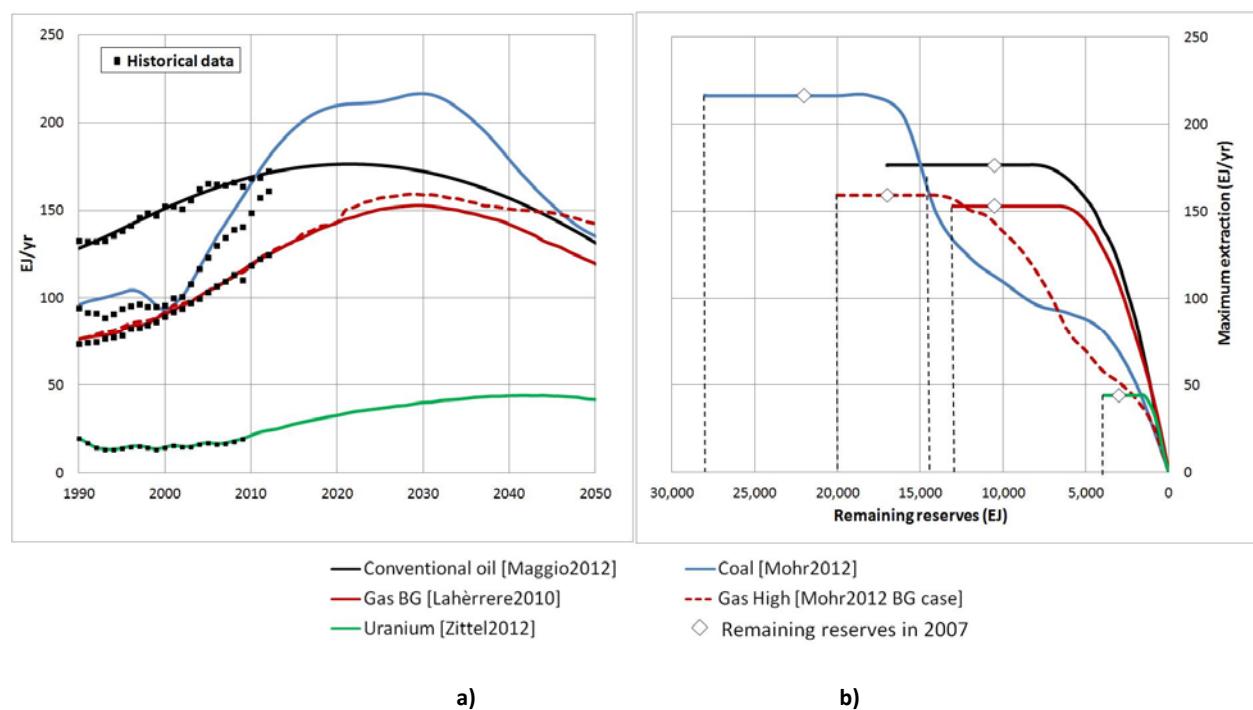
**Tabla 1:** Recursos no renovables usados en el modelo. (a) RAR: reasonably assured resources; IR: Inferred resources; NEA: Nuclear Energy Association.

### Coal to liquids y gas to liquids

También se tienen en cuenta otras tecnologías capaces de generar combustibles líquidos como son las basadas en carbón CTL (coal-to-liquids) y gas natural GTL (gas-to-liquids). Existen diferentes tecnologías para ello pero todas se caracterizan por tener bajas eficiencias (Höök et al., 2013; IPCC, 2007b). Su producción actual es exigua: menos de 0.3 Mb/d en 2011 (WEO, 2012) y las proyecciones de crecimiento que dan las agencias internacionales son relativamente modestas (ej. +11%/año para GTL en el *New Policies Scenario* de (WEO, 2012)).

## Introducción de las curvas en el modelo

Para poder ser capaces de utilizar las curvas descritas en apartados anteriores en el modelo dinámico debemos transformarlas, puesto que ofrecen perfiles de extracción máxima en función del tiempo. Puesto que nuestro modelo tiene en cuenta la demanda, si por ejemplo, debido al escenario elegido, la economía mundial no demanda gas o carbón éste no sería extraído. Por ello las curvas de extracción máxima en función del tiempo han sido transformadas en curvas de extracción máxima en función del stock de recurso (ver Figura 7 y Apéndice B). Por medio de estas curvas podemos estimar la producción de cualquier recurso en cada momento, que será calculada como el mínimo entre la demanda y la máxima extracción posible.



**Figura 7:** (a) Curvas de extracción en función del tiempo extraídas de sus referencias originales; (b) Curvas de máxima extracción en función de las reservas restantes para todos los recursos no renovables (energía primaria). El eje y representa la extracción máxima posible por año (EJ anuales), asociado a las reservas resultantes del eje x (EJ). Para cada recurso el punto del extremo izquierdo (que coincide con el máximo valor de la reserva) representa su URR. De esta manera, cuando las reservas restantes caen por debajo del punto donde la máxima extracción puede conseguirse (aproximadamente cuando se ha extraído la mitad de la URR), la extracción es forzada a declinar según los patrones de los estudios seleccionados. También se muestra en la figura con un rombo el nivel de reservas restantes en 2007 para cada recurso. Para más explicaciones ver Apéndice B.

## 3.2 Recursos renovables

La energía renovable es normalmente considerada una fuente extremadamente abundante de energía, asumiéndose por ello que los límites tecnológicos son inalcanzables, centrándose las preocupaciones en las restricciones económicas, políticas o ecológicas impuestas (IPCC, 2011). Sin

embargo existen varias restricciones importantes que limitan su disponibilidad práctica y muchas veces no son tenidas en cuenta. En esta sección se discuten los potenciales tecno-ecológicos de las principales energías renovables a la luz de estudios previos del equipo investigador (de Castro et al., 2013b, 2013a, 2011).<sup>8</sup>

### **Bioenergía**

La energía procedente de biomasa representa actualmente aproximadamente el 10% del consumo de energía primaria a nivel mundial, y es producida por un conjunto de fuentes (cultivos, residuos y basuras urbanas (MSW), etc.) y puede servir para diferentes usos (biocombustibles, calor, electricidad, etc.). Sus potenciales tecno-ecológicos dependen críticamente de la disponibilidad futura de tierra fértil, puesto que la cantidad de tierra necesaria por unidad de energía extraída es elevada (de Castro et al., 2013a). Por otra parte las necesidades de tierra que se prevén para el cultivo de alimentos y el establecimiento de infraestructuras para una población en crecimiento ponen un límite a su expansión. El potencial de la bioenergía se ha establecido en el modelo en base a la superficie que podría dedicarse a este uso. Varía entre el valor actual (100 MHa) y un máximo de 200 MHa (una explicación más completa se puede ver en el Apéndice F).

### **Generación de electricidad de fuentes renovables**

Las tecnologías renovables para generación de electricidad más prometedoras son la solar y la eólica (Smil, 2010). Sin embargo, estudios recientes (realizados por los autores de este artículo usando una metodología top-down) sugieren que su potencial está significativamente limitado por límites técnicos y de sostenibilidad (de Castro et al., 2013b, 2011). De acuerdo con estos estudios, el potencial de desarrollo de la energía eólica se situaría en entorno a de 30 EJ/año (de Castro et al., 2011). Por otra parte, en (de Castro et al., 2013b) encontramos que los requisitos reales de superficie necesarios para la energía solar son entre 4 y 10 veces mayores que los estimados en la mayor parte de los estudios publicados, por lo que el potencial que tomamos es de aproximadamente 60-120 EJ/año. Por todo ello, globalmente, el potencial tecno-ecológico que consideramos para las renovables eléctricas es de 150 EJ/año (5 TWe) (ver Apéndice G).

En términos de inversiones económicas, tenemos en cuenta las inversiones necesarias para la construcción de nuevas plantas, el reemplazo o re-potenciación de las ya existentes (Teske et al., 2011), el refuerzo de las redes de distribución (Mills et al., 2012) y los costes de regulación (Holttinen et al.,

---

<sup>8</sup> Para un análisis detallado véase (Capellán-Pérez et al., 2014).

2011)<sup>9</sup> (ver Tabla G1). Para una descripción detallada del modelado de la generación de energía eléctrica por fuentes renovable ver (Capellán-Pérez et al., 2014).

### **Renovables térmicas**

El sector Industrial y Residencial (IB) es mucho más complicado de analizar que el sector eléctrico ya que usa todo tipo de fuentes de energía con una gran diversidad de tecnologías. Por ello se ha decidido enfocar el presente estudio en los sectores de Transporte y Electricidad, manteniendo un alto nivel de agregación en el sector IB. Los usos térmicos de las energías renovables (ej. solar térmica o geotérmica para edificios) no han sido modelados explícitamente en WoLiM ni son tampoco asignados a una tecnología en concreto (excepto para la biomasa de tercera generación). Políticas de transición energética en este sector incluyen aspectos como el cambio a sistemas más eficientes de calentamiento, mejoras en el aislamiento de las viviendas, acceso a la luz natural o calefacción de distrito. Estas políticas se modelan como objetivos de penetración en el mercado para un año en concreto de un modo similar al implementado en el WORLD3 (Meadows et al., 2004) (ver Apéndice D para una descripción más detallada).

## **4. Estimación de la demanda de energía**

Existe una diversidad de técnicas para estimar la demanda energética de una determinada economía o sector económico. Como el modelo WoLiM es altamente agregado el método que se ha escogido ha sido el de la intensidad energética, ampliamente usado en estudios similares (Furtado and Suslick, 1993; Saddler et al., 2007). Este método es simplista, ya que no incluye explícitamente el precio o la estructura económica; sin embargo, se puede considerar que a medio plazo la demanda de energía y sus dos principales motores (el PIB y la mejora tecnológica) dominan sobre las fluctuaciones de los precios (de Castro, 2009; Furtado and Suslick, 1993; Saddler et al., 2007). De hecho, precios y costes pueden falsear la escasez física. (Reynolds, 1999) demostró que, cuando la magnitud de las reservas es desconocido (o ignorado), es posible un periodo largo de tiempo con incrementos de producción y costes decrecientes hasta que se produce un incremento súbito en los costes con un gran reducción en la producción,

---

<sup>9</sup> No consideramos en el modelado la llamada “trampa energética” (*energy trap*) (Murphy, 2011; Zenzey, 2013). En ese caso, los resultados en términos energéticos serían peores, ya que la energía necesitada para construir la infraestructura necesaria para construir un sistema de generación renovable deben proceder del consumo actual de combustibles fósiles. En palabras de (Zenzey, 2013, p. 80): “Unlike monetary investments, which can be made on credit and then amortized out of the income stream they produce, the energy investment in energy infrastructure must be made upfront out of a portion of the energy used today (...) The arithmetic is daunting. To avoid, for example, a 2-percent annual decline in net energy use, replacing that loss with solar photovoltaic (with an EROEI pegged at 10:1) will require giving up 8 percent of the net energy available for the economy”.

similar al proceso ocurrido con el petróleo en las décadas de 1990 y 2000 y el shock del petróleo de 2007-08 (Hamilton, 2009).

Se va a considerar la intensidad energética de cada uno de los tres sectores económicos estudiados, calculada como la energía usada por ese sector dividida entre el PIB total de la economía global (ecuación 1). Este método puede resumirse en las siguientes etapas:

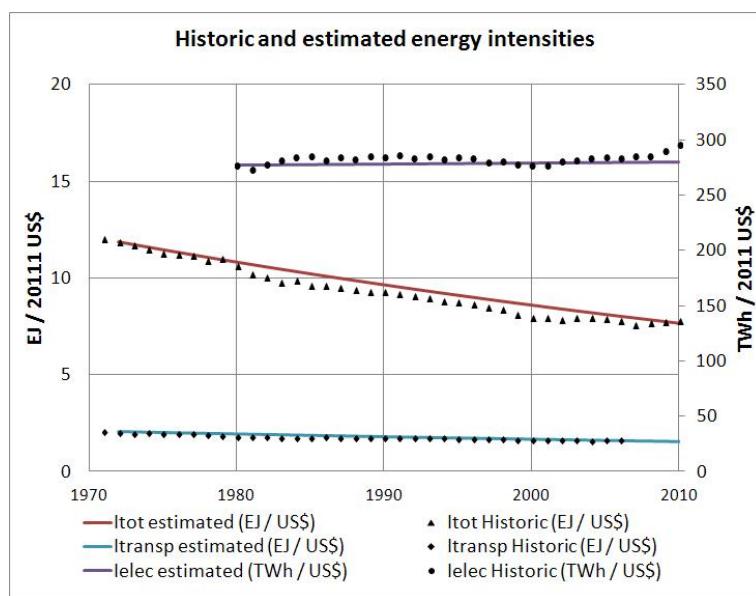
- 1- Se estima la evolución futura del PIB (cuyo crecimiento se determina por medio de variables exógenas que dependen del escenario usado),
- 2- se estima la evolución futura de la intensidad energética para cada sector ( $I_i$ ), en base a técnicas econométricas,
- 3- finalmente la demanda futura de energía para cada sector ( $E_i$ ) se calcula como el producto del PIB por la intensidad energética de cada sector en cada instante de tiempo, según la expresión de la ecuación 1:

$$E_i(t) = GDP(t) \cdot I_i(t) \quad \text{ecuación (1)}$$

El índice  $i$  hace referencia a los 3 sectores económicos estudiados: transporte, electricidad e IB (industria y edificios). Los resultados de la regresión de la intensidad energética mundial basada en datos históricos se pueden ver en la Tabla 2 y la Figura 8. Estos resultados indican que, en los últimos 40 años, la intensidad energética mundial en términos de energía primaria total ha mejorado a un ritmo medio de un 1,15% anual, pero desde 2000 su valor ha permanecido constante en torno a 8 EJ/\$ (US 2011\$). Las intensidades sectoriales del transporte y del sector (IB) también han mejorado en las últimas décadas, pero a ritmos menores (0,7% y 0,5% respectivamente). Finalmente la intensidad del consumo de electricidad se ha mantenido prácticamente constante en las últimas décadas en un valor de 275 TWh/\$ (US 2011\$).

Energy sector	Sectoral Energy Intensities		Period
Total PE demand	$I_{tot} = 0.988582 \cdot I_{tot-1}$ ( $R^2=0.999840$ )	EJ / US\$	1971-2010 (regression)
Transport PE demand	$I_{transp} = 0.993298 \cdot I_{transp-1}$ ( $R^2=0.999841$ )	EJ / US\$	1971-2007 (regression)
Electricity generation	$I_{elec} = 1.00127 \cdot I_{elec-1}$ ( $R^2=0.999916$ )	TWh/ US\$	1980-2010 (regression)
IB PE demand	$I_{IB} = 0.995 \cdot I_{IB-1}$	EJ / US\$	1990-2010 (calibration)

**Tabla 2: Resultados de la intensidad energética total y por sectores.** Todos los dólares (en todo el artículo) son US\$ constantes del año 2011. La base de datos del Banco Mundial (2014) ha sido usada para las series históricas del PIB (GDP) y demanda de energía primaria (PE), los datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA ETP, 2010) han sido tomados para el cálculo del consumo de la energía para el transporte, mientras los datos de consumo eléctrico han sido tomados de (US EIA db, 2014). El consumo del sector IB ha sido calculado como la resta de la energía primaria menos la energía para transporte y electricidad (tanto generación como pérdidas).



**Figura 8:** Intensidad energética histórica por sectores y estimada por curvas de ajuste.  $I_{tot}$  se refiere a la intensidad de la energía primaria total (EJ/US\$),  $I_{transp}$  es la intensidad del sector del transporte (EJ/US\$), e  $I_{elec}$  es la intensidad de la energía eléctrica (TWh/US\$). Todos los dólares son US\$ constantes al año 2011.

Para ser capaces de estimar la intensidad energética futura tomamos un modelo al cual ajustar los datos históricos. La expresión que vamos a tomar (ver ecuación 2) está basada en la propuesta por (Schenk and Moll, 2007), que tiene en cuenta los límites biofísicos y termodinámicos en la sustitución de los inputs de producción en el medio y largo plazo, como se defiende desde la economía ecológica (Ayres, 2007; Ehrlich, 1989; Stern, 1997). Por ejemplo, para la intensidad energética total se definiría la siguiente ecuación:

$$I_{\text{tot}} = I_{\min} + (I_{t=0} - I_{\min}) \cdot \alpha^t \quad \text{equación (2)}$$

Donde  $I_{\min}$  es el valor mínimo de la intensidad energética y representa la asymptota a la cual tendería a converger la curva de la intensidad en el medio-largo plazo. El parámetro  $\alpha$  está relacionado con las mejoras anuales de eficiencia, AEI (Annual Efficiency Improvements), ya que es  $\alpha = (1 - AEI)$  y es el factor que tiene en cuenta el cambio tecnológico que mejora la intensidad energética. Ambos valores ( $\alpha, I_{\min}$ ) van a ser variados en las simulaciones del modelo dependiendo del escenario utilizado (ver Sección 6). Los estudios de (Baksi and Green, 2007; Lightfoot and Green, 2002) son tomados como referencia.<sup>10</sup> Por último, la demanda de energía primaria de cada sector es corregida dinámicamente para tomar en cuenta que las tecnologías renovables son más eficientes en la cobertura de servicios finales que las basadas en combustibles fósiles o nucleares.

## 5. Emisiones y concentraciones de CO<sub>2</sub>

WoLiM computa las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al uso de los combustibles fósiles usando los coeficientes de (BP, 2013) para los combustibles convencionales y de (Brandt and Farrell, 2007; Howarth et al., 2011) para los no convencionales. Los biocombustibles están actualmente lejos de ser neutrales en términos de emisiones de gases de efecto invernadero debido a los cambios de usos indirectos de la tierra (European Commission, 2010; Fargione et al., 2008; Haberl et al., 2012; Searchinger et al., 2008), por ello les asignamos un valor de emisiones similar al del gas natural (ver Tabla 3).

Resource		Reference	Value [tCO <sub>2</sub> / toe]
Coal		(BP, 2013)	3.96
CTL		(Brandt and Farrell, 2007)	6.94
Natural gas	Conventional	(BP, 2013)	2.35
	Unconventional	(Howarth et al., 2011)	3.53
GTL		(Brandt and Farrell, 2007)	4.34
Oil	Conventional	(BP, 2013)	3.07
	Unconventional	(Brandt and Farrell, 2007)	3.84 (6.14 for shale oil)

Tabla 3: Emisiones de CO<sub>2</sub> para los recursos no renovables del modelo.

<sup>10</sup> Una aplicación práctica de esto se muestra en (Capellán-Pérez et al., 2014).

Con el fin de poder estudiar las implicaciones climáticas de las políticas energéticas, las emisiones netas de CO<sub>2</sub> se han traducido a concentraciones<sup>11</sup> asumiendo que, en el periodo simulado, el océano y el suelo seguirán absorbiendo el 45% de las emisiones como ha ocurrido en el pasado (Canadell et al., 2007). Debido a la gran inercia y el largo alcance del cambio climático, la proyección de emisiones se ha extendido hasta 2100, como el IPCC suele hacer, con la intención de poder comparar los niveles de concentración al menos en orden de magnitud.

## 6. Escenarios y políticas del modelo

Como se describió en la Sección 2, el modelo WoLiM requiere como base un paradigma de futura, es decir algunas suposiciones acerca de la evolución de la economía y la sociedad (crecimiento de la población y la economía, evolución de la tecnología, etc.). Para poder establecer estas políticas de forma coherente y sensata se ha aplicado la metodología de creación de escenarios (ej. informes del IPCC (IPCC, 2007a, 2001; IPCC SRES, 2000), de UNEP (UNEP, 2012, 2007, 2004) o (MEA, 2005)).

La realización de experimentos con los modelos de dinámica de sistemas y la obtención de resultados significativos puede ser una tarea muy compleja y laboriosa, puesto que son muchas las políticas que pueden ser modificadas a la vez. La metodología de creación de escenarios permite lidiar simultáneamente con la incertidumbre, la complejidad y las limitaciones de conocimiento de las ciencias naturales y sociales y, aplicado a los modelos de dinámica de sistemas, puede ser usada para agrupar las variaciones de las políticas en escenarios coherentes y con sentido. Así, cada escenario representa una visión arquetípica y coherente de cómo el futuro puede evolucionar –y que puede ser vista como positiva por unos y negativa por otros (IPCC SRES, 2000; MEA, 2005).

*Usando esta metodología en el modelo WoLiM logramos replicar las visiones del futuro que manejan las agencias internacionales y confrontarlas con las restricciones energéticas y ambientales. Hasta la fecha, estas instituciones científicas internacionales han ignorado este tipo de restricciones geológicas (Aleklett et al., 2010; Höök and Tang, 2013).*

En esta sección se describen las características más importantes de las familias de escenarios identificadas en los estudios GEA (van Vuuren et al., 2012), describiendo, primero las características cualitativas de los escenarios<sup>12</sup> y después proponiendo una cuantificación. A estos escenarios de (van

<sup>11</sup> En esta versión del modelo se ha implementado un programa de reforestación como política de secuestro de CO<sub>2</sub>, siguiendo la idea de Nilsson and Schopfhauser, 1995, que analizaron los cambios en el ciclo de carbón que podrían conseguirse con un gran programa global de reforestación que cubriese 345 Mha. Otras tecnologías como la captura y secuestro de CO<sub>2</sub> no se han considerado en este estudio debido a las incertidumbres que se observan actualmente en torno a su desarrollo y beneficios (Fischedick et al., 2008; Scott et al., 2013).

<sup>12</sup> Hemos completado las descripciones de (van Vuuren et al., 2012) con los datos del informe del IPCC (IPCC

Vuuren et al., 2012) se les incorpora un escenario Business-as-Usual (BAU) que extrae las tendencias observadas en los últimos años.<sup>13</sup>

**Escenario 1- Optimismo económico con algunas reformas de mercado (Economic optimism with some market reforming).** En este escenario se describe cómo la humanidad se centra en conseguir mercados competitivos y eficientes en un contexto de libre comercio y crecimiento económico rápido, pero incluyendo algunas políticas que tienen como fin corregir las deficiencias del mercado respecto al desarrollo social, la lucha contra la pobreza y la protección del medio ambiente.

El escenario asume una rápida difusión del desarrollo tecnológico y una convergencia de los niveles de ingresos en todas las regiones y países del mundo. Se asume que un mayor crecimiento económico coincide con un bajo crecimiento de la población (debido a la rápida caída en los niveles de fertilidad). La escasez de energía y minerales es superada por el desarrollo tecnológico que permite la explotación de nuevas reservas y la sustitución de energías mediante mecanismos de mercado (vía precios). Así, a medio plazo, todos se beneficiarían de la globalización y los avances tecnológicos remediarían los problemas ecológicos (ej. 'Environmental Kuznets Curve').

**Escenario 2-Desarrollo sostenible global (Global Sustainable Development).** En este escenario se concede prioridad a la protección del medio ambiente y la reducción de las desigualdades, utilizando para ello la cooperación internacional, cambios en los modos de vida y avances tecnológicos (tecnologías más eficientes, desmaterialización de la economía, economía de servicios y de la información, etc.). Los elementos centrales son un nivel elevado de conciencia medioambiental y social combinado con un enfoque global hacia el desarrollo sostenible. En este escenario se asume que es posible un alto nivel de coordinación internacional que permita tratar los problemas de lucha contra la pobreza, protección del clima y conservación de la naturaleza.

**Escenario 3- Competición regional (Regional competition/regional markets).** Este escenario supone que las regiones se centrarán principalmente en la autosuficiencia, la soberanía nacional y la identidad regional, aumentando la diversidad pero también las tensiones entre regiones y/o culturas. Los países se centrarán en la seguridad, el apoyando a los mercados regionales (proteccionismo, desglobalización), prestando poca atención a los bienes comunes. Dadas las significativas reducciones en la difusión de la tecnología, el progreso tecnológico avanzará lentamente.

---

Reports on Scenario Emissions, IPCC SRES, 2000) y (MEA, 2005).

<sup>13</sup> En realidad, (van Vuuren et al., 2012) describen 6 escenarios, pero, como ellos mismos explican en su artículo, los escenarios 1 y 2 son muy similares ("Economic optimism/conventional markets scenarios" and 2 "Reformed market scenarios" are very similar). Por ello decidimos juntarlos por motivos de simplicidad.

**Escenario 4-Desarrollo regional sostenible (Regional Sustainable Development).** Este escenario es la versión “amigable” del escenario anterior y en él la globalización retrocede y se produce un importante cambio en los valores tradicionales y las normas sociales en contra de un consumismo sin sentido y de una falta de respeto por la vida. Ciudadanos y países deciden asumir sus responsabilidades siendo un ejemplo “verde” para el resto. Aunque las barreras al comercio de mercancías se vuelven a construir las barreras a la información tienden a ser eliminadas. El énfasis se pone en encontrar soluciones regionales para los problemas sociales y ambientales, normalmente combinando cambios drásticos en los estilos de vida con estilos descentralizados de gobernanza.

### **Cuantificación de los escenarios**

Para poder implementar estos escenarios en el modelo debemos especificar las políticas en que se traducen estas descripciones cualitativas y los números concretos que estas políticas toman. La cuantificación de escenarios<sup>14</sup> es una tarea delicada e inherentemente subjetiva. Hemos utilizado estudios GEA similares como guía, sin embargo, las divergencias en la interpretación y las hipótesis consideradas son inevitables y se tratan de explicar a continuación.

**Variables socioeconómicas.** Los valores del crecimiento del PIB per cápita y la población son tomadas de (MEA, 2005), de hecho el valor numérico que tomamos es muy similar al de (IPCC SRES, 2000). Los valores concretos se pueden ver en la Tabla 4.

**Recursos energéticos disponibles.** Dado que el Escenario 1 pone el énfasis en los avances tecnológicos que permiten una mayor extracción de recursos junto con la persecución de beneficios en el corto plazo, en este escenario consideramos que el petróleo y gas no convencionales pueden ser extraídos a un ritmo mayor que en el resto de los escenarios. Por ello para el Escenario 1 tomamos las “estimaciones altas” de extracción de recursos que se describieron en la Sección 3. En escenarios que priorizan la protección del medio ambiente sobre la economía consideramos que los combustible fósiles no convencionales no se extraen a niveles mayores que la “mejor estimación” debido a los importantes perjuicios ambientales que implica la extracción de estos recursos (Olmstead et al., 2013; Osborn et al., 2011).

**CTL y GTL.** Mientras no existe escasez de energía existe un crecimiento de estas tecnologías que sigue las tendencias observadas en los últimos años (fuerte para GTL y lento para CTL). Cuando se observa una importante escasez de combustibles líquidos se implementa en el modelo un “programa de

---

<sup>14</sup> Los aspectos éticos relativos a la distribución equitativa del capital natural en un mundo de recursos limitados se encuentran fuera del alcance del presente trabajo.

choque" que consiste en un importante crecimiento anual de estas tecnologías, como se indica en la Tabla 4.<sup>15</sup> Cuando empiezan a encontrarse problemas de suministro de carbón o gas estos "programas de choque" son detenidos.

**Mejoras sectoriales de la eficiencia.** La eficiencia de cada sector (Transporte, IB y electricidad) está determinada por su intensidad energética (ecuación 2), tomando los valores de la Tabla 4 para cada escenario para los parámetros  $a$  e  $I_{min}$ . La intensidad energética de la electricidad se mantiene constante a lo largo de todo el periodo de simulación, ya que se asume que las tendencias actuales de electrificación continúan en todos los escenarios (los escenarios New Policies en (WEO, 2011) todavía prevén 1000 millones de personas sin acceso a la electricidad en 2030) y la tendencia observada en las últimas décadas es una constante. En los escenarios 3 y 4 donde existe desglobalización se supone un descenso en la eficiencia energética del transporte de un 1,5% (doblando las tendencias actuales), que reflejaría una reducción en las necesidades de transporte debido a políticas de fomento del transporte público o medidas similares.<sup>16</sup>

Es necesario tener en cuenta que **la evolución de todas las intensidades energéticas de nuestro modelo puede ser considerada optimista**. Se puede ver en la Figura 8 que en los últimos años las intensidades sectoriales han disminuido a ratios menores que en décadas pasadas y la intensidad energética total se ha mantenido prácticamente constante desde 2000, mientras la intensidad de la energía eléctrica ha aumentado incluso.

**Energía nuclear.** Teniendo en cuenta el estudio de (Schneider et al., 2012) sobre el estado de la industria nuclear en el mundo, la conservación de la potencia nuclear actualmente existente en las próximas décadas se puede considerar ya una hipótesis optimista (teniendo en cuenta el previsible cierre de las centrales que van alcanzando su fin de vida útil), este va a ser el caso asignado al BAU y al escenario 3. Para los escenarios 1 y 2, donde la energía nuclear podría ser promocionada, tomamos como referencia los datos de la *World Nuclear Association* (WNA), que prevé un aumento de un 1-2% anual para las próximas décadas (Dittmar, 2013). Finalmente, para el escenario 4, donde el medio ambiente es activamente protegido, se estima un programa de progresivo cierre de las centrales nucleares según van alcanzando el final de su vida útil.

<sup>15</sup> Este es un supuesto optimista puesto que el CTL, al contrario que el GTL, es aún una tecnología inmadura (exceptuando Sudáfrica) y los retos para su generalización son significativos (Höök et al., 2013).

<sup>16</sup> El potencial de reducción del consumo de energía para el transporte en los escenarios de desglobalización está, de hecho, muy limitado dada la pequeña contribución que el transporte marítimo y la aviación tienen en relación con la energía primaria total usada en el sector (por debajo del 13%, mientras el transporte por carretera requiere más del 65% (IEA ETP, 2010). De hecho se puede pensar en un rango de patrones de desglobalización muy amplios, desde un comercio basado en el intercambio entre regiones de países hasta reconfiguraciones en intercambios mucho más locales que darían lugar a patrones en el uso de la energía muy diferentes (e.g. (Bueno, 2012)).

**Vehículos eléctrico e híbrido (HEV&hybrid).** La evolución de los vehículos híbridos y eléctricos en nuestro modelo sigue las estimaciones de (EVI IEA, 2013). EVI es un “foro multi-gubernamental dedicado a la aceleración de la introducción y adopción de vehículos eléctricos en el mundo” que intenta “facilitar el desarrollo de al menos 20 millones de vehículos eléctricos de pasajeros para 2020” (EVI IEA, 2013), por ello podemos tomar sus previsiones como optimistas. Tomaremos estas previsiones para los escenarios 1 y 2, mientras que para el BAU y el escenario 3 tomaremos la mitad de esta previsión. En el escenario 4 interpretamos la expresión “cambios de vida” como un giro todavía mayor hacia el vehículo eléctrico. Después de 2020 el ritmo de crecimiento se dobla en todos los escenarios asumiendo que un cambio mayor hacia otro tipo de movilidad será implementado en cualquier caso debido a la escasez de combustibles líquidos para esa fecha en todos los escenarios.

**Vehículos de Gas Natural (NGV).** A pesar del importante crecimiento que han tenido en la década pasada (+20% anual) el número total de vehículos a gas es todavía de sólo 16,7 millones (<http://www.iangv.org/current-ngv-stats/>), una cifra pequeña comparada con los 1150 millones de vehículos de motor mundiales en 2009 (World Bank database, 2014). Debido a la insensibilidad del modelo a los diferentes valores de crecimiento de estos vehículos (por alcanzarse el pico del gas), por simplicidad, se ha tomado en todos los escenarios un crecimiento anual que sigue las tendencias pasadas, que ya es un ritmo muy elevado.

**Bioenergía.** Como ya se discutió en la sección 3.2 una gran superficie de tierra dedicada a la bioenergía no es compatible con escenarios de futuro como los propuestos en este artículo. Como referencia, desde el año 2000, la cantidad de tierra de países del Sur que ha sido comprado o alquilado a largo plazo a compañías transnacionales y fondos de inversión se ha estimado en más de 80 MHa (Anseeuw et al., 2012). En los escenarios aplicados se contemplan dos posibilidades a la expansión de la bioenergía. En los escenarios 3 y 4 (regionalización), el acaparamiento de tierras no se considera que aumente significativamente respecto a los niveles actuales (máximo de 100 MHa). Para los escenarios 1 y 2 se prevé una “ocupación del Sur” que llegaría a utilizar 200 MHa (un 13% de la tierra arable del mundo). En Apéndice F y en (Capellán-Pérez et al., 2014) se pueden ver más detalles sobre estos aspectos.

**Energías renovables y eficiencia en el sector Industrial y Edificios.** En los escenarios se prevén diferentes niveles de penetración de estas tecnologías, basados en los potenciales asignados en estudios como los de la Comisión Europea (European Comission, 2007) y que son mayores en los escenarios 2 y 4, más involucrados en la protección ambiental. Los valores aplicados se pueden ver en la Tabla 4.

**Políticas de Cambio Climático.** Los escenarios BAU y 3 excluyen la adopción de políticas de reducción de gases de efecto invernadero (e.g. precio al carbono). La descripción cualitativa del escenario 1

sugiere que se podrían tomar medidas contra el cambio climático, pero probablemente demasiado tarde. Por ello, políticas activas para mitigar el cambio climático sólo encajarían en los escenarios 2 y 4. Sin embargo, muchas de estas medidas ya están incluidas en otros aspectos de estos escenarios. Adicionalmente se añade un programa de reforestación similar al propuesto en by (Nilsson and Schopfhauser, 1995) con un horizonte de 2020. Estos autores analizan los cambios en el ciclo del carbón que se conseguirían con un programa de reforestación de 350MHa, con un máximo de captura de carbón de 1,5GtC/año 50 años después del comienzo del programa. No se consideran otras tecnologías como la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, debido a las incertidumbres que todavía existen sobre su desarrollo y beneficios (Fischedick et al., 2008; Scott et al., 2013).

La Tabla 4 contiene un resumen detallado de todas estas políticas para cada uno de los escenarios.

	SCENARIO - INPUT	0 – BAU	Scenario 1 Economic optimism with some market reforming	Scenario 2 Global Sustainable Development	Scenario 3 Regional competition	Scenario 4 Regional sustainable development
Socioeconomic (% 2010-2050)	GDPcap	Hist + 1.9% (1960-12)	+ 3%	+ 2.4%	+ 1.1%	+ 1.9%
	Population	UN Medium-Variant +0.75%	+0.5%	+0.65%	+0.81%	+ 0.8%
Sectoral efficiency improvements	$a_{Transp}$	Past trends (-0.67%)	Rapid (-0.9 %)	Rapid (-0.9 %)	Deglobalization (-1.5%)	Deglobalization (-1.5%)
	$a_{elec}$		Past trends (0%)			
	$a_{BI}$	Past trends (-0.5%)	Past trends (-0.5%)	Past trends (-0.5%)	Past trends (-0.5%)	Past trends (-0.5%)
	$I_{min}^a$	25 %	25 %	15 %	25 %	15 %
Resource availability	Non-renewables	Best Guess	Best guess (coal, conv. oil) High case (gas, unconv. oil)	Best Guess	Best Guess	Best Guess
	CTL, GTL	Crash program (+15 %)	Crash program (+20 %)	Crash program (+20 %)	Crash program (+15 %)	Crash program (+15 %)
Electric renewables	Solar FV&CSP	Medium (+15%)	Past trends (+19%)	Very rapid (+25%)	Medium (+15 %)	Very rapid (+25%)
	Wind	Medium (+20%)	Past trends (+26%)	Very rapid (+30%)	Medium (+15%)	Very rapid (+30%)
	Hydroelectric, Geothermal, Bioenergy&Waste	Past trends (slow)	Past trends (slow)	Very rapid (x3 past trends)	Past trends (slow)	Very rapid (x3 past trends)
	Oceanic	Rapid (+20% from 2020)	Rapid (+20% from 2020)	Very rapid (+30% from 2020)	Rapid (+20% from 2020)	Very rapid (+30% from 2020)

Nuclear		Constant	+ 3 % from 2015	+ 1.5% from 2015	Constant	Progressive shutdown
BioEnergy	2nd generation	Slow (+8%, 100 MHa available)	Rapid (+ 20%, 200 MHa available)	Rapid (+ 20%, 200 MHa available)	Slow (+8%, 100 MHa available)	Medium (+15%, 100 MHa)
	3rd generation	Slow (+8% from 2025)	Rapid (+ 20% from 2025)	Rapid (+ 20% from 2025)	Slow (+8% from 2035)	Medium (+15% from 2035)
	Residues	Slow (+8% from 2025)	Rapid (+20% from 2025)	Rapid (+20% from 2025)	Slow (+8% from 2035)	Medium (+15% from 2035)
Thermal renewables & efficiencies	Industrial sector (market share 2050)	Low (12.1%)	Medium (23.1%)	Rapid (37.6%)	Low (12.1%)	Rapid (37.6%)
	Buildings sector (market share 2050)	Low (4.7 %)	Medium (22.6%)	Rapid (48%)	Low (4.5%)	Rapid (48%)
Alternative transport <sup>b</sup>	HEV & Hybrid (market share 2050)	Medium (9%)	Rapid (18%)	Very rapid (36%)	Medium (9%)	Very rapid (50%)
	NGVs	Past trends (+20 % annual)				
Afforestation program		-	-	350 MHa	-	350 MHa

Tabla 4: Hipótesis y políticas de cada escenario. Los porcentajes se refieren a crecimiento anuales, excepto cuando se especifique de otra manera.

<sup>a</sup>El valor mínimo de la intensidad ( $I_{min}$ ) se fija al 25% de la intensidad actual para los escenarios BAU, 1 y 3, y a un 15% para escenarios 2 y 4 de acuerdo con (Baksi and Green, 2007).

<sup>b</sup> Las políticas de “Transporte Alternativo” se mantienen mientras no se alcanzan los “puntos de escasez” en los carburantes materia prima (ej. electricidad para los HEV&EV y gas para NGVs).

## 7. Resultados y discusión

En esta sección se describen los resultados obtenidos con el modelo WoLiM para el horizonte temporal de 2050 bajo los escenarios descritos en la Sección 6. Debe tenerse en cuenta un aspecto importante a la hora de interpretar los resultados: puesto el modelo no contempla la realimentación energía-economía, si la demanda de energía no puede ser cubierta, aparece una divergencia entre demanda y suministro de energía que no es realista, puesto que en mundo real existiría una interacción mediante el precio que reduciría este hueco. Así, cuando las divergencias entre suministro y demanda sea elevada, interpretaremos el resultado concluyendo que el escenario no es posible.

Debe también tenerse en cuenta que algunos aspectos importantes de la realidad no se han tenido en cuenta en el modelado (ver Apéndice A) y la mayor parte de ellos tienden a empeorar los resultados obtenidos.

### 7.1 Entradas socioeconómicas y eficiencias sectoriales

Los valores de las variables socioeconómicas que son las entradas de nuestro modelo para cada uno de los escenarios se pueden ver en la Figura 9. El aumento de la población es similar en todos los escenarios debido a sus grandes inercias y las estimaciones para 2050 varían entre 8,3 y 9,5 millones de habitantes (escenarios 1 y 3-4 respectivamente). Las diferencias en el PIB son más acusadas: en 2050 el PIB estimado para el escenario 1 prácticamente dobla el del escenario 3 (que dobla el valor de 2010). En la Figura 10 se pueden ver también las estimaciones de evolución de las intensidades energéticas.

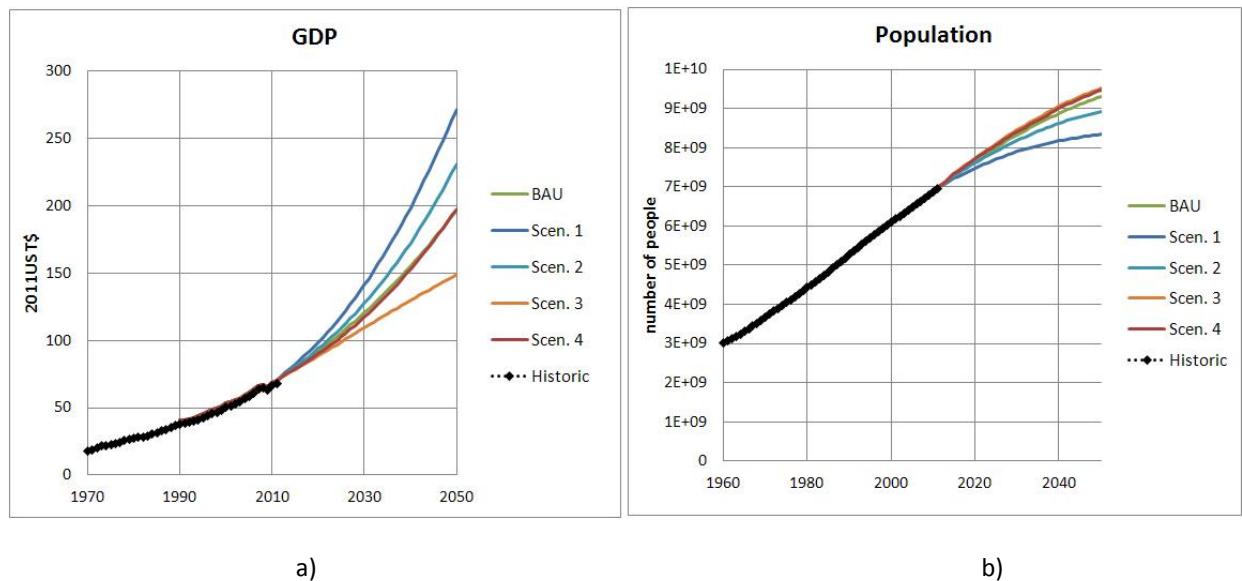
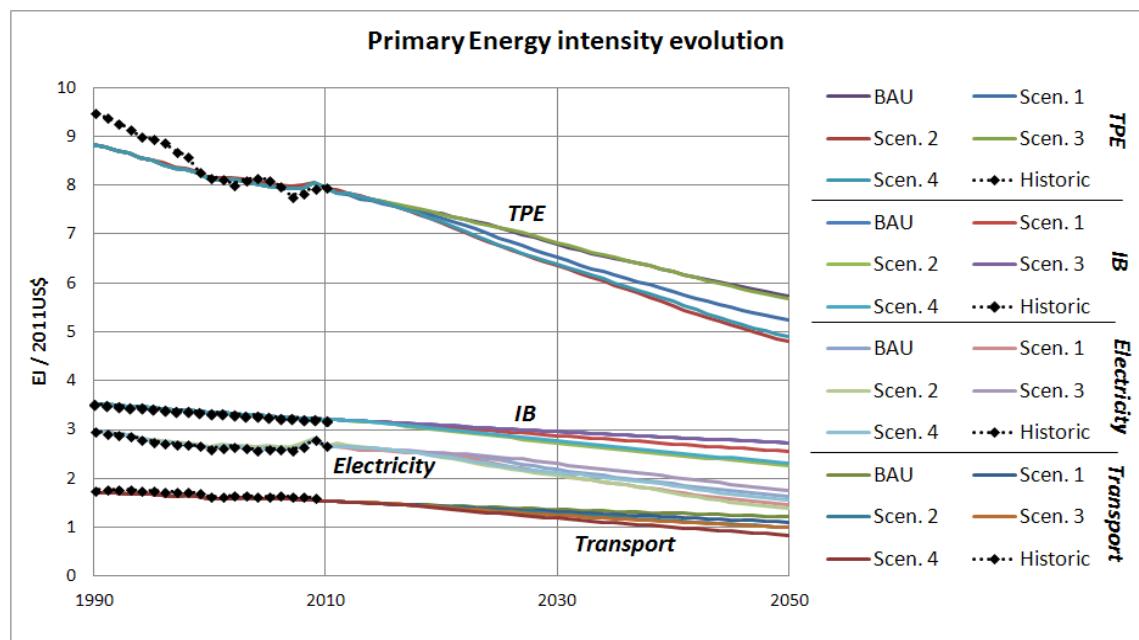


Figura 9: Entradas socioeconómicas para cada escenario: (a) PIB (en dólares US constantes 2011) (b) Población. Datos históricos de (World Bank database, 2014). Puesto que en esta versión del modelo no se aplica realimentación los impactos de la escasez de energía y el cambio climático no alteran la evolución de estas variables.



**Figura 10:** Evolución estimada de la intensidad energética total y por sectores en EJ / \$ (2011 US\$). PE: energía primaria, TPE: energía primaria total, IB: sector industrial y edificios. Datos históricos de (IEA ETP, 2010; World Bank database, 2014), ajuste de las curvas a los datos pasados explicada en Sección 4.

En la Tabla 5 se comparan las reducciones anuales medias de la intensidad energética total obtenida en este estudio con los obtenidos por el IPCC (IPCC SRES, 2000). Nuestras estimaciones están en el rango del 0.8% - 1.25% y son similares a los propuestos por (Baksi and Green, 2007; Lightfoot and Green, 2002; Pielke et al., 2008), que encuentran que eficiencias mayores (como las propuestas en los escenarios A1 y B1 en IPCC SRES, 2000)) son poco realistas dados los límites biofísicos de la sustitución tecnológica.

Total Energy Intensity evolution	BAU	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
This study	-0.82 %	-1.04%	-1.24%	-0.84%	-1.21%
(IPCC SRES, 2000)	-	-1.5% (A1)	> -2% (B1)	-0.65% (A2)	-1% (B2)

**Tabla 5:** Evolución de la intensidad energética total (valores medios de la reducción anual estimada para el periodo 2010-2050) y comparación con la propuesta en (IPCC SRES, 2000).

## 7.2 Resultados por sector y combustible

**Sector Electricidad** La comparación entre la demanda y la generación de electricidad procedente de diversas fuentes y para cada uno de los escenarios se puede ver en la Figura 11. En los escenarios que cuentan con un rápido desarrollo de las tecnologías renovables (2 y 4), el suministro de electricidad es grosso modo capaz de cubrir la demanda; pero en escenarios con un crecimiento más modesto de las

renovables (BAU y 1), el suministro de electricidad no es capaz de cubrir la demanda creciente más allá de 2030. En el escenario 3, que contempla un crecimiento muy modesto de la demanda, también hay un crecimiento muy modesto de las energías renovables y por ello incluso ese modesto aumento de la demanda queda sin cubrir y aparecen problemas de suministro en torno a 2030.

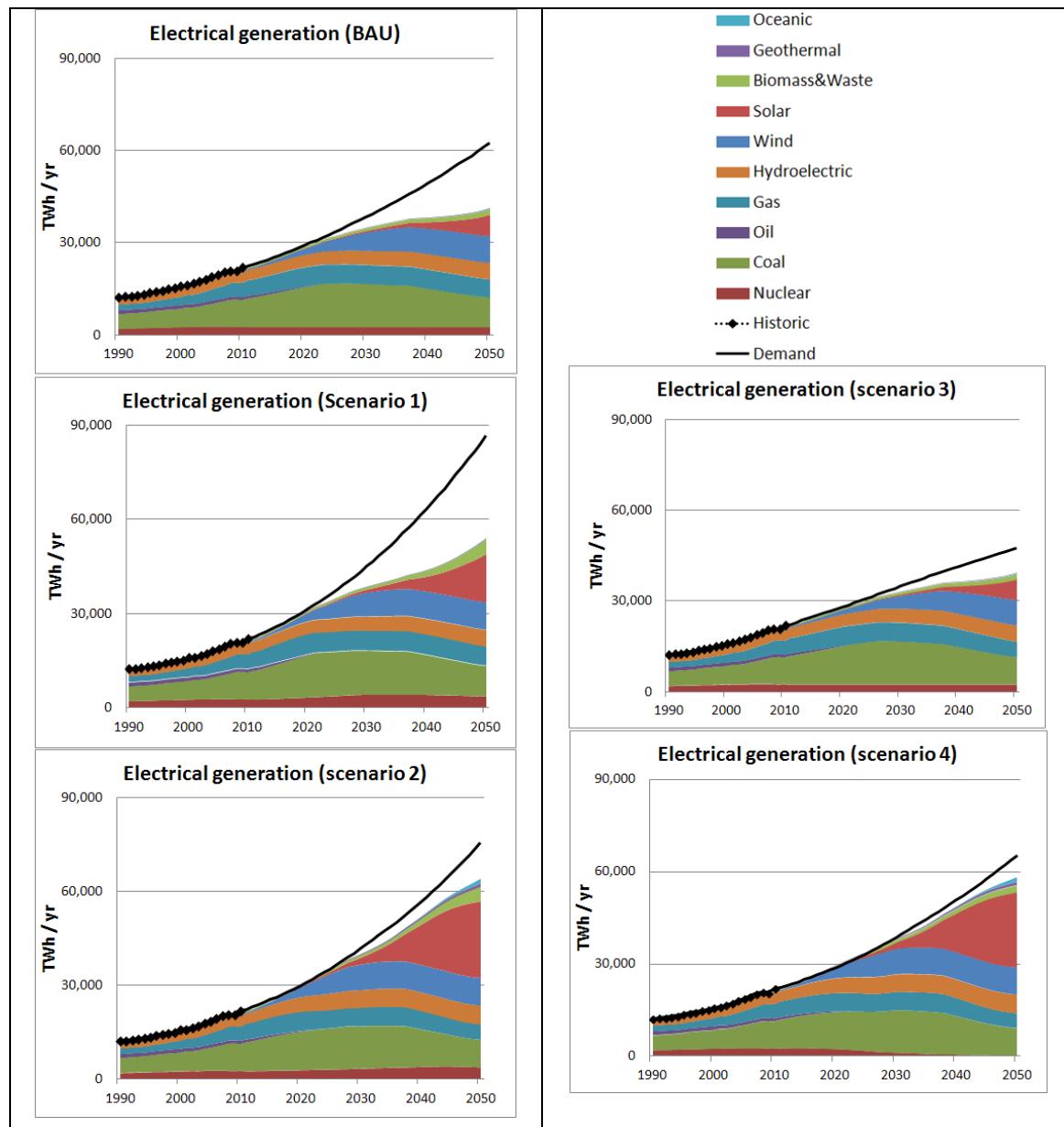
El potencial máximo que hemos asignado a la expansión de la energía eólica se alcanza en torno a 2030 y el crecimiento de la energía solar se ralentiza significativamente en torno a 2050 por la proximidad a su potencial máximo. La electricidad de origen nuclear resulta irrelevante.

Sin embargo la masiva expansión de la electricidad de origen renovable tiene importantes implicaciones. En la Figura 12 se puede ver la proporción de energía eléctrica procedente de fuentes variables (solar y eólica) en función de la producción total eléctrica. En los escenarios 2 y 4 esta proporción excede el 50% de la generación total en 2050, lo que implicaría un reto importante en términos de integración de la producción en las redes de distribución (que probablemente requeriría un sobredimensionado de las infraestructuras como apunta (Trainer, 2012).

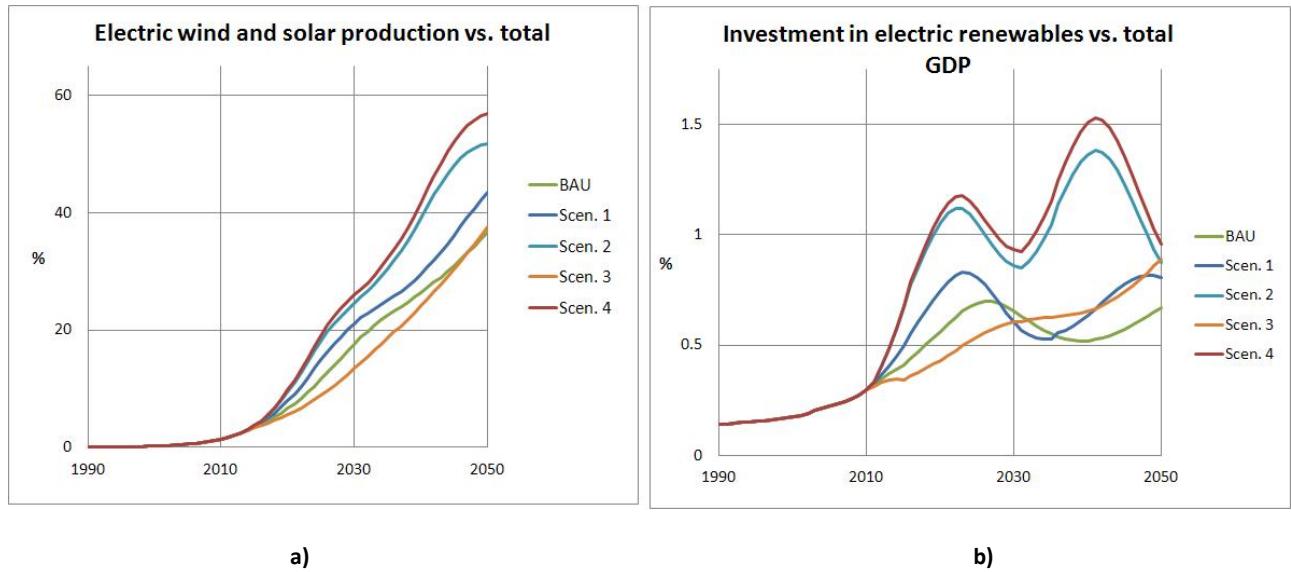
En términos monetarios (Figura 12-b), la inversión en infraestructuras de electricidad renovables se mantendría por debajo del 1,5% del PIB total en todos los escenarios, lo cual es del mismo orden de magnitud que lo estimado en estudios similares (*ej. Bloomberg New Energy Finance*,<sup>17</sup> Teske et al., 2011).

---

<sup>17</sup> <<http://about.bnef.com/press-releases/strong-growth-for-renewables-expected-through-to-2030/>>

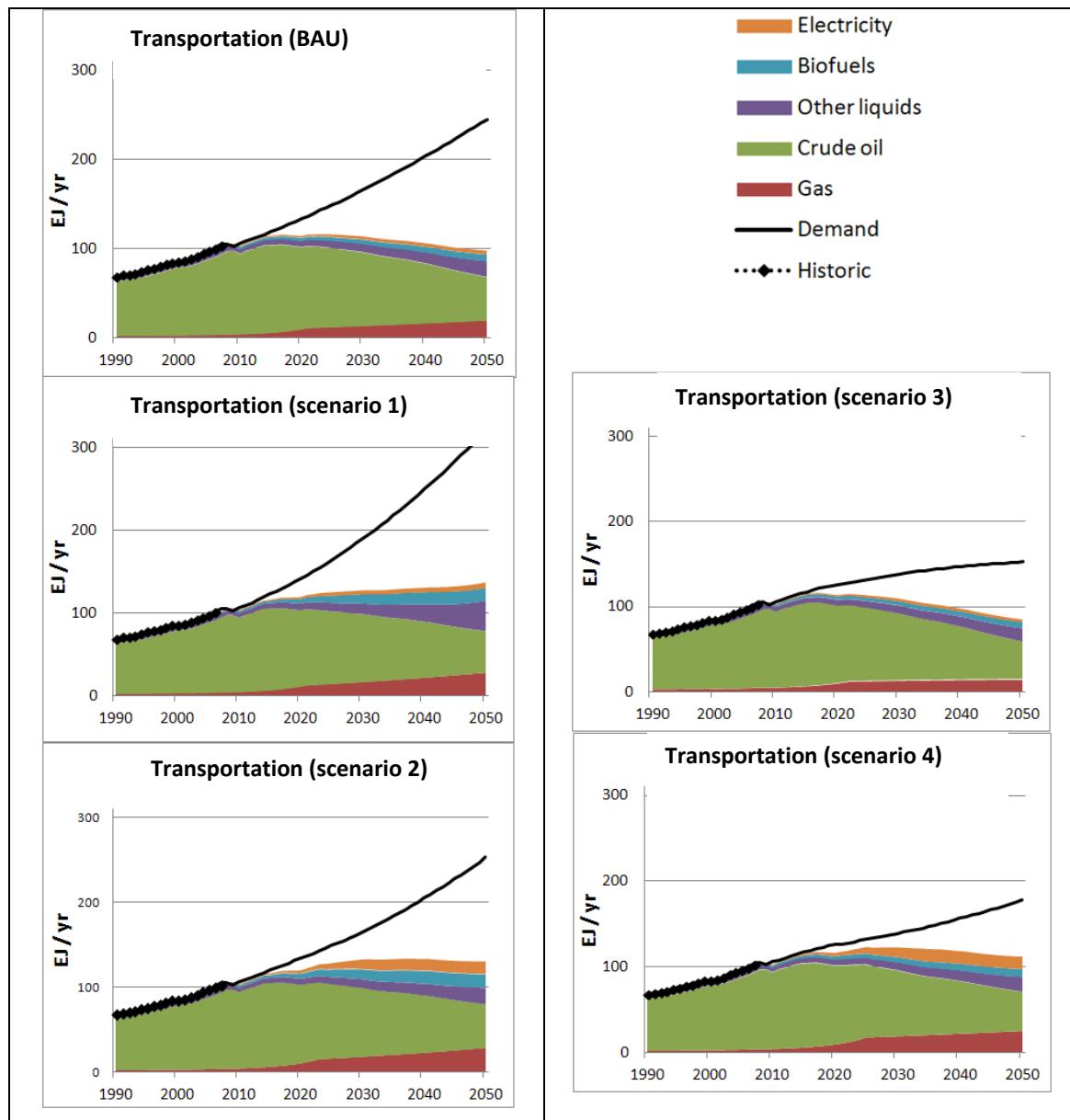


**Figura 11:** Generación eléctrica de diversas fuentes y demanda (TWh/yr) para cada uno de los escenarios. El consumo histórico ha sido tomado de (US EIA db, 2014) teniendo en cuenta las pérdidas por transporte de la energía (9% de media).



**Figura 12:** (a) Proporción de electricidad variable (solar y eólica) en función de la generación eléctrica total. (b) proporción de inversión en electricidad renovable en relación al PIB total.

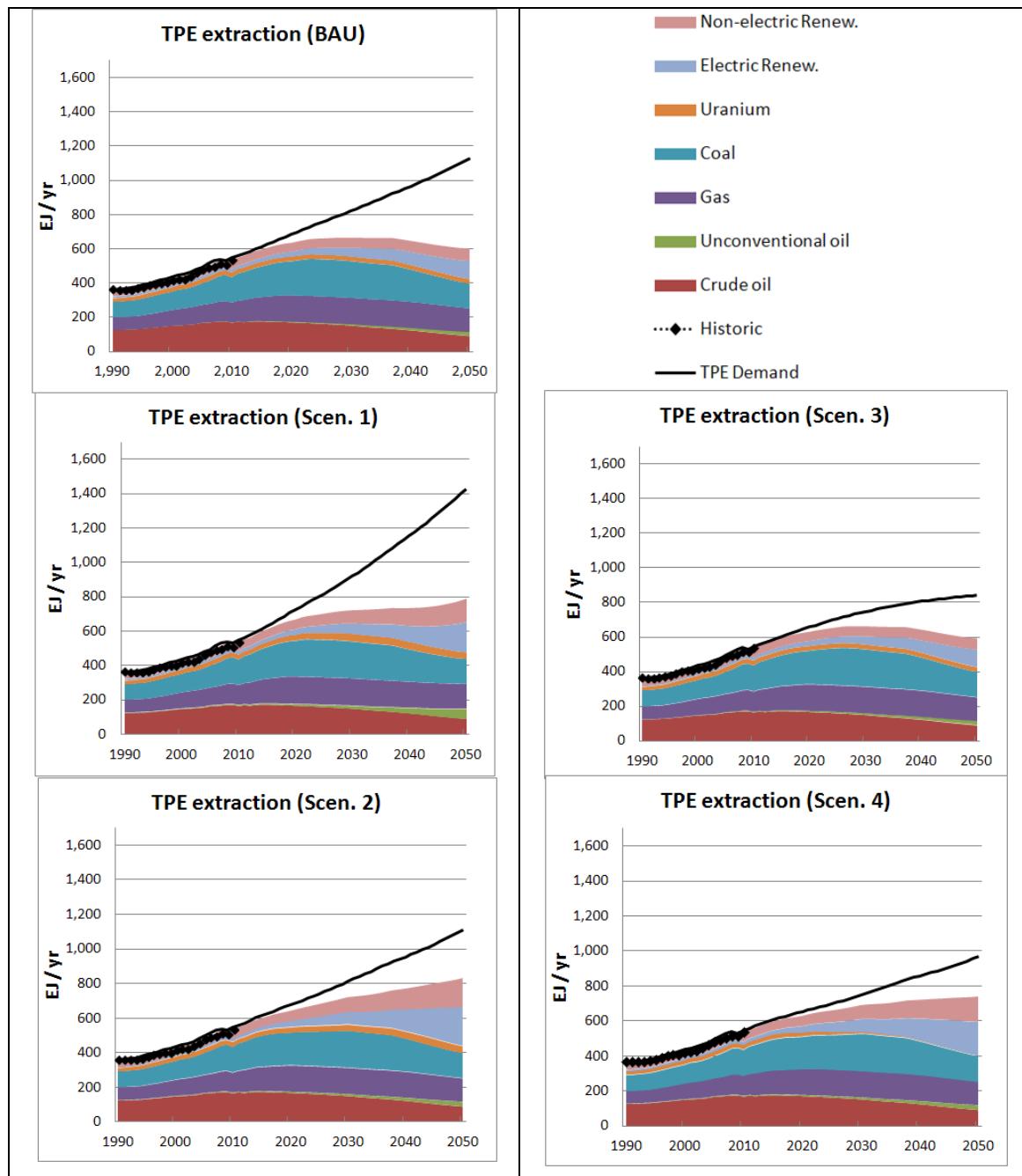
**Transporte.** La comparación entre la demanda y el suministro de energía para transporte puede verse en la Figura 13. A pesar de la diversidad de políticas aplicadas en los diferentes escenarios para sustituir los combustibles derivados del petróleo, el pico del petróleo convencional a comienzos de siglo determina una estabilización o declive de la energía disponible para el transporte. Todas las medidas introducidas en el modelo: biocombustibles, transporte eléctrico, vehículos híbridos, CTL&GTL (que no se desarrollan de forma significativa debido a la llegada de los picos del gas y carbón), las mejoras de la eficiencia e incluso un desarrollo elevado del petróleo no convencional en el escenario 1, son incapaces de alcanzar los ritmos de sustitución necesarios para compensar el declive del petróleo. Por ello, como ya se concluyó en el estudio preliminar de (Mediavilla et al., 2013), **bajo todas las posibles políticas y escenarios que se consideran plausibles aparece escasez de energía en el sector Transporte antes de 2020.**



**Figura 13:** Demanda y suministro de energía primaria para el transporte de diferentes fuentes y para cada escenario. Los datos históricos son tomados de (IEA ETP, 2010). La categoría “Otros líquidos” incluye: petróleo no convencional, CTL, GTL y ganancias en refinerías. Nota: la demanda de energía primaria de cada sector es corregida dinámicamente para tomar en cuenta que las tecnologías renovables son más eficientes en la cobertura de servicios finales que las basadas en combustibles fósiles o nucleares.

**Energía primaria total.** En la Figura 14 se puede ver la comparación entre la demanda de energía primaria total y la extracción estimada procedente de diversas fuentes. De forma general la extracción de energía primaria se mantiene por debajo de los 800 EJ/yr en 2050 (aproximadamente un 50% más que en 2010). Sin embargo, el crecimiento observado en décadas pasadas (+ 2.6%/año 1965-2012 -BP, 2013) no puede mantenerse y la energía primaria total en 2050 o bien decrece (-0.7 %/año en escenario BAU y 3), se estabiliza (crecimiento menor de 0.5%/año en escenarios 1 y 4) o crece muy ligeramente (1%/año en escenario 2).

Esto ocurre debido a que el declive en la extracción de combustibles líquidos sólo puede ser parcialmente compensado por las energías renovables, las políticas alternativas y las mejoras de la eficiencia. De hecho, entre 2020 y 2030, ya aparecen diferencias significativas entre la demanda y el suministro en todos los escenarios (ver Figura 15).



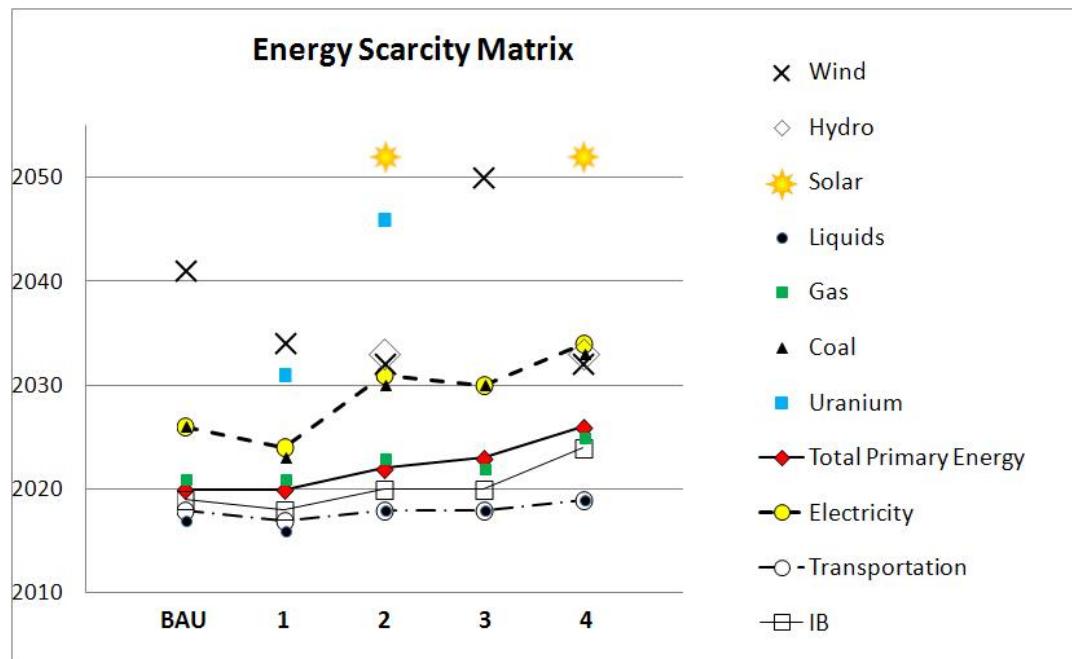
**Figura 14:** Demanda y extracción de energía primaria total por fuente y para todos los escenarios (EJ/yr). Nota: la demanda de energía primaria de cada sector es corregida dinámicamente para tomar en cuenta que las tecnologías renovables son más eficientes en la cobertura de servicios finales que las basadas en combustibles fósiles o nucleares.

### **Análisis integrado: la matriz de escasez**

Con el objeto de analizar las restricciones del suministro de energía para cada sector y recurso se ha realizado lo que llamamos “matriz de escasez energética”, que puede verse en la Figura 15. Para cada sector económico y recurso no renovable se marca el punto (si existiese) que representa el año en el cual la diferencia entre la demanda y el suministro es mayor del 5%. Elegimos un 5% como umbral en el cual asumimos que los mecanismos de adaptación oferta-demanda vía precios forzarían un importante cambio estructural que modificaría las hipótesis subyacentes en las que se basan el modelo y los escenarios. Para los recursos renovables, los puntos representan el año en que se alcanza el 95% del potencial máximo estimado.

En vista del análisis de los resultados de la matriz de escasez, se puede observar una secuencia similar de hechos en todos los escenarios:

- 1- La escasez de líquidos en torno a 2015-20 precipita la escasez de energía para el sector transporte inmediatamente después, y para el sector IB unos años más tarde.
- 2- Los puntos de escasez de energía primaria y gas coinciden en torno a 2020-25.
- 3- Para 2035 el suministro de carbón no es capaz de cubrir la demanda para ningún escenario. Las restricciones en el suministro de carbón aparecen antes de lo que normalmente suele esperarse.
- 4- La generación de electricidad no es capaz de cubrir la demanda en torno a 2025-35 en todos los escenarios (a pesar de la fuerte promoción de las energías renovables en algunos de ellos).
- 5- Las reservas de uranio son capaces de suministrar el mineral necesario para mantener la producción actual hasta 2050, sin embargo, cuando se consideran incrementos en la capacidad de generación nuclear –incluso incrementos modestos- empiezan a aparecer restricciones en la extracción de uranio (escenario 1 sobre 2030).
- 6- Una fuerte expansión de las energías renovables para generación de electricidad nos llevaría antes de 2050 a sobrepasar (ej. Eólica, hidroeléctrica) o valores cercanos de los potenciales máximos que hemos considerado (ej. Solar).

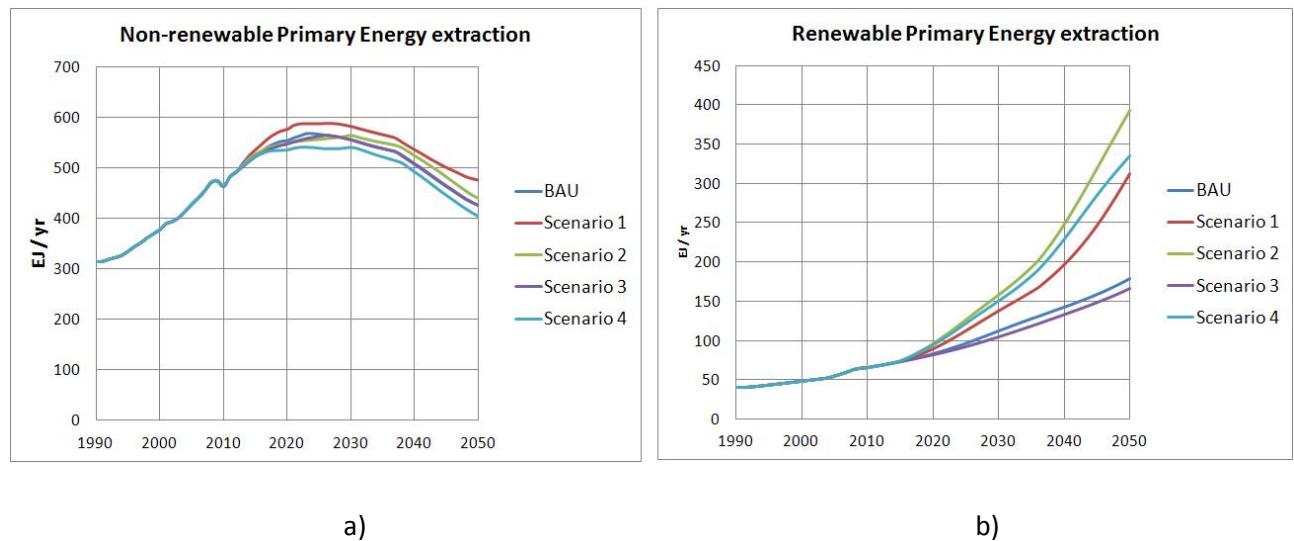


**Figura 15.** Matriz de escasez energética de los escenarios propuestos. Para cada sector económico y recurso no renovable el punto que representa el año en el cual la diferencia relativa entre la demanda y el suministro es mayor del 5%. Para los recursos renovables, los puntos representan el año en que se alcanza el 95% del potencial máximo estimado Puede suceder que para un recurso en particular no se alcance el punto de escasez en algunos escenarios (ej. solar en escenarios BAU, 1 y 3)

Fuel / Sector	Supply-demand divergence (5%)
Liquids	2015-2018
Gas	2022-2032
Coal	2024-2034
Uranium	2031-...
TPE	2020-2027
Electricity	2025-2036
Transportation	2015-2018
IB	2017-2025
Potential reached (95%)	
Wind	2032-2050
Solar	2052-...
Hydroelectric	2033-...

**Tabla 6.** Divergencia entre suministro y demanda (5%) o potencial alcanzado al 95% para todos los escenarios y sectores. Datos extraídos de la matriz de escasez energética de la Figura 15.

Finalmente, en la Figura 16-a se representa la evolución de la extracción de combustibles fósiles para todos los escenarios. A pesar de la diversidad de políticas y suposiciones aplicadas aparece en todos los escenarios una trayectoria muy similar de declive en la extracción de combustibles fósiles, que alcanza una meseta entre 2020 y 2035 en torno a un valor de 500-525 EJ (un 17% más que el consumo de 2010). Esta meseta es seguida por un declive rápido de un 1-1,5% anual.



**Figure 16:** (a) Combustibles fósiles extraídos para cada escenario (b) Energías renovables extraídas para cada escenario.

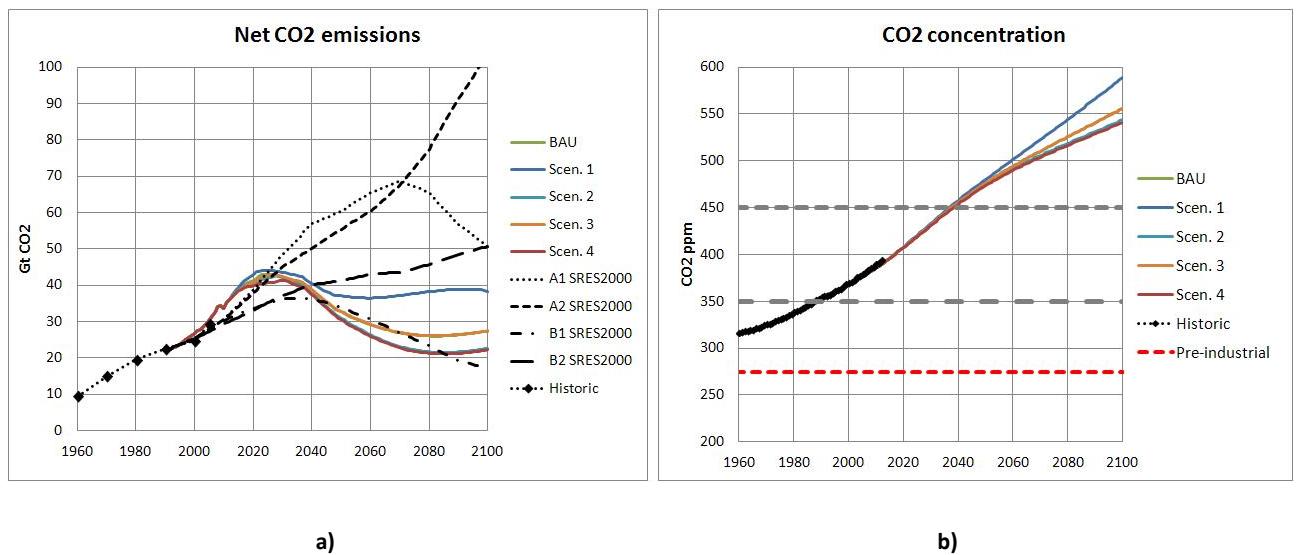
### 7.3 Calentamiento Global

Los resultados de las emisiones de CO<sub>2</sub> se pueden ver en la Figura 17-a. Todos ellos muestran un pico de emisiones en torno a 2020-30 en un valor de unas 40-45 GtCO<sub>2</sub>/año, que es un 35-50% más alto que las emisiones de 2005. Los escenarios BAU, 2 y 4 prevén un declive con un perfil muy similar al del escenario B1 del IPCC (IPCC SRES, 2000). El escenario 1, sin embargo, (caracterizado por un fuerte crecimiento económico y escasas medidas de protección ambiental) mantiene niveles de emisiones mayores, similares a los del escenario A2 SRES del IPCC, debido a la mayor extracción de recursos no convencionales.

De igual manera, todos los escenarios proyectan valores similares de concentración de CO<sub>2</sub> para mediados de siglo (Figura 17-b), que alcanzan las 475ppm en 2050. En 2100 todos los escenarios alcanzan las 550ppm y el escenario 1 casi 600ppm. La evidencia paleoclimática sugiere que el CO<sub>2</sub> atmosférico debería reducirse hasta casi 350ppm si la humanidad desea mantener el Planeta en un estado similar a aquel en el cual las civilizaciones se ha desarrollado y para el cual está adaptada la vida en la Tierra (Hansen et al., 2011, 2008; Rockström et al., 2009).<sup>18</sup> De hecho, si las concentraciones se mantienen altas durante

<sup>18</sup> Los discursos institucionales consideran que el umbral crítico para la estabilización del cambio climático "a un nivel

un cierto tiempo, el cambio climático antropogénico podría acelerarse debido a la fuerte realimentación de dinámicas irreversibles (ej. pérdida del hielo polar). Por ello, **en todos nuestros escenarios, a pesar de que las emisiones de CO<sub>2</sub> caen como consecuencia del declive de los combustibles fósiles, las concentraciones se mantienen en niveles peligrosamente alarmantes**. Por añadidura, nuestros resultados se pueden considerar optimistas, ya que se ha sumido que la absorción de los sumideros naturales se mantiene constante, aunque es más probable que decrezca debido al calentamiento del planeta (Canadell et al., 2007; Le Page et al., 2013).



**Figura 17:** (a) Evolución de las emisiones netas de CO<sub>2</sub> (Gt CO<sub>2</sub>) para cada escenario comparadas con los escenarios SRES A1, A2, B1 y B2. (b) Evolución de la concentración neta de CO<sub>2</sub> (ppm) para cada escenario a lo largo del siglo XXI comparada con las observaciones históricas en Mauna Loa y el valor pre-industrial. Las líneas horizontales representan la concentración de CO<sub>2</sub> pre-industrial (en rojo) y dos umbrales diferentes habituales en la literatura 350ppm y 450ppm.

Otras equipos investigadores que han estudiado las relaciones entre el agotamiento de los combustibles fósiles y el cambio climático (Höök and Tang, 2013; Brecha, 2008; Nel and Cooper, 2009; Ward et al., 2012) han encontrado que las emisiones tienden a parecerse a los escenarios de emisiones medios y bajos del IPCC (IPCC, 2007a, 2001; IPCC SRES, 2000), lo cual corresponde a un cambio climático moderado (Höök and Tang, 2013). Nuestros resultados coinciden con los suyos, sin embargo, incluso estos relativamente "bajos" perfiles de emisiones implican que el cambio climático podría alcanzar dimensiones muy peligrosas.

---

que evitase interferencias antropogénicas peligrosas con el sistema climático" es 450ppm (UNFCCC (Cancún Agreements), UE, IEA (450 ppm Scenario)). Sin embargo, incluso este nivel alto, se vería excedido en 2050 para todos nuestros escenarios.

## 7.4 Resumen y discusión sobre los resultados

Los resultados obtenidos con el modelo WoLiM muestran que el sistema socio-económico mundial no va a ser capaz de seguir ninguno de los escenarios que hemos propuesto (que imitan visiones de futuro habituales en las agencias internacionales). De forma más específica:

- **La electricidad** parece ser el sector menos preocupante, especialmente en aquellos escenarios donde las tecnologías renovables son fuertemente incentivadas. En estos casos, la saturación de estas tecnologías es apreciable en torno a 2050.
- **Para el sector del transporte** todos los escenarios son imposibles antes de 2020. Ni los biocombustibles, ni el transporte eléctrico e híbrido, ni los CTL&GTL, ni las mejoras en la eficiencia ni el desarrollo de petróleos no convencionales pueden alcanzar los niveles de sustitución capaces de compensar el declive del petróleo (y hay que tomar en cuenta que se han usado las mayores estimaciones extracción de petróleo que se han encontrado en la literatura). En los escenarios dónde se simula una desglobalización el hueco entre demanda y suministro se reduce fuertemente por una drástica disminución de la demanda. Esta reducción del transporte es una de las políticas clave del modelo. Por otra parte, dado que en la realidad las diferencias entre oferta y demanda deben anularse por fuerza, los escenarios 3 y 4 en los que hay una importante desglobalización y disminución del comercio internacional, muestran ser los menos irreales de todos los presentados.
- **El suministro total de energía primaria** puede mantenerse estable o incluso crecer en algunos escenarios hasta 2050, pero el crecimiento de décadas pasadas (+ 2.6%/año 1965-2012) no puede mantenerse, porque el declive de la extracción de combustibles fósiles sólo puede ser parcialmente compensado por las tecnologías alternativas y las mejoras de la eficiencia.
- **Todos los escenarios muestran un céntesis de las emisiones de CO<sub>2</sub>** en torno a 2020-2030 a un nivel de 40-45 GtCO<sub>2</sub>. Estos perfiles de emisiones son menores que los escenarios alto-medios del IPCC, sin embargo aún tienen la capacidad de llevarnos a un cambio climático de dimensiones muy peligrosas.

Nuestros resultados no pretenden describir un plan de evolución de la humanidad a medio plazo, puesto que, una vez que el primer desequilibrio sea alcanzado en un sector determinado, el sistema socio-económico tenderá a evolucionar por caminos que se alejan de las tendencias observadas y que no podemos predecir. Sin embargo, nuestro análisis permite extraer conclusiones importantes: los resultados muestran que, a partir de esta misma década, el sistema socio-económico mundial comenzará a verse forzado a independizarse de recursos energéticos baratos y abundantes que han estado a disposición en el

pasado. De hecho, los datos de los últimos años sugieren que las tendencias de décadas pasadas están cambiando (el consumo de los países de la OCDE está cayendo, el consumo de petróleo del sur de Europa se desploma mientras los países sufren severas crisis económicas, etc.). *Recalcamos de nuevo que la exclusión de algunos aspectos que no se han podido tener en cuenta en el modelo sólo puede empeorar los resultados obtenidos en este estudio* (ver Apéndice A).

Los resultados sugieren que el actual paradigma socio-económico puede no ser sostenible y la tendencia a buscar el crecimiento económico continuado puede ser más un problema que una solución. Sin embargo el PIB no fue diseñado para ser una medida del bienestar social (van den Bergh, 2009) y la investigación sobre indicadores de bienestar muestra que, por encima de un cierto nivel, no existe una relación clara entre mayores niveles de PIB per capita y el nivel de bienestar (Kubiszewski et al., 2013). Por ello puede pensarse en diferentes paradigmas y en escenarios socio-económicos que busquen caminos alternativos de desarrollo con altos niveles de bienestar a pesar del inevitable descenso del consumo energético, como los propuestos por la economía del estado estacionario (Daly, 1996; Kerschner, 2010), el decrecimiento (Kallis et al., 2012) o la nueva economía de la prosperidad sin crecimiento (Jackson, 2009).

Añadimos dos consideraciones más en relación con las hipótesis del modelado:

- De los combustibles fósiles, el **carbón** es el más abundante y también el menos estudiado desde el punto de vista de su agotamiento, *por ello todas las conclusiones relacionadas con el mismo están sujetas a un nivel de incertidumbre mayor que las relacionadas con el resto de los recursos*. Hacemos un llamamiento a la comunidad investigadora para que estudie este tema de forma que esta incertidumbre se pueda reducir.
- Todos los escenarios GEA analizados consideran crecimientos del PIB, sin embargo nuestros resultados sugieren que el objetivo de un continuado crecimiento exponencial del PIB (en un sistema que se muestra incapaz de desacoplar crecimiento económico y aumento del consumo de energía) debe ser reemplazado por otros objetivos de bienestar económico.
- La mayor parte de los modelos energía-economía-medio ambiente descritos en la literatura tienden a usar estimaciones de recursos energéticos muy elevadas, que están sujetas a una gran incertidumbre y con tendencia a la sobreestimación. Pensamos que sería muy deseable que instituciones como el IPCC o IEA pusieran mayor atención a las estimaciones de agotamiento de recursos fósiles en sus estudios

## 8. Conclusiones

En este artículo se introduce un modelo de dinámica de sistemas, WoLiM, que ha sido diseñado para intentar corregir una deficiencia encontrada en los modelos energía-economía-medio ambiente: el hecho de que pocos de ellos integran las estimaciones de agotamiento de los combustibles fósiles. El modelo es aplicado a una serie de escenarios que reproducen los escenarios contemplados habitualmente por las agencias institucionales (Global Environmental Assessment studies (van Vuuren et al., 2012), IPCC's Assessment reports (IPCC, 2007a, 2001; IPCC SRES, 2000), UNEP's Global Environmental Outlook (UNEP, 2012, 2007, 2004) o (MEA, 2005)).

*Los resultados muestran que existe un importante riesgo sistémico de escasez energética global: una transición tecnológica y dirigida por la demanda como las experimentadas en siglos pasados no parece posible.* Estas restricciones críticas de energía tienen capacidad para provocar cambios inesperados, haciendo que las 5 familias de escenarios de los estudios GEA sean imposibles en el horizonte de 2050.

El transporte es el sector más crítico, debido al estancamiento de la producción de combustibles líquidos y la ineffectividad de las políticas de compensación antes de 2020. El sector eléctrico parece menos preocupante, especialmente en aquellos escenarios donde la generación eléctrica renovable es incentivada fuertemente. Sin embargo, los niveles de CO<sub>2</sub> todavía tienen capacidad para conducir a un cambio climático de dimensiones peligrosas a mitad de siglo.

Para poder encontrar escenarios compatibles con las restricciones energéticas y con límites sensatos al desarrollo tecnológico nos vemos obligados a aplicar hipótesis que raramente son contempladas por las instituciones internacionales o los gobiernos nacionales, como crecimientos económicos cero o negativos. Los datos parecen indicar que un importante cambio en los paradigmas socio-económicos no es sólo necesario, sino inevitable.

A pesar de que nuestro estudio tiene un alcance mucho más limitado, nuestras conclusiones son similares a las de los estudios sobre Los Límites del Crecimiento (reforzadas por la actualización después de 40 años y la comparación con los datos históricos (Turner, 2012, 2008)) y que observaban que las actuales políticas conducían a un sobrepaso y colapso global a mediados del siglo XXI por la incapacidad del sistema socio económico de adaptarse a los límites de los recursos naturales.<sup>19</sup>

---

<sup>19</sup> "las políticas actuales provocarán un comportamiento de sobrepaso y colapso debido a la ineffectividad de los esfuerzos para anticipar y corregir los límites ecológicos" (Trad. propia) en la primera mitad del siglo XXI, reclamando "profunda y proactiva innovación social a través del cambio tecnológico e institucional" (Meadows et al., 2004, 1993, 1972).

## Appendix A. Basic structure of the model

Figures A1 and A2 show an overview of the Forrester diagram of WoLiM, where the main relationships and subsystems can be seen. Demands are shown in green, non renewable resources in light blue, renewable electricity in dark blue, policies in red and emissions in orange<sup>20</sup>.

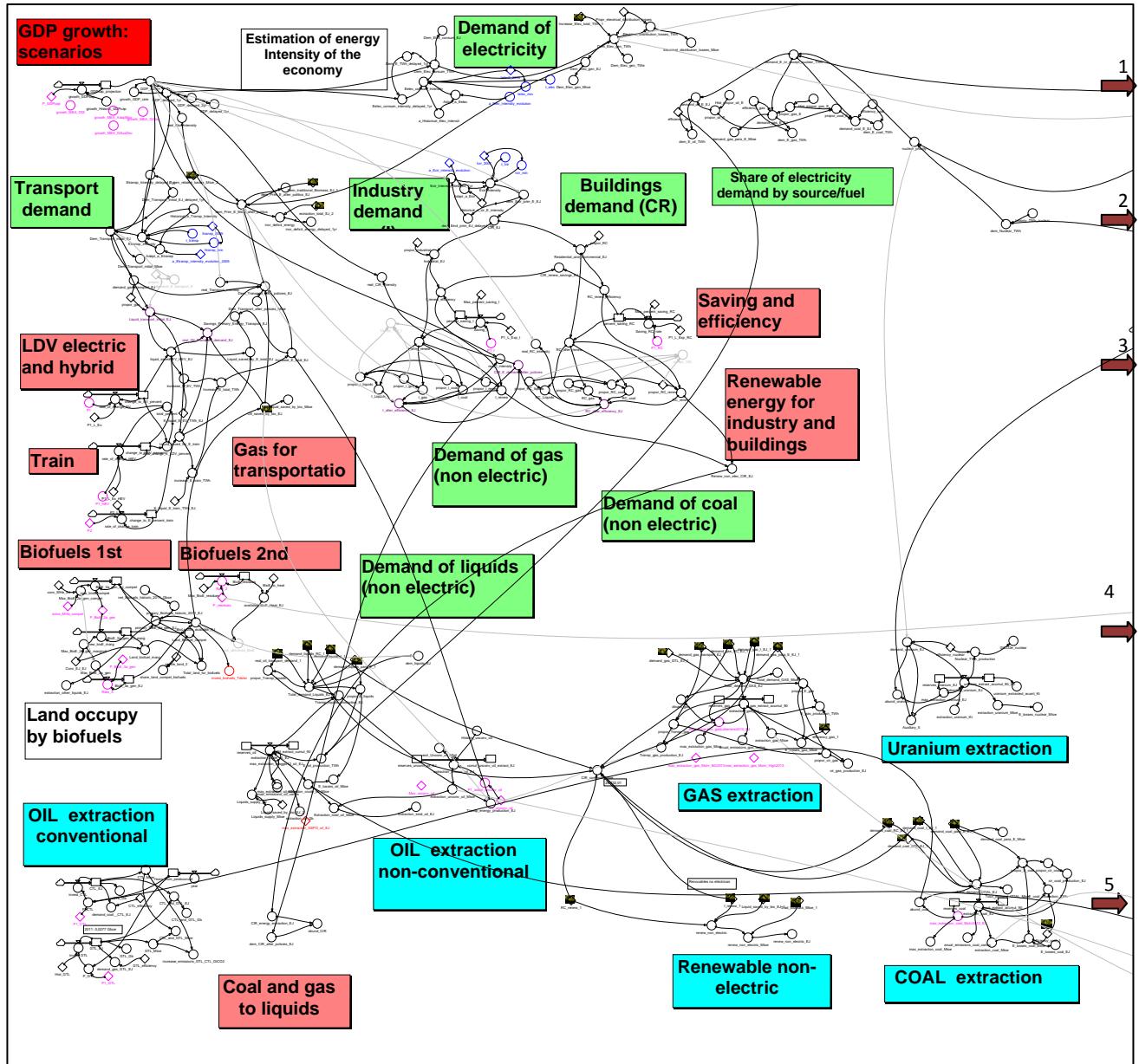
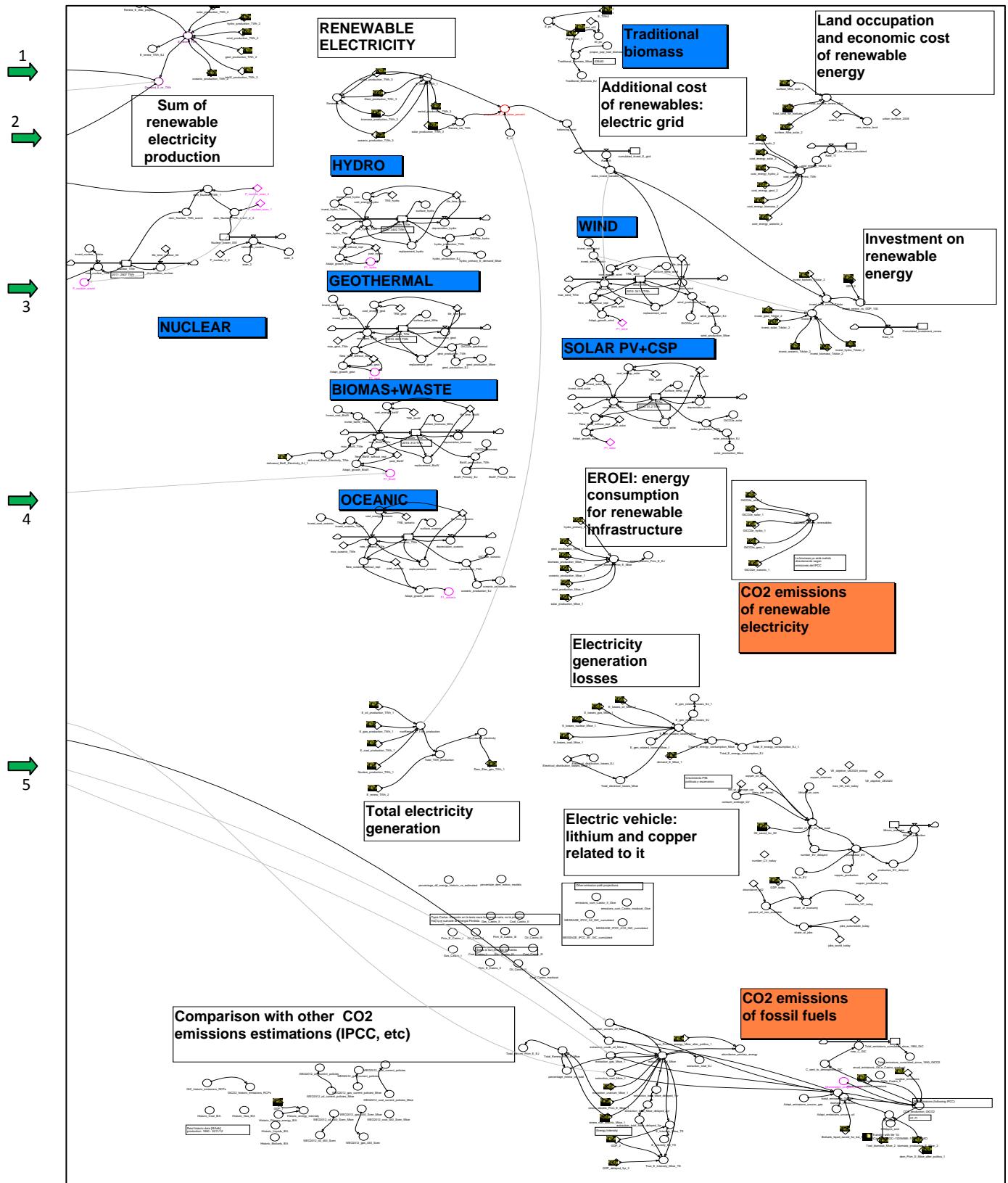


Figure A1: Forrester diagram of WoLiM model (left side). Stocks are represented as squares, flows by the arrows related to stocks, variables are represented by circles and constants by rhombus. Most of the relationships between variables are represented by lines but some are hidden for simplicity

<sup>20</sup> For a complete description of the model, please see (Capellán-Pérez et al., 2014). [http://www.eis.uva.es/energiasostenible/?page\\_id=2056](http://www.eis.uva.es/energiasostenible/?page_id=2056)



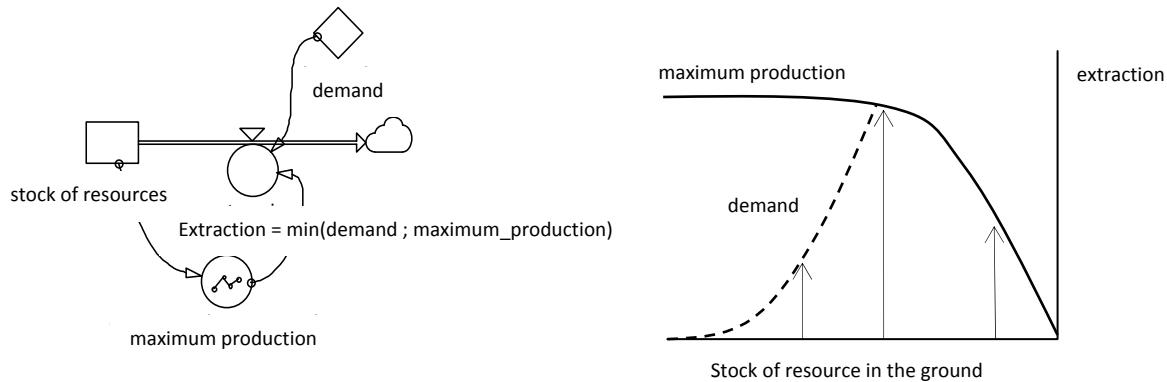
**Figure A2:** Forrester diagram of WoLiM model (right side). Stocks are represented as squares, flows by the arrows related to stocks, variables are represented by circles and constant by rhombus. Most of the relationships between variables are represented by lines but some are hidden in order to simplify the graph.

## Appendix B. Integration of resource curves

The maximum energy resource extraction curves, described in section 3, are curves of maximum energy extraction as a function of time. In order to use them in the model they have been transformed into maximum production curves as a function of resources.

In these curves, as long as the resources are large, extraction will not be limited physically and we make it equal to the total maximum production. When the resources diminish, physical limits start to appear and production is reduced. In this way, the model uses a stock of resources and studies how this stock is emptied depending on production, which is in turn determined by demand and maximum extraction.

Figure B1 gives a hypothetical example of the dynamic model used (left) and an example of a maximum production curve (right). The x-axis of Figure B1(right) represents the stock of non-renewable energy available. The y-axis represents the maximum production of this energy that could be obtained depending on the stock of the resource still unexploited. As can be seen, when the resources diminish, the maximum production decreases until it reaches zero (when the resource is exhausted). The Forrester diagram of Figure B1(left) shows the **stock of resources**. A variable called **maximum production** is calculated as a function of the **stock of resources** and a curve similar to the one of Figure B1(right). **Stock of resources** is emptied by the flow called **Extraction**, whose value is the minimum between **demand** and **maximum production**.

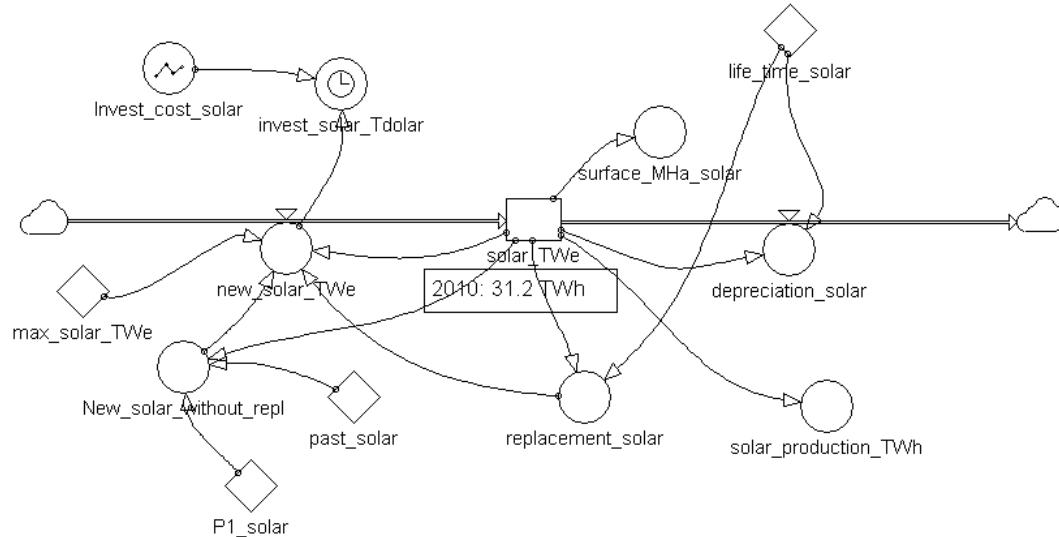


**Figure B1:** Maximum production curves as a function of resources. Left: the Forrester diagram used to model extraction. Right: a curve of maximum production (solid) compared with the demand (dashed). Both curves meet when the peak of the resource is reached.

## Appendix C: Renewable energies modeling

The growth of the renewable electricity production from all sources is modeled by a similar structure to the one presented in Figure C1 for solar. The Forrester diagram shows the stock of renewable electricity

infrastructure (**solar\_TWe**) with its two flows: the inflow of new infrastructure determined by investments (**new\_solar\_TWe**), and the outflow determined by the depreciation (**depreciation\_solar**) driven by the lifetime (**life\_time\_solar**).



**Figure C1: Structure of the renewable electric technologies (here, solar).**

Therefore, the equation that determines **Solar\_TWe** is:

$$\frac{d(solar_{TWe})}{dt} = new\_solar\_TWe - depreciation\_solar \quad \text{Equation D2}$$

**Replacement\_solar** just compensates for the depreciation rate, and **P1\_solar** represents the annual growth considered in each scenario. However, this growth is adjusted to a function that introduces diminishing returns on the new solar power (**new\_solar\_TWe**) depending on the proximity to the potential (**max\_solar\_TWe**); creating a feedback loop that reduces the exogenous growth initially set (logistic growth):

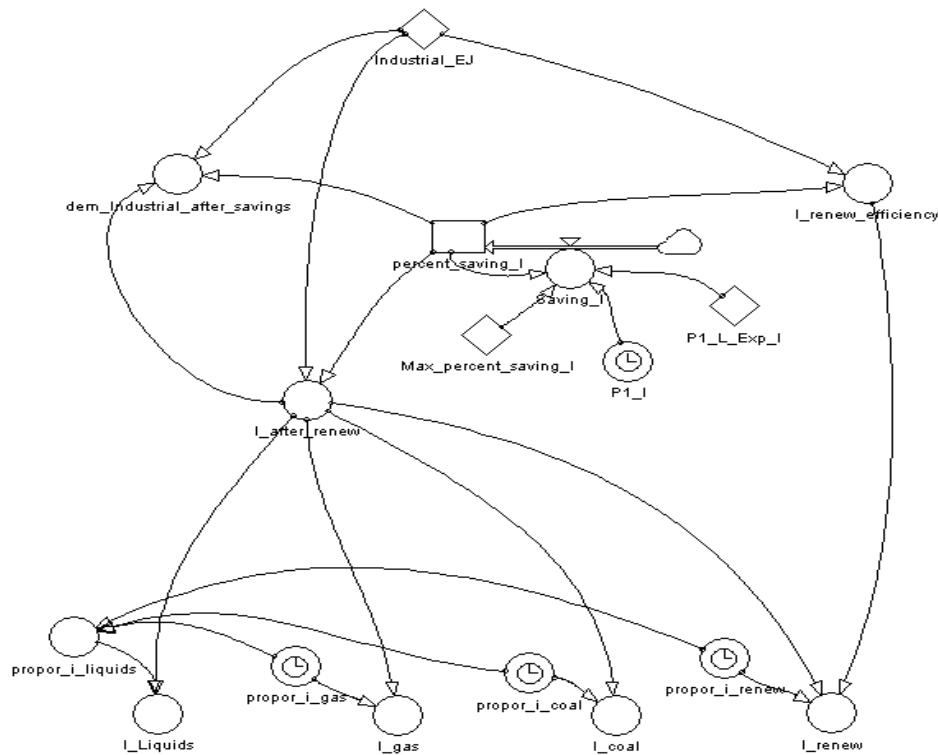
$$New\_solar(t) = replacement\_solar + P1\_solar(t) * solar\_Twe(t - 1) * (max\_solar\_TWe - solar\_Twe(t - 1)) / (max\_solar\_TWe) \quad \text{Equation D1}$$

The model also accounts for the electrical production (**solar\_production\_TWh**), the land occupied (**surface\_MHa\_solar**) and the investment required (**invest\_solar\_Tdolar**):

## Appendix D: Modeling of alternative technologies and saving policies

The policies that represent alternatives to oil, non-electrical renewable energies and saving (biofuels, electric and hybrid vehicle, train, savings and renewable thermal energy for buildings and industry) are described in the model with a similar structure to the one represented in Figure D1 (savings in the industry sector in this case). The thermal uses of renewable energies are not explicit or assigned to a concrete technology (except for the 3rd generation biomass residues), but modeled as a general policy, in the same way as done in WORLD3 (Meadows et al., 2004).

In the example of Figure D1, the total Industrial energy demand (**Industry\_EJ**) is calculated in a different part of the model (as a function of GDP and sectoral intensities). The stock variable **percent\_saving\_I** represents the share to the total Industrial energy demand that is concerned with the transition policies. This variable is a stock because it is assumed that these savings accumulate as the change to better equipment is done. The variable **percent\_saving\_I** causes a drop in energy demand, and the variables **dem\_industrial\_after\_savings** and **I\_after\_renew** account for the new demand, which is divided into the demands of individual fuels (**I\_gas**, **I\_coal**, **I\_oil**, **I\_renew**) according to a share consistent with the past evolution.



**Figure D1:** Forrester diagram of the representation of the Industrial sector and the policies applied.

## Appendix E: Limitations of the modeling

As mentioned in the paper, the modeling of complex systems always implies a trade-off between simplicity and the loss of detail. Thus, uncertainties and limitations arise: some are solvable (and are targeted as "future research directions"), while others are related to unavoidable judgment calls in the extrapolation of the future. Among the first are:

- **Non-inclusion of Energy Return of Energy Investment (EROEI):** The model operates in terms of primary energy, but in reality the useful energy used by society (Net Energy) in the future may decrease at the same time as the EROEI of the non-renewable resources diminishes, due to the smaller EROEI of unconventional resources (Murphy and Hall, 2010). Some modern renewable energies also perform low EROEI ratios (e.g. solar (Prieto and Hall, 2013)).
- **Non-inclusion of material limits and other non energetic renewable sources** (e.g. water availability (Postel, 2000), minerals (e.g. phosphorus (Cordell et al., 2009), copper (Harmsen et al., 2013))).
- **Absence of dynamic feedback between the main subsystems.** In this model version, climate impacts and energy scarcity are not fed back to the economic system. Similar studies have shown that models are biased optimistically when feedback is omitted (e.g. (Barney, 1980; Randers, 2000)). The (MEA, 2005) report concluded that approximately 60% (15 out of 24) of the ecosystem services examined are currently being degraded or used unsustainably. Also, (Rockström et al., 2009) identifies 3 out of 10 planetary boundaries that have already been overstepped. However, high uncertainties are involved in the feedback quantification and remain beyond the scope of this paper.
- **Others:** intermittency of renewable energies, non-consideration of phenomenons such as the "energy trap", the rebound effect, conflicts (within and between countries, e.g. corruption, wars), unexpected events (e.g. natural disasters), etc.

The omission of restrictions when solving a system can only lead to optimistic results. However, interesting conclusions have already been extracted and ongoing research on these issues will explore the influence of these constraints.

On the other hand, other assumptions such as the non-modeling of technology-fuel competition (through cost and efficiency as typically done in demand-driven models), might seem as in significant weakness of the model. However, since in all scenarios the peak of all fossil fuels occurs in the range of 15-20 years, the introduction of the competition would only tend to slightly delay the first "scarcity points"

while hastening the last ones. In brief, for each scenario, the points in Figura 15 would tend to converge in time, thus, not affecting the main conclusions of the work. However, from a societal point of view, the transition might be less challenging if the “scarcity points” are more spread in time.

## **Appendix F: Potential of bioenergy**

The techno-ecological potential estimation of bioenergy depends critically on the future land availability. The foreseeable growth of land for food over the next few decades (due to population and affluence growth) is projected to be 200–750 MHa (Balmford et al., 2005; Bruinsma, 2003; Rockström et al., 2007; Schade and Pimentel, 2010), while the projected growth of new infrastructures because of population and affluence growth is more than 100 MHa. Moreover, it is estimated that current and future crop yields will be affected negatively by climate change (IPCC, 2014), offsetting potential productivity gains from technological innovation. According to (FAOSTAT, 2014), there were 1,526 MHa of arable land and permanent crops in 2011. In view of the current situation, in which almost 15% of the world population is undernourished (FAO, 2012), a very large surface for bioenergy at global level is not compatible with future scenarios, such as the ones explored in this paper.

For the sake of simplicity, we decided to divide it into 3 categories for differentiated uses: traditional biomass, dedicated crops for biofuels and residues for thermal uses (Municipal Solid Waste and 3rd generation). The techno-ecological potential estimation of these categories is a sensitive and complex task: different lands (e.g. current arable vs. marginal) have different productivities, land competition issues, etc. The energy density and potentials assumed for each resource are presented in Table F1. These values are based on estimations from (de Castro et al., 2013a; Field et al., 2008; UNEP, 2009, p. 2009; WBGU, 2008) and our assumptions are detailed in (Capellán-Pérez et al., 2014).

		Reference	Surface	Gross power density	Potential
			MHa	W/m2	EJ/yr
2nd generation	Marginal lands	(Field et al., 2008)	386	0.033 <sup>a</sup>	4.1 (gross power)
	World average	(de Castro et al., 2013a)	100 (std. scenario)	0.155 <sup>b</sup>	4.9 (gross power)
3rd generation (from 2025)	Dedicated crops	(WBGU, 2008)	0	0.18	+2.3 (gross power)
	Agriculture & Forestry residues	Own estimation	-	-	25 (NPP)

**Table F1:** Bioenergy power density and potentials assumed for each resource. Other potential resources, such as 4th generation biomass (algae), are not considered due to the high uncertainties of the technology and the long-term nature of its eventual commercial appearance (Janda et al., 2012). NPP: Net Primary Production. <sup>a</sup>(Field et al., 2008) find that 27 EJ of NPP can be extracted from 386 Mha of marginal lands. A transformation efficiency to biofuels of 15% is assumed. <sup>b</sup>The gross power density for the best lands was estimated at 0.3-0.36 W/m2 in Brazil (de Castro et al., 2013a).

## Appendix G: Potential of renewable electricity

Techno-ecological potential of renewable energies as estimated by (Capellán-Pérez et al., 2014; de Castro et al., 2013b, 2011):

References	Techno-ecological potential	Investment cost		
	(Capellán-Pérez et al., 2014; de Castro et al., 2013b, 2011)	(Teske et al., 2011)		
Technology/Unit	TWe	2011\$/We		
		2010	2030	2050
<b>Hydroelectricity</b>	0.5	4.8	6.3	6.9
<b>Wind<sup>a</sup></b>	1	8.3	6.6	6
<b>Solar</b>	3	26.9	7.4	7.4 <sup>b</sup>
<b>Waste &amp; MSW</b>	0.3	3.9	3.3	3.2
<b>Geothermal</b>	0.2	15.9	9.3	6.6
<b>Oceanic</b>	0.05	9.2	2.8	2.1
<b>TOTAL</b>	5.05			

**Table G1:** Data of electric renewable in the model. "TWe" represents power electric production: TWh/8760. <sup>a</sup>The learning curve for wind is adapted from (Teske et al., 2011) in order to aggregate both onshore and offshore wind. <sup>b</sup> The solar investment cost is maintained constant after 2030 since we judge it to be too optimistic that the solar technologies will manage to be less expensive than wind. In fact, in recent years, the price of solar modules has fallen significantly due to efficiency improvements but also to dumping and excess capacity effects in the crisis.

## References

- Adelman, M.A., 1990. Mineral Depletion, with Special Reference to Petroleum. *The Review of Economics and Statistics* 72, 1. doi:10.2307/2109733
- Aleklett, K., Höök, M., Jakobsson, K., Lardelli, M., Snowden, S., Söderbergh, B., 2010. The Peak of the Oil Age – Analyzing the world oil production Reference Scenario in World Energy Outlook 2008. *Energy Policy* 38, 1398–1414. doi:10.1016/j.enpol.2009.11.021
- Anseeuw, W., Boche, M., Breu, T., Giger, M., Lay, J., Messerli, P., Nolte, K., 2012. Transnational Land Deals for Agriculture in the Global South.
- ASPO, 2009. ASPO Newsletter n. 100.
- Ayres, R.U., 2007. On the practical limits to substitution. *Ecological Economics* 61, 115–128. doi:10.1016/j.ecolecon.2006.02.011
- Ayres, R.U., van den Bergh, J.C.J.M., Lindenberger, D., Warr, B., 2013. The underestimated contribution of energy to economic growth. *Structural Change and Economic Dynamics* 27, 79–88. doi:10.1016/j.strueco.2013.07.004
- Baksi, S., Green, C., 2007. Calculating economy-wide energy intensity decline rate: The role of sectoral output and energy shares. *Energy Policy* 35, 6457–6466. doi:10.1016/j.enpol.2007.08.018
- Balmford, A., Green, R.E., Scharlemann, J.P.W., 2005. Sparing land for nature: exploring the potential impact of changes in agricultural yield on the area needed for crop production. *Global Change Biology* 11, 1594–1605. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.001035.x
- Barney, G.O., 1980. Global 2000 Report to the President of the United States: The Summary Report - With Environment Projections and the Government's Global Model v. 1: Entering the 21st Century. Pergamon Press.
- Bassi, A.M., Shilling, J.D., 2010. Informing the US Energy Policy Debate with Threshold 21. *Technological Forecasting and Social Change* 77, 396–410. doi:10.1016/j.techfore.2009.10.007
- Benes, J., Chauvet, M., Kamenik, O., Kumhof, M., Laxton, D., Mursula, S., Selody, J., 2012. The Future of Oil: Geology versus Technology (No. WP/12/109). IMF Working Paper.
- Bitas, K., Kalimeris, P., 2013. Re-estimating the decoupling effect: Is there an actual transition towards a less energy-intensive economy? *Energy* 51, 78–84. doi:10.1016/j.energy.2012.11.033
- Bouwman, A., Kram, T., Goldewijk, K.K., 2006. Integrated modelling of global environmental change: an overview of IMAGE 2.4. Netherlands Environmental Assessment Agency, Bilthoven.
- BP, 2013. BP Statistical Review of World Energy June 2013, Statistical Review of World Energy. British Petroleum.
- Brandt, A.R., Farrell, A.E., 2007. Scraping the bottom of the barrel: greenhouse gas emission consequences of a transition to low-quality and synthetic petroleum resources. *Climatic Change* 84, 241–263. doi:10.1007/s10584-007-9275-y

- Brecha, R.J., 2008. Emission scenarios in the face of fossil-fuel peaking. *Energy Policy* 36, 3492–3504. doi:10.1016/j.enpol.2008.05.023
- Brown, J.H., Burnside, W.R., Davidson, A.D., Delong, J.R., Dunn, W.C., Hamilton, M.J., Mercado-Silva, N., Nekola, J.C., Okie, J.G., Woodruff, W.H., Zuo, W., 2011. Energetic Limits to Economic Growth. *BioScience* 61, 19–26. doi:10.1525/bio.2011.61.1.7
- Bruinsma, J., 2003. World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective. *Earthscan/James & James*.
- Bueno, G., 2012. Analysis of scenarios for the reduction of energy consumption and GHG emissions in transport in the Basque Country. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 1988–1998. doi:10.1016/j.rser.2012.01.004
- Campbell, C.J., Laherrère, J., 1998. The end of cheap oil. *Scientific American*.
- Canadell, J.G., Quéré, C.L., Raupach, M.R., Field, C.B., Buitenhuis, E.T., Ciais, P., Conway, T.J., Gillett, N.P., Houghton, R.A., Marland, G., 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *PNAS* 104, 18866–18870. doi:10.1073/pnas.0702737104
- Capellán-Pérez, I., Mediavilla, M., de Castro, C., Miguel, L.J., 2014. World Limits Model (WoLiM) 1.0 - Model Documentation. Technical Report ([http://www.eis.uva.es/energiasostenible/?page\\_id=2056&lang=en](http://www.eis.uva.es/energiasostenible/?page_id=2056&lang=en)). Energy and System Dynamics Group of the University of Valladolid, Spain.
- Cordell, D., Drangert, J.-O., White, S., 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change* 19, 292–305. doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009
- Dale, M., 2012. Meta-analysis of non-renewable energy resource estimates. *Energy Policy* 43, 102–122. doi:10.1016/j.enpol.2011.12.039
- Daly, H.E., 1996. Beyond growth: the economics of sustainable development. Beacon Press, Boston.
- Davies, E.G.R., Simonovic, S.P., 2010. ANEMI: a new model for integrated assessment of global change. *Interdisciplinary Environmental Review* 11, 127–161. doi:10.1504/IER.2010.037903
- De Castro, C., 2009. Escenarios de Energía-Economía mundiales con modelos de dinámica de sistemas. University of Valladolid, Valladolid, Spain.
- De Castro, C., Carpintero, Ó., Frechoso, F., Mediavilla, M., de Miguel, L.J., 2013a. A top-down approach to assess physical and ecological limits of biofuels. *Energy*. doi:10.1016/j.energy.2013.10.049
- De Castro, C., Mediavilla, M., Miguel, L.J., Frechoso, F., 2011. Global wind power potential: Physical and technological limits. *Energy Policy* 39, 6677–6682. doi:10.1016/j.enpol.2011.06.027
- De Castro, C., Mediavilla, M., Miguel, L.J., Frechoso, F., 2013b. Global solar electric potential: A review of their technical and sustainable limits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28, 824–835. doi:10.1016/j.rser.2013.08.040
- De Castro, C., Miguel, L.J., Mediavilla, M., 2009. The role of non conventional oil in the attenuation of peak oil. *Energy Policy* 37, 1825–1833. doi:10.1016/j.enpol.2009.01.022

Dittmar, M., 2013. The end of cheap uranium. *Science of The Total Environment*.

doi:10.1016/j.scitotenv.2013.04.035

Ehrlich, P.R., 1989. The limits to substitution: Meta-resource depletion and a new economic-ecological paradigm. *Ecological Economics* 1, 9–16. doi:10.1016/0921-8009(89)90021-9

European Comission, 2007. "Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius—the way ahead for 2020 and beyond. (No. COM(2007) 2 final), Communication from the Commssion. Commission of the European Communities, Brussels.

European Commission, 2010. REPORT FROM THE COMMISSION on indirect land-use change related to biofuels and bioliquids (No. COM(2010) 811 final).

EVI IEA, 2013. Global EV Outlook. Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020. Electric Vehicles Iniciative. International Energy Agency.

EWG, 2006. Uranium Resources and Nuclear Energy (No. 1/2006), EWG-Series. Energy Watch Group.

EWG, 2007. Coal: Resources and Future Production (No. EWG-Paper No. 1/07).

EWG, 2008. Crude Oil - The Supply Outlook. Energy Watch Group / Ludwig-Boelkow-Foundation.

EWG, 2013. Fossil and Nuclear Fuels – the Supply Outlook (No. 2013/03/18 LBST). Energy Watch Group.

FAO, 2012. The state of food insecurity in the world 2012.

FAOSTAT, 2014. Statistics Division of the FAO.

Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., Hawthorne, P., 2008. Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt. *Science* 319, 1235–1238. doi:10.1126/science.1152747

Fiddaman, T.S., 2002. Exploring policy options with a behavioral climate–economy model. *System Dynamics Review* 18, 243–267. doi:10.1002/sdr.241

Field, C.B., Campbell, J.E., Lobell, D.B., 2008. Biomass energy: the scale of the potential resource. *Trends in Ecology & Evolution* 23, 65–72. doi:10.1016/j.tree.2007.12.001

Fischedick, M., Esken, A., Pastowski, A., Schüwer, D., Supersberger, N., Nitsch, J., Viebahn, P., Bandi, A., Zuberbühler, U., Edenhofer, O., 2008. Ecological, Economic and Structural Comparison of Renewable Energy Technologies (RE) with Carbon Capture and Storage (CCS) — An Integrated Approach. Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy; German Aerospace Center;Centre for Solar Energy and Hydrogen Research; Potsdam Institute for Climate Impact Research.

Fouquet, R., 2010. The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service. *Energy Policy* 38, 6586–6596. doi:10.1016/j.enpol.2010.06.029

Furtado, A.T., Suslick, S.B., 1993. Forecasting of petroleum consumption in Brazil using the intensity of energy technique. *Energy Policy* 21, 958–968. doi:10.1016/0301-4215(93)90184-H

García, D., 2009. A new world model including energy and climate change data, in: First International Workshop Mission Earth, Modeling and Simulation for a Sustainable Future. Zurich.

- Grushevenko, E., Grushevenko, D., 2012. Unconventional Oil Potential Tends to Change the World Oil Market. *Energy Science and Technology* 4, 68–74. doi:10.3968/j.est.1923847920120401.178
- Guseo, R., 2011. Worldwide cheap and heavy oil productions: A long-term energy model. *Energy Policy* 39, 5572–5577. doi:10.1016/j.enpol.2011.04.060
- Haberl, H., Sprinz, D., Bonazountas, M., Cocco, P., Desaubies, Y., Henze, M., Hertel, O., Johnson, R.K., Kastrup, U., Laconte, P., Lange, E., Novak, P., Paavola, J., Reenberg, A., van den Hove, S., Vermeire, T., Wadham, P., Searchinger, T., 2012. Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy. *Energy Policy* 45, 18–23. doi:10.1016/j.enpol.2012.02.051
- Hamilton, J.D., 2009. Causes and Consequences of the Oil Shock of 2007-08 (Working Paper No. 15002). National Bureau of Economic Research.
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., Pagani, M., Raymo, M., Royer, D.L., Zachos, J.C., 2008. Target Atmospheric CO<sub>2</sub>: Where Should Humanity Aim? *The Open Atmospheric Science Journal* 2, 217–231. doi:10.2174/1874282300802010217
- Hansen, J., Steffen, K., Epstein, P., Rohling, E.J., Zachos, J.C., Smith, P., von Schuckmann, K., Parmesan, C., Sato, M., Rockstrom, J., Sachs, J., Rahmstorf, S., Hoegh-Guldberg, O., Kharecha, P., Hearty, P.J., 2011. The Case for Young People and Nature: A Path to a Healthy, Natural, Prosperous Future.
- Harmsen, J.H.M., Roes, A.L., Patel, M.K., 2013. The impact of copper scarcity on the efficiency of 2050 global renewable energy scenarios. *Energy* 50, 62–73. doi:10.1016/j.energy.2012.12.006
- Heinberg, R., Fridley, D., 2010. The end of cheap coal. *Nature* 468, 367–369. doi:10.1038/468367a
- Hirsch, R.L., 2008. Mitigation of maximum world oil production: Shortage scenarios. *Energy Policy* 36, 881–889. doi:10.1016/j.enpol.2007.11.009
- Holttinen, H., Meibom, P., Orths, A., Lange, B., O'Malley, M., Tande, J.O., Estanqueiro, A., Gomez, E., Söder, L., Strbac, G., Smith, J.C., van Hulle, F., 2011. Impacts of large amounts of wind power on design and operation of power systems, results of IEA collaboration. *Wind Energy* 14, 179–192. doi:10.1002/we.410
- Höök, M., Fantazzini, D., Angelantoni, A., Snowden, S., 2013. Hydrocarbon liquefaction: viability as a peak oil mitigation strategy.
- Höök, M., Tang, X., 2013. Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review. *Energy Policy* 52, 797–809. doi:10.1016/j.enpol.2012.10.046
- Höök, M., Zittel, W., Schindler, J., Aleklett, K., 2010. Global coal production outlooks based on a logistic model. *Fuel* 89, 3546–3558. doi:10.1016/j.fuel.2010.06.013
- Howarth, R.W., Santoro, R., Ingraffea, A., 2011. Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations. *Climatic Change* 106, 679–690. doi:10.1007/s10584-011-0061-5
- Hubbert, M.K., 1956. Nuclear Energy and the Fossil Fuel, in: Drilling and Production Practice. American Petroleum Institute.
- IEA ETP, 2010. Energy technology perspectives 2010: scenarios & strategies to 2050. OECD/IEA., Paris.

- IPCC, 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC, 2007a. Climate Change 2007: Synthesis Report. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC, 2007b. Mitigation of Climate Change - Contribution of Working Group III. Cambridge University Press.
- IPCC, 2011. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2014. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. Cambridge University Press.
- IPCC SRES, 2000. Special Report on Emissions Scenarios.
- Jackson, T., 2009. Prosperity without Growth: Economics for a Finite Planet, Reprint. ed. Routledge.
- Janda, K., Kristoufek, L., Zilberman, D., 2012. Biofuels: policies and impacts. A review. Agricultural Economics - UZEI v. 58(8) p. 372-386.
- Kallis, G., Kerschner, C., Martínez-Alier, J., 2012. The economics of degrowth. Ecological Economics 84, 172–180. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.08.017
- Kerschner, C., 2010. Economic de-growth vs. steady-state economy. Journal of Cleaner Production 18, 544–551. doi:10.1016/j.jclepro.2009.10.019
- Kubiszewski, I., Costanza, R., Franco, C., Lawn, P., Talberth, J., Jackson, T., Aylmer, C., 2013. Beyond GDP: Measuring and achieving global genuine progress. Ecological Economics 93, 57–68. doi:10.1016/j.ecolecon.2013.04.019
- Laherrère, J., 2006. Oil and gas, what future? Presented at the Groningen annual Energy Convention, Groningen, Nederlands.
- Laherrère, J., 2010. Peak Oil y Seguridad Energética. Presented at the Segundo Simposio ASPO Argentina Buenos Aires, Buenos Aires (Argentina).
- Le Page, Y., Hurt, G., Thomson, A.M., Bond-Lamberty, B., Patel, P., Wise, M., Calvin, K., Kyle, P., Clarke, L., Edmonds, J., Janetos, A., 2013. Sensitivity of climate mitigation strategies to natural disturbances. Environ. Res. Lett. 8. doi:10.1088/1748-9326/8/1/015018
- Lightfoot, H.D., Green, C., 2002. Energy intensity decline implications for stabilization of atmospheric CO<sub>2</sub> content (No. Report No. 2001-7, October 2001). McGill Centre for Climate and Global Change Research (C2GCR).
- Maggio, G., Cacciola, G., 2012. When will oil, natural gas, and coal peak? Fuel 98, 111–123. doi:10.1016/j.fuel.2012.03.021
- Manne, A.S., Richels, R.G., 2004. MERGE: an integrated assessment model for global climate change, in: Energy and Environment. pp. 175–189.

Maugeri, L., 2012. Oil: The Next Revolution (Discussion Paper No. Discussion Paper #2012-10). Geopolitics of Energy Project Belfer Center for Science and International Affairs.

McCollum, D., Bauer, N., Calvin, K., Kitous, A., Riahi, K., 2014. Fossil resource and energy security dynamics in conventional and carbon-constrained worlds. Climatic Change 123, 413–426. doi:10.1007/s10584-013-0939-5

MEA, 2005. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Scenarios, Global Assessment Reports. Island Press.

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens III, W.W., 1972. The Limits to Growth. Universe Books.

Meadows, D.H., Randers, J., Meadows, D.L., 1993. Beyond the Limits: Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future. Chelsea Green Publishing Company.

Meadows, D.H., Randers, J., Meadows, D.L., 2004. The limits to growth: the 30-year update. Chelsea Green Publishing Company, White River Junction, Vt.

Mediavilla, M., de Castro, C., Capellán, I., Javier Miguel, L., Arto, I., Frechoso, F., 2013. The transition towards renewable energies: Physical limits and temporal conditions. Energy Policy 52, 297–311. doi:10.1016/j.enpol.2012.09.033

Mills, A., Wiser, R., Porter, K., 2012. The cost of transmission for wind energy in the United States: A review of transmission planning studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 1–19. doi:10.1016/j.rser.2011.07.131

Mohr, S.H., 2012. Fossil fuel future production, world and Australia focus. Presented at the Australian Frontiers of Science 2012: Science for a green economy, Sydney, 2-4 December 2012.

Mohr, S.H., Evans, G.M., 2009. Forecasting coal production until 2100. Fuel 88, 2059–2067. doi:10.1016/j.fuel.2009.01.032

Mosconi, J.-J., 2008. The energy outlook in 2030 according to Total.

Murphy, D.J., Hall, C.A.S., 2010. Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. Annals of the New York Academy of Sciences 1185, 102–118. doi:10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x

Murphy, D.J., Hall, C.A.S., 2011. Adjusting the economy to the new energy realities of the second half of the age of oil. Ecological Modelling 223, 67–71. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.06.022

Murray, J., King, D., 2012. Climate policy: Oil's tipping point has passed. Nature 481, 433–435. doi:10.1038/481433a

Nakicenovic, N., Riahi, K., 2003. Model runs with MESSAGE in the context of the further development of the Kyoto-Protocol, WBGU—German Advisory Council on Global Change. WBGU website.

Nel, W.P., Cooper, C.J., 2009. Implications of fossil fuel constraints on economic growth and global warming. Energy Policy 37, 166–180. doi:10.1016/j.enpol.2008.08.013

Nilsson, S., Schopfhauser, W., 1995. The carbon-sequestration potential of a global afforestation program. Climatic Change 30, 267–293. doi:10.1007/BF01091928

- Odell, P.R., 2004. Why carbon fuels will dominate the 21st century's global energy economy. Multi-Science Pub. Co., Brentwood, England.
- OECD, 2012. Looking to 2060: Long-term global growth prospects, OECD Economics Department Policy Notes, n° 15. Paris: OECD.
- Olmstead, S.M., Muehlenbachs, L.A., Shih, J.-S., Chu, Z., Krupnick, A.J., 2013. Shale gas development impacts on surface water quality in Pennsylvania. *PNAS* 110, 4962–4967. doi:10.1073/pnas.1213871110
- Osborn, S.G., Vengosh, A., Warner, N.R., Jackson, R.B., 2011. Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. *PNAS* 108, 8172–8176. doi:10.1073/pnas.1100682108
- Pielke, R., Wigley, T., Green, C., 2008. Dangerous assumptions. *Nature* 452, 531–532. doi:10.1038/452531a
- Postel, S.L., 2000. Entering an era of water scarcity: The challenges ahead. *Ecol. Appl.* 10, 941–948. doi:10.1890/1051-0761(2000)010[0941:EAEOWS]2.0.CO;2
- Prieto, P.A., Hall, C.A.S., 2013. Spain's Photovoltaic Revolution: The Energy Return on Investment, 2013th ed. Springer.
- Randers, J., 2000. From limits to growth to sustainable development or SD (sustainable development) in a SD (system dynamics) perspective. *System Dynamics Review* 16, 213–224.
- Reynolds, D.B., 1999. The mineral economy: how prices and costs can falsely signal decreasing scarcity. *Ecological Economics* 31, 155–166. doi:10.1016/S0921-8009(99)00098-1
- Rockström, J., Lannerstad, M., Falkenmark, M., 2007. Assessing the water challenge of a new green revolution in developing countries. *PNAS* 104, 6253–6260. doi:10.1073/pnas.0605739104
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., Wit, C.A. de, Hughes, T., Leeuw, S. van der, Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475. doi:10.1038/461472a
- Rutledge, D., 2011. Estimating long-term world coal production with logit and probit transforms. *International Journal of Coal Geology* 85, 23–33. doi:10.1016/j.coal.2010.10.012
- Saddler, H., Diesendorf, M., Denniss, R., 2007. Clean energy scenarios for Australia. *Energy Policy* 35, 1245–1256. doi:10.1016/j.enpol.2006.03.013
- Schade, C., Pimentel, D., 2010. Population crash: prospects for famine in the twenty-first century. *Environ Dev Sustain* 12, 245–262. doi:10.1007/s10668-009-9192-5
- Schenk, N.J., Moll, H.C., 2007. The use of physical indicators for industrial energy demand scenarios. *Ecological Economics* 63, 521–535. doi:10.1016/j.ecolecon.2006.12.008
- Schneider, M., Froggatt, A., Hazemann, J., 2012. The World Nuclear Industry Status Report 2012.

- Scott, V., Gilfillan, S., Markusson, N., Chalmers, H., Haszeldine, R.S., 2013. Last chance for carbon capture and storage. *Nature Clim. Change* 3, 105–111. doi:10.1038/nclimate1695
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R.A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., Yu, T.-H., 2008. Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science* 319, 1238–1240. doi:10.1126/science.1151861
- Simon, J.L., 1996. *The ultimate resource 2*. Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Skrebowski, C., 2010. *The Oil Crunch: a wake-up call for the UK economy*. UK Industry Taskforce on Peak Oil & Energy Security (ITPOES).
- Smil, V., 2010. *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*. Praeger.
- Söderbergh, B., Robelius, F., Aleklett, K., 2007. A crash programme scenario for the Canadian oil sands industry. *Energy Policy* 35, 1931–1947. doi:10.1016/j.enpol.2006.06.007
- Solow, R.M., 1974. Intergenerational equity and exhaustible resources. *The review of economic studies* 41, 29–45.
- Sorrell, S., Speirs, J., Bentley, R., Brandt, A., Miller, R., 2009. Global Oil Depletion. An assessment of the evidence for a near-term peak in global oil production. UK Energy Research Centre.
- Sterman, J.D., 2001. System dynamics modeling. *California management review* 43, 8–25.
- Stern, D.I., 1997. Limits to substitution and irreversibility in production and consumption: A neoclassical interpretation of ecological economics. *Ecological Economics* 21, 197–215. doi:10.1016/S0921-8009(96)00103-6
- Teske, S., Pregger, T., Simon, S., Naegler, T., Graus, W., Lins, C., 2011. Energy [R]evolution 2010—a sustainable world energy outlook. *Energy Efficiency* 4, 409–433. doi:10.1007/s12053-010-9098-y
- Thielemann, T., 2012. Why There Will Be No Peak Coal in the Foreseeable Future. *Open Journal of Geology* 02, 57–64. doi:10.4236/ojg.2012.22006
- Trainer, T., 2012. A critique of Jacobson and Delucchi's proposals for a world renewable energy supply. *Energy Policy* 44, 476–481. doi:10.1016/j.enpol.2011.09.037
- Turner, G.M., 2008. A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality. *Global Environmental Change* 18, 397–411. doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.05.001
- Turner, G.M., 2012. On the Cusp of Global Collapse? Updated Comparison of The Limits to Growth with Historical Data. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 21, 116–124.
- Tverberg, G.E., 2012. Oil supply limits and the continuing financial crisis. *Energy* 37, 27–34. doi:10.1016/j.energy.2011.05.049
- UNEP, 2004. *The GEO-3 scenarios, 2002-2032: quantification and analysis of environmental impacts*, UNEP/DEWA/RS. UNEP; RIVM, Nairobi, Kenya; Bilthoven, Netherlands.

UNEP, 2007. Global Environment Outlook: environment for development, GEO 4. United Nations Environment Programme; Stationery Office., Nairobi, Kenya: London.

UNEP, 2009. Towards sustainable production and use of resources: Assessing biofuels.

UNEP, 2012. Global environment outlook GEO 5: environment for the future we want. United Nations Environment Program, Nairobi, Kenya.

US EIA db, 2014. International Energy Statistics (Database). US Energy Information Administration, <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm>.

Valero, A., Valero, A., 2010. Physical geonomics: Combining the exergy and Hubbert peak analysis for predicting mineral resources depletion. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 1074–1083.  
doi:10.1016/j.resconrec.2010.02.010

Van den Bergh, J.C.J.M., 2009. The GDP paradox. *Journal of Economic Psychology* 30, 117–135.  
doi:10.1016/j.jeop.2008.12.001

Van Vuuren, D.P., Kok, M.T.J., Girod, B., Lucas, P.L., de Vries, B., 2012. Scenarios in Global Environmental Assessments: Key characteristics and lessons for future use. *Global Environmental Change* 22, 884–895.  
doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.06.001

Ward, J.D., Mohr, S.H., Myers, B.R., Nel, W.P., 2012. High estimates of supply constrained emissions scenarios for long-term climate risk assessment. *Energy Policy* 51, 598–604.  
doi:10.1016/j.enpol.2012.09.003

WBGU, 2008. Future Bioenergy and Sustainable Land Use.

WEC, 2010. Survey of Energy Resources. World Energy Council.

WEO, 2010. World Energy Outlook 2010. OECD / IEA.

WEO, 2011. World Energy Outlook 2011. IEA, International Energy Agency: OECD, Paris.

WEO, 2012. World Energy Outlook 2012. OECD / IEA.

World Bank database, 2014. World Bank database. <http://data.worldbank.org/>.

Zerta, M., Schmidt, P.R., Stiller, C., Landinger, H., 2008. Alternative World Energy Outlook (AWEO) and the role of hydrogen in a changing energy landscape. *International Journal of Hydrogen Energy* 33, 3021–3025.  
doi:10.1016/j.ijhydene.2008.01.044

Zittel, W., 2012. Feasible Futures for the Common Good. *Energy Transition. Paths in a Period of Increasing Resource Scarcities.*