

## 8.4 El mayor cambio climático de la historia de la humanidad

El pico de los combustibles fósiles junto al de varios elementos va a conllevar el colapso de la economía global. El calentamiento global será un tercer factor que empujará en el mismo sentido. Pero el aumento de la temperatura tendrá repercusiones mucho más profundas que las socioeconómicas. La temperatura superficial del mar y de la tierra subió 0,99°C entre 1880 y 2016 (NASA, 2017)<sup>599</sup>. Un incremento de 1°C puede parecer muy poco, considerando que entre el día y la noche o a lo largo de las estaciones las variaciones de temperatura son mucho mayores. Sin embargo, las implicaciones para el equilibrio climático de esta “pequeña” variación son muy grandes. Por lo tanto, el símil más apropiado sería lo que le ocurre al cuerpo humano cuando su temperatura se incrementa de 37°C a 38°C. El cambio climático está desequilibrando los ecosistemas de manera profunda, cambiando radicalmente la distribución, movilidad, abundancia e interacciones de distintos seres vivos<sup>600</sup> (IPCC, 2014a). Además, este proceso ocurre en un planeta marcado por el Capitaloceno<sup>601</sup> y que por lo tanto tiene mucha menos resiliencia, menos capacidad de adaptación a los cambios. En conclusión, para la vida, incluyendo la humana, este es un problema mucho más grave que la menor disponibilidad de combustibles fósiles y minerales. Aunque, en realidad el cambio climático también es un problema energético y material, ya que supone una disminución para los seres humanos en la disponibilidad de estos recursos (alimentos, agua, tierra fértil, regeneración de ecosistemas, reciclaje de materiales)<sup>602</sup>.

Los cambios climáticos han sido habituales en la historia de la Tierra. Desde hace un millón de años, los periodos glaciares han durado unos 100.000 años y los interglaciares unos 10.000-15.000 años. Los cambios han estado condicionados por la excentricidad, la inclinación axial y la precesión de la órbita terrestre, que han producido variaciones en la distribución geográfica y estacional de la radiación solar, lo que ha generado pequeños cambios en la temperatura. Después, el sistema-Tierra ha amplificado estas variaciones: i) El deshielo ha destapado superficies más oscuras que absorben más radiación y, con ello, se ha incrementado el calentamiento planetario. ii) El suelo y el océano han liberado más CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, cuyas propiedades como GEI han incrementado la temperatura global.

Sin embargo, el cambio climático en curso no está regido por los cambios en la órbita terrestre, sino por las emisiones humanas de GEI<sup>603</sup> (figura 8.17a), que están disparando los dos bucles de realimentación positiva descritos anteriormente y varios

599 En realidad, el aumento debe ser superior respecto a una fecha realmente preindustrial (Puig Vilar, 2016a).

600 El IPCC (2007) estima que, si el calentamiento global supera los 1,6°C respecto a las etapas preindustriales, se perderán el 9-21% de las especies. Si el incremento de temperatura es de 2,9°C desaparecerán el 21-52%.

601 Apartado 6.13.

602 Apartados 1.2, 2.1 y 3.1.

603 Los GEI liberados por los seres humanos son: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ozono (O<sub>3</sub>), clorofluorocarbonados (CFC) y otros (PFC, SF<sub>6</sub>).

más que explicaremos. Las concentraciones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O han subido hasta niveles sin precedentes en, por lo menos, los últimos 800.000 años<sup>604</sup> (Hansen y col., 2011), el incremento es cada vez más rápido<sup>605</sup> y el ritmo de aumento de la temperatura también es novedoso<sup>606</sup>.

Entre los GEI destaca el CO<sub>2</sub><sup>607</sup> (figura 8.17b). Esto se debe a que, aunque el resto de GEI tienen un potencial de efecto invernadero mayor que el CO<sub>2</sub><sup>608</sup>, el tiempo de vida media de este último en la atmósfera es mucho más largo<sup>609</sup>, se lleva emitiendo más tiempo<sup>610</sup> y en mayores cantidades. Además, variaciones en la actividad solar o en la volcánica, que tienen efectos sobre el clima a corto plazo, no producen las consecuencias duraderas del CO<sub>2</sub> (Hansen y col., 2011).

El CO<sub>2</sub> proviene mayoritariamente de la quema de combustibles fósiles y de la desaparición de bosques desde mediados del siglo XX, fruto sobre todo de la extensión agraria. El incremento del CH<sub>4</sub> es causado fundamentalmente por el aumento del ganado en los últimos 50 años y del uso del gas natural, aunque también contribuyen la expansión de los arrozales y la degradación de la materia orgánica en los vertederos<sup>611</sup>. La emisión de N<sub>2</sub>O corresponde principalmente a la utilización de abonos químicos en la agricultura industrializada. En resumen, detrás del cambio climático están la utilización masiva de los combustibles fósiles desde la Revolución Industrial, pero especialmente tras la II Guerra Mundial y, en menor medida, la agricultura industrial<sup>612</sup> (figura 8.17c). Ambos, elementos centrales del crecimiento capitalista (figura 8.17d).

604 En 2013, la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera alcanzó el 142% del nivel de la era preindustrial (antes de 1750), la de CH<sub>4</sub> el 253% y la de N<sub>2</sub>O el 121%. En 2014, la concentración de CO<sub>2</sub> en abril sobrepasó las 400 ppm en el hemisferio norte (OMM, 2014a, 2014b). En los últimos 650.000 años, los niveles de CO<sub>2</sub> atmosférico han oscilado entre 180 y 300 ppm (IPCC, 2007).

605 La tasa de crecimiento de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la década de 1960 era de 0,7 ppm/año, en la de 2000 de 2,1 ppm/año y en 2013 era de 2,8 ppm/año (Bawden, 2013). Después, ha seguido creciendo a pesar de los datos contradictorios (Martín-Sosa y González Reyes, 2017).

606 Durante los últimos periodos de calentamiento, la temperatura media necesitaba 5.000 años para subir 4-7°C. En el último siglo, ha aumentado 10 veces más rápido (Monbiot, 2015).

607 La responsabilidad del CO<sub>2</sub> es en torno al 55% (IPCC, 2013).

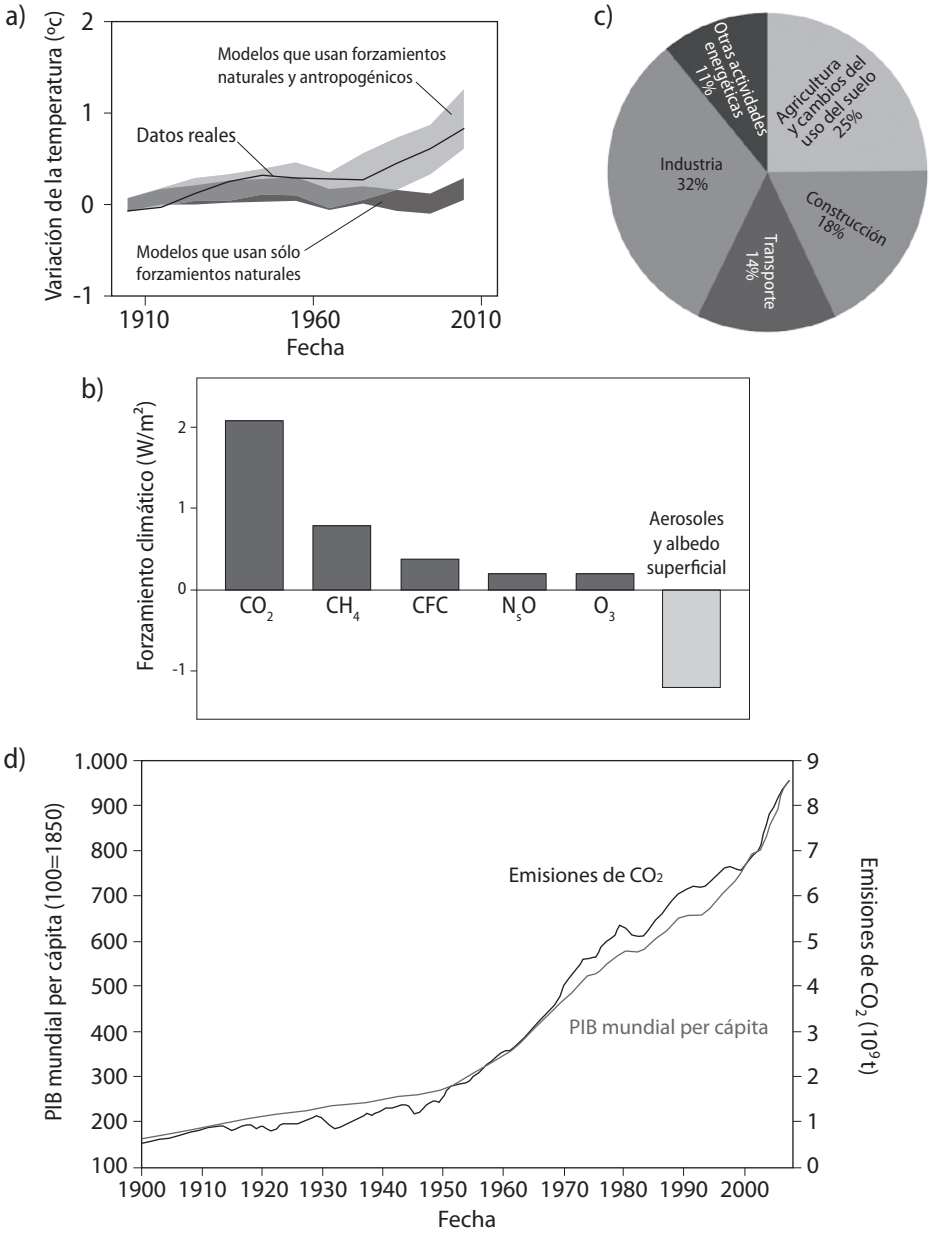
608 La eficacia por molécula del CH<sub>4</sub> para generar efecto invernadero frente al CO<sub>2</sub> es 34 veces mayor a los 100 años y 84 veces a los 20. El N<sub>2</sub>O es más de 200 veces más activo que el CO<sub>2</sub>, y los CFC lo son unas 14.000 veces (IPCC, 1990, 2013).

609 El CO<sub>2</sub> puede estar siglos, mientras que la permanencia en la atmósfera de CH<sub>4</sub>, CFC y N<sub>2</sub>O es de 10-100 años (Brooke, 2014).

610 La emisión del resto de GEI se activó en la segunda mitad del siglo XX.

611 El 60,8% de las emisiones anuales se deben a actividades humanas. De las emisiones humanas, el 34% proviene de la extracción y distribución de combustibles fósiles, el 33% de la ganadería, el 18% de la gestión de basura y aguas residuales, y el 9% de los arrozales (Saunio y col., 2016).

612 Hasta 1960, la principal fuente de GEI fue el sector agropecuario (cultivo de arroz en China, deforestación en Norteamérica y agricultura en los trópicos), pero desde entonces el primer lugar lo ocupa la quema industrial de combustibles fósiles (Brooke, 2014).



**Figura 8.17** a) Correlación entre la temperatura y los modelos climáticos incluyendo las contribuciones antropogénicas al calentamiento global, fundamentalmente la emisión de GEI, y sin hacerlo (IPCC, 2013). b) Forzamientos climáticos efectivos entre 1750 y 2016 (Hansen y col., 2017). c) Emisiones de GEI por sectores en el mundo en 2010 (IPCC, 2014b). d) Emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> y PIB mundial per cápita<sup>613</sup> (Husson, 2013a).

613 Para profundizar en en esta correlación se puede consultar Martín-Sosa y González Reyes (2017).

El cambio climático es una “conquista” del Centro, liderado claramente por EEUU, y a la que se han incorporado las regiones emergentes, con China a la cabeza<sup>614</sup>. Un 70-80% del cambio climático es atribuible históricamente a los Estados centrales<sup>615</sup>. Además, entre 2002 y 2008, un 48% de las emisiones chinas fueron por la producción de bienes para la exportación<sup>616</sup> (Lohmann y Hildyard, 2014). Todo esto con fuertes diferencias en cuanto a la responsabilidad como causantes de este fenómeno dentro de cada sociedad, pues la utilización del flujo energético no es la misma según las clases sociales. Si la medición, en lugar de por Estados, se realiza por compañías, las petroleras (y las gasistas y las dedicadas a la minería del carbón) son las principales responsables<sup>617</sup>.

Sin embargo, hay algunas actividades humanas que están amortiguando el calentamiento antropogénico. Los aerosoles y su interacción con las nubes han compensado una parte del aumento de temperatura esperable por las emisiones de GEI<sup>618</sup> (IPCC, 2013) (figura 8.17b). Entre ellos, se encuentran los nitratos y sulfatos formados a partir de la quema de carbón. También están otros contaminantes atmosféricos. De este modo, el calentamiento global se ve atemperado en parte por el combustible más emisor de CO<sub>2</sub> por unidad energética (el carbón) y por la contaminación atmosférica. Pero otros aerosoles aceleran el calentamiento global, como es el caso de la carbonilla orgánica o mineral. El tiempo de permanencia en la atmósfera de los aerosoles es pequeño (3-7 días). Este efecto de apantallamiento podría ocultar un alza de la temperatura de 0,9-3,0°C (Schellnhuber, 2008; Puig Vilar, 2009, 2012a; Hansen y col., 2013).

## Los bucles de realimentación positivos y sus implicaciones

Una de las claves fundamentales del sistema climático es su complejidad, lo que hace que se comporte de forma no lineal. Esta no linealidad se basa por una parte en los procesos de realimentación positiva, en los que los efectos amplifican las causas una vez pasado un determinado umbral. Por ejemplo, los sumideros de carbono pasan a ser emisores netos, como lo son ya algunas zonas del mar Báltico o la agricultura. Por otra parte, el sistema climático contiene elementos que retardan las variaciones climáticas. Es el caso de los océanos o las regiones heladas, que absorben una parte sustancial del aumento de la energía en la Tierra como consecuencia del incremento del efecto invernadero. También que el CO<sub>2</sub> emitido tarda 25-35 años

614 1/2 del incremento de GEI entre 2002 y 2012 ha tenido lugar en China (BP, 2013).

615 Las emisiones históricas a lo largo del siglo XX de EEUU (93 Gt de CO<sub>2</sub>eq) triplican las de China y las de Europa Occidental (74 Gt de CO<sub>2</sub>eq) las duplican con creces (Boden y col., 2011).

616 Casi un 25% de las emisiones de GEI relacionadas con bienes consumidos en los países centrales se han producido en los periféricos o semiperiféricos, especialmente en China. Este desplazamiento de las emisiones va en alza (Davis y Caldeira, 2010; Peters y col., 2011).

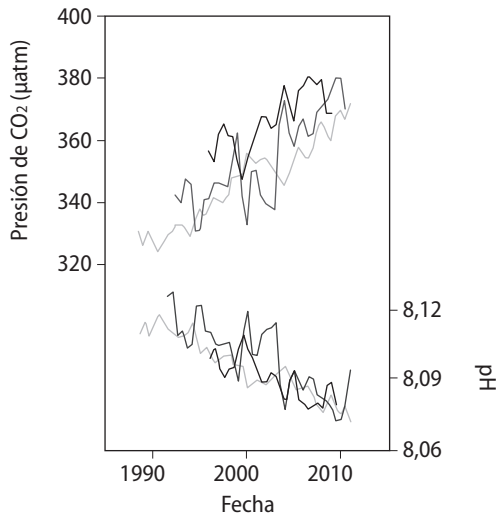
617 <sup>20</sup> empresas son responsables del 29,5% del CO<sub>2</sub> y del CH<sub>4</sub> emitido entre 1751 y 2010. En cabeza están: Chevron (3,5%), ExxonMobil (3,2%), Saudi Aramco (3,2%), BP (2,5%), Gazprom (2,2%) y Royal Dutch/Shell (2,1%) (Heede, 2013).

618 Los aerosoles reducen el calentamiento global atrayendo moléculas de agua, aumentando las precipitaciones y reflejando la radiación solar.

hasta que tiene su máximo potencial de efecto invernadero (Whittingstall, 2013). De este modo, la temperatura actual corresponde a la composición de la atmósfera de hace 5-50 años (Budzianowski, 2011).

### ***Acidificación de los océanos y pérdida de su potencial amortiguador***

El océano ha disuelto alrededor del 30% del CO<sub>2</sub> emitido, lo que ha causado su acidificación. De este modo, el pH de la superficie oceánica ha bajado desde el inicio de la Revolución Industrial<sup>619</sup> (figura 8.18) y seguirá haciéndolo (IPCC, 2013).



**Figura 8.18** Concentración de CO<sub>2</sub> en la superficie oceánica y pH (IPCC, 2013).

Los principales afectados por la acidificación son los arrecifes de coral<sup>620</sup> y el fitoplancton<sup>621</sup>, que está en la base de la cadena trófica marina. Las consecuencias van más allá de la vida marina: al reducirse la fijación de CO<sub>2</sub> que realizan el plancton y distintos seres vivos en forma de conchas o corales, se acelera el calentamiento global.

Pero la absorción marina de CO<sub>2</sub> atmosférico no será indefinida: conforme el océano se calienta disminuirá la solubilidad del CO<sub>2</sub> y podría empezar a liberarlo

619 El ritmo actual de acidificación es muy superior al de los últimos 20 millones de años (Folke, 2013; Singer, 2013).

620 Al aumentar la solubilidad del carbonato cálcico en agua, los crustáceos y corales tienen más difícil construir sus estructuras sólidas. Además, los arrecifes de coral también se ven afectados por el incremento de la temperatura, que hace que las microalgas que les dan color y que son básicas para su sostén, los abandonen. Como resultado de todo ello, los corales están experimentando un retroceso del 1-2% anual, con una frecuencia de los eventos de blanqueamiento que se ha multiplicado por 5 entre 1980 y 2016. Unos 500 millones de personas dependen de las funciones que proporcionan los arrecifes coralinos (Hansen y col., 2013; Hughes y col., 2018).

621 Su concentración desciende desde 1899 a un ritmo del 1%/año (Boyce y col., 2010), un 40% desde 1950 (Butler y Wuethner, 2012).

a la atmósfera activando un bucle de realimentación positivo (Hansen y col., 2013). De hecho, su capacidad de retirar CO<sub>2</sub> de la atmósfera está disminuyendo<sup>622</sup> (McKinley y col., 2011; Pérez y col., 2013).

Por otro lado, más del 60% del incremento de energía neta de la Tierra como consecuencia del aumento del efecto invernadero entre 1971 y 2010 ha sido absorbido por la capa superior de los océanos (hasta 700 m de profundidad) y un 30% en las capas profundas (IPCC, 2013). De este modo, hasta ahora el océano ha servido como un amortiguador del cambio climático debido a su gran inercia térmica (cuesta mucho calentarlo): ha hecho que la temperatura de la atmósfera haya aumentado menos de lo que debería haberlo hecho atendiendo a la concentración de GEI existentes<sup>623</sup>. Este potencial amortiguador se irá terminando.

### ***Incremento del nivel del mar y de los fenómenos meteorológicos extremos***

El aumento del nivel del mar desde mediados del siglo XIX ha sido mayor que la media durante los 2 milenios anteriores<sup>624</sup> y no se detendrá en el siglo XXI. Esto está siendo consecuencia sobre todo de la expansión térmica de los océanos y, en segundo lugar, del deshielo de los glaciares, especialmente de Groenlandia (IPCC, 2013). Si se fundiesen la mitad de los glaciares de Groenlandia y de la Antártida occidental, el nivel del mar subiría 6-7 m (Henson, 2006; Larios, 2008; Bardi, 2013b). Si las masas de hielo en tierra se fundiesen en su totalidad, el aumento llegaría a superar los 75-80 m (Hansen y col., 2008; Bardi, 2013b).

Más de 400 millones de personas viven en costas a menos de 5 m sobre el nivel del mar y más de 1.000 millones a menos de 25 m<sup>625</sup> (Tol y col., 2006). Pero como el aumento del nivel del mar no solo implica la desaparición de tierra, sino también la salinización de acuíferos por intrusión salina, las implicaciones para el ser humano serán todavía mayores.

Además de la expansión térmica del océano, el calentamiento puede conllevar el colapso de los ecosistemas marinos: por encima de cierto nivel de temperatura oceánica habría una extinción masiva de algas. Esto activaría otro bucle de realimentación positivo, ya que las algas fijan importantes cantidades de CO<sub>2</sub> y crean nubes blancas que reflejan la luz del sol.

622 Por ejemplo, el océano Antártico absorbe menos CO<sub>2</sub> de la atmósfera desde 1981, pese a que su presencia en el aire ha aumentado un 40% (Larios, 2008).

623 Si no fuese porque el mar y los glaciares están absorbiendo una parte importante del calor, el incremento de la temperatura del planeta ya habría superado los 2°C (Hansen y col., 2008).

624 En el periodo 1993-2010, el ritmo de incremento fue de 2,8±0,5 mm/año (IPCC, 2013). El nivel del mar ha subido 22,6 cm entre 1880 y 2013 (NASA, 2015).

625 El país potencialmente más afectado es China. Después estarían India y Bangladesh (Brown, 2012). Los deltas de los ríos (Níger, Nilo, Misisipi, Ganges, Yangtsé, Mekong) son zonas donde la población es especialmente vulnerable. En contraposición, en lugares como Groenlandia la tierra ascenderá sobre el nivel del mar como consecuencia del deshielo de los glaciares y la reducción consiguiente de la presión sobre el suelo, entre otros factores (Rivera, 2013b).

En las últimas décadas, los fenómenos meteorológicos extremos han aumentado<sup>626</sup>, con lo que se ha incrementado la mortalidad asociada<sup>627</sup>. Nos referimos a:

- i). Episodios de temperaturas extremas que son cada vez más frecuentes (Hansen y col., 2011, 2012, 2013; IPCC, 2013).
- ii). Ciclones, tifones y huracanes tropicales más intensos (IPCC, 2013). Para la formación de un huracán hace falta que la temperatura de la superficie del agua sea mayor de 26,5°C, que exista un nivel muy alto de humedad y que esta se enfríe rápidamente al ascender. El calentamiento global incide claramente en los dos primeros factores y es posible que también en el tercero por una mayor diferencia entre la temperatura superficial y la de las zonas altas de la troposfera (Hannam, 2013). Las consecuencias de los huracanes exceden las capacidades incluso de países como EEUU<sup>628</sup> y son devastadores en las Periferias, como mostró el tifón Haiyan en Filipinas (2013).
- iii). Desplazamiento de los ciclones hacia los polos<sup>629</sup> como consecuencia de que se reproducen las condiciones en las que son posibles, sobre todo el aumento de la temperatura del agua. Esto implica que en las zonas donde antes se producían van teniendo menos incidencia (y aparecen otros problemas como el acceso al agua) (Kossin y col., 2014).
- iv). Cambio en el patrón de precipitaciones. Al haber más evaporación del agua como consecuencia del incremento en las temperaturas, llueve más en algunas zonas<sup>630</sup>. En general, en las regiones más húmedas están creciendo las precipitaciones y en las más secas, disminuyendo. También aumentan las diferencias entre las estaciones secas y húmedas (IPCC, 2013, 2014a). Se están expandiendo las regiones secas y cálidas subtropicales a medida que se ensancha el cinturón atmosférico tropical<sup>631</sup>, lo que afecta especialmente al sur de EEUU, el Mediterráneo, Sudamérica (sobre todo el altiplano), el norte

626 Han pasado a producirse cada 20 años en lugar de cada 100 (Rivera, 2013a). La frecuencia de los desastres naturales ha aumentado un 42% desde la década de 1980 y la proporción de aquellos que están relacionados con el clima ha aumentado un 50-82% (de Sherbinin y col., 2011). Más de 200 millones de personas se ven expuestas cada año a desastres naturales (Castillo, 2011).

627 La mortalidad en 2001-2010 por fenómenos meteorológicos extremos aumentó un 20% respecto a la década anterior. El incremento fue provocado principalmente por la ola de calor que vivió Europa en 2003, donde murieron 66.000 personas, y la ola de calor en Rusia de 2010, que estuvo detrás del fallecimiento de 55.000 personas (OMM, 2013).

628 Diez días después del huracán Sandy (2012), más de 730.000 personas seguían sin electricidad en Nueva York y Nueva Jersey. Cerca de 50.000 se encontraban todavía desalojadas y cientos de miles dependían de los repartos de agua, comida y gasolina (Petras, 2012). Las consecuencias del huracán Katrina (2005) fueron todavía más devastadoras.

629 La actividad de los ciclones tropicales se está desplazando desde la banda tropical hacia los polos 53 km hacia el norte y 62 km hacia el sur cada década (Kossin y col., 2014).

630 El aumento de las precipitaciones podría ser de un 7% por cada grado de incremento de las temperaturas (Henson, 2006).

631 El cinturón atmosférico tropical se ha ensanchado 225-530 km (sumando el efecto en ambos hemisferios) desde 1979 (Kossin y col., 2014).

de China, el sur de África y el sur de Australia<sup>632</sup> (Hansen y col., 2013; Kossin y col., 2014). Además, aumentaría la fuerza de las tormentas (Hansen y col., 2016). Todo ello incrementa la pérdida de biodiversidad.

- v). Un Niño y una Niña más fuertes como consecuencia de un mayor calentamiento del Atlántico Centro y Sur, y el Pacífico, mientras se enfría el Atlántico alrededor del Polo Norte como consecuencia del deshielo (de Castro, 2015e).

La subida del nivel del mar, los fenómenos meteorológicos extremos y el cambio de patrones de precipitación son los fenómenos climáticos que están incidiendo más en el aumento de las migraciones por causas ambientales<sup>633</sup>. Aunque, nunca es posible aislar un único factor como causa de las migraciones, los climáticos están siendo cada vez más influyentes. Además, Hasiang y col. (2013) y Wallance (2009) muestran la correlación entre cambios climáticos y conflictos, no solo en el pasado prefosilista<sup>634</sup>, sino también durante todo el siglo XX y el XXI<sup>635</sup>.

### ***Deshielo de glaciares y de aguas marinas***

Los glaciares se están fundiendo cada vez más rápido (Xu y col., 2009; Csatho y col., 2014; Hansen y col., 2015; Kjeldsen y col., 2015; Wouters y col., 2015). Una de las causas fundamentales de esta aceleración es que en Groenlandia y la Antártida el agua que se descongela en superficie cae por grietas a la base del glaciar formando una película sobre la que flota el hielo, con lo que se acelera su migración hacia el mar y hacia zonas de menor altura<sup>636</sup>. Otra, es que las aguas marinas más cálidas y el mayor nivel del mar aceleran la fusión de los glaciares costeros. El hielo antártico ha podido iniciar ya su colapso irreversible (Joughin y col., 2014; Rignot y col., 2014).

La pérdida de hielo también se está produciendo en la gran superficie marina helada ártica<sup>637</sup> (figura 8.19) empujada, entre otros factores, por el mayor aumento de la temperatura en el Polo Norte que en otros lugares del globo. Probablemente, el deshielo de esta extensión ya ha pasado el umbral de no retorno y, antes de 2020, habrá septiembrés en los que se funda todo el hielo ártico, algo que no ha ocurrido en el último millón de años<sup>638</sup> (Jamail, 2014b).

632 En 2015, se registraron 32 sequías importantes, más del doble de la media de la década anterior (EFAverde, 2016).

633 El éxodo de migrantes ambientales en la década de 2000 fue de 25-50 millones (Castillo, 2011), más que el de refugiadas/os de guerra desde 1999 (Tanuro, 2011). Muchas de estas personas nunca volvieron. Por ejemplo, tras el huracán Katrina en 2005 1/3 de la población no regresó a Nueva Orleans (Gemenne, 2015).

634 Apartado 3.10.

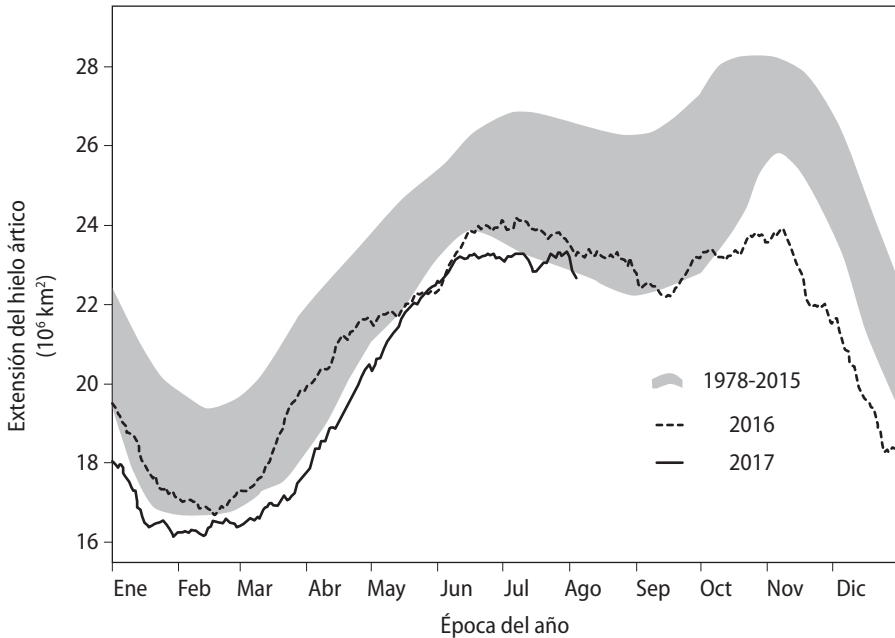
635 Algunos ejemplos de conflictos en los que está influyendo el calentamiento global a través de un incremento de las sequías son el de Sudán o el de Siria (Ecologistas en Acción, 2013b).

636 Por ejemplo, el glaciar Kangerdlugssuaq lleva el 4% del hielo de Groenlandia. En 2001 avanzaba a 5 km/año y en 2005 a 14 km/año (Henson, 2006).

637 El hielo ártico disminuyó en el periodo 1979-2012 a un ritmo del 3,5-4,1%/década (y el descenso fue mucho mayor en el mínimo de hielo en verano) (IPCC, 2013).

638 El IPCC (2013) retrasa la fecha a después de 2050.





**Figura 8.19 Extensión del hielo ártico** (ArctischePinguin, 2017).

El deshielo de los glaciares de montaña está formando grandes lagos en las zonas altas, que en muchos casos revientan produciendo inundaciones en lugares como los Andes y el Himalaya. Una vez completado el deshielo, las reservas de agua que suponían los glaciares para las temporadas secas desaparecen, por lo que se incrementan los problemas de acceso a agua potable para miles de millones de personas. Por otra parte, la desaparición del hielo ártico pone en peligro hábitats cruciales para las algas y el krill, que son la base alimentaria de animales de gran tamaño (Sohns y Crowder, 2013).

Este proceso también afecta a la circulación termohalina<sup>639</sup>. La pérdida de un gran volumen de hielo ártico provocaría que descendiese la salinidad del mar, disminuyendo su densidad. A esto se sumaría el calentamiento de las capas intermedias oceánicas. Como consecuencia de ambos fenómenos, se limitaría la formación de las aguas frías y densas en el Atlántico Norte y la circulación termohalina se ralentizaría<sup>640</sup>. Esto alteraría el clima (*grosso modo*, bajaría temporalmente la temperatura

639 La circulación termohalina es fundamental en el clima terrestre. Es un flujo de agua marina relativamente superficial que se calienta en el Pacífico, el Índico y el Atlántico tropical y se enfría en el Atlántico norte. En la zona ártica, el viento, al provocar la evaporación del agua, contribuye a su enfriamiento. A la vez, esto incrementa la concentración salina. La formación del hielo ártico también aumenta la concentración salina al "retirar" agua del mar. De este modo, el agua, más fría y más salina, aumenta su densidad y se hunde.

640 Aunque el IPCC (2013) sostiene que es improbable que se detenga, los resultados de Hansen y col. (2016) sostienen que esto es posible.

planetaria alrededor del final del siglo, especialmente cerca de los polos). También reduciría el secuestro de  $\text{CO}_2$  por los océanos del hemisferio sur y aumentaría el deshielo. Ambos procesos suponen una realimentación del cambio climático (Hansen y col., 2016).

De este fenómeno podría derivarse la desaparición algunos años del verano en el hemisferio norte. Los impactos serían muy altos, pues la maduración de las cosechas de cereal depende de las altas temperaturas estivales. Este proceso podría ocurrir como consecuencia de que la diferencia de temperaturas entre el ecuador y el Polo Norte ha disminuido, fruto del más rápido calentamiento de este último. Como consecuencia de la bajada del gradiente, es más frecuente que vientos fríos procedentes del norte penetren más hacia el sur en épocas estivales y produzcan veranos frescos. También que se produzca el fenómeno inverso (aire caliente del sur que genere inviernos suaves) (Turiel, 2013f; Jamail, 2014b).

El efecto más importante de la desaparición de estas grandes superficies blancas y su sustitución por otras más oscuras (rocas, mar) es la disminución del efecto albedo<sup>641</sup>. Por ello, la fundición de todo este hielo activa un bucle de realimentación positivo fundamental del calentamiento global. Además, desprotegerá parte de la costa de Groenlandia, acelerando el deshielo de sus glaciares. A esto se suma que ya no habrá hielo para absorber parte de la energía solar, lo que redundará en un mayor calentamiento del agua marina<sup>642</sup>. Y, por si esto fuera poco, también permitirá la liberación de grandes cantidades de  $\text{CH}_4$  contenido en el lecho marino y en los suelos helados (Hansen y col., 2011), sobre lo que entramos a continuación. En cualquier caso, esta pérdida de hielo también aumentaría la captación de  $\text{CO}_2$  por parte del océano, pues nuevas superficies quedarían en contacto con la atmósfera. Pero este proceso de amortiguamiento del calentamiento global sería inferior a los de realimentación positiva.

### ***Deshielo del permafrost y liberación del metano oceánico***

El permafrost es el suelo congelado permanentemente que se encuentra a 0-6 m de profundidad<sup>643</sup>. Estos suelos contienen una cantidad de carbono similar a todo el presente actualmente en la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$  y de  $\text{CH}_4$  (Henson, 2006; Larios, 2008; Puig Vilar, 2011; Leahy, 2013; Whittingstall, 2013), por lo que su liberación supondría otro bucle de realimentación positivo. Además, este deshielo tendría otras consecuencias, como la destrucción de infraestructuras, al perder consistencia la base sobre la que se asientan.

La temperatura del permafrost ha ascendido desde la década de 1980, lo que

641 La nieve y las superficies de hielo reflejan el 90% de la radiación solar incidente, mientras que los océanos abiertos o tierras con vegetación reflejan solo aproximadamente el 10%.

642 Se requieren 79 cal para convertir 1 g de hielo a 0°C en agua a 0°C. Pero, una vez que el hielo se ha fundido añadir la misma cantidad de energía aumenta la temperatura del agua a 79°C.

643 En el hemisferio norte, el permafrost ocupa el 22-24% de la superficie, más la plataforma continental submarina circumpolar.

ha producido una reducción en su grosor y extensión<sup>644</sup>. Esto está produciendo ya la liberación de CH<sub>4</sub> (Walter y col., 2006). Además, es posible que el punto de inflexión a partir del cual se vuelva irreversible el deshielo del permafrost pueda producirse antes de 2030. Será cuando el incremento de temperatura planetaria llegue a 1,5°C (Leahy, 2013; Whittingstall, 2013; Chadburn y col., 2017).

También hay ingentes cantidades de CH<sub>4</sub> retenido en los lechos oceánicos (los clatratos de metano de los que ya hemos hablado). Estas formaciones son estables solo a grandes presiones y bajas temperaturas. Si la temperatura del agua aumenta lo suficiente, el equilibrio puede romperse liberando una gran cantidad de CH<sub>4</sub> en un breve periodo de tiempo. Este fenómeno pudo ser el que hace 251 millones de años, en el Pérmico, disparó la extinción del 96% de las especies (Westbrook y col., 2009). Este proceso ya ha comenzado<sup>645</sup>.

### ***El sistema suelo-vegetación como emisor neto de CO<sub>2</sub> y el papel del vapor de agua***

El suelo ha absorbido cerca del 30% del CO<sub>2</sub> emitido por el ser humano (IPCC, 2013). Sin embargo, al igual que ocurre con el océano, puede llegar un momento en que los suelos se conviertan en emisores netos de GEI y, por lo tanto, aumenten el calentamiento global<sup>646</sup>. Detrás de esta mutación hay varios factores: i) Cambios en los patrones de otoño y primavera en el hemisferio norte que están produciendo dos fenómenos contrarios. Por un lado, las temperaturas cálidas de primavera aceleran el crecimiento de las plantas y, por lo tanto, la captura de CO<sub>2</sub><sup>647</sup>. Por otro, el calentamiento en otoño aumenta la descomposición del suelo al estimular la actividad microbiana y de los hongos, lo que incrementa la emisión de CO<sub>2</sub> y de N<sub>2</sub>O. La tendencia es que el segundo fenómeno vaya adquiriendo mayor importancia cuantitativa que el primero (Piao y col., 2008; MREEPB, 2009; Bardgett, 2016). ii) Aumento de los incendios como consecuencia del incremento de temperaturas, lo que produce emisiones de CO<sub>2</sub><sup>648</sup>, pero también el calcinado del suelo, que pierde parte de su fertilidad y se ennegrece, aumentando la captación de calor y la pérdida de humedad. iii) Desestabilización de las selvas tropicales y reducción del área que cubren por el incremento de la temperatura. Cuando mueren los ecosistemas de bosques o algas, su descomposición libera CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Este proceso ya está en marcha en lugares como la Amazonia en los años

644 A finales del siglo XXI, el permafrost cercano a la superficie (hasta 3,5 m de profundidad) podrá haber disminuido un 37-81% (IPCC, 2013).

645 El ritmo de liberación de CH<sub>4</sub> desde la plataforma ártica de Siberia oriental pasó de 7 millones de toneladas en 2010 a 17 millones en 2013 (Jamail, 2014a).

646 El suelo ya está disminuyendo su capacidad de fijar carbono (He y col., 2016) y podría ser un emisor neto antes de 2050 (Crowther y col., 2016).

647 Las plantas han pasado de retirar 1-2 Pg/año en 1950 a 2-4 a principios de siglo (Keenan y col., 2016). Aunque la tendencia puede estar cambiando, ya que desde 2006 hasta 2014 se ha producido un descenso continuado de la fijación de carbono por la vegetación (Curran y Curran, 2016).

648 Entre 2000 y 2004, las emisiones de CO<sub>2</sub> por incendios en EEUU supusieron el 4-6% de las emisiones del país (Larios, 2008).

secos<sup>649</sup> y es inevitable en muchas regiones forestales<sup>650</sup>, no en vano los árboles no pueden migrar a la velocidad a la que está cambiando el clima (Puig Vilar, 2012b; Riechmann, 2014; Gatti y col., 2014). A esto se suma que la deforestación produce un calentamiento neto de la superficie en las regiones cálidas por una disminución de la evapotranspiración no compensada por un aumento del efecto albedo (Duveiller y col., 2018). iv) Disminución de la capacidad fotosintética de las plantas por el ozono troposférico, lo que supone una contribución añadida al incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico (Tai y col., 2014).

Con un aumento de la temperatura de 2°C, ya habrá disminución en la productividad de las cosechas, un descenso que sería mayor en las regiones tropicales<sup>651</sup> (figura 8.20) (Challinor y col., 2014). Esto considerando el crecimiento de la vegetación como consecuencia de la mayor concentración de CO<sub>2</sub><sup>652</sup>. Si no se considera este factor, que está en duda<sup>653</sup> sobre todo conforme aumente la temperatura, el descenso de la producción sería mayor (Cline, 2007; Peñuelas y col., 2017). Y esto sin incluir el menor acceso a agua pues, como vimos, aumentará la intensidad y la frecuencia de las sequías; ni la intrusión salina en los acuíferos costeros<sup>654</sup>; ni el incremento de la erosión, fruto de más temporadas secas seguidas de inundaciones; ni el mayor número de incendios; ni que el cambio climático está siendo muy rápido, lo que impide que las cosechas se adapten a las nuevas condiciones (Ackerman y Santon, 2013).

---

649 Las sequías en la Amazonia están siendo cada vez más prolongadas como consecuencia del calentamiento del Atlántico, la reducción de la transpiración arbórea y los incendios forestales. Esto se podría agravar por el retraimiento de los glaciares peruanos y la disminución del aporte de agua de los ríos en la época seca (Larios, 2008). Además, el Niño tiende a reducir las precipitaciones en la zona y, aunque no está claro todavía, parece que el cambio climático va a reforzar y hacer más frecuente este fenómeno (Henson, 2006). Si la Amazonia pierde el 40% de su cubierta forestal podría entrar en un proceso de sabanización irreversible, lo que conllevaría fuertes impactos sobre el clima regional y global (Larios, 2008). Entre la década de 1990 y la de 2010 perdió 1/2 de su capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> (Brienen y col., 2015).

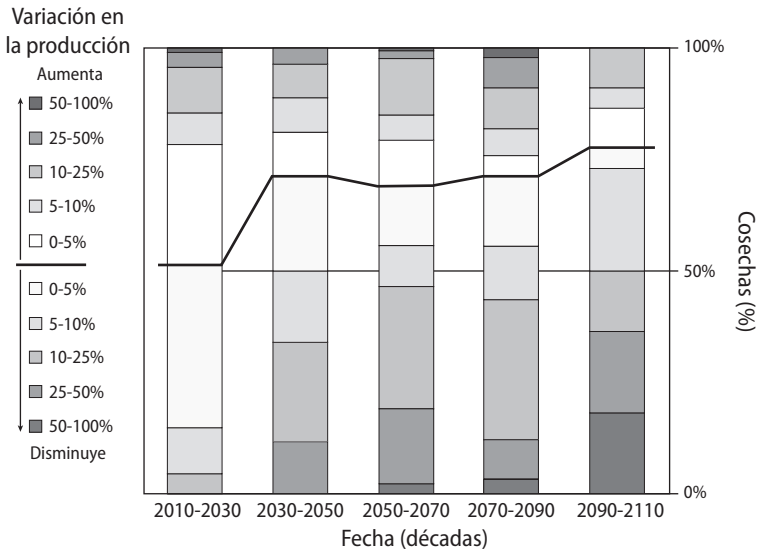
650 En 2015-2016, las tres mayores regiones tropicales (la sudamericana, la africana y la asiática) liberaron un 50% más de CO<sub>2</sub> que en 2011. Probablemente detrás está un Niño especialmente fuerte (Eldering y col., 2017).

651 Según la FAO, un incremento de 3-4°C provocaría una caída de la producción de un 15-35% en África y Asia Occidental y de un 25-35% en el Suroeste Asiático (Ecologistas en Acción, 2012a).

652 Mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> pueden aumentar el crecimiento de los cereales, pero también reducir su contenido en aminoácidos, proteínas y minerales (Högy y Fangmeier, 2013).

653 Es posible que el potencial fertilizador del carbono sea pequeño y que el efecto de la temperatura sobre muchos cultivos esté sujeto a umbrales a partir de los cuales el crecimiento caiga rápidamente (Ackerman y Santon, 2013). De hecho, se han constatado pérdidas en campos de arroz en el Sureste Asiático atribuidas a mayores temperaturas (Peng y col., 2004).

654 Elliott y col. (2014) predicen que la pérdida de 400-2.600 cal/per como consecuencia del calentamiento global (8-43% de los niveles actuales) se puede convertir en una pérdida de 600-2.900 cal/per si se incorpora la pérdida de zonas regables como consecuencia del cambio climático.



**Figura 8.20** Previsión del porcentaje de las cosechas que modificarán su productividad conforme avance el calentamiento global (IPCC, 2014a).

Por otra parte, una de las consecuencias del aumento de la temperatura es el incremento de la evaporación del agua. Las nubes, en un proceso complejo y desigual, reflejan parte de la radiación solar que llega a la Tierra (“enfrián” el clima). Pero, a la vez, el vapor de agua es un GEI. Parece que el incremento de vapor de agua, de forma neta, realimentaría el calentamiento global (IPCC, 2013).

### ¿Cuáles pueden ser los nuevos equilibrios climáticos?

Según los datos conservadores del IPCC (2013)<sup>655</sup>, el aumento de temperatura en 2100 se situará en 1,5-4,5°C, es extremadamente improbable que esté por debajo de 1°C y muy improbable que sea superior a los 6°C. En el más favorable de los escenarios, la concentración de CO<sub>2</sub> en 2100 sería de 421 ppm (475 ppm si se contabilizan como CO<sub>2</sub>eq el N<sub>2</sub>O y el CH<sub>4</sub>).

Esta concentración está fuera del margen de seguridad, ya que “si la humanidad desea preservar un planeta similar a aquel en el que se han desarrollado todas las civilizaciones, y al que la vida se ha adaptado, la evidencia paleoclimática y el cambio climático en curso indican que el CO<sub>2</sub> debe ser reducido a, como mucho, 350 ppm, pero probablemente incluso menos (...). El valor preindustrial definido como ‘normalidad’ es de 280 ppm” (Hansen y col., 2008). Esto permitiría que no se activen (o lo hagan de forma mínima) muchos de los bucles de realimentación

<sup>655</sup> El IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático en sus siglas en inglés) ha realizado proyecciones que sistemáticamente han infravalorado la evolución del cambio climático y que son cuestionables a nivel metodológico (Capellán-Pérez y de Castro, 2015a).

positivos que hemos descrito<sup>656</sup> y situaría el incremento de temperatura por debajo de 1,5°C, probablemente en 1°C, respecto a los valores preindustriales (Hansen y col., 2011; Hansen y col., 2016; Xu y Ramanathan, 2017). Además, esto posibilitaría que los impactos del cambio climático fuesen más asumibles<sup>657</sup>. Para conseguir esta concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, Hansen y col. (2013, 2017) afirman que las emisiones mundiales de GEI deberían reducirse desde 2021 un 6% al año<sup>658</sup> (que es mucho<sup>659</sup>), junto a un fuerte plan de reforestación<sup>660</sup>. Esto permitiría que la concentración de CO<sub>2</sub> bajara hasta 350 ppm a final de siglo (actualmente están por encima de las 400 ppm) y que el incremento de temperatura no superase los rangos térmicos del Holoceno<sup>661</sup>.

La temperatura del planeta seguiría aumentando después de 2100 si no se produjesen los procesos de reforestación. Incluso cesando totalmente la emisión de GEI, la temperatura no se mantendría. Esto se debe a que el 15-40% del CO<sub>2</sub> emitido permanecerá en la atmósfera más de 1.000 años (IPCC, 2013). Un segundo factor es que, al igual que los océanos están absorbiendo una parte considerable del calor y esto está retrasando el aumento de la temperatura, el proceso inverso también se producirá. Es decir, una vez calentadas, las grandes masas de agua serán un foco cálido que retrasará el enfriamiento planetario aun en el caso de que descendan las concentraciones de CO<sub>2</sub>. Esto se puede prolongar durante miles de años o, al menos, 500<sup>662</sup> (Matthews y Caldeira, 2008). De esta forma, el cambio climático antropogénico es ya irreversible. La cuestión estriba en la gravedad que llegue a alcanzar.

656 Whittingstall (2013) compila algunos de los límites de seguridad para no disparar varios de los bucles de realimentación: deshielo ártico, 1,11°C; liberación de los hidratos de metano árticos, 1,33°C; deshielo de los glaciares de Groenlandia y la Antártida, 1,43°C; deshielo del permafrost, 1,54°C; acidificación del océano, 455 ppm de CO<sub>2</sub>. Además, si la temperatura se acerca a los 2°C en 2100, la mayoría de los corales de aguas calientes y los bivalvos de latitudes medias estarían en riesgo (Gattuso y col., 2015). Pero algunos umbrales podrían no ser tales, pues ya vimos que el deshielo ártico y antártico podría haber pasado ya su punto de no retorno.

657 Un aumento de 1°C respecto a la era preindustrial implicaría una subida permanente y alta del nivel del mar (Matthews y Caldeira, 2008). Un incremento de 1-2°C supondría un descenso en el agua potable disponible (Puig Vilar, 2010). Una subida de 2°C implicaría un aumento significativo de olas de calor, sequías y lluvias torrenciales respecto a un aumento de 1,5°C (Schleusser y col., 2017).

658 En el periodo 1980-2000, las emisiones provenientes de combustibles fósiles aumentaron un 1,5%/año, pero en 2000-2012 el ritmo fue del 3% (Hansen y col., 2013).

659 Un ritmo de reducción de emisiones del 6% no tiene precedentes. Los más pronunciados fueron del 2-4% durante colapso de la URSS (Riahi y col., 2015).

660 Haría falta retirar 153 PgC antes de 2100. Probablemente mediante reforestación y agricultura se podrían alcanzar 100 PgC (Hansen y col., 2017). Para retirar 1 ppm/año haría falta plantar aproximadamente 1/3 de toda el área habitable del planeta (Prieto, 2015).

661 Otros modelos dan reducciones igualmente draconianas: 10%/año a partir de 2015 hasta alcanzar el 0 en 2050 para no superar 2°C (Anderson, 2015), lo que implicaría dejar bajo tierra un 66% de las reservas de petróleo (incluyendo las arenas bituminosas, el petróleo en roca poco porosa y el ártico), el 50% de las de gas y el 80% de las de carbón (McGlade y Ekins, 2015); balance neutro de carbono en 2045-2050 para no superar 1,5°C (Rogelj y col., 2015); y es posible que se queden cortos (Ferrán Puich, 2016b).

662 Estos escenarios deben tomarse como estimativos, pues en ellos influyen múltiples factores.

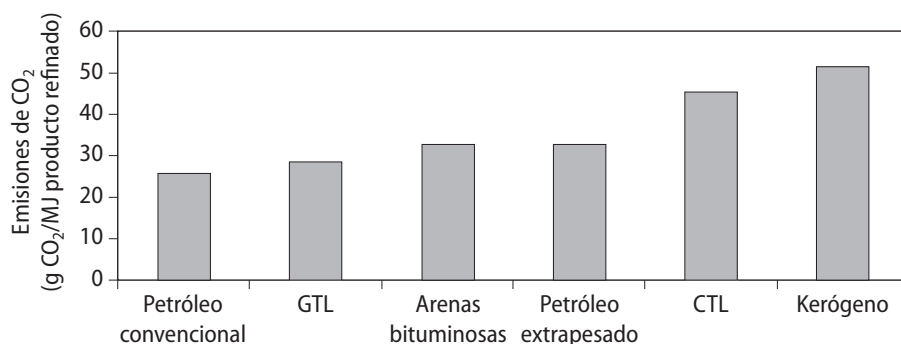
En el caso de que se activen los bucles de realimentación positiva, el planeta podría deslizarse hacia otra nueva situación de equilibrio climático unos grados por encima de la actual. ¿Cuál podría ser esta situación? Una posibilidad sería semejante al Plioceno (hace 3-5 millones de años). Entonces la concentración de CO<sub>2</sub> osciló entre 365 y 415 ppm, la temperatura media era entre 2-4°C superior a la actual (en los polos 10°C mayor). Esto hizo que, a pesar de que la intensidad de la radiación solar era menor que en el presente, el nivel del mar fuese 5-40 m más alto. Otro posible punto de equilibrio sería algo similar al Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno de hace 55,9-55,0 millones de años. En él, el planeta no tenía hielo, el nivel del mar era 75 m más alto que ahora y la temperatura subió unos 6°C (5°C en los trópicos y 8°C en las latitudes templadas). El 50% de las especies se extinguieron por el calentamiento y la acidificación de los océanos. Los sedimentos indican que se produjo una liberación de carbono muy rápida a la atmósfera (en solo 13 años), probablemente por el efecto de un meteorito que disparó los bucles de realimentación positivos (sobre todo, la liberación de CH<sub>4</sub>). Tras este suceso, el nuevo equilibrio no se alcanzó hasta 200-2.000 años después, con una concentración de CO<sub>2</sub> por encima de las 500 ppm. La recomposición del equilibrio previo a la liberación masiva de carbono requirió unos 150.000 años.

No es posible afirmar categóricamente que se haya superado, ni que no se haya hecho, el umbral de estabilidad del sistema climático de la Tierra, pasado el cual evolucionaría inevitablemente hacia un nuevo punto de equilibrio (Puig Vilar, 2012a, 2016c) en el que amplios territorios no serían habitables por el ser humano.

### ***¿Cómo se interrelacionan el pico de los combustibles fósiles y el calentamiento global?***

Indudablemente, conforme vaya siendo más difícil acceder a los combustibles fósiles, su uso disminuirá y, con ello, las emisiones de GEI. La cuestión es si la caída en el uso de fósiles será lo suficientemente rápida para impedir que el cambio climático se dispare como consecuencia de los bucles de realimentación positiva. Parece que el pico del petróleo no “resolverá” por sí solo el problema del cambio climático (Höök y Tang, 2013): i) Distintos estudios que correlacionan el pico de los combustibles fósiles con el de emisiones de CO<sub>2</sub> sitúan las concentraciones de GEI por encima de 400 ppm en 2100 (en algunos casos muy por encima) lo que supera con mucho el margen de seguridad de 350 ppm (Prieto, 2008a, 2012b; Rutledge, 2007; Kharecha y Hansen, 2008; Höök y Tang, 2013; Capellán-Pérez y col., 2014; Political Economist, 2014; Capellán-Pérez y col., 2016; Patterson, 2016b; Wang y col., 2017). En ese sentido, las reservas de combustibles fósiles son muy superiores a las que dispararían el calentamiento global si se quemasen (Carbon Tracker, 2013; McGlade y Ekins, 2015). Aunque ya hemos argumentado que estas reservas nunca se usarán en su totalidad, avances tecnológicos podrían permitir hacerlo en mayor medida de las posibilidades actuales. ii) Los petróleos y el gas no convencional, al requerir más energía en su extracción, emiten más CO<sub>2</sub> que los convencionales (figura 8.21) haciendo que las emisiones puedan incluso aumentar en un escenario de consumo decreciente. En el mismo sentido, la disminución

inicial de la disponibilidad del petróleo conllevará que crezca el consumo de carbón y el carbón emite más  $\text{CO}_2$  que el petróleo y el gas. Además, la fractura hidráulica es más barata que la perforación en aguas profundas (Cunningham, 2015). Esto puede hacer que se priorice con el aumento de emisiones consiguiente por fugas, que ya abordamos. iii) La reducción de la contaminación como consecuencia de la bajada de la actividad económica por la crisis reducirá la emisión de aerosoles, que “enfían” el clima, como explicamos. iv) Una vuelta al uso de la biomasa como fuente energética principal, que más adelante argumentaremos que es probable que ocurra, implicará un aumento del cambio del uso del suelo y, con ello más emisiones de GEI.



**Figura 8.21 Emisiones de  $\text{CO}_2$  por tipo de combustible** (Brandt y Farrel, 2007).

Pero entrarán en juego más elementos que empujarán en el sentido contrario: i) Los escenarios de crisis económica cada vez más profundos, sobre los que entraremos en el siguiente capítulo, producirán que la reducción en la extracción de petróleo sea mayor que la prevista desde la perspectiva geológica. ii) Los límites de recursos que hemos analizado también disminuirán la capacidad de obtener combustibles fósiles. iii) El cambio climático aumentará la dificultad y el coste de extraer petróleo, por ejemplo aumentando la probabilidad de accidentes en las plataformas petroleras en regiones con huracanes o destrozando las infraestructuras en las zonas donde se deshiele el permafrost. El deshielo del Ártico y el acceso al petróleo bajo su lecho marino es posible que no compensen estas pérdidas, pues no será fácil extraerlo por las duras condiciones meteorológicas y los riesgos que suponen los icebergs. iv) La inevitable transición hacia una agricultura menos petrodependiente también ayudará<sup>663</sup>.

En base a la crisis económica alimentada por la escasez energética, Tverberg (2014f) calcula que las emisiones de GEI antropogénicas estarán en 2030 en el 40% de las existentes en 2010. El escenario, que ya describimos como insuficiente, que marca el IPCC (2013) para evitar el cambio climático desbocado plantea que las emisiones en 2030 deberían ser un 84% de las de 2010.

<sup>663</sup> La agricultura mundial podría fijar 0,4-1,2 GtC/año mediante técnicas de arado mínimo y agricultura ecológica (Lal, 2004).