

## El deseable futuro energético global

Antonio Sarmiento Galán

**R**ecientemente fueron publicados dos estudios científicos muy relevantes, para el futuro del equilibrio maravilloso del sistema en el que vivimos, y al que tanto hemos perturbado. El primero de ellos<sup>1</sup> muestra claramente que el uso del gas natural sólo propiciará una leve reducción en las emisiones de los gases causantes del efecto invernadero, quedando muy lejos de convertirse en la panacea que tanto se clama para justificar su explotación e introducción al mercado y sin contar los daños que causan tanto su quema como las inevitables fugas que se generan en su extracción –especialmente la fractura hidráulica– transporte, almacenamiento y uso pues el gas natural es casi exclusivamente metano, un gas que es mucho más poderoso que el bióxido de carbono para exacerbar el efecto invernadero durante lapsos que van hasta los cien años.

El segundo estudio<sup>2</sup> muestra que el empleo de energía proveniente de fuentes renovables (*i. e.*, solar fotovoltaica, solar térmica, eólica e hidráulica) tendrá un impacto global benéfico en el ambiente reduciendo las emisiones de gases causantes del efecto invernadero, la eco-toxicidad en el agua, la eutrofización<sup>3</sup> y la exposición a partículas suspendidas, pudiendo además proporcionar el 100% de la energía eléctrica necesaria para el año 2050; además, el estudio se realiza haciendo la comparación no con las contaminantes plantas actuales, sino con las plantas de nueva generación que usarían combustibles fósiles pero capturarían el bióxido de carbono producido y lo almacenarían evitando al menos, su repercusión en la atmósfera.

La primera pregunta que surge es la de que si se necesita un cambio a nivel global ¿por qué sólo se promueve el cambio al uso de metano (gas natural) y no el cambio a fuentes renovables? ¿Por qué autoriza el gobierno a empresas ‘privadas’ la instalación de plantas

---

<sup>1</sup> Limited impact on decadal-scale climate change from increased use of natural gas. *Nature*. Haewon McJeon, *et al.* doi:10.1038/nature13837. <http://www.nature.com/nature/journal/vaop/ncurrent/full/nature13837.html>

<sup>2</sup> Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. Edgar G. Hertwich *et al.*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1312753111](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1312753111)

<sup>3</sup> Contaminación del agua por exceso de nutrientes provenientes de los escurrimientos con abundancia de fertilizantes, la cuál causa un crecimiento denso de vegetación y la pérdida de vida animal por falta de oxígeno.

termoeléctricas de metano (ciclo combinado de gas natural) en donde el daño será mayor –zonas agrícolas– en lugar de utilizar el supuesto subsidio al consumo eléctrico para proporcionárselo a los ciudadanos con el fin exclusivo de impulsar el cambio al uso de energía proveniente de fuentes renovables? Se vuelve inevitable el recordar las tácticas de coaptación y soborno que tan eficientemente han usado las industrias tabacalera y ‘alimenticia’ para proteger sus ganancias escondiendo las consecuencias en salud que causa su tolerancia/adopción.

Volviendo a los estudios mencionados, tenemos que ambos analizan el lapso 2010 - 2050, ambos utilizan todas las variables relevantes y exploran las predicciones de 5 modelos en el primer estudio y tanto los recursos necesarios como los impactos ambientales resultantes bajo los dos escenarios de mitigación más realistas de la Agencia Internacional de Energía en el segundo estudio; una característica adicional que estos dos estudios comparten, es la de que se trata de las primeras evaluaciones globales integradas que se realizan: una aproximación global a los sistemas integrando energía, economía y clima, en el primer estudio y una evaluación global integrada de todo el ciclo de vida de las plantas generadoras en el segundo estudio que incorpora la retroalimentación del sistema eléctrico sobre si mismo utilizando suposiciones consistentes con los escenarios de mejoras tecnológicas en la producción de materiales y energía que se realizarán durante el lapso de evaluación.

En cuanto a los estudios mencionados, el primero considera cinco modelos creados por otros tantos grupos de investigación que simulan la evolución del futuro sistema global energético hasta el 2050 bajo dos suposiciones alternativas acerca del suministro de metano, el actual de explotación convencional y el reciente de suministro abundante (figura 1); cada evolución se construye sobre la síntesis del suministro de metano y de la distribución geográfica, ambos contenidos en el reporte de la Evaluación Global de Energía (EGE)<sup>4</sup>.

El escenario convencional considera que el máximo de los recursos recuperables es de  $11 \times 10^{21}$  joules en el 2010, una estimación consistente con los recursos convencionales que tienen costos de extracción por debajo de los 3 dólares por cada  $10^9$  joules. La curva evolutiva refleja el metano redituablemente recuperable con

---

<sup>4</sup> *Global Energy Assessment*, H. Rogner et al., 2012. Cambridge University Press.

la tecnología disponible antes de la invasión del gas de esquisto. Por su parte, el escenario de suministro abundante se caracteriza por la abundancia global de –pequeños pero copiosos– yacimientos de metano y los substancialmente menores costos de extracción; se incorpora la aplicación global de las tecnologías avanzadas de extracción que permiten la remoción del metano no convencional y previamente no redituable.

Para representar tal escenario, se supone que el cambio tecnológico disminuye el costo de extracción en el reporte sobre la Evaluación Global de Energía a la mitad entre el 2010 y el 2050 permitiendo que más de  $30,000 \times 10^{18}$  joules se produzcan con un costo igual o inferior a los 3 dólares por cada  $10^9$  joules y que los recursos adicionales se extraigan a costos mayores. Este escenario se ha diseñado para obtener una cota superior potencial sobre el suministro global de gas y no debe interpretarse como el caso más probable; adicionalmente, la tasa de reducción de costos es más agresiva que la de la mayoría de las fuentes de energía de bajo carbono contra las que el metano compite (tabla 1).

Los cinco modelos de evaluación integrada que se utilizan en el primer estudio se conocen mediante las siglas BAEGEM<sup>5</sup>, GCAM<sup>6</sup>, MESSAGE<sup>7</sup>, REMIND<sup>8</sup> y WITCH<sup>9</sup> y pertenecen a la clase de modelos diseñados para evaluar las implicaciones de cambios en el sistema energético global sobre el forzamiento climático, modelos que han sido ampliamente utilizados para proyectar los escenarios de emisiones en las evaluaciones regionales y globales; por ejemplo, GCAM y MESSAGE proporcionaron dos de las cuatro vías representativas de concentración (RCPs por sus siglas en inglés) del 5to reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático,

---

<sup>5</sup> Mi, R. & Fisher, B. S. BAEGEM Model Documentation (BAEconomics, 2014); <http://www.baeconomics.com.au/wp-content/uploads/2014/02/BAEGEMdocumentation-21Feb14.pdf>

<sup>6</sup> Calvin, K. et al. GCAM Wiki Documentation (Pacific Northwest National Laboratory, 2011); <http://wiki.umd.edu/gcam/>

<sup>7</sup> Riahi, K., Grübler, A. & Nakicenovic, N. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technol. Forecast. Soc. Change* **74**, 887–935 (2007).

<sup>8</sup> Bauer, N. et al. Global fossil energy markets and climate change mitigation—an analysis with REMIND. *Clim. Change* (en prensa).

<sup>9</sup> Bosetti, V., Carraro, C., Galeotti, M., Massetti, E. & Tavoni, M. A world induced technical change hybrid model. *Energy J.* **27**, 13–37 (2006).

IPCC<sup>10</sup>. Estos modelos se armonizan para compartir las mismas suposiciones sobre las curvas de suministro de metano, pero difieren ampliamente en cuanto a arquitectura del modelo, la resolución geoespacial, las suposiciones socioeconómicas y las proyecciones tecnológicas. El hecho de que este diverso conjunto de modelos produzcan un resultado similar refuerza la confianza en que dicho resultado no es un artefacto idiosincrático de un método individual de modelaje sino que se trata de la consecuencia de interacciones más fundamentales.

Los cinco modelos indican que un suministro abundante de energía conduce a un consumo adicional de metano y de electricidad generada quemando dicho gas en comparación con el escenario de suministro convencional. La velocidad de la divergencia y el tamaño de la diferencia en dicho consumo varía desde un 11% en WITCH a un 170% en REMIND para el 2050 (figura 2a). Los cinco modelos concordaron en el patrón de penetración en el sector. La producción de electricidad mostró el mayor desplazamiento hacia la sustitución de todos los otros combustibles por metano, prominentemente el carbón. Algunos pequeños desplazamientos se observan en la industria y la construcción (figura 3a). Los modelos también concuerdan en el hecho de que el metano seguirá jugando un papel menor sólo en el transporte.

A pesar de los cambios mayores en el sistema global de energía y el aumento substancial en el consumo de metano, los cinco modelos concuerdan en que el suministro adicional de metano en el mercado no reduce en forma discernible las emisiones de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de los combustibles fósiles; las emisiones futuras de CO<sub>2</sub> son similares en magnitud con o sin el suministro abundante de metano ya que las trayectoria de las emisiones siguen aumentando con el tiempo a tasas similares (figura 2b). Para los modelos GCAM, MESSAGE y WITCH, las emisiones de CO<sub>2</sub> en ambos escenarios están a un 2% una de la otra; los modelos BAEGEM y REMIND muestran diferencias mayores (11 y 5%, respectivamente), pero en ambos casos, dichas emisiones aumentan en lugar de disminuir para el escenario de suministro abundante.

---

<sup>10</sup> Van Vuuren, D. P. et al. The representative concentration pathways: an overview. *Clim. Change* **109**, 5–31 (2011). Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Stocker, T. F. et al.) (Cambridge Univ. Press, 2013). <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

Los resultados demuestran que el suministro abundante de gas metano no reducirá necesariamente las emisiones de CO<sub>2</sub>; se tienen dos fuerzas en juego, la substitución de combustible y un efecto de escala. Inicialmente, el metano substituye principalmente al carbón (figura 3a) pero no de manera exclusiva, sino que también substituye a los otros combustibles primarios, incluyendo la energía nuclear y la de fuentes renovables: para el 2050 el metano suministrado abundantemente substituye en promedio un 18% del carbón y un 17% de las energías con muy bajas emisiones (10 y 8% respectivamente para el total acumulado entre 2010 y 2050). Por lo tanto, el efecto del metano sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> no se basa en la diferencia entre los factores de emisión de dicho gas y el carbón, sino en su factor de emisión respecto de el de un conjunto mucho más amplio de fuentes de energía.

El factor de emisión del metano (56 kg de CO<sub>2</sub> por cada 10<sup>9</sup> Joules) es más de la mitad del factor de emisión del carbón (96 kg de CO<sub>2</sub> por cada 10<sup>9</sup> Joules); sin embargo, no es substancialmente menor al promedio global de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de energía (68 kg de CO<sub>2</sub> por cada 10<sup>9</sup> Joules, promedio de los modelos para el 2050). Consecuentemente, aún y cuando se substituyesen todas las fuentes energéticas por metano, las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuirían por un máximo del 20%; si se considera el promedio de los modelos para el 2050, participación del 36% de metano en el sistema global, el efecto en la reducción de emisiones sería sólo una fracción de dicho valor máximo.

Adicionalmente, los relativamente bajos precios del metano aceleran la actividad económica, reducen los incentivos para invertir en tecnologías que ahorren energía y conducen a una expansión agregada del sistema energético total: un efecto de escala. Todos los modelos encuentran un consumo global total de energía primaria mayor (6% en promedio) para el escenario de suministro abundante en comparación con el de suministro convencional. Suponiendo que todo lo demás permanece contante, el mayor uso de energía produce un aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Todos los modelos encuentran que el efecto combinado de las dos fuerzas, substitución y efecto de escala, no resulta en una reducción discernible de emisiones y, en algunos casos, conduce a un aumento de las mismas.

Las emisiones que indican los modelos para todas las fuentes de energía se procesan en un modelo del clima que evalúa el cambio

climático inducido por gases de efecto invernadero conocido como MAGICC6, con el objeto de estimar el efecto combinado de dichos gases y los agentes que fuerzan el clima. Los resultados repiten los observados para las emisiones de CO<sub>2</sub> y consistentemente, los cambios en la temperatura asociados no se reducen discerniblemente en el escenario de suministro abundante (figuras 2c, 2d, 3b y 3c). Cuatro de los modelos que simulan endógenamente las emisiones fugitivas de metano encuentran aumentos en el forzamiento del clima para el escenario de suministro abundante debido al aumento de las emisiones fugitivas asociadas al aumento en el consumo; el modelo WITCH que especifica exógenamente las emisiones de metano, prácticamente no encuentra cambio alguno en el forzamiento (-0.3%). Nótese que de acuerdo a la figura 2d, el aumento promedio de temperatura en sólo cuatro décadas estará entre 2.0 y 2.5 °C; esta es una tasa de cambio increíblemente elevada, nunca antes observada en registro alguno, incluyendo los extensos registros geológicos.

El resultado central es que los aumentos en el suministro de metano en el mercado energético podrían cambiar substancialmente el sistema energético global durante las próximas cuatro décadas sin producir cambios conmensurables en las emisiones de gases de efecto invernadero o en el forzamiento del clima; este resultado se debe a: i) sustitución de todas las fuentes de energía, ii) precios bajos de energéticos aumentando la escala del sistema y iii) cambios en emisiones de otros gases de efecto invernadero distintos al CO<sub>2</sub>. Los resultados serían distintos si se implementasen políticas que impidiesen la sustitución global de fuentes de bajas emisiones por metano. Para explorar la sensibilidad de los modelos, se recalculan las emisiones suponiendo que el metano substituye solamente al carbón, en cuyo caso, cuatro modelos muestran reducciones en las emisiones de CO<sub>2</sub> entre 0.1 y 6% (tabla 2); el aumento del 7% del modelo BAEGEM está causado por una expansión energética global del 11%.

Si los cambios tecnológicos en el suministro de metano se extienden al caso del petróleo suponiendo avances tecnológicos similares, el análisis correspondiente no podría disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> o el forzamiento del clima ya que el cociente carbón a energía del petróleo es aproximadamente 35% más alto que el del metano.

El estudio termina aclarando que la implementación global de la tecnología para la extracción barata de metano –la invasora y destructiva fractura hidráulica– conlleva implicaciones no sólo para el

cambio climático sino también para muchas otras áreas preocupantes como la calidad del aire, la calidad del agua, la seguridad energética, el acceso a la tecnología moderna y el crecimiento económico.

*Para el segundo estudio* se usa un modelo de evaluación integral de ciclo de vida de la capacidad de generación instalada a lo largo de cada año por región, lo que permite contabilizar los cambios en la mezcla de energías usada para construir nuevas plantas de generación. Para el análisis se consideran dos escenarios, el convencional (continuar como si nada ocurriese) que se toma como base y el escenario de mitigación del cambio climático llamado mapa azul, ambos de la Agencia Internacional de Energía<sup>11</sup>.

En el escenario base, las emisiones de contaminantes del aire y del agua aumentan a más del doble mientras que las tecnologías de bajas emisiones (energía de fuentes renovables) introducidas en el escenario del mapa azul permiten la duplicación del suministro eléctrico a la vez que estabilizan o reducen la contaminación.

Los recursos materiales por unidad de generación necesarios para las tecnologías de bajas emisiones pueden ser mayores a los de la generación convencional mediante combustibles fósiles: entre 11 y 40 veces mayores cantidades de cobre para los sistemas fotovoltaicos y entre 6 y 14 más hierro para los aerogeneradores; sin embargo, sólo dos años de la producción anual actual de cobre y uno de hierro serán suficientes para construir el sistema energético de bajas emisiones capaz de proporcionar la electricidad global necesaria en el 2050.

La comparación detallada se hace en dos partes: primero, se compara la electricidad generada mediante energía de fuentes renovables con la generada mediante la quema de combustibles fósiles sin captura y almacenamiento de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para cuantificar los beneficios ambientales adicionales y las compensaciones relevantes para las decisiones de inversión a largo plazo en el sector energético eléctrico; dicha comparación refleja el desempeño de la tecnología de frontera en ambos sistemas, renovables y fósiles. Los impactos se evalúan en términos de las emisiones de gases de efecto invernadero, la eutrofización, las partículas suspendidas y la eco-toxicidad acuática resultante de los contaminantes emitidos a la atmósfera y al agua a través de todo el ciclo de vida de cada tecnología, También se analiza a través de dicho

---

<sup>11</sup> International Energy Agency (2010) Energy technology perspectives 2010: Scenarios and strategies to 2050 (Organisation for Economic Co-operation and Development/ International Energy Agency, Paris).

ciclo de vida, el uso de materiales clave --como aluminio, hierro, cobre y cemento—requerimientos de energía no renovable y área requerida para el funcionamiento de cada tecnología por unidad de electricidad producida. Éste es el primer análisis que se realiza bajo un modelo de inventario del ciclo de vida que incluye la retroalimentación de la cambiante mezcla de tecnologías para producir electricidad y los efectos de las mejoras tecnológicas en la producción de electricidad.

La segunda parte analiza los requerimientos potenciales de recursos y los impactos ambientales de las mismas tecnologías dentro del escenario de mitigación del cambio climático llamado mapa azul de la Agencia Internacional de Energía (AIE)<sup>10</sup> y se comparan con los del escenario base --sin mitigación alguna-- de la misma AIE. El modelo se basa en la instalación de nueva capacidad de generación y su uso en forma consistente con el mapa azul rastreando un elemento importante de la transición hacia sistemas de energía proveniente de fuentes renovables: el hecho de que la nueva capacidad --de fuentes renovables-- se instale usando la mezcla existente de tecnologías generadoras en cada momento del lapso analizado. Se cuantifican las cantidades de materiales requeridos y la presión ambiental asociada a la ruta del mapa azul, ambos a lo largo del tiempo, y se comparan con el escenario base; además, estos resultados se pueden comparar con los niveles de producción anual de los materiales requeridos.

Los resultados del análisis en cuanto a la comparación de tecnologías generadoras por unidad de electricidad generada, indican que en todas y cada una de las categorías de impacto analizadas, las tecnologías de fuentes renovables tienen impactos ambientales derivados de la contaminación por unidad de generación que son significativamente menores que los de las plantas generadoras que queman carbón e incorporan las mejores técnicas disponibles en el lapso estudiado (figura 4).

Las plantas de ciclo combinado de metano de última generación (con captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>), si bien pueden causar poca eutrofización, se encuentran entre las renovables y las de carbón en cuanto a las emisiones de gases invernadero y la ecotoxicidad (figuras 4D, 4A y 4C) y son las que causan mayor exposición a partículas suspendidas (figura 4B). La evaluación del ciclo de vida muestra que tanto la generación eólica como la solar pueden requerir mayor cantidad de algunos materiales --hierro, cobre, aluminio y cemento-- que la generación por carbón o gas, por unidad



generada (4G-J). Para las plantas de combustibles fósiles, los materiales constituyen una pequeña fracción del total de los impactos ambientales (menor al 1% para las plantas sin sistema de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> y 2% para las que si lo tienen); para las renovables, la contribución de los materiales a los impactos ambientales va del 20 al 50% siendo mayores las proporciones en las torres de energía solar concentrada y en la energía eólica en mar. Sin embargo, el impacto ambiental de los recursos materiales adicionales para las energías renovables es aún pequeño en términos absolutos comparado con el impacto ambiental de la producción de combustibles fósiles (4F).

Si bien el sistema de captura y almacenamiento del CO<sub>2</sub> reduce las emisiones de las plantas que queman combustibles fósiles, también hace que los indicadores de partículas suspendidas, ecotoxicidad y eutrofización aumenten durante el ciclo de vida por entre 5 y 60% (4B-D). Tanto la postcombustión como la pre-combustión del sistema de captura y almacenamiento requieren aproximadamente el doble de los materiales de una planta sin dicho sistema (4G-J). El proceso mismo de captura de carbono requiere energía adicional, requisito suplementario que causa una reducción en la eficiencia y explica el aumento tanto en contaminación como en recursos materiales requeridos por unidad generada.

El cambio de hábitat es una causa importante de la pérdida de biodiversidad y depende tanto de la localización de la planta como del área requerida por la tecnología. Una planta fotovoltaica, por ejemplo, puede instalarse en una área natural prístina con un alto impacto sobre el hábitat o en los techos de edificaciones con un impacto muy bajo. Como indicador del cambio potencial en el hábitat, se usa el área ocupada durante el ciclo de vida de cada tecnología (4E).

Los requisitos de área más altos están asociados a las tecnologías de generación hidráulica (presas), a las minas de carbón, las instalaciones de energía solar concentrada y las de fotovoltaica en suelo; los requisitos más bajos están asociados con las plantas de ciclo combinado de metano, los aerogeneradores y la fotovoltaica en techos –la cuál se considera tiene un requerimiento de área directo nulo debido a que dicha área ya se encuentra ocupada por la edificación en donde se instala. Para la tecnología fotovoltaica en suelo se considera el área necesaria para toda la planta debido a que los módulos o los espejos se colocan en una forma que no permite algún otro uso –

agrícola o similar– de las superficies no ocupadas; si únicamente se considerase el área físicamente ocupada por la instalación, los requerimientos disminuirían por un factor de entre 2 y 3 respecto de los valores en la figura 4E. Para el uso directo de suelo asociado con la generación eólica, se considera sólo el área ocupada por las turbinas, los caminos de acceso y las instalaciones relacionadas; no se incluyen los espacios entre turbinas pues éstos pueden ser utilizados para actividades agrícolas o, con algunas restricciones, para el aprovechamiento de ciertos ecosistemas. Si se considera un parque eólico completo, el uso de suelo será del orden de entre 50 y 200 metros cuadrados – año por cada Mega-Watt-hora instalado ( $m^2/a/MWh$ ), un valor más alto que el de otras tecnologías. El uso de área de mar por los aerogeneradores instalados fuera de la costa no se contabiliza.

El consumo acumulado de energía no renovable (fósil o nuclear) es relevante pues indica el insumo proveniente de una clase de recursos limitados. Las tecnologías actuales utilizadas para la producción de sistemas renovables consumen entre 0.1 y 0.25 kWh de energía no renovable por cada kWh de electricidad generada (4F). Esta situación es muy diferente para los sistemas propulsadas mediante combustibles fósiles, en cuyo caso el consumo acumulado de energía refleja la eficiencia de la producción y los costos energéticos derivados de la cadena de producción del combustible – extracción, refinación, transporte, *etc.*– y en su caso, del sistema de captura y almacenamiento de  $CO_2$ .

De los escenarios analizados, el mapa azul considera que la fracción compartida por las tecnologías renovables –solar, eólica e hidráulica– aumenta del 16.5% en el 2010 a un 39% en e 2050. La inversión inicial requerida en la capacidad de generación mediante renovables requeriría de una inversión combinada de materia prima de 1.5 Gt durante el lapso 2010-2050, lo cuál resulta ser mayor que el uso total de dichos materiales en el escenario base. Debido a la necesidad de instalar una nueva capacidad de generación mediante renovables, el requerimiento en materiales del mapa azul es mayor desde el inicio al de el escenario base, aún cuando los perfiles de generación sean inicialmente muy similares. La diferencia en la demanda material (figura 5G-J) muestra que la demanda inicial de hierro y cemento se encuentra asociada con la generación eólica y la solar concentrada, mientras que la de cobre lo hace con la tecnología fotovoltaica. El mapa azul tiene una demanda material inferior para las plantas de carbón sin captura y almacenamiento, la cuál se anula por la demanda

material adicional para las plantas que si incorporan dicho sistema. La contribución más importante para la demanda de materiales asociada con las plantas de carbón, es la requerida por la producción y el transporte de aproximadamente 500 kg de carbón necesarios por cada MWh de electricidad generada.

El mapa azul puede ser capaz de estabilizar las emisiones de partículas suspendidas y la eco-toxicidad para las tecnologías analizadas, aún y cuando se duplique la generación anual de electricidad entre el 2010 y el 2050 –pasando de 18 a 36 PWh<sup>12</sup>. En comparación con el año 2010, se alcanzarían tanto una reducción substancial de emisiones de gases invernadero (de 9.4 a 3.4 Gt de CO<sub>2</sub> eq, ó 63.8%), como una disminución en la eutrofización. En claro contraste, el escenario base conduciría a duplicar todos los indicadores relacionados con la contaminación aún y cuando se instalasen nuevas plantas de carbón con eficiencias muy altas. La diferencia en contaminación entre ambos escenarios crecería dramáticamente con el tiempo (figura 5), mientras que el material adicional requerido sólo aumentaría moderadamente; ambos como resultado de las crecientes ganancias generadas por la continua inversión en la capacidad de generación mediante renovables.

Para el escenario del mapa azul, el mayor requerimiento material por unidad de electricidad generada mediante renovables y un aumento proyectado en la demanda de energía, causan un aumento substancial en el uso de material. El requerimiento total de material por unidad de electricidad producida sería de entre 2.3 kg/MWh en comparación con 1.2 kg/MWh del escenario base (es decir, un 47.8% mayor). Dicho aumento es manejable en el contexto de los volúmenes de producción actuales, la larga vida del equipo y la habilidad para reciclar los metales. En comparación con los niveles de producción de materiales en el 2011, la construcción y operación del sistema eléctrico previsto para el 2050 en el mapa azul, requerirá menos del 20% del cemento, 90% del hierro, 150% del aluminio y 200% del cobre, relativo a las correspondientes cantidades producidas en el 2011.

La demanda de cobre podría ser problemática debido a la decreciente ley del mineral y causaría un aumento potencial en los costos ambientales de la producción de cobre.

---

<sup>12</sup> Un PetaWatt-hora son 10<sup>15</sup> Watts-hora ó 3.6 X 10<sup>18</sup> Joules de energía

El desplazamiento de los combustibles fósiles mediante el amplio despliegue de energía solar y eólica limitaría la contaminación en aire y agua (figura 5). Durante el lapso de estudio, 2010-2050, las emisiones de gases invernadero conectadas a las plantas investigadas son 62% inferiores en el mapa azul que las del escenario base, la abundancia de partículas suspendidas es 40% inferior, la eco-toxicidad en el agua dulce es casi 50% más baja y la eutrofización es 55% inferior. Además, tanto el consumo acumulado de energía como el uso de suelo se reducen.

El análisis realizado puede subestimar los beneficios adicionales en la mitigación del calentamiento global en el aspecto de reducción de la contaminación debido a que se supone que las plantas de combustibles fósiles de última generación son reemplazadas por equipo moderno de control de emisiones operado óptimamente; la situación real podría ser que el equipo de control de emisiones funcione sub-óptimamente o se encuentre ausente debido a la falta de reglamentación.

Es necesario recalcar que la evaluación realizada se basa en un modelo de ciclo de vida integrado, híbrido, y basado en escenarios con cobertura global a través de la integración del proceso del ciclo de vida en un modelo multi-regional que considera nueve regiones: China, India, países de Europa en la OCDE, Países de Norteamérica en la OCDE, países del Pacífico en la OCDE, las economías en transición, América Latina, Asia, y África y Medio Oriente. El modelo del ciclo de vida integrado, en el que las nuevas tecnologías se vuelven parte de la mezcla de medios que generan electricidad y donde sus ciclos de vida y los de las otras nuevas tecnologías quedan integrados, considera la interacción entre todas las diversas tecnologías. La adopción de un modelo famoso de capital permite la incorporación explícita de las varias etapas temporales del ciclo de vida de cada planta.

Este enfoque proporciona la habilidad de modelar el papel de varias tecnologías en una forma colectivamente exhaustiva y mutuamente excluyente; sólo a través de esta integración se pueden analizar correctamente las emisiones de ciclo de vida y el uso de recursos de los escenarios energéticos. Además, se pueden analizar las contribuciones debidas a los cambios en la mezcla tecnológica de generación y las mejoras en cada tecnología para la reducción de impactos ambientales.

El amplio empleo de fuentes variables como las energías solar y eólica genera una pregunta ¿cuáles son los costos ambientales adicionales para empatar el suministro con la demanda? Las medidas para la integración a la red de distribución relativas a suministro variable, tales como la operación en espera de plantas de combustibles fósiles, la expansión de dicha red, la demanda-respuesta y el almacenamiento de energía, requieren de recursos extra y causan impactos ambientales.

Los retos para balancear el suministro y la demanda no son severos en el mapa azul, donde las tecnologías eólica y solar cubren el 24% de la producción total de electricidad en el 2050. El balance puede volverse preocupante más adelante, a finales de siglo, cuando en el suministro se alcance una mayor proporción proveniente de fuentes renovables. En el escenario del mapa azul, el factor capacidad de las plantas de combustibles fósiles sin captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, se reduce de 40% en el 2007 a 19% en el 2050 para el metano y de 65 a 30% para carbón en el mismo lapso.

Un estudio integrador del Laboratorio Nacional de Energía Renovable<sup>13</sup> (NREL, por sus siglas en inglés), indica que el aumento en los ciclos de plantas fósiles por la integración de una fracción similar de renovables variables resulta en aumentos despreciables de emisiones de gases invernadero en comparación con un escenario sin la inclusión de renovables. La integración de las renovables puede también causar una disminución en las emisiones de óxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O) y un aumento en las emisiones de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) entre el 2 y el 5% del total de las emisiones evitadas por el uso de renovables. En otro estudio que investiga una disminución del 80% en las emisiones del estado de California<sup>14</sup>, los requisitos para el almacenamiento de electricidad se vuelven significativos a tasas mayores de penetración de las energías renovables.

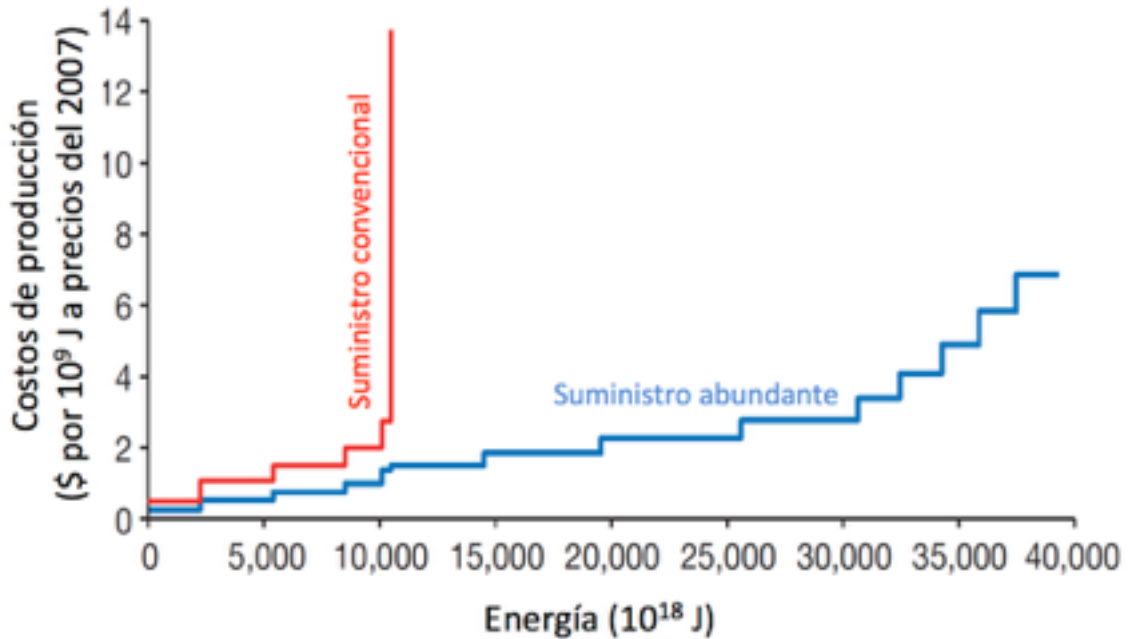
El estudio termina concluyendo que la implementación a gran escala de las energías eólica, solar fotovoltaica y solar concentrada tiene el potencial para reducir los impactos ambientales relacionados con la contaminación derivada de la generación de electricidad, impactos como la emisión de gases causantes del efecto invernadero, la eco-toxicidad del agua dulce, la eutrofización y la exposición a

---

<sup>13</sup> The Western Wind and Solar Integration Study Phase 2. D. Lew, et al., Technical Report NREL/TP-5500-55588 September 2013 <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/55588.pdf>

<sup>14</sup> The Technology Path to Deep Greenhouse Gas Emissions Cuts by 2050: The Pivotal Role of Electricity. James H. Williams et al. Science 335, 53 (2012); DOI: 10.1126/science.1208365

partículas suspendidas. Así mismo, la contaminación causada por los mayores requisitos de materiales de estas tecnologías es pequeña en comparación con las emisiones directas de las plantas generadoras que queman combustibles fósiles. Los requerimientos adicionales de materia prima son manejables, si bien no despreciables en comparación con las tasas actuales de producción de dichos materiales; el cobre es el único de los materiales analizados en el estudio, cuyo suministro podría ser un elemento de preocupación.



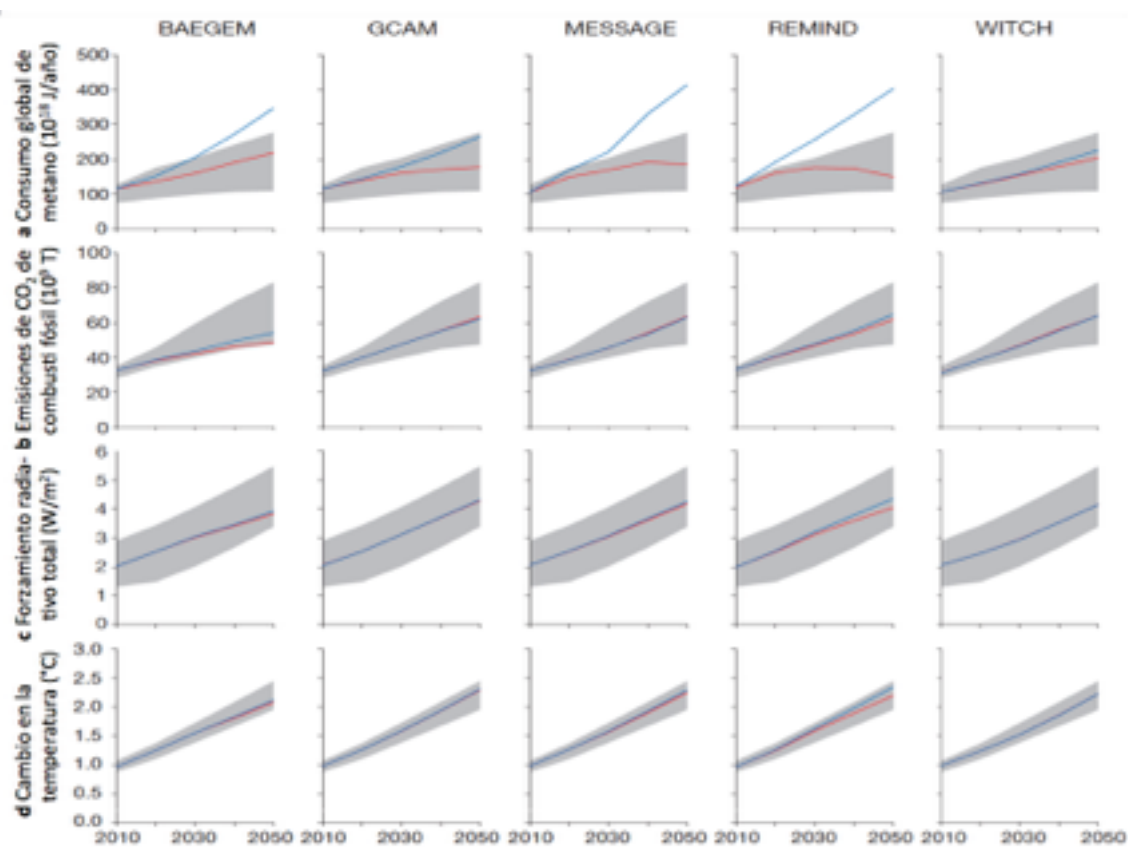
**Figura 1.** Suministro de metano al 2050. Datos del reporte sobre la Evaluación Global de Energía<sup>3</sup>. Los costos del suministro no son los precios actuales en el mercado, no incluyen impuestos ni regalías y mucho menos los costos ambientales o sociales asociados con la producción de metano.

Energía	BAEGEM	GCAM	MESSAGE	REMIND	WITCH
Solar FV	36	83	58	21	53
Eólica	37	21	41	13	40
Nuclear	29	15	17	0	7

**Tabla 1.** Reducción de costos (porcentaje) en las fuentes renovables de energía del 2010 al 2050 en el escenario de suministro abundante considerada en cada uno de los cinco modelos utilizados<sup>4-8</sup>.

Substitución	Suministro	BAEGEM	GCAM	MESSAGE	REMIND	WITCH
	Convencional	48.5	63.1	63.4	61.7	63.8
Estándar	Abundante	54.0	62.1	62.9	64.6	63.9
	Diferencias	5.5	-1.0	-0.5	2.9	0.1
	Convencional	48.5	63.1	63.4	61.7	63.8
Sólo carbón	Abundante	51.9	60.4	59.7	60.4	63.8
	Diferencias	3.4	-2.7	-3.7	-1.3	0.0

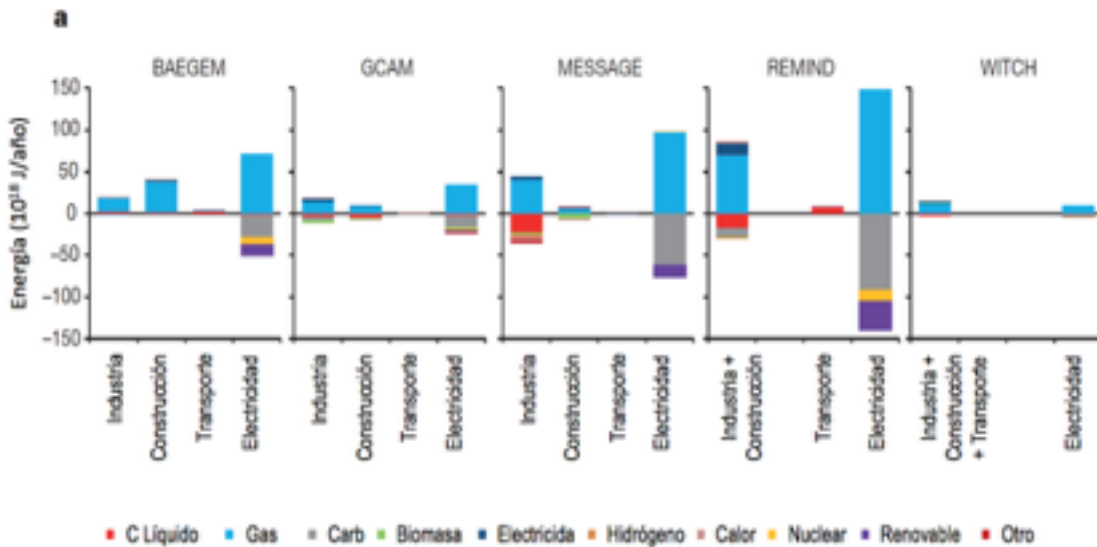
**Tabla 2.** Emisiones de CO<sub>2</sub> en el 2050 por combustibles fósiles e industria bajo las suposiciones estándares de mercado y bajo la suposición de sólo substituir el carbón; unidades 10<sup>9</sup> toneladas de CO<sub>2</sub>.



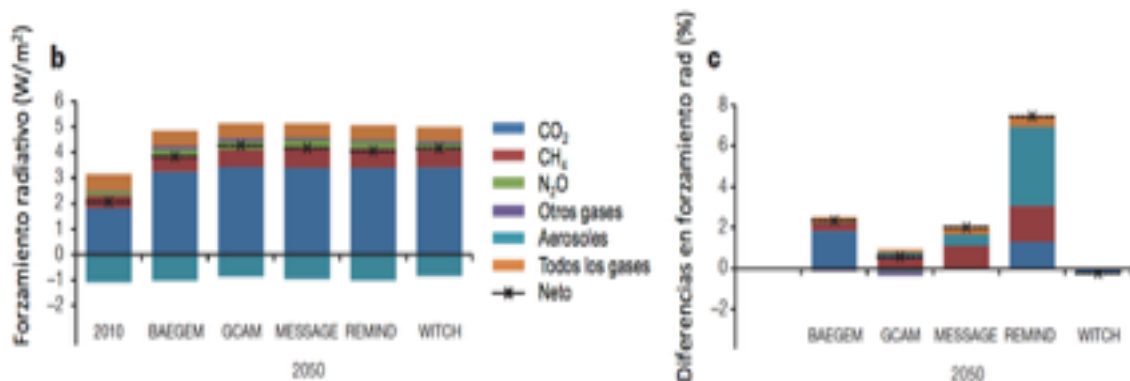
**Figura 2.** Comparación de los resultados de los modelos; la línea roja indica el suministro convencional, la azul indica el suministro abundante y la región sombreada muestra el rango de variación en la literatura<sup>15</sup>. **a** Consumo global de metano (la diferencia relativamente pequeña en WITCH, 11%, se vuelve considerablemente mucho mayor en la segunda mitad del siglo); **b** Emisiones de CO<sub>2</sub> por combustibles fósiles; **c** Forzamiento radiativo total; **d** Cambio en la temperatura superficial promedio (respecto del promedio preindustrial 1750-1849).

<sup>15</sup> Kriegler, E. et al. The role of technology for achieving climate policy objectives: overview of the EMF 27 study on global technology and climate policy strategies. *Clim. Change* **123**, 353–367 (2014). Calvin, K. et al. The role of Asia in mitigating climate change: results from the Asia modeling exercise. *Energy Econ.* **34**, S251–S260 (2012).

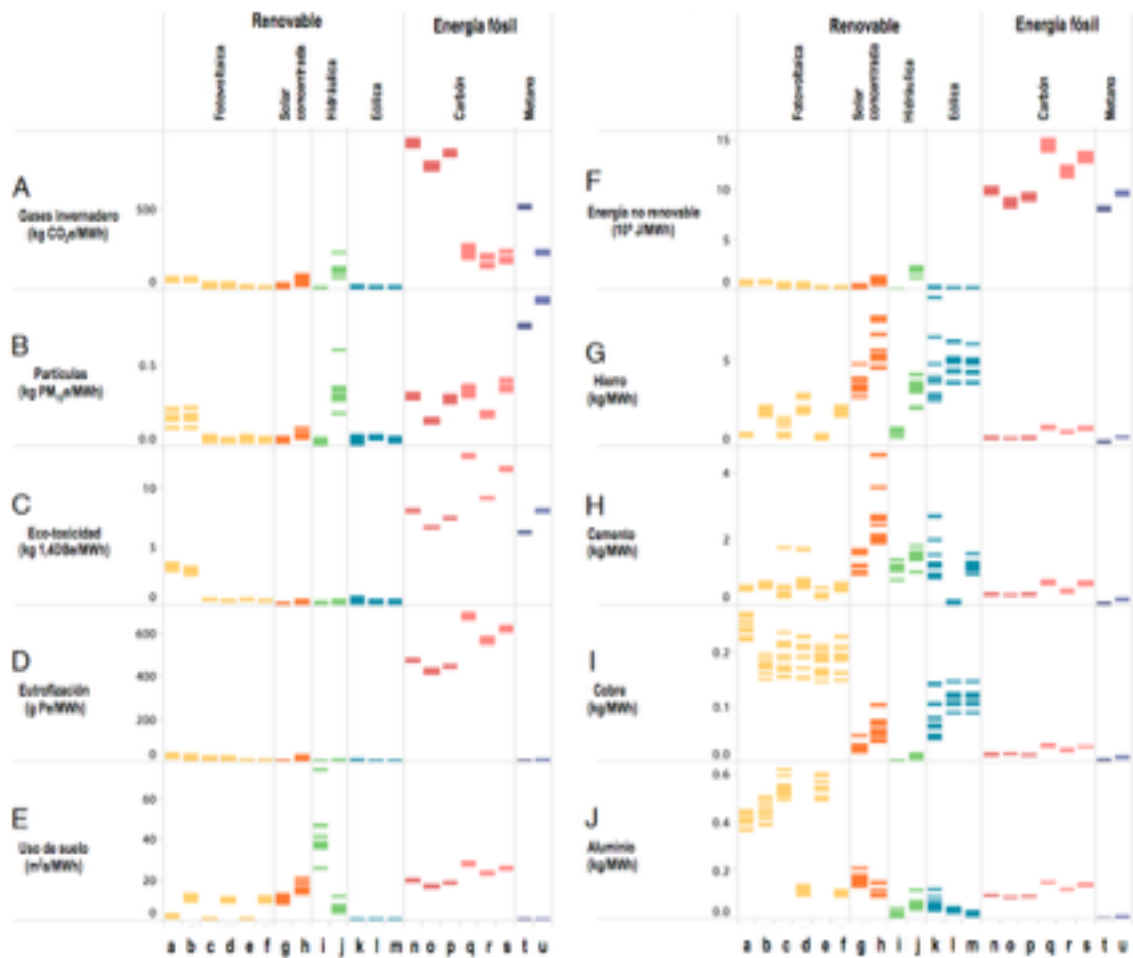




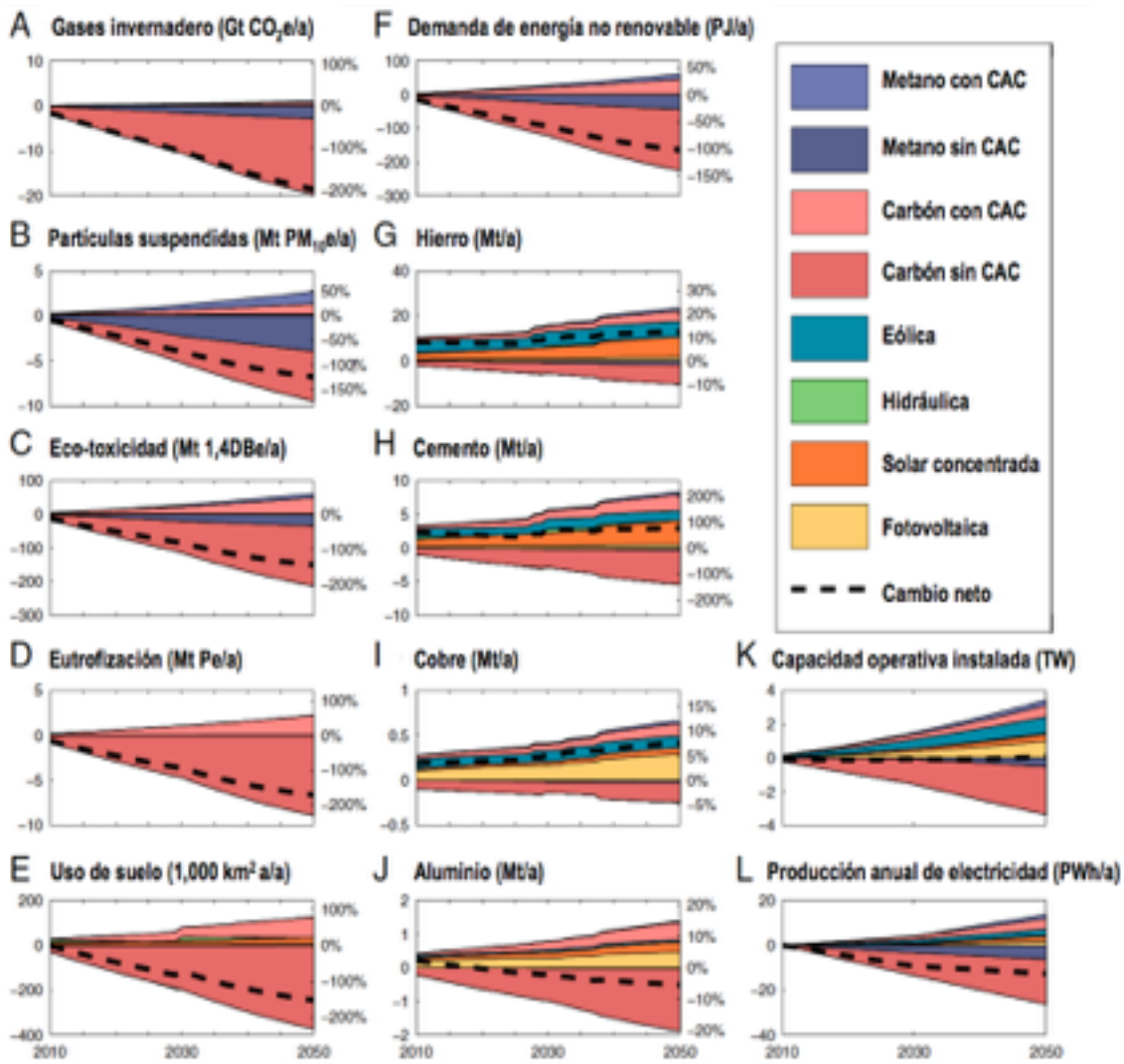
**Figura 3a.** Consumo global de energía en el 2050. Diferencias en uso de energía por sector y combustible, escenario de suministro abundante menos escenario de suministro convencional.



**Figura 3b, c.** Consumo global de energía en el 2050. Panel **b** Forzamiento radiativo en el escenario de suministro convencional; los datos del 2010 se muestran como comparación. Panel **c** Diferencias en forzamiento radiativo entre el escenario de suministro abundante y el de suministro convencional (diferencias promedio de 1% equivalen a 0.042 W/m<sup>2</sup>).



**Figura 4.** Comparación de las presiones ambientales del ciclo de vida y del uso de recursos por unidad de electricidad (MWh) generada mediante diversas tecnologías en cada una de las nueve regiones analizadas. La columna izquierda muestra cuatro indicadores de contaminación: (A) Gases de efecto invernadero, (B) Exposición a partículas materiales, (C) Eco-toxicidad en el agua dulce, (D) Eutrofización del agua dulce y (E) Uso de suelo. La columna derecha indica la demanda de energía primaria no renovable (F), y la demanda de materiales (G-J). Las letras en la parte inferior indican la tecnología evaluada: (a) Fotovoltaica de silicio policristalino en techo, (b) misma en suelo, (c) fotovoltaica de seleniuro de Cobre, indio y galio en techo, (d) la misma en suelo, (e) fotovoltaica de telurio de cadmio en techo, (f) misma en suelo, (g) solar concentrada parabólica, (h) misma en torre, (i) hidráulica 1, (j) hidráulica 2, (k) Eólica en tierra, (l) misma en mar sobre acero, (m) misma sobre concreto, (n y q) carbón pulverizado subcrítico sin y con CAC, (o y r) ciclo combinado de gasificación integrada y carbón sin y con CAC, (p y s) carbón pulverizado supercrítico sin y con CAC, (t y u) ciclo combinado de metano sin y con CAC. CAC son las siglas de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.



**Figura 5.** Impactos ambientales y recursos requeridos para la generación de electricidad siguiendo el escenario mapa azul en lugar del escenario base (ambos de la Agencia Internacional de Energía). Los resultados muestran una reducción de los impactos ambientales asociados con la contaminación aún cuando la generación de electricidad se duplica; también muestran un aumento substancial en el consumo de algunos materiales, especialmente de cobre. Los ejes a la izquierda muestran valores absolutos y los de la derecha muestran las variaciones entre dichos valores y los niveles base en el 2007 (porcentajes). Nótese que el cambio neto puede alcanzar valores por debajo de -100% cuando la diferencia entre el escenario base y el mapa azul es mayor a los niveles base del 2007.