

## Clase 5 – El clima del futuro

Emisiones de GEI  
Escenarios de emisiones  
Proyecciones de clima futuro  
Impactos

Los factores más importantes que operan sobre el clima en escalas de décadas a siglos son la composición de la atmósfera, la constante solar y el albedo. Si conocemos como cambiarán en el futuro, podemos estimar cual va a ser la respuesta del clima. En el próximo siglo, la composición de la atmósfera, en particular las concentraciones de GEI, jugarán un papel crucial. Veamos cómo se pueden estimar las concentraciones de GEI y proyectar el clima.

### 5.1. Emisiones de GEI

#### 5.1.1 . ¿De qué dependen las emisiones?

Dado que más del 90 % de la energía que se utiliza actualmente en el mundo para producir bienes y servicios proviene de combustibles fósiles y que al quemarlos se emite CO<sub>2</sub>, la emisión de GEI está básicamente ligada a la producción de bienes y servicios. La emisión de otros GEI también está ligada a la producción y al consumo, aunque la relación puede no ser tan obvia.

Para poder entender mejor los factores que afectan a las emisiones es útil la ecuación que relaciona la población, el consumo, y el impacto de la tecnología con el impacto ambiental (I=PAT), que, aplicada a las emisiones de GEI se conoce generalmente como **identidad de Kaya**.

Veamos primero la ecuación I=PAT, considerando que es la emisión total de GEI a la atmósfera. Las emisiones dependen de la cantidad de **población, P** Dejando los demás factores sin cambios, si se duplica la población, las emisiones se duplican.

Por otra parte, los niveles de consumo determinan diferencias importantes. Pensemos en las emisiones de una familia norteamericana que vive en una gran casa climatizada, con pileta, TV, computadoras y otros equipos en cada habitación, autos para cada integrante de la familia, vacaciones a países lejanos en avión y otros consumos que podemos imaginar. Por otro lado, imaginemos una familia en el África Subsahariana, que realiza agricultura de subsistencia, vive sin agua corriente ni electricidad. Las emisiones de esta familia son muchísimo menores respecto a la otra (probablemente 1 a 100, o incluso menos), aunque también es mucho menor su calidad de vida. Estas diferencias se incluyen en el factor **A, afluencia** o consumo de bienes y servicios por persona (U\$S/ persona). Para un país dado, la producción de bienes y servicios se estima mediante el Producto Bruto Interno, PBI por lo que la afluencia se puede calcular como el PBI per cápita ( $PxA = PBI$ ).

El tercer factor, **T, tecnología**, en este caso factor de intensidad de emisiones, relaciona los GEI emitidos por los bienes y servicios producidos. Está claro que

cambiando tecnologías, o produciendo los bienes de forma más eficiente, es posible reducir emisiones sin cambiar la cantidad de población o su nivel de consumo.

En la identidad de Kaya este último término se descompone a su vez en otros dos términos.

$$T = IE \times IC$$

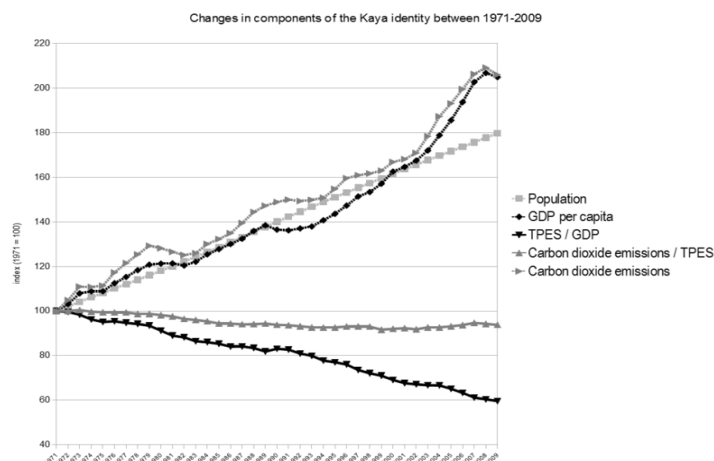
donde IE= intensidad de energía ; IC= intensidad de carbono

La **intensidad de energía** se define como el número de joules que se utilizan para generar 1 U\$S de bienes y servicios<sup>1</sup>. Este término tiene a su vez dos componentes. El primero es de que actividad de producción estamos hablando. No es lo mismo una producción industrial, por ejemplo acero, que requiere una alta cantidad de energía, que un servicio, que requiere solamente iluminación y teléfonos (aunque ambos sean necesarios para el funcionamiento de la sociedad). El otros componente es la eficiencia con la que se producen estos bienes. Por ejemplo, podemos entregar la misma iluminación necesaria con lámparas incandescentes o con lámparas LED: la IE será en este caso varias veces menor.

La **intensidad de carbono** es la cantidad de GEI emitidos por joule de energía generada. Esto refleja la mezcla de tecnologías que se usan para generar la energía en un país. Por ejemplo, dentro de los combustibles fósiles, es menor la intensidad de carbono del gas natural que la del carbón. Otras fuentes de energía (hidroeléctrica, eólica, solar, nuclear<sup>2</sup>) pueden generar energía con emisiones mucho menores.

**Emisiones totales de CO<sub>2</sub> = Población x PBI/población [U\$S/ habitante] x Energía/PBI [joules/ U\$S] x Emisiones/Energía [ton CO<sub>2</sub>/joule] = [ton CO<sub>2</sub>]**

**todo en un período de un año**



<sup>1</sup> Tener presente que aunque las unidades de IE son joule/U\$S , no se trata del costo de la energía (o su inversa), sino de la energía utilizada para generar 1 U\$S de “riqueza”.

<sup>2</sup> Aunque con sus propios problemas y limitaciones; y no en todos los casos (ej. las hidroeléctricas en regiones tropicales generan emisiones de metano).

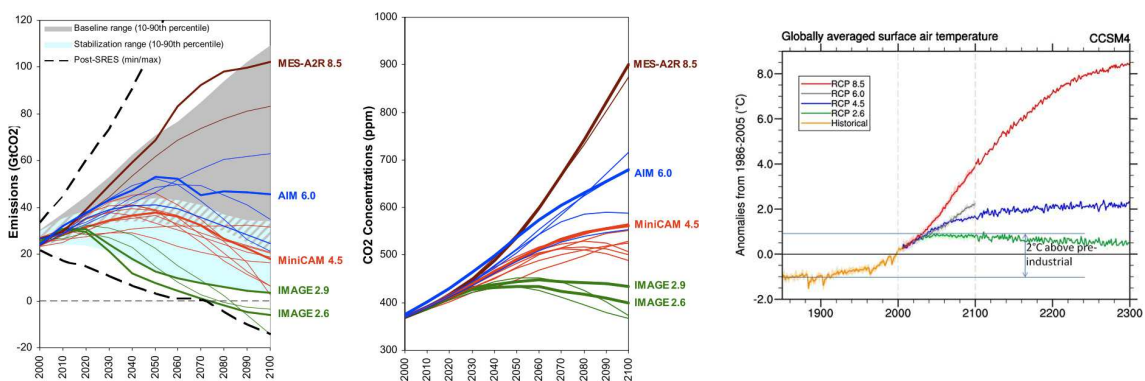
**Fig. 1. Variación de los factores de la identidad de Kaya. (TPES: total primary energy supply, abastecimiento de energía primaria total; GDP=PBI)**

**5.1.2. Escenarios de emisiones**

Aunque conozcamos los factores que controlan las emisiones de GEI, no es fácil realizar predicciones sobre como variarán en el futuro, ya que a su vez estos factores son dependientes entre sí en cierta medida (en las sociedades occidentales, mayor riqueza ha hecho en el pasado disminuir el aumento de la población). Pero para poder proyectar que sucederá con el clima necesitamos saber que sucederá con las emisiones.

Hacia fines de los 90, el IPCC planteó diferentes escenarios de emisiones, con los nombre A1, A2, B1, B2 ( y algunas combinaciones entre estos. Estos escenarios son distintas suposiciones sobre como se irán modificando las emisiones. Para el próximo informe (AR5, a publicarse en setiembre 2013) se han planteado nuevos escenarios. En realidad a la atmósfera no le interesan las “historias” que se plantearon en la construcción de los escenarios, sino solo las concentraciones que se alcanzan. Por ej. para la atmósfera es igual si una disminución de emisiones se produce porque los seres humanos comienzan a utilizar energía solar o porque un virus eliminó a una parte sustancial de la población.

Con los distintos escenarios de emisiones planteados, podemos calcular las **concentraciones de GEI que se alcanzarán en el futuro**. No sabemos cuales son los valores que se alcanzarán, de acuerdo a las emisiones que se realicen, serán las concentraciones que se alcancen. Por lo tanto, los escenarios de emisiones nos permiten estimar que pasará en distintos futuros posibles , y elegir nuestras acciones para que estos se futuros se cumplan o los podamos evitar.



emisiones → concentraciones → temperaturas

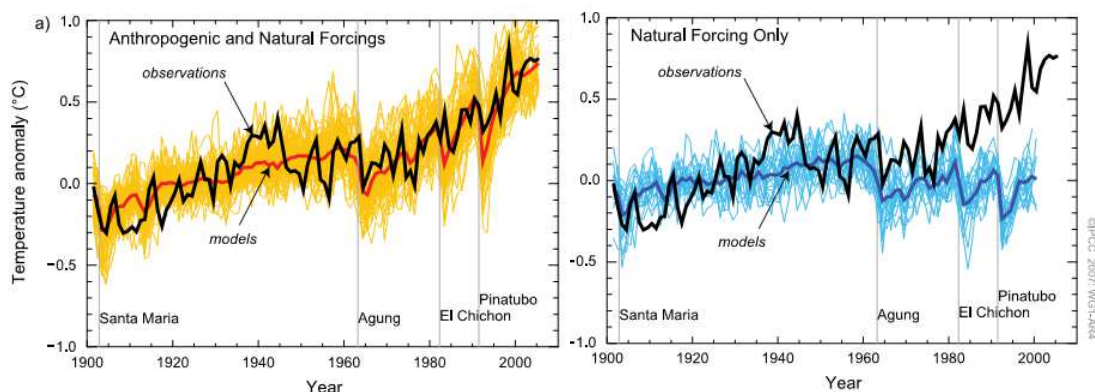
**Fig. 2. Escenarios de emisiones, concentraciones y temperaturas: nomenclatura IPCC AR5 (resultados preliminares de un único modelo, con el objeto de mostrar solo como serán los gráficos) CUIDADO: los colores no se corresponden en los distintos gráficos. Los números de cada escenario indican el forzado radiativo correspondiente.**

## 5.2. Proyecciones del clima del futuro

Una vez que se determinan los escenarios de emisiones y se calculan las concentraciones atmosféricas resultantes de estas emisiones, se alimentan con estos datos modelos climáticos para determinar como se comportarán temperaturas, precipitaciones y otras variables climáticas en el futuro.

Los modelos climáticos son representaciones matemáticas de las interacciones entre la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre, la criosfera y el Sol. Son modelos complejos que se utilizan para determinar tendencias y no eventos particulares. Un modelo climático no nos puede decir cuál será la temperatura de un día específico (tiempo), sino como será el tiempo promedio en un período de unos 30 años (clima).

Como no podemos esperar 30 años para saber si un modelo funciona o no, estos se testean contra el clima del pasado. Si un modelo puede proyecta correctamente tendencias a partir de un punto en el pasado (hindcasting), podemos esperar que proyecte con una certidumbre razonable lo que sucederá en el futuro (fig. 3).

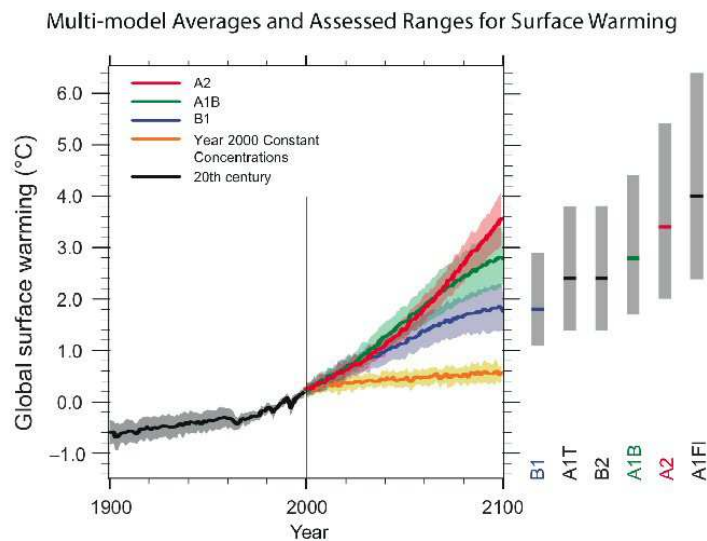


**Fig. 3. Hindcasting con 14 MCGs (Modelos de Circulación General), 58 simulaciones. Teniendo en cuenta solo los forzantes naturales (variación del Sol y volcanes) no es posible simular las observaciones de temperatura de las últimas décadas. Si es posible hacerlo si se tienen en cuenta las concentraciones de GEI.**

Otra forma de probar el funcionamiento de los modelos son las erupciones volcánicas. En la erupción del Pinatubo en 1991 se alimentó a los modelos con las nuevas condiciones resultantes de la erupción y los modelos pronosticaron correctamente los efectos que luego se verificaron con las observaciones: mayor calentamiento en el Ártico y sobre tierra, mayor calentamiento por las noches, enfriamiento de la estratosfera.

Podemos pensar que los modelos son “experimentos” que hacemos con el clima, ya que no tenemos varias Tierras para experimentar. Por ejemplo, no sabemos si habrá una o muchas erupciones volcánicas, o si el Sol seguirá brillando con la misma

intensidad, pero podemos testear estos sucesos mediante los modelos, de la misma manera que se testean las distintas variaciones de las concentraciones de GEI.



**Fig. 4. Estimaciones de temperatura global de superficie para distintos escenarios, relativa al promedio 1980-1999. Fuente: IPCC AR4.**

La figura 4 muestra el aumento de las temperaturas globales para distintos escenarios. Debe quedar claro que existe un rango de temperaturas posibles correspondiente a cada escenario, pero cuál será el escenario real dependerá de lo que suceda con las emisiones. La curva roja/amarillo corresponde a concentraciones constantes, o sea emisiones cero. Incluso en ese caso las temperaturas continuarán aumentando (calentamiento “en la cañería”). También es notable que las temperaturas en las primeras 3-4 décadas del siglo XXI son prácticamente similares, mientras que las diferencias son notables hacia el final del siglo. Esto se debe a que las temperaturas de las próximas décadas responden a las emisiones de las décadas pasadas, mientras que las emisiones de los próximos años mostrarán su efecto dentro de 20-30 años. Esta es una de las causas de que sea tan difícil la mitigación del cambio climático, se debe actuar ya para evitar problemas en el futuro.

Otro hecho a tener en cuenta: la Tierra no se acaba en el año 2100. y los GEI siguen actuando en la atmósfera. Si las concentraciones de GEI alcanzaran las 1200 ppm y se disminuyeran entonces instantáneamente las emisiones a cero, las concentraciones se mantendrían alrededor de las 800 ppm por más de 1000 años. Es muy posible que las concentraciones actuales sean ya suficientes para evitar la próxima glaciación que comenzaría dentro de algunas decenas de miles de años.

### 5.3. Impactos

Como vimos en la figura 4, si no se limitan las emisiones, las temperaturas pueden aumentar hasta 6°C para fin de siglo. Esto no parece demasiado, dado que las temperaturas suelen cambiar más de 5°C entre el verano y el invierno, e incluso en un mismo día. Sin embargo, estas variaciones que ocurren en sitios puntuales, se cancelan entre sí en todo el globo: cuando en un punto es de día en otro es de noche, cuando en un hemisferio es verano en el otro es invierno. Las olas de calor implican en algún otro sitio una ola de frío.

Cuando hablamos de temperatura global, estos pocos grados implican cambios muy serios. Comparemos con los 5-8°C de diferencia respecto a los períodos glaciales, el mundo es muy diferente en esas condiciones.

No es solo la cantidad de calentamiento lo importante sino también la velocidad de cambio. Al planeta le llevó 10.000 años calentarse después de la última glaciación, menos de 0,1°C por siglo. La velocidad es importante porque el ambiente debe adaptarse a los cambios. Si los océanos aumentan su nivel 1 m en 1000 años, nadie tendrá problemas para adaptarse. Un aumento de 1 m en un siglo, puede traer problemas, pero adaptarse a un aumento de 1 m en una década es casi imposible: desplazaría millones de personas y significaría costos impensables en infraestructura (especialmente si este aumento se mantiene década a década).

¿Cómo sabemos que un mundo más caliente no sería mejor? En los últimos 10.000 años, en los que se desarrollaron nuestras sociedades complejas, la temperatura varió dentro de un rango de 1°C. Estamos adaptados al clima existente (nos guste o no) y cualquier cambio traerá dificultades.

En las regiones boreales se ha construido sobre permafrost: casas, caminos, puentes. Cuando el permafrost se funde todo esto se destruye.

La agricultura está adaptada al clima actual, incluso a toda la incertidumbre que conlleva. También la infraestructura que acompaña a la agricultura: silos, plantas de procesamiento. Si el clima cambia, esta infraestructura deja de tener sentido, es necesario reconstruirla en otro lado. Pero la fertilidad de la tierra no es la misma en otras regiones. Y las regiones que no tienen hoy agricultura son las regiones en las que todavía se conserva algún tipo de ecosistema natural, que deberíamos reemplazar.

Podemos dividir los impactos del cambio climático en impactos de dos tipos: por un lado los impactos físicos, sobre la temperatura, precipitaciones, nivel del mar, eventos extremos y por otro los impactos de tales cambios sobre los seres humanos y el ambiente, necesario para su supervivencia.

#### 5.3.1. Impactos físicos

Los **incrementos de temperatura** no serán uniformes en todo el globo. Los continentes se calentarán más que los océanos, debido a la gran capacidad calorífica de los mismos. Por lo tanto algunas regiones, en especial las regiones continentales del hemisferio norte pueden tener temperaturas promedio varios grados por encima del promedio global. Además las latitudes altas se calentarán más que los trópicos, debido

al efecto de feedback sobre el albedo. El calentamiento causa pérdida de hielo, se expone mayor superficie oceánica, absorbe más radiación y se calienta más.

En general, se cree que el aumento de los GEI disminuye los contrastes de temperatura, entre los polos y los trópicos, entre invierno y verano, entre la noche y el día. Esto nos lleva a pensar en un planeta con menos situaciones extremas. Sin embargo los resultados pueden ser contraintuitivos, tal como podría estar sucediendo actualmente en el hemisferio norte. Al disminuir el gradiente Ecuador-Polo, la corriente en chorro, que “separa” y conduce las masas de aire disminuye su velocidad formando meandros, que llevan más aire caliente hacia regiones polares y más aire frío hacia regiones tropicales. Además, disminuye la velocidad de traslación de la onda, con lo que los sistemas del tiempo se establecen en determinadas regiones, creando así olas de frío y de calor, o tormentas sostenidas en regiones contiguas. Aunque esto no es definitivo, y las investigaciones científicas sobre este tema son muy recientes, se sabe que estos patrones han actuado en las olas de calor que afectaron a Francia en el 2003, a Rusia en el 2010, y a la mayor parte del hemisferio norte en los primeros meses de 2013.

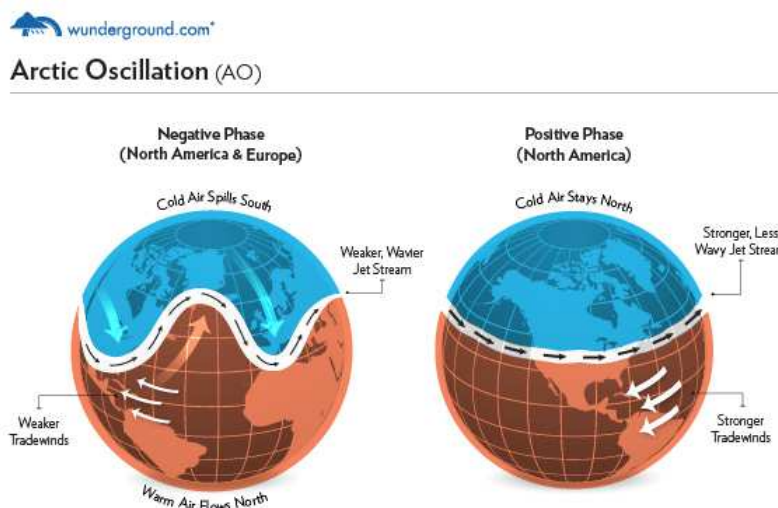


Fig.5 . Distintos patrones de la corriente en chorro: a)circulación meridional, b) circulación zonal.

Ej. Ver:

[http://www.youtube.com/watch?v=\\_nzwJg4Ebzo&feature=player\\_embedded](http://www.youtube.com/watch?v=_nzwJg4Ebzo&feature=player_embedded)

El calentamiento de la atmósfera conduce a un incremento en la evaporación de los océanos. Mientras que la atmósfera puede retener mayor cantidad de humedad al estar más caliente, también hay un **aumento de las precipitaciones**. De manera que el ciclo hidrológico (que además transporta energía horizontal y verticalmente en la

atmósfera) se acelera. Sin embargo las precipitaciones no se distribuyen en forma homogénea. En general se estima que las regiones húmedas tendrán un aumento de precipitaciones mientras que en las regiones secas disminuirá. Una tendencia que se ha observado en casi todo el mundo (incluida Argentina) es que las precipitaciones son más concentradas (llueve más en menos eventos), con un aumento en la erosión y en el riego de inundaciones.

Además de los cambios en la cantidad de precipitaciones puede haber cambios en la forma. En las regiones montañosas la nieve se acumula y se funde en verano, abasteciendo acuíferos y valles. Si cae en forma de lluvia, no hay acumulación, disminuyendo la disponibilidad de agua en el verano.

Desafortunadamente, las proyecciones de precipitaciones que resultan de los modelos climáticos son mucho más inciertas que las proyecciones de temperaturas.

El **aumento del nivel del mar** depende de la fusión de los glaciares, y de las capas de hielo de Groenlandia y Antártida, pero también del incremento de volumen de la masa de agua por efecto de la temperatura (dilatación). Se estima que este aumento estará entre 1 y 2 m para el año 2100. Por otra parte la **acidificación de los océanos** es otra consecuencia de las emisiones de CO<sub>2</sub>. El pH de los océanos es básico, de aproximadamente 8. Desde la revolución industrial el pH ha disminuido aproximadamente 0,1 unidades (un aumento de la concentración de H<sup>+</sup> de un 30%). Los océanos son ahora más ácidos que en los últimos 20 millones de años.

### 5.3.2. Impactos de los cambios físicos

Los cambios físicos son solo el primer paso para determinar como nos afecta el cambio climático. Tenemos que entender de que manera los cambios en el clima afectan todas nuestras actividades para comprender como tendremos que enfrentarnos a este problema.

Por un lado tenemos los efectos directos de las temperaturas sobre el ser humano. Aunque sabemos lo difícil que es adecuar nuestra infraestructura a condiciones cambiantes, el hombre lo ha venido haciendo desde hace milenios.

Pero las temperaturas y precipitaciones no nos afectan solo directamente sino también a través de su acción sobre los ecosistemas, la agricultura y la producción de alimentos, y la infraestructura. Además, tenemos que pensar todos estos impactos en el contexto de una población creciente, que aumentará al menos un 30% en las próximas décadas.

Cambios en las precipitaciones, sumados a una mayor evaporación por el aumento de la temperatura afectarán nuestros suministros de agua dulce, necesaria tanto para el consumo directo como para la agricultura, la producción de bienes e incluso para la producción de energía.

¿Cómo afectarán todos estos cambios la estabilidad política de los gobiernos? ¿Las políticas migratorias en caso de desastres o falta de abastecimiento de agua? ¿Qué posibilidades de hacer frente a estos problemas tienen los distintos países y cómo se distribuye su responsabilidad, ya que en general los países más vulnerables tienen

menor responsabilidad en las emisiones que han contribuido al cambio climático? ¿De qué manera podremos diferenciar en cada caso la contribución climática a los desastres de otro tipo de problemas (ineficiencia en la previsión, administración de recursos, asistencia necesaria, etc, etc)? Difícilmente una crisis política se deba únicamente a problemas ambientales o climáticos, pero muchas veces estos han sido desencadenantes de crisis en la historia de todas las sociedades humanas.

### **Bibliografía**

Archer D. (2012) Global warming. Understanding the forecast. Wiley

Dessler A. (2012) Introduction to modern climate change. Cambridge Univ. Press

### **Problemas:**

- 1) Explique los pasos de generación de las proyecciones del clima futuro.
- 2) Considere el argumento: “Si no pueden pronosticar el tiempo de la semana que viene, no es posible pronosticar el clima a 100 años” ¿Es correcto o no? ¿Por qué?
- 3) En la figura 2, explique como varían a lo largo del siglo XXI las concentraciones y emisiones para los escenarios en los que se produce un aumento de 2 y de 5 °C para el año 2100 respecto a niveles preindustriales.
- 4) Las temperaturas no cambiarán uniformemente en todo el planeta. Explique.
  - a) ¿Por qué se calientan más las latitudes altas que los trópicos?
  - b) ¿Por qué se calienta más la superficie terrestre que la superficie de los océanos?