

El Cambio Climático Antropogénico: Una teoría científica en un debate socio-político a escala global

La invitación del Rector para que impartiera esta lección inaugural del curso 2015-2016, además de apreciarla como una deferencia que cordialmente le agradezco, también la interpreté como su interés por que versara sobre el Cambio Climático, el campo científico al que me dedico, quizá por ser éste un asunto que va a concitar la atención mundial en los próximos meses. Como sabrán, en diciembre de este año está convocada en Paris la vigésimo primera Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, con el propósito de alcanzar acuerdos globales para tratar de mitigar la futura intensificación de dicho fenómeno.

De los diversos aspectos que componen el complejo asunto del Cambio Climático, dedicaré esta lección a esbozar su fundamento físico, los medios de que dispone la Ciencia para analizarlo y lo que ésta puede decir acerca de su posible evolución futura. Pero he creído conveniente comenzar con unas consideraciones sobre porqué el Cambio Climático ha sido, y pasmosamente continua siendo, un tema de debate socio-político.

Por *Cambio Climático Antropogénico* se entiende la alteración que experimentan los diversos climas terrestres por el sobrecalentamiento causado al acumularse en la atmósfera ciertos gases emitidos cuando quemamos combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas). Esta es en esencia la teoría sobre cuya consistencia la Ciencia ya no alberga dudas, pero que curiosamente la sociedad aún contempla como un tema sujeto a controversia.

Sería esto comprensible si se tratase de una cuestión ante la que cupiera aducir razones morales, creencias religiosas o convicciones políticas. Pero el *Cambio Climático Antropogénico* es una teoría científica, como lo son la Teoría de la Relatividad o la Cinética de Gases. La práctica generalidad de las teorías se han discutido en los foros científicos, no en la sociedad. Y cuando la Ciencia ha acordado la solvencia de una teoría, no se comprende que sea puesta en cuestión en foros sociales, económicos o políticos. Entonces, ¿qué tiene de particular la teoría del Cambio Climático Antropogénico?

Buscando entre los raros precedentes de una teoría científica que también hubiera provocado debate en la sociedad, acaso admita comparación la famosa Teoría de la Evolución de las Especies, propuesta por Darwin y Wallace a mediados del siglo XIX. Los ilustrados más radicales de aquella época esgrimieron la teoría darwinista para combatir el cándido creacionismo sostenido entonces por la mayoría de religiones, lo que provocó la reacción impetuosa de ciertos estamentos, y ese debate se propagó de forma muy rápida al ámbito social y político. Los medios de comunicación tomaron también partido, divulgando oportunas opiniones de “científicos” de uno u otro signo. No obstante, la polémica se calmó al cabo de pocas décadas, pues la Ciencia siguió aportando evidencias que apuntalaban la teoría y, al mismo tiempo, los ideólogos religiosos hallaron argumentos para conciliarla con los dogmas, claro.

¿Qué semejanzas con aquel debate presenta el actual sobre el Cambio Climático?. Creo que se pueden hallar en algunos rasgos de su desarrollo histórico que se inició a finales de la década de los 70 del pasado siglo. Por entonces surgieron las primeras noticias acerca de que un calentamiento global empezaba a ser discernible de la variabilidad natural del clima, cuya causa debía atribuirse a la acumulación de gases emitidos por actividades humanas, como ya habían advertido especulativamente algunos científicos a finales del siglo XIX. Ante esas novedades, la mayoría de científicos se mostraron escépticos, pero a muchos les despertó un enorme interés por conocer mejor los procesos físicos que determinan el clima terrestre. Así se inició uno más de los más extraordinarios avances conseguidos por la Ciencia en las últimas cuatro décadas.

Con esos incipientes hallazgos, aparecieron en escena grupos ambientalistas radicales, junto a algunos científicos poco rigurosos, lo que empezó a politizar el tema del Cambio Climático, pues inmediatamente se inició el contraataque de diversas organizaciones, preferentemente de signo conservador, apoyadas por importantes corporaciones industriales. Comenzó entonces un curioso proceso. Desde la izquierda se decidió exponer tales hallazgos científicos con tintes algo catastrofistas, creyendo que así concitarían la atención de una sociedad que suponían apática. Y a su vez, desde la derecha se optó por la búsqueda desesperada de ideas imaginativas para negar, como fuera, que el

calentamiento global pudiera atribuirse a las emisiones antropogénicas. Pero con el tiempo, uno tras otro de tales argumentos se han ido desmoronando ante el inmisericorde contraste con observaciones cada vez más precisas y la veloz mejora del conocimiento científico.

Aunque fueron relativamente pocos los científicos del clima que por aquella época cayeron en el dogmatismo, algunos adquirieron una efímera relevancia porque para muchos medios de comunicación sus declaraciones resultaban más atractivas, pues no planteaban dudas ni incertidumbres. Ante tan notable grado de desinformación sobre el problema real del Cambio Climático global, en la década de los 90 los científicos, bajo el auspicio de Naciones Unidas, crearon un canal de comunicación extraordinariamente valioso: El Panel Intergubernamental de expertos en Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). Desde entonces, este Panel ha publicado cinco informes, el último en 2013, en los que se sintetiza el mejor conocimiento científico alcanzado hasta ese momento. En ellos no se recoge la opinión de sus autores, sino su evaluación de los avances en el conocimiento sobre el tema publicados en revistas científicas a lo largo de los seis años precedentes, resumiendo el resultado de esa tarea en un conjunto de recomendaciones. Una ingente y encomiable labor, reconocida con un premio Nobel de la Paz.

No obstante, los dictámenes del IPCC continúan siendo objeto del acoso obsesivo de grupos radicalizados de sesgo “negacionista”, que toman las incertidumbres planteadas en los informes como prueba de desconocimiento y se obstinan, ellos sabrán porqué, en tratar de convencer a la sociedad y a los políticos de que la falta de precisión absoluta equivale a un desconocimiento total, abogando así por aplazar cualquier decisión hasta que la Ciencia no disponga de más certezas. Pero la verdad es que los científicos sabemos bastante del Cambio Climático Global, tanto como para comprender su causa esencial y ofrecer solventes proyecciones sobre su probable futura evolución.

Empiezo por lo que sabemos sobre el fundamento físico que liga el calentamiento global terrestre, UNA EVIDENCIA, con la acumulación en la atmósfera de ciertos gases, OTRA EVIDENCIA.

¿Por qué se produce un calentamiento?. La temperatura de cualquier materia obedece al balance de la energía que intercambia con su entorno exterior. Si gana más calor que pierde, la temperatura aumenta en una cantidad que depende de la capacidad calorífica de dicha materia y crece a un ritmo en función de su inercia térmica. Esta es una ley inviolable de la Física.

El planeta Tierra, aislado en el espacio, solo puede ganar o perder calor en forma de radiación. Gana el que llega del Sol y pierde el que emite el planeta hacia el espacio en forma de radiación infrarroja, y la Física nos dice que la magnitud del flujo de esa radiación infrarroja depende de la temperatura de emisión terrestre.

Un sencillo cálculo resolviendo una simple ecuación determina que, para que haya equilibrio entre la energía ganada del Sol y la infrarroja emitida por la Tierra, el promedio global de la temperatura de emisión terrestre debe ser de 18 grados bajo cero. Pero sabemos que la temperatura media global de la superficie terrestre es de unos 15 grados (o sea, 33 grados más). Luego no todo el calor infrarrojo que se desprende de la superficie terrestre escapa al espacio exterior. Esto se debe a que ciertos gases presentes de forma natural en la atmósfera actúan como si ésta fuera un invernadero, que deja entrar una buena parte de la radiación solar que calienta las plantas y el aire de su interior, pero permite que escape solo una pequeña porción del calor que desprenden, elevándose así la temperatura interior. Esos 33 grados en el caso del gran “invernadero” atmosférico.

De los diversos gases atmosféricos que contribuyen a este “efecto invernadero” los tres principales son, por este orden, el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4). Obviamente, si aumentara la concentración en la atmósfera de alguno de ellos, también lo haría la temperatura global de la superficie terrestre. De igual manera que aumentaría la temperatura de un invernadero si en su techo pusiéramos doble cristal. Y como esto obedece a leyes físicas, resolviendo ecuaciones podría calcularse cuanto calentamiento adicional induciría un determinado aumento de cualquiera de esos gases en la atmósfera.

Por otro lado se dispone de evidencias científicas incontestables de que la concentración en el aire de algunos “gases invernadero” viene aumentando desde finales del siglo XVIII. Así, por ejemplo, la del CO_2 ha crecido más de un

40%: Desde unos 278 ppm entonces, a 400 ppm en la actualidad. El amplio conocimiento científico adquirido sobre el ciclo natural del carbono permite determinar que, aunque el total de emisiones humanas es muy pequeño en comparación con las naturales (más de 20 veces menores), estamos liberando a la atmósfera CO₂ en cantidades tales que han alterado el equilibrio natural entre fuentes y sumideros mantenido a lo largo de cientos de milenios, propiciando la creciente acumulación que claramente indican las observaciones.

La pregunta pertinente ahora sería: ¿Podría ser responsable del calentamiento global observado ese modesto aumento de gases invernadero?.

Si simplemente aplicáramos las ecuaciones de transferencia radiativa al aumento observado de la concentración de CO₂ desde el inicio de la era industrial (de 278 a 400 ppm), resultaría un incremento térmico medio de la superficie terrestre de algo más de 6°C (Sloan&Wolfendale, 2013), pero las observaciones señalan que sólo ha sido de unos 0.8°C (AR5-IPCC-WG1, 2013).

La causa de tan gran diferencia radica en que este sencillo cálculo sólo ha tenido en cuenta uno de los numerosos procesos que ocurren en el sistema climático terrestre, que no solo incluye la atmósfera, sino también los océanos, las masas de hielo, los suelos continentales y la vegetación que los cubre. En cada uno de estos cinco componentes del sistema, con capacidades e inercias térmicas tan diferentes, se producen multitud de procesos físicos e ingentes intercambios de energía y materia entre ellos, que inducen innumerables mecanismos de retroalimentación de uno y otro signo. Es decir, se trata de un sistema colosal extremadamente complejo en el que establecer una relación cuantitativa causa-efecto supone un soberbio reto científico.

A lo largo de las últimas tres décadas se ha conseguido un extraordinario avance en el conocimiento y comprensión de lo que ocurre en el sistema climático. Esto ha permitido plasmar en ecuaciones matemáticas los efectos de un número creciente de mecanismos actuando en el sistema, basadas en diversos principios de la Física. Este complejísimo sistema de ecuaciones se ha podido resolver con más precisión al ir contando con ordenadores cada vez más potentes. De hecho, para ello siempre se emplean los supercomputadores más potentes que la industria informática ha ido proporcionando.

En esto consisten los llamados *modelos de simulación del clima*, que constituyen la mejor herramienta de que dispone la Ciencia para analizar el Cambio Climático pasado, presente y futuro. Posiblemente alguno de ustedes se sorprenda al enterarse ahora de lo que realmente son los modelos climáticos. Desgraciadamente existe un notable confucionismo sobre este particular.

En efecto, para simular el Cambio Climático se usan modelos físicos, no modelos estadísticos; simplemente porque estos últimos no serían adecuados. Los modelos estadísticos se basan en analogías o extrapolaciones de comportamientos observados en el pasado para realizar predicciones futuras. Desde luego resultan muy útiles para predecir la evolución de un sistema complejo, pero siempre que se mantengan inalteradas las condiciones subyacentes en dicho sistema, de lo contrario sus predicciones serían muy cuestionables. Esto lo comprobamos, por ejemplo, en muchos modelos de prospectiva económica.

En contraste con eso, los modelos físicos se basan en la comprensión suficiente de las causas físicas reales que provoca cualquier efecto, lo que permite establecer ecuaciones que relacionan causa y efecto según dicta la Física. Como tales fundamentos físicos no es probable que cambien en el futuro, resolviendo tales ecuaciones se podrán realizar predicciones fiables aunque se altere el escenario en que se aplican.

No obstante, sabemos que un modelo físico es una aproximación más o menos ajustada, pero no la realidad. Por eso todos los modelos climáticos se evalúan de forma exhaustiva realizando simulaciones de épocas pasadas y comparando los resultados con observaciones o evidencias climáticas disponibles. Por ejemplo, entre otras muchas pruebas, se examina la habilidad de los modelos para reproducir los cambios climáticos en la transición entre eras glaciales e inter-glaciales, que se sabe ocurrieron en el pasado, y así se comprueba que, en esencia, éstas se deben a ciertas variaciones en las características orbitales de la Tierra alrededor del Sol.

Y por supuesto se evidencia que los modelos simulan aceptablemente el calentamiento global observado desde el inicio de la era industrial, esos 0.8 grados de media global, pero siempre que en tales simulaciones se incluya el

incremento observado de los gases invernadero en la atmósfera. Sin tal condición, los modelos climáticos no reproducen la tendencia térmica global observada. Ello constituye una prueba muy consistente de que tales gases antropogénicos son los principales responsables del calentamiento global terrestre evidenciado en los últimos 150 años.

Entonces, como tales emisiones son las causantes esenciales del Cambio Climático observado, parece obvio deducir que el clima futuro estará condicionado al ritmo con que sigamos consumiendo combustibles fósiles. La cuestión ahora es cómo se comportarán las emisiones globales antropogénicas en el tiempo por venir, pues ese es el dato clave que hay que introducir en los modelos para disponer de proyecciones climáticas futuras.

Hasta hace pocos años, las proyecciones de cambio climático se realizaban según un conjunto de escenarios socio-económicos posibles, desde los basados en el consumo intensivo de combustibles fósiles a los que propiciarían su drástica reducción. Así se comprobó que según creciera la concentración de gases invernadero en la atmósfera, así se alteraría la magnitud de todas las variables climáticas. Y además se constató que la cuantía y el signo de tales alteraciones climáticas no serían iguales en todas las zonas geográficas del planeta.

Entonces, ¿qué hacer?. Parece evidente que la mitigación del futuro cambio climático global sólo se puede conseguir acordando políticas. Y para eso es preciso fijar un objetivo global cuantificable que prevenga que, a largo plazo, el cambio climático alcance un “nivel peligroso”. Por eso, en la Cumbre Climática de Cancún en 2010 (CoP, 2010) se acordó este objetivo: Que el calentamiento global no debería sobrepasar 2 grados respecto a la era preindustrial. Y se estableció esa cifra, entre otras razones, porque en el cuarto informe del IPCC (AR4-IPCC-WG1, 2007) se señalaba que un calentamiento global superior a 1.9°C aumentaría “significativamente” el riesgo de una fusión irreversible del hielo de Groenlandia, capaz de elevar el nivel medio del mar hasta 7 metros. Y también el IPCC mostraba que no superar esos 2 grados de calentamiento global se podría conseguir con ciertas “trayectorias” que siguieran las emisiones humanas de gases invernadero a lo largo de las próximas décadas.

No obstante, la Ciencia ha desvelado últimamente que la magnitud final del calentamiento global está determinada por la cantidad total de emisiones humanas, no por el ritmo de las emisiones anuales. Como se señala en último informe del IPCC ([AR5-IPCC-WG1, 2013](#)), para que, con una probabilidad superior al 66%, no se llegue a esos 2 grados de calentamiento global, las emisiones antropogénicas totales de CO₂, contándolas desde el inicio de la era industrial, no deberían sobrepasar 3.5 billones de toneladas, y hasta el año 2011 ya se habían emitido algo más de la mitad de esa cifra.

En conclusión, si se quiere conseguir con una probabilidad razonable no sobrepasar ese umbral de los 2 grados de calentamiento global, no deberíamos emitir en total más de unos 1.6 billones de toneladas adicionales de CO₂. Entonces hay que decidir cómo repartirlas en el tiempo. Obviamente, cuanto más se retrasen las medidas de reducción de emisiones, más severos deberán ser los recortes posteriores para conseguir el objetivo.

Así, por ejemplo, si durante los próximos cinco años las emisiones globales continuaran creciendo al mismo ritmo actual, cumplir con suficiente probabilidad no superar los 2 grados de calentamiento global requeriría reducir al 50% las emisiones en tan solo una década (2021-30). Mientras que si fuera el próximo año cuando se iniciara el decrecimiento de emisiones globales, el objetivo se conseguiría con ese mismo recorte del 50%, pero repartido a lo largo de dos décadas, no de una ([AR5-IPCC-WG3, 2014](#)).

Pero, ¿sería esto asumible por la economía mundial?. Según las estimaciones del IPCC ([AR5-IPCC-WG3, 2014](#)), tales recortes en el uso de combustibles fósiles supondrían una reducción en el ritmo de crecimiento de la economía global de tan sólo 6 centésimas de puntos porcentuales por año. Por tanto, si se estimara conveniente un crecimiento global del 2% anual, la necesaria mitigación de emisiones lo reduciría al 1.94%. Es decir, la economía global podría continuar creciendo con semejante recorte de emisiones, aunque a un ritmo muy poco menor. No obstante, en el informe del IPCC también se advierte de que tales efectos sobre el crecimiento económico no se distribuirían por igual entre todos los países. Por eso habría que arbitrar mecanismos de compensación.

Quiero terminar con un breve comentario sobre las incertidumbres. Los científicos del clima sabemos que los modelos que usamos son aproximaciones, y que es posible que haya procesos en el complejísimo sistema climático aún desconocidos, aunque tenemos una razonable confianza en que los actuales modelos simulan los más importantes. Por eso, los resultados de las proyecciones que proporcionan los modelos climáticos van siempre acompañados de sus correspondientes intervalos de incertidumbre.

Aunque no cabe duda de que las incertidumbres se irán reduciendo a medida que los modelos climáticos mejoren aún más, sabemos que nunca podrán ser eliminadas por completo. Pero, en definitiva, ¿hay alguna decisión que no entrañe incertidumbres?

Los responsables de tomar decisiones siempre manejan *modelos de riesgo* que sopesan las consecuencias de un determinado evento en función de la gravedad de sus efectos y de su probabilidad de ocurrencia. Un nivel de riesgo puede resultar igual para un evento muy probable con efectos moderados que para un evento muy improbable con consecuencias catastróficas. Este es el tipo de evaluaciones del nivel de riesgo asociado al futuro cambio climático que los científicos proporcionamos a los que han de tomar las decisiones políticas para mitigar esa formidable amenaza global: El futuro cambio climático.

Confiemos en que se tengan en cuenta en la reunión de París del próximo diciembre, y que prevalezca allí la sensatez y el sentido de la responsabilidad.

Muchas gracias por su atención.

Referencias:

AR4-IPCC-WG1 (2007): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html

AR5-IPCC-WG1 (2013): Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group 1.
<http://www.climatechange2013.org/report/>

AR5-IPCC-WG3 (2014): Climate Change 2014. Mitigation of Climate Change. Working Group 3.
<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>

CoP (2010): Acuerdos de la 16ª Conferencia de las Partes de la UNFCCC en Cancún,
<http://unfccc.int/resource/docs/2010/cop16/eng/07a01.pdf#page=2>)

Sloan, T. and A.W. Wolfendale (2013): "Cosmic rays, solar activity and the climate", *Environ. Res. Lett.*, vol. 8, 045022. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/045022>