

# *Cambio Climático*

## CIENCIA, IRREVERSIBILIDAD Y COMPROMISO

**FIDEL GONZÁLEZ ROUCO**

Facultad de Ciencias Físicas  
de la Universidad Complutense de Madrid  
Instituto de Geociencias (UCM-CSIC)

La temperatura global del planeta ha aumentado algo más de un grado centígrado desde finales del siglo XIX. Este cambio es el resultado de un cambio en el balance radiativo global y sabemos que se debe a la actividad humana. El cambio climático es irreversible en escalas seculares y continuará desarrollándose con una intensidad y velocidad que dependen de las emisiones acumuladas de gases de efecto invernadero. Por eso, limitar el aumento de temperatura futuro es necesario si se quieren mitigar las consecuencias para los ecosistemas y para la sociedad.

Para ello es importante estimar los impactos del cambio climático en el futuro y discutir su importancia en el marco de los derechos humanos incluidos, entre otros, el derecho al agua, la alimentación, la salud y el desarrollo. En esta conferencia, realizada en colaboración con Real Sociedad Española de Física, González Rouco ofrece argumentos sólidos sobre la naturaleza humana del cambio climático.

**HACE UNOS AÑOS**, uno abordaba una conferencia sobre cambio climático con el objetivo de mostrar a los asistentes los argumentos científicos que les permitirían entender la existencia de un cambio climático en proceso y de por qué las causas del mismo se deben a las actividades humanas. Esos argumentos son todos de naturaleza física, basados en la investigación que se realiza con modelos y observaciones del Sistema Climático. A veces algún asistente me daba una palmadita y me decía que le había gustado ver que no resultaba ser demasiado catastrofista. En mi perplejidad me preguntaba siempre qué había hecho mal. Hoy en día, las encuestas nos informan de que el cambio climático es considerado por parte de la sociedad uno de los problemas actuales más preocupantes. Los medios, movimientos sociales recientes y la percepción abrumadora de numerosos cambios medioambientales han conseguido transmitir, quizás con más eficacia que la propia divulgación científica, la noción de que el cambio climático está en marcha. La actualidad se centra ahora en la dificultad de llegar a acuerdos estables de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Discutir si existe o no un cambio climático no es interesante; sabemos que estamos en un proceso de cambio climático. Este es el

problema más importante al que se enfrenta la sociedad en el S. XXI y el reto está en cómo desarrollar los cambios socioeconómicos y tecnológicos necesarios. Creo que ahora es más necesario que nunca mostrar en qué se basa nuestro conocimiento científico sobre este problema: ¿cómo sabemos que existe un cambio climático?; ¿qué es lo que lo produce y cómo va a evolucionar? ¿qué margen tenemos para adaptarnos y mitigarlo? Hoy en día, la ciencia está en posición de ofrecer información útil para la toma de decisiones de cara al futuro, para diseñar protocolos que nos permitan tanto adaptarnos a los impactos del cambio climático, como parcialmente mitigarlos. Hoy en día podríamos utilizar el conocimiento científico para intentar elegir cómo queremos que sea el futuro.

*El futuro: no es tanto una cuestión de predecirlo sino de hacerlo posible.* Esta cita de Saint Exupéry (Ciudadela, 1948) proporciona una idea que me parece muy ilustrativa: la ciencia está en la posición de informarnos cómo podemos hacer posible un futuro viable desde el punto de vista climático. No es el único tema en el que la ciencia tiene un papel importante para anticipar problemas a largo plazo. Por ejemplo, la reciente crisis de la COVID-19 ofrece importantes aspectos en común con el problema del cambio climático. En ambos casos la comunidad científica alertó de un riesgo a largo plazo. La ocurrencia de pandemias era previsible por la continua presión de las actividades humanas sobre los ecosistemas -una faceta del cambio global- y el consiguiente riesgo de zoonosis. Por tanto, en ambos casos se trata de un problema que tiene que ver con la existencia de una sociedad cada vez más conectada globalmente, en la que las emisiones de cada país influyen en el cambio climático, generando impactos a escala global, y en la que la presión global sobre los ecosistemas donde quiera que estén, expone a cualquier ciudadano del mundo a nue-

vos patógenos. En ambos casos, las soluciones requieren de la colaboración internacional en investigación y de compartir información, ya sea para articular una reducción de emisiones en un caso o para el control de la progresión de una pandemia en el otro. Finalmente, en ambos casos es necesario que la ciudadanía entienda y sea sensible al problema global de forma que se puedan estructurar socialmente en cada nación acciones cooperativas que favorezcan el aislamiento social en un caso para frenar la propagación de un virus o bien para poder articular reducciones de la huella de carbono. En ambos casos, es necesario que el ciudadano pueda confiar en la información proporcionada por las instituciones. Aun dándose todos estos aspectos es complicado articular medidas de respuesta ante crisis a largo plazo que sin duda ocurrirán, pero que no se sabe cuándo van a sobrevenir. Si no existe una transparencia informativa, concienciación y colaboración ciudadana, todo se complica.

### La difícil colaboración internacional

La dificultad de articular medidas a largo plazo en el caso del cambio climático se encuentra, sobre todo, en la colaboración internacional. Los países han reconocido, en sucesivos acuerdos internacionales de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio climático (e.g. Kyoto 1997, París 2015), la necesidad de articular esta colaboración y han determinado estrategias para conseguirlo. Sin embargo, estos acuerdos sufren con frecuencia el abandono de algunos de los países que realizan las mayores emisiones,



evidenciando la dificultad de mantener acuerdos funcionales que duren a largo plazo.

Centrémonos ahora en cómo se llega al conocimiento que proporciona la base científica para alcanzar estos acuerdos y que nos coloca ante la oportunidad y responsabilidad de decidir sobre cómo podemos y queremos influir en el futuro. Consideremos las siguientes preguntas: ¿cómo colocamos el cambio climático actual en la perspectiva del pasado paleoclimático?; ¿disponemos de herramientas para entender las causas de esa evolución climática?; finalmente y, en caso afirmativo, ¿cómo podemos utilizar el conocimiento actual para evaluar las consecuencias del cambio climático?, y ¿qué margen de actuación nos ofrecen para poder tomar decisiones que influyan en el futuro?



## LA RECIENTE CRISIS DE LA COVID-19 OFRECE IMPORTANTES ASPECTOS EN COMÚN CON EL PROBLEMA DEL CAMBIO CLIMÁTICO. EN AMBOS CASOS LA COMUNIDAD CIENTÍFICA ALERTÓ DE UN RIESGO A LARGO PLAZO

El clima es una realidad cambiante y esto se puede constatar en la historia del planeta y, por supuesto, con anterioridad a la llegada de nuestra especie. Con frecuencia se relativiza el cambio actual por el hecho de haber existido grandes cambios climáticos en el pasado, con épocas muy convulsas que llevaron al menos a 5 extinciones masivas con cambios drásticos en la flora y la fauna. Muchos de estos procesos tienen que ver con cambios en la química de la atmósfera asociados a orogénesis, o a impactos de meteoritos con gran emisión de gases y de material a la atmósfera, o a cambios orbitales y subsiguientes cambios en la energía recibida del Sol o emitida por la Tierra. En realidad, cualquier cambio climático está asociado a cambios en el equilibrio radiativo del planeta. El clima planetario, identificado por la temperatura a escala global, llamada *temperatura de equilibrio*, es el resultado de un *equilibrio* entre la radiación solar entrante y la radiación terrestre emitida. Los cambios en la temperatura global resultantes son la expresión de una ganancia o de una pérdida energética planetaria y se transmiten a escalas regionales y locales en función de la configuración de océanos y continentes, de la dinámica oceánica y atmosférica y la interacción de la atmósfera con la orografía y las características físicas

del terreno de región en cada época. Por tanto, para entender los cambios climáticos en el pasado, hay que considerar los mecanismos físicos que en cada momento han llevado a un estado de equilibrio climático diferente. Alguno de esos estados climáticos pasados puede tener características similares, por ejemplo en la posición orbital y en la concentración de gases de efecto invernadero, a la situación actual y llegar a ser útil para considerar algunos aspectos análogos a la evolución climática actual. Pero en general, los mecanismos de los cambios climáticos pasados son diferentes del actual.

Cuando pensamos en el cambio climático actual, desde el punto de vista del pasado climático de la Tierra, con frecuencia adoptamos una posición antropocéntrica. Digo esto en el sentido de que consideramos la importancia del cambio climático actual por cómo afecta al hombre, no por su magnitud relativa en comparación con cambios anteriores, sino porque en el momento actual la sociedad y la especie humana son sensibles a los impactos del cambio climático; en cambios climáticos anteriores “no estábamos allí” como sociedad organizada, con una agricultura, industria, comercio, etc. Esta organización se ha desarrollado a lo largo del último período interglacial en el que nos encontramos, el Holoceno, iniciado hace 11.000 años. Adoptemos brevemente esta perspectiva antropocéntrica.

La humanidad se ha desarrollado a lo largo de los últimos millones de años. El homo



sapiens es la única de las especies de género homo que no ha desaparecido. Sabemos que el último millón de años ha sido una sucesión de períodos fríos y cálidos, llamados glaciales e interglaciales. También sabemos que estas etapas se disparan por cambios en la posición relativa de la Tierra respecto al Sol. En su movimiento orbital, el eje de rotación de la Tierra tiene un ángulo de casi 70° respecto al plano de traslación de la tierra alrededor del Sol, la Eclíptica. Este ángulo varía lentamente con el tiempo, así como también la distancia entre la Tierra y el Sol. Cuando la inclinación del eje de rotación aumenta y la distancia disminuye, la insolación aumenta. Esto es muy importante en latitudes medias y altas en donde entonces la temperatura

aumenta con la mayor energía entrante y se reduce la cobertura de hielo y el albedo. La menor reflexión de energía solar refuerza la entrada de energía y retroalimenta positivamente el cambio inicial. A su vez, el aumento de temperatura contribuye a una menor asimilación de CO<sub>2</sub> por parte del océano y, por tanto, a un aumento de su concentración en la atmósfera y la consiguiente intensificación del efecto invernadero. De este modo, el cambio de temperatura inicial se amplifica y el hielo retrocede más. Estos cambios van también acompañados de un aumento del nivel del mar asociado a la dilatación de la columna de agua oceánica y a la fusión del hielo en la criosfera. De esta forma retroceden, progresivamente, los mantos de hielo

## LA EVIDENCIA OBSERVACIONAL Y LOS MODELOS CLIMÁTICOS CONFIRMAN QUE EXISTE UN PROCESO DE CAMBIO CLIMÁTICO EN DESARROLLO QUE ES, SOBRE TODO, CONSECUENCIA DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS

continentales y pasamos de un glacial a un interglacial. En el tránsito a una glaciación el detonante es una menor inclinación del eje terrestre respecto al plano de la Eclíptica, entra menos energía solar en el sistema y los cambios se suceden de forma inversa a los descritos anteriormente.

Hoy sabemos que la temperatura del planeta, las concentraciones de gases de efecto invernadero y el nivel del mar han cambiado de forma sincrónica en periodos glaciales e interglaciales. La composición química de la atmósfera y el estado climático varían de forma coordinada: los cambios en la temperatura del planeta alteran la composición química de la atmósfera y viceversa. Podemos constatar estas variaciones a partir de testigos de hielo en las zonas polares y muestras de sedimentos marinos que se extienden millones de años hacia atrás. El registro arqueológico también muestra estos cambios pasados y retrata al hombre en su contexto. Hace 20.000 años fue el momento de máxima extensión de hielo continental; lo llamamos el Último Máximo Glacial. Los *homo sapiens* nos quedamos solos más o menos en ese momento. De alguna forma pudimos adaptarnos mejor que los neandertales y otras especies del género *homo*. Es posible que fuese una mayor

capacidad de colaboración en el grupo, pero no podemos decir que fuésemos una sociedad; no estábamos allí como tal. Algunas cuevas muestran pinturas e indicaciones de ecosistemas muy diferentes a los actuales. Visiten la web y busquen la Grotte Cosquer, cerca de Marsella, y podrán ver pinturas rupestres de pingüinos hechas por *sapiens* hace poco más de 20.000 años, ¡en Marsella! Es también un ejemplo interesante de subida del nivel del mar; piensen que la entrada a la cueva se encuentra hoy a más de 30 metros bajo la superficie.

### Hace 27.000 años

Hace 27.000 años nos encontrábamos en el último momento de máxima extensión del hielo en toda la Tierra y... no era extraño ver pingüinos en Marsella. La cuestión es que en este momento los *sapiens* éramos cazadores recolectores. Todavía no éramos una sociedad constituida, no había estructuras sociales, escritura, burocracia, etc. A partir de ese momento la posición orbital del planeta haría que nos dirigiésemos hacia un interglacial. La temperatura global subió a partir de ese momento del orden de 3 a 8°C a escala global, el hielo retrocedió y sobrevino el Holoceno, el último interglacial en el que nos encontramos desde hace aproximadamente 11.000 años. Los cambios fueron de una magnitud comparable o superior a los que experimentaremos en las próximas décadas, pero ocurrieron en unos cuantos miles de años. Es muy probable que tuviesen cierto impacto en los humanos, ya solo *sapiens*, de ese momento. De hecho, el cambio favoreció condiciones óptimas unos cuantos miles de años más tarde para el asentamiento y el desarrollo de la ganadería y la agricultura y, por tanto, la aparición de sociedades y culturas progresivamente más complejas. No es difícil remitirnos al desarrollo de grandes civilizaciones en Mesopotamia,

Asia, sur y norte del Mediterráneo y Centro América.

En todo ese proceso, el hombre no dejó de tener un impacto en el entorno en el que se desarrollaba. La agricultura y la ganadería ha sido un factor que contribuyó a la desertización en zonas de Asia, Libia y Egipto. Incluso anteriormente, a medida que el *sapiens* iba extendiéndose por todos los continentes, los grandes mamíferos fueron desapareciendo progresivamente como resultado de las actividades de una especie depredadora. La agricultura y la ganadería permitieron el asentamiento humano y el florecimiento de las sociedades y, por la dependencia de ambas, también ofreció una nueva sensibilidad de la especie a los avatares climáticos. Son numerosos los ejemplos de florecimiento y caída de civilizaciones favorecidos por cambios en las condiciones climáticas o por eventos extremos, fundamentalmente por las dificultades de acceso al agua para la agricultura y la ganadería. El clima no es el único factor determinante, pero con frecuencia la sequía y sus impactos en la agricultura y la ganadería han sido y son fuente de conflicto social y político; han favorecido la caída de dinastías y civilizaciones: Angkor, Tikal, el Imperio Asirio y la dinastías en el Asia monzónica son solamente algunos ejemplos. Podríamos pensar, no sin cierta arrogancia, que son circunstancias que afectan a sociedades menos desarrolladas que la actual. Un ejemplo interesante, en este sentido, lo constituye la cultura Anasazi; construían pueblos preciosos -su seña de identidad- en el suroeste de EE.UU. entre finales del primer milenio y principios del segundo. Esta cultura de los pueblos floreció en esta época y desapareció a principios del segundo milenio asolada por una serie de “megasequías”, las más grandes que se han visto desde entonces en esa región. Resulta curioso pensar que en los años 30 del S. XX, el Dust Bowl fue un evento com-

parativamente menor, y que sin embargo resultó ser suficiente para tener grandes consecuencias sociales y económicas en la región, influyendo en EE.UU. y en la economía mundial en tiempos de la gran depresión –pensemos en “Las uvas de la ira”, de Steinbeck-. La sociedad industrial y tecnológica del S. XX y XXI sigue siendo dependiente de las condiciones climáticas a las que está adaptada; solo tenemos que pensar en los períodos de sequía en el Sahel, la reciente sequía en Siria, los efectos de las precipitaciones extremas y las inundaciones en el Mediterráneo, entre otros. El desarrollo y la tecnología ayudan, pero no nos hacen invulnerables ante las crisis climáticas.

Con la modernidad llegó el desarrollo de las ciencias, la instrumentación científica y el conocimiento de la mecánica y la termodinámica. A mediados del siglo XIX los motores de combustión y la máquina de vapor habían facilitado un proceso de industrialización basado en el uso de combustibles vegetales y fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Esta aproximación para proporcionar energía a la sociedad ha sido fundamental para llegar al punto actual de desarrollo tecnológico y social y la generación de energía basada en el uso de combustibles fósiles representa aproximadamente, un 80 % del total global.

A principios del S.XIX Joseph Fourier, en Francia, entendió por qué la Tierra tenía una temperatura de equilibrio superior a la que le correspondería considerando su distancia al Sol y su tamaño. Si no se tiene en cuenta la atmósfera, la temperatura de la Tierra sería aproximadamente 30°C más baja. El motivo es que algunos gases en la atmósfera dejan pasar la radiación electromagnética solar -de onda corta- e interaccionan con la emitida por la Tierra en onda larga. Estos gases absorben esta radiación terrestre, menos energética



que la solar, y vuelven a emitirla al espacio y hacia la superficie. Se trata de un rebote en donde parte de la energía vuelve hacia el interior del sistema, lo que aumenta la temperatura de equilibrio de la Tierra. A esto lo llamamos efecto invernadero. El CO<sub>2</sub>, el metano y otros gases, incluido el vapor de agua, interaccionan con la radiación emitida por la Tierra y contribuyen a este efecto invernadero. Cuando sus concentraciones aumentan en la atmósfera, el efecto invernadero se intensifica. Recordemos que los gases de efecto invernadero aumentaban en una glaciación como un efecto secundario del aumento de temperatura, originalmente producido por cambios orbitales. Con el desarrollo de la industrialización empiezan a surgir hipótesis sobre un aumento de temperatura producido por el incremento de gases de efecto invernadero asociado a las crecientes emisiones y consumo de energía.

A finales del S. XIX algunos científicos como Svante Arrhenius en Suecia trabajaban en la interacción de la radiación de onda larga infrarroja con gases como el CO<sub>2</sub> y eran conscientes de la gran cantidad de emisiones efectuadas con el desarrollo industrial. Siguiendo la hipótesis anterior calculó que debería de esperarse un aumento global de temperatura de 5 a 6°C si se duplicaran las concentraciones de CO<sub>2</sub>. Las estimaciones de Arrhenius eran bastante consistentes con nuestras previsiones actuales; no estaba mal teniendo en cuenta los ordenadores disponibles en su época. Al igual que Arrhenius otros científicos (e.g. Thyndal) empezaron a explorar la importancia de gases de efecto invernadero en esta época tan temprana, pero existía todavía un registro instrumental de observaciones meteorológicas muy corto y de limitada cobertura espacial sobre el planeta.

A lo largo del S.XX se desarrolla la era industrial y seguidamente se entra en la era tec-

nológica actual. Este cambio extraordinario ha ocurrido en apenas dos siglos de desarrollo. Las concentraciones de CO<sub>2</sub> son hoy en día no sólo superiores a las preindustriales anteriormente indicadas, sino que los registros paleoclimáticos nos indican que están por encima de los niveles del último millón de años y probablemente antes. Las concentraciones de otros gases de efecto invernadero como el metano y el óxido nitroso han subido también de forma significativa a lo largo de los dos últimos siglos. Hoy en día podemos analizar la evolución climática a lo largo de la era industrial; tenemos observaciones instrumentales y modelos climáticos que nos permiten entender los mecanismos que han influido en el registro climático observado. A principios de la era industrial las concentraciones de CO<sub>2</sub> eran de 280 ppm y hoy en día hemos superado el nivel de 410 ppm. ¿Qué nos dicen las observaciones del sistema climático desde entonces?

### **El aumento de temperatura ha sido global...**

Desde finales del S. XIX hasta ahora, la temperatura global del planeta ha subido algo más de 1°C. El aumento de temperatura ha sido global y ha sido mayor sobre los continentes -aproximadamente 1.5°C- que sobre el océano -0.7°C-, por la mayor capacidad calorífica de este último. La cubierta de hielo y nieve continental ha disminuido, contribuyendo al aumento del nivel del mar. La dilatación térmica de la columna de agua oceánica por aumento de temperatura y la fusión de hielo continental son consistentes con las observaciones del nivel del mar. El nivel del mar global ha subido de forma cuasi lineal a un ritmo de aproximadamente 15 mm por década. El aumento de temperatura ha sido mayor en latitudes altas del Hemisferio Norte, debido a la retroalimentación positiva de la



disminución de la criosfera. Las observaciones a lo largo de las últimas décadas nos han permitido constatar que el aumento de temperatura ha afectado a toda la atmósfera por debajo de la Tropopausa -aproximadamente 10 km de altura- y la atmósfera por encima se ha enfriado. La comprobación de todos estos cambios en variables representativas del estado de diferentes subsistemas, no solamente en la temperatura, es importante para evaluar la robustez y confianza en la existencia de un calentamiento global y su consistencia con el aumento de energía. Por ejemplo, se esperaría que un aumento de la energía infrarroja de onda larga asociada a un aumento de gases de efecto invernadero generase una menor emisión infrarroja a capas altas de la atmósfera y, por tanto, un enfriamiento relativo en altura, tal como indican las observaciones. Por otro lado, una atmósfera más cálida tiene mayor capacidad de albergar humedad -piensen en una sauna- y efectivamente podemos comprobar que ha habido una incentivación del ciclo hidrológico con un aumento de la humedad y un aumento de la precipitación en las re-

giones más húmedas y un déficit hídrico en donde normalmente llueve menos. Por tanto, las observaciones indican con claridad que ha habido un aumento de la energía en el sistema, constatable en el comportamiento de las variables observadas en diferentes partes del sistema climático.

Teniendo en cuenta lo anterior, podríamos decir que hemos detectado un cambio climático. Nuestro sistema observacional describe de forma objetiva un aumento en la energía que entra en el sistema climático y que se manifiesta en una variedad de indicadores, más incluso que los anteriormente mencionados. En este tipo de comparaciones intervienen muchas instituciones con diferentes métodos y aproximaciones independientes; toda esa cantidad de información consistente aporta confianza en los resultados. Quizás merezca la pena reparar en esto: ningún ser humano sería capaz por sí mismo de tener una percepción tan completa a lo largo de su vida de cómo ha variado el clima. Con frecuencia echamos mano de nuestra memoria e intui-

## LA SITUACIÓN ES IRREVERSIBLE: UNA PARTE IMPORTANTE DE LAS CANTIDADES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EMITIDAS PERMANECE EN LA ATMÓSFERA DURANTE SIGLOS

ción e intentamos establecer consecuencias subjetivas sobre cómo percibimos los cambios a lo largo de nuestra experiencia vital. Necesitamos tener sistemas de observación global y continuada para poder decir que estamos seguros de que el sistema climático se está calentando. Derivar conclusiones de este modo es bastante habitual pero peligroso porque el clima a escala regional y local, es decir, el clima que se corresponde con la experiencia perceptiva de cualquier ciudadano, no representa toda la variedad de cambios e información antes indicados. Es más, en un mundo sin cambios a largo plazo, sin cambio climático, podríamos percibir igualmente alteraciones asociadas a nuestra cotidianidad a lo largo de los años como resultado de lo que llamamos variabilidad interna, producida por interacciones entre distintos subsistemas. En un estado climático estable a largo plazo, en el que no se da un cambio climático, es posible percibir cambios locales en escalas decadales y multidecadales asociados a un aumento o disminución de la temperatura, la precipitación u otras variables de interés –recuerden el caso de los Anasazi-, sin que necesariamente se transite a otro estado climático diferente. Para detectar con confianza un cambio climático hemos de poder observar diferentes partes del sistema de forma sistemática a lo largo de un periodo largo de



tiempo, con frecuencia más largo que la vida de una persona.

### ...pero no uniforme a lo largo del S.XX

El aumento de temperatura global no es uniforme a lo largo del S. XX. Las temperaturas no aumentaron o incluso disminuyeron en las primeras décadas, para aumentar en los años 20 y 30, estabilizarse después y luego aumentar con más rapidez desde los años 70. ¿Qué pudo producir estos cambios y qué pudo hacer que su desarrollo temporal fuese así?, ¿podrían estar asociados a variabilidad interna o realmente tener que ver con cam-

te pueden suponer una simplificación de la realidad. Obviamente no podemos encontrar una solución analítica para un problema tan grande, pero estos modelos nos permiten encontrar soluciones muy realistas que llegan a representar la evolución del clima a lo largo de todo el período de interés con un altísimo nivel de detalle espacial y temporal. No obstante, lo que nos interesa para esta reflexión es qué ocurre si le proporcionamos a un modelo climático los cambios en el balance de energía global, ¿pueden entonces simular cambios similares a los antes descritos en la realidad?

Si en los modelos no se introducen cambios que afecten a su equilibrio energético, estos representan un clima estable en el que aparece variabilidad climática “interna” asociada a la interacción entre el océano, la litosfera, la criosfera y la atmósfera, pero sin transitar a largo plazo sistemáticamente a un clima más cálido o frío, con cambios coordinados en la precipitación, hielo, nivel del mar, etc. Para estudiar el cambio climático introducimos en el modelo los cambios en todos los factores de forzamiento que pueden alterar el equilibrio energético, tanto los de origen natural como los de origen humano. Se incluyen entonces los cambios asociados a la posición orbital de la Tierra, la irradiancia solar y la concentración de aerosoles asociados a la actividad volcánica; todos esos son factores de origen natural. Por otro lado, se introduce la influencia de las actividades humanas: la evolución de las concentraciones de los gases de efecto invernadero, los aerosoles emitidos por la industria y los cambios en los usos y cobertura del terreno. Estos modelos funcionan con un laboratorio o una pseudo-realidad. Nos permiten hacer experimentos en los que consideramos el efecto que producen diferentes posibilidades. Por ejemplo, podemos considerar su respuesta a cambios en los forzamientos naturales (orbi-

bios en el equilibrio energético global, con un cambio climático? Para poder atribuir los cambios observados a causas específicas utilizamos modelos climáticos.

Un modelo climático es un software en el que se describe matemáticamente y se resuelven las ecuaciones que rigen de cada uno de los subsistemas climáticos. Casi toda la física y la química que conocemos del sistema climático está introducida en estos modelos, ahora llamados Modelos del Sistema Tierra. Son computacionalmente complejos y requieren un alto coste computacional en grandes ordenadores. Por supuesto, estos modelos están sometidos a errores e incertidumbres puesto que, por complejos que sean, solamen-



tales, solar y volcanes). Cuando se hace esto puede comprobarse que no se reproduce el cambio climático actual; aparecen aumentos leves de temperatura global en algunas décadas como en los años 30 y 40, muy inferiores a las registradas y se simulan también los enfriamientos de algunas épocas en las que sube la actividad volcánica. Si se tienen en cuenta los factores naturales y también los antropogénicos, entonces los modelos climáticos muestran un aumento de temperatura comparable al observado y a lo largo de los mismos períodos en los que ocurre en la realidad. La variabilidad solar contribuye mínimamente al aumento de temperatura antes de 1950, y todo lo demás es el resultado de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a las actividades humanas. Los aerosoles industriales hacen que el aumento de temperatura en la segunda mitad del S. XX, asociado al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero, se retrase un poco y empiece en los años 70; la inclusión de aerosoles volcánicos permite representar el enfriamiento de eventos como el del Pinatubo en 1991. Es este tipo de experimentos, realizado con muchos modelos diferentes, el que nos permite explicar las tendencias de temperatura observada solamente si tenemos en cuenta las actividades humanas. De hecho, el análisis puede llevarse a escalas regionales y comprobar que no es posible representar en la mayor parte de los continentes y océanos los cambios en la temperatura, la energía almacenada en el océano o el retroceso del hielo marino si no se tienen en cuenta los factores de forzamiento energético de origen humano. A este tipo de experimentos se les denomina experimentos de atribución y nos permiten vincular los cambios observados con diferentes causas de origen natural y humano. Nos permiten decir que más del aumento de temperatura observado desde mediados del S. XX se debe a las actividades humanas.

## Un proceso de cambio climático en desarrollo

Llegados a este punto, podemos decir que la evidencia observacional y los modelos climáticos nos confirman que existe un proceso de cambio climático en desarrollo que es, sobre todo, consecuencia de las actividades humanas. Este tipo de aproximación a la detección y atribución causal de los cambios, además de proporcionarnos un gran poder interpretativo sobre la evolución del sistema en el pasado, nos permite plantearnos preguntas de cara al futuro. ¿Podemos utilizar estas herramientas para predecir la intensidad y consecuencias del cambio climático en el futuro? Para poder contestar a esta pregunta tendríamos que saber la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que se van a emitir a la atmósfera en las próximas décadas. Esto equivale a saber cuál será la evolución de la población mundial, su demanda energética y los recursos tecnológicos de los que dispone o cuánto recurrirá en la producción energética a la combustión y emisión de gases de efecto invernadero. Resulta evidente que no podemos anticipar con certidumbre estos cambios. Pero lo que sí podemos hacer es un análisis de riesgos. Tenemos las herramientas, los modelos climáticos, que podemos usar como laboratorio, en los que especifiquemos posibles evoluciones futuras de las emisiones asociadas a las actividades humanas. Un escenario posible sería aquel en el que realmente intentamos reducir al máximo las emisiones haciendo un gran esfuerzo en llevar a cabo una transición tecnológica y energética de forma que el forzamiento a finales del S.XXI por esta vía no supere los  $2.6 \text{ Wm}^{-2}$ ; esto se ha denominado RCP2.6 (del inglés, Representative Concentration Pathway) y coincide con los planteamientos del tratado de París en 2015. Es un reto importante porque las emisiones que nos permitiríamos realizar hasta finales del S. XXI serían las que



consumiríamos al ritmo actual de crecimiento en un par de décadas. Alternativamente se analizan otros escenarios con un progresivo menor nivel de intervención hasta un escenario de no intervención que incluye un aumento del forzamiento antropogénico de  $8.5 \text{ Wm}^{-2}$  –RCP8.5– a finales de siglo, muy consistente con los planteamientos de Arrhenius.

Si se considera el escenario de menor emisión (RCP2.6; tratado de París) el aumento de temperatura global se limita por debajo de  $2^\circ\text{C}$  respecto al período preindustrial. La respuesta en otros escenarios aumenta progresivamente hasta los  $5^\circ\text{C}$  de promedio global en el RCP8.5. No olvidemos que los promedios globales son siempre inferiores a los cambios en muchas regiones continentales y en latitudes altas, en donde en el RCP8.5 se puede llegar a cambios de  $10^\circ\text{C}$  en ese escenario más agresivo. El patrón de respuesta espacial de la temperatura es, en este sentido, muy similar al observado, solo que representa un estado de mayor intensidad de los cambios. Otras variables representativas del sistema, como

la cantidad de hielo ártico en el Hemisferio Norte, apuntan a un descenso importante del mismo incluso en el caso de reducir las emisiones al máximo, y a un colapso de seguirse escenarios de alta emisión como en el RCP8.5. A su vez, la precipitación muestra intensificaciones del ciclo hidrológico con aumento de la precipitación asociada a la circulación atmosférica zonal: más precipitación en latitudes altas, descenso en el Mediterráneo y alteración de la precipitación en los regímenes monzónicos tropicales. En realidad todo se parece bastante a los cambios que ya estamos observando solo que, con más intensidad. Por otro lado, tenemos bastante confianza en las herramientas utilizadas porque si se analiza la evolución de las temperaturas a lo largo de los últimos 30 años coincide bien con las estimaciones realizadas a lo largo de los años 90. En ese sentido, esta evaluación de riesgos anticipó correctamente los cambios que luego experimentaríamos; no está mal para no pretender hacer predicciones.

La comparación de emisiones con el au-

## LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA DEBE DE ADELANTARSE VARIAS DÉCADAS RESPECTO A LO QUE SE NECESITARÍA PARA ALCANZAR EL OBJETIVO DE 2°C, LO QUE CONSTITUYE UN RETO ENORME DE REDUCCIÓN DE EMISIONES PARA LA SOCIEDAD ACTUAL

mento de temperatura resultante en las observaciones y el simulado por los modelos en diferentes escenarios nos lleva a la noción de proporcionalidad: a mayores emisiones tenemos una respuesta del sistema como la que estamos observando hoy en día, simplemente que proporcionalmente de mayor magnitud. Es decir, el cambio esperable de la temperatura es proporcional a la cantidad total de emisiones realizadas desde la era preindustrial. Dicho de otra forma: si seguimos como hasta ahora sólo deberíamos de esperar más de lo mismo. Esta es una idea simple que nos trae planteamientos importantes de irreversibilidad y compromiso: ¿hasta qué punto es posible frenar el cambio climático en marcha?, ¿podemos hacer cambios que devuelvan el sistema a las condiciones anteriores y corregir las consecuencias de nuestro desarrollo?, ¿podemos al menos suavizarlas o mitigarlas?

Los experimentos con modelos climáticos nos confirman que la situación es irreversible. La razón es que aunque una parte de las cantidades de gases de efecto invernadero emitidas se depositan en la tierra o son retiradas por el océano, una parte importante permanece en la atmósfera durante siglos; no

se “disipa” en poco tiempo. Recordemos que hemos superado la barrera de los 410 ppm de concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico por las emisiones acumuladas de unas pocas décadas, un nivel no alcanzado en millones de años. Eso significa que todas las emisiones realizadas en el pasado nos comprometen con un determinado nivel de intensidad del efecto invernadero que no podemos invertir. Una posibilidad sería realizar emisiones negativas, es decir, desarrollar técnicas (tecnologías de emisión negativa; del inglés NET) de retirada de carbono de la atmósfera, pero no tenemos la tecnología y estamos a un ritmo de emisión muy alto; recordemos que un 80 % de la producción está basada en combustibles fósiles y con una población en aumento. Otra posibilidad es fijarnos un límite en la intensificación del efecto invernadero. Supongamos que no queremos que supere los 2°C a escala global. Para ello tenemos un margen estrecho de emisiones que todavía se pueden realizar a lo largo de las próximas décadas. Pensemos que la cantidad acumulada de emisiones hasta 2010, con 1°C de aumento desde finales del S.XIX era de aproximadamente 2000 GtCO<sub>2</sub>. Si se quiere limitar el aumento de temperatura a 1.5 o 2°C, de acuerdo con el tratado de París y el escenario RCP2.6, el nivel de emisiones acumuladas podría subir hasta un valor límite de 3000 GtCO<sub>2</sub>. Hoy en día tendríamos menos de ese margen ya. Como decíamos antes, al ritmo actual de aumento de emisiones esa cantidad se alcanzaría antes de mediados de siglo. Por tanto, la amplitud del aumento de temperatura en la segunda mitad de este siglo depende de los esfuerzos que hagamos ahora para reducir las emisiones a lo largo de las próximas décadas.

Por tanto, los experimentos con modelos climáticos nos permiten estimar el cambio de temperatura futuro en función de nuestras decisiones en la actualidad y nos permiten preguntarnos qué margen tenemos para mitigar



los impactos esperados. Sabemos que las emisiones actuales y futuras comprometerán un calentamiento global mayor que no será posible revertir al estado inicial, no al menos en una escala temporal corta. Y esto solamente se refiere a cambios en el clima medio; sabemos que la probabilidad de “sorpresas” asociadas a respuestas no lineales como el deshielo de los mantos polares es mayor en un clima más cálido. Aunque detuviésemos instantáneamente las emisiones, algo imposible, las temperaturas seguirían subiendo para compensar el desequilibrio energético de las emisiones del pasado reciente. Para reducir todos estos riesgos, las transformaciones sociales, tecnológicas y energéticas han de iniciarse con antelación suficiente de forma que los cambios puedan hacerse de forma efectiva. En el presente existe todavía un margen de oportunidad que permitiría plantearnos el objetivo de limitar el aumento de temperatura global a 1.5 o 2°C. Desde este punto de vista, existe una urgencia climática asociada a la necesidad de tomar decisiones para poder cumplir con este objetivo. Al ritmo actual, el calentamiento

producido por el hombre añade del orden de 0.2°C de aumento global de las temperaturas en cada década y el aumento global de temperatura alcanzará los 1.5°C entre 2030 y 2050. El 20-40 % de la población global vive en regiones que ya han experimentado un aumento de más de 1.5°C en alguna estación del año.

Las simulaciones con modelos climáticos muestran que es técnicamente posible limitar el aumento de temperatura a 1.5°C a escala global a finales del S.XXI. Para ello deben de controlarse las emisiones lo antes posible. Existen varios caminos o escenarios de emisión posible para poder alcanzar este objetivo. Algunas involucran un “disparo” por encima de 1.5°C en 2050 que se relaja posteriormente al objetivo de 1.5 °C a finales de siglo, pero todas las vías posibles tienen algo en común: se necesita una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> netas a cero en 2050 y una reducción considerable de otros gases de efecto invernadero y aerosoles. Para conseguir esto habría que emplearse a fondo también con las NETs en las próximas décadas. Los retrasos en los



recortes de emisiones llevarán a mayores intensificaciones del efecto invernadero en la segunda mitad del siglo y a mayor esfuerzo en NETs para eliminar carbono de la atmósfera.

### Alteraciones profundas de los ecosistemas

El aumento de temperatura a lo largo de las últimas décadas ya ha resultado en alteraciones profundas de los ecosistemas naturales e impactos en la sociedad, a través de extremos meteorológicos, sequías, inundaciones, subidas del nivel del mar y pérdidas de la biodiversidad, elevando el riesgo y vulnerabilidad de partes importantes de la sociedad. Aunque podamos tener incertidumbres en la magnitud de los cambios esperables que dependen de los factores antes considerados, el riesgo es cierto y aumenta con el incremento de temperatura, siendo significativamente mayor incluso para un umbral de 2°C que para uno de 1.5 °C respecto al clima preindustrial. Cuando se analizan los motivos de preocupación (RFC, del inglés, reasons for concern), el riesgo es elevado para 1.5°C y muy elevado para 2°C para sistemas únicos bajo amenaza. Este es el caso de sistemas únicos en dominios geográficos restringidos con propiedades endémicas específicas (e.g. los arrecifes de coral, el Ártico, glaciares de montaña y puntos focales de biodiversidad). El riesgo es elevado en un aumento de 1.5 °C y de 2°C para la ocurrencia de meteorología extrema (olas de calor, sequías, fuegos e inundaciones) e impactos en la salud humana, las infraestructuras y sistemas económicos relacionados. Por ejemplo, 1.5°C en vez de 2°C supone 420 millones de personas menos expuestas frecuentemente a olas de calor. El riesgo es elevado por encima de 1.5°C y en 2°C para todas las demás RFCs que describen la vulnerabilidad de sectores concretos de la sociedad, la economía y la calidad de los ecosistemas y la biodi-

versidad. Más específicamente, la desaparición de los arrecifes de coral será total con un aumento de 2°C y mayoritaria en 1.5°C; la presencia de hielo marino en el Ártico disminuye 10 veces en un escenario de 2°C de aumento respecto a uno de 1.5°C; la desaparición de especies de vertebrados y plantas se duplica y la de insectos se triplica con un aumento de 2°C; el impacto para los ecosistemas, las pesquerías y la productividad de las cosechas se duplica aproximadamente con medio grado más de aumento de temperatura. Adicionalmente, hay que contar con las sorpresas: procesos que no están representados de forma suficientemente realista en los modelos climáticos actuales y que pueden acelerarse al cruzar umbrales, al aumentar la probabilidad de respuestas no lineales en el sistema, e.g. fusión del permafrost o de mantos glaciares en Groenlandia o en la Antártida.

Aunque técnicamente es posible limitar los cambios en el sistema climático con un control de las emisiones, la transformación socioeconómica y tecnológica necesaria para conseguirlo no tiene precedentes y requiere acuerdos que entiendan la oportunidad de la situación. De lo contrario, se perderá la oportunidad del objetivo de 1.5°C de aumento o incluso el de 2°C. Existen muchas trayectorias que se pueden seguir, pero todas requieren emisiones netas cero de CO<sub>2</sub> en 2050. Para cumplir este objetivo la transición energética debe adelantarse varias décadas respecto a lo que se necesitaría para alcanzar el objetivo de 2°C, lo que constituye un reto enorme de reducción de emisiones para la sociedad actual. Por ejemplo, las emisiones de la industria deberían caer en un 80% respecto a los niveles de 2010 y el mercado eléctrico debería estar descarbonizado a partir de 2050 y sustentado en la generación de energía renovable en un 70-85 %. El ciudadano debe de poder acceder a información clara sobre las consecuencias de sus actividades en términos

de emisiones. Debe de poder estimar la huella de carbono de sus actividades y la de los productos que compra. Antes que eso, las instituciones, públicas y privadas, deben de publicar los balances de sus emisiones de carbono e intentar reducirlas de forma eficaz. El transporte, la construcción y la eficiencia energética deben de orientarse en esta dirección. En este sentido deben de ir las leyes, como la reciente propuesta en trámite de Ley de Cambio Climático y Transición Energética. Si no se avanza en los requerimientos de reducción de emisiones será imposible conseguir los objetivos del Tratado de París y limitar el aumento de temperatura en las próximas décadas.

Estamos en el Antropoceno; el desarrollo humano ha generado una huella geológica discernible. El reto que plantea el cambio climático es el mayor al que se ha enfrentado la sociedad desde sus orígenes: gestionar las consecuencias adversas de su propio crecimiento y evolución y garantizar un desarrollo sostenible que cumpla con las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades. Esto requiere equilibrar el bienestar social, la prosperidad económica y la protección del medioambiente. Este camino permitiría desarrollar sinergias para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible para 2030. Por el contrario, no hacerlo socava objetivamente esa posibilidad por los problemas derivados de los impactos del cambio climático y las consiguientes dificultades de acceso a la comida, al agua y a un medioambiente limpio. Indiscutiblemente será necesario hacer también un gran esfuerzo que incluya no solo estrategias de mitigación sino también de adaptación, entendidas estas últimas como procesos de ajuste al clima actual o al esperado, o bien como evolución que permita aprovechar las oportunidades para generar beneficios o mejoras en la sociedad.



### FIDEL GONZÁLEZ ROUCO

Es Profesor Titular en el Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica de la Universidad Complutense de Madrid y es investigador en el Instituto de Geociencias (IGEO, UCM-CSIC) donde es codirector del grupo PalMA (Paleoclimate Modelling and Analysis). Centra su investigación en diferentes problemas científicos que involucran modelización y comparación de modelo y datos, como el estudio de los mecanismos que contribuyen a la variabilidad y al cambio climático actual en el contexto de los últimos milenios. Ha sido autor del quinto informe del IPCC y participado en diferentes comités nacionales e internacionales orientados al estudio y monitorización del clima (PAGES 2K, CLIVAR-es, Asociación Española de Climatología). Es coordinador de la red de observación GuMNet (Guadarrama Monitoring Network [www.ucm.es/gumnet/](http://www.ucm.es/gumnet/)).