

# LOS OCÉANOS Y EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

Jorge Oyarzún Muñoz\*

*El cambio climático global, tema de una polémica científica principal, implica riesgos de gran magnitud, complejidad e incertidumbre. Enfrentarlo requiere decisiones costosas y difíciles de adoptar. Su curso y efectos futuros se relacionan principalmente con el comportamiento, por ahora incierto, de las masas oceánicas.*



**E**l cambio climático se vincula con importantes materias económicas y geopolíticas e involucra conceptos físicos y mediciones no sujetas a discusión, pero también interacciones y proyecciones a futuro que implican altos grados de incertidumbre. En ese complejo marco de análisis destacan el rol de los océanos como receptáculos de CO<sub>2</sub>, el principal “gas invernadero”, así como las incertidumbres relativas a su futura evolución. La presente revisión, basada en un artículo más extenso (Oyarzún, 2014), expone las bases físicas del tema central y analiza los principales escenarios proyectados para el presente siglo.

## Cambio climático y gases invernadero

La Tierra ha experimentado varios cambios climáticos globales en su larga evolución, como producto de factores astronómicos, geológicos y biológicos, en los cuales el nivel de los océanos ha variado centenares de metros. El actual cambio en curso se asocia principalmente al incremento de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>, de 280 ppm (partes por millón) en 1860 a 400 ppm en 2014, producto del uso de combustibles fósiles. Como consecuencia se espera un incremento de 1.2° a 2.5°

\* Geólogo (U.Ch.), Dr. Geoquímica y Dr. de Estado en Ciencias (U. París). Profesor Titular del Departamento de Ingeniería de Minas. Universidad de La Serena.

a lo largo del presente siglo (Alley et al, 2007; IPCC, Panel Internacional para el Cambio Climático).

El “efecto invernadero” del CO<sub>2</sub> y otros gases compuestos de la atmósfera es función de los enlaces atómicos de sus moléculas, que interceptan la radiación electromagnética de baja frecuencia emitida por la Tierra al espacio, lo que incrementa la temperatura del gas. Como consecuencia, la Tierra retiene actualmente 1W/m<sup>2</sup>, cifra que puede llegar a 2-3 W/m<sup>2</sup> en el curso de este siglo. Cerca de dos tercios del efecto se atribuye al CO<sub>2</sub> y entre sus principales consecuencias está la fusión acelerada de los hielos del casquete Ártico y de Groenlandia.

Al efecto de estos gases se unen actividades humanas como la agricultura, la deforestación y el crecimiento urbano, favorables al aumento de la temperatura atmosférica. Otro factor principal, de carácter astronómico, corresponde a los “Ciclos de Milankovic”, productos de cambios en el eje de rotación de la Tierra, y en la excentricidad de su órbita en torno al Sol, que en conjunto determinan máximos de temperatura cada cien mil años, en uno de los cuales nos encontramos. Un tercer factor es el incremento de la radiación solar, estimado en 0.5%, que explicaría un tercio del aumento de la temperatura atmosférica (Duhau, 2005). Los tres factores señalados agravan las probables consecuencias del efecto invernadero antes explicadas.

### Efectos directos e indirectos del cambio climático

La fusión de las masas de hielo de Groenlandia (Appenzeller, 2007) contribuye a la elevación de los niveles oceánicos, no así la de los hielos flotantes del Ártico (debido a su menor densidad respecto al agua líquida). El calentamiento de las aguas oceánicas implica también un aumento de su volumen y favorece una mayor frecuencia y magnitud de los fenómenos ciclónicos (huracanes, tifones), alimentados por la mayor energía térmica disponible. Las probables consecuencias del cambio climático incluyen también la alteración de la distribución y retención como nieve de las precipitaciones atmosféricas, lo que puede afectar en particular al centro y sur de Chile.

### El cambio climático y el nivel de los mares

Los mares alcanzaron su nivel actual hace unos 3 mil años, después de haberse situado unos 150 m más abajo hace 18 mil años. (Lambeck y Chappel, 2001). Sin embargo, se elevaron de nuevo durante el siglo pasado y con seguridad continuarán el ascenso durante el siglo actual, aunque la velocidad y el ritmo del cambio son inciertos. Tampoco el ascenso ha sido uniforme, y tanto en el Pacífico occidental y en la costa atlántica de Norteamérica al norte del Cabo Hatteras, ha sido 3 a 4 veces más rápido que el promedio mundial (Nichols y Cazenave, 2010; Sallenger et al, 2012).

A lo anterior se agrega el desconocimiento del efecto del cambio climático sobre la fusión de las plataformas de hielo flotantes de la Antártica Occidental y la acelerada pérdida de masa de hielo en Groenlandia. Se estima que este último factor contribuye con un 60% al ascenso del nivel de los mares, mientras la expansión térmica explica un 30% y otros factores menores un 10%. Se proyecta que los cambios en curso lo elevarán entre 0.6 y 1 m en el curso del presente siglo (Panel del IPCC, 4º informe, en Nichols y Cazanave, 2010), cifras similares a las calculadas por Rahmstorf (2011), de 0.5 a 1.4 m.

### El efecto amortiguador de los océanos

Los océanos tienen el mayor potencial amortiguador respecto al almacenamiento del CO<sub>2</sub> y al control del pH de las aguas. Respecto al primer punto, se estima que los océanos almacenan unas 37 300 Gt (1Gt= 109 t) de CO<sub>2</sub>, contra sólo 750 Gt contenidas en la atmósfera (Holmén, 2000). Aunque la concentración de CO<sub>2</sub> en las aguas debería comunicar a éstas un pH ácido, el contenido de cationes “fuertes” en el agua de mar, como Na, Mg y Ca, determina que el pH sea moderadamente alcalino. El hecho de que las temperaturas atmosféricas no hayan mostrado el cambio esperado desde principios del presente siglo, pese al continuo incremento de concentración de CO<sub>2</sub>, ha sido atribuido al rol jugado por las masas oceánicas. Al respecto, Chen y Tung (2014) señalan el probable rol determinante que puede tener la corriente cálida y salina superficial procedente del Golfo de México, que transporta calor hacia

el Atlántico norte. Su salinidad, efecto de su mayor temperatura y evaporación, facilita su inmersión en el Atlántico norte, llevando con ella el calor a niveles oceánicos situados entre 300 y 1500 m de profundidad, donde éste puede permanecer secuestrado por períodos de 20 a 35 años. Esta hipótesis está respaldada por la información de perfiles térmicos de los océanos hasta profundidades de 2000 m (proyecto Argos). Conforme al estudio de Chen y Tung, 0.69x10<sup>23</sup> J de energía térmica fueron secuestrados y almacenados por el mecanismo descrito entre 300 y 1500 m de profundidad, en el lapso 1999 - 2012. Sin embargo no se trata de una retención permanente. Por otra parte, el mecanismo podría alterarse por efecto de la dilución de la salinidad debido a la fusión de los hielos del Ártico y Groenlandia, proceso del cual existen evidencias documentadas para los pasados 60 mil años y que podría conducir a un episodio glacial (Murray, 2000).

### **Impactos del cambio climático sobre las poblaciones humanas**

Las tierras bajas (menos de 10m sobre el nivel del mar) y contiguas al mar ocupan sólo un 2% de la superficie de la Tierra, pero albergan a un 10% de la población mundial total, y a 13% de la población urbana. Las más amenazadas son las de deltas y llanuras de inundación de bordes continentales, 14% de las cuales pertenecen a países en desarrollo. Entre 1994 y 2004 murieron unas 60 000 personas por inundaciones en estas áreas costeras (Golfo de Bengala, Filipinas, etc.) y fueron afectadas 98 millones de personas (McGranahan et al, 2007). El caso más grave es el de Bangladesh, 98% de cuyos 170 millones de habitantes se encuentran en un delta fluvial que tiene 580 km de costa sobre el Golfo de Bengala. Se ha estimado (Karim y Mimura, 2008) que el ascenso del nivel del mar en 0.3 m incrementaría el área de riesgo de inundaciones en Bangladesh en 15% y su profundidad superaría el metro dentro de los 20 km adyacentes a su extensa costa. Puesto que sólo un 10% del territorio de ese país supera la cota inundable, un desastre ambiental es predecible.

Actualmente 20 millones de personas en el mundo viven bajo los niveles normales de la alta marea y 200 millones son susceptibles al efecto de tormentas ciclónicas (Nichols, 2011). A esos riesgos predecibles se suman los limitados recursos económicos de gran parte de las poblaciones expuestas. En cambio, en países desarrollados como Dinamarca, la evaluación de estos riesgos ha llevado a tomar medidas integrales, que incluyen la planificación urbana a largo término (Hallegate et al, 2011). También se dispone de una base mundial de datos para evaluar los probables impactos del ascenso del nivel del mar y la vulnerabilidad de las costas (Vafeidis et al, 2008, Proyecto DINAS-COAST). Sin embargo, como advierte Stern (2006), "hay límites a la capacidad de adaptarse a cambios climáticos fundamentales y rápidos, y los costos humanos y económicos pueden ser muy grandes."

### **Un gran factor de riesgo: Los efectos de retroalimentación**

Un riesgo mayor de la evolución futura del cambio climático radica en los mecanismos de retroalimentación, que pueden seguir cursos desconocidos y alcanzar magnitudes imposibles de evaluar. El principal de ellos concierne a la enorme cantidad de CO<sub>2</sub> disuelto en las aguas profundas de los océanos: unas 36 400 Gt, contra 900 Gt disueltas en las aguas superficiales y 750 Gt presentes en la atmósfera (Holmén, 2000). Puesto que la capacidad de los océanos para disolver gases disminuye al aumentar su temperatura, se podría desencadenar una transferencia masiva del gas a las aguas superficiales y de éstas a la atmósfera, al aumentar la temperatura de las aguas. Otro tanto puede ocurrir respecto a los grandes volúmenes de CH<sub>4</sub> almacenados en los fondos oceánicos bajo la forma de cristales de hielo-metano. Bajo tales condiciones tanto la velocidad como la extensión de los cambios generados por los gases invernadero escapan a toda proyección. Al respecto conviene considerar el efecto de cambios climáticos globales como el ocurrido durante el Cretácico (145 a 65 millones de años atrás), cuando desaparecieron los hielos polares y el nivel de los mares se situó unos 500 m sobre el actual.

## Mientras no pase nada grave...

Las bases físicas del cambio climático global son bien conocidas y el registro geológico presenta los resultados catastróficos de cambios climáticos ocurridos a lo largo de la historia de la Tierra. Ello, junto con los resultados de la modelación físico matemática de los procesos en curso, contrastada con la distribución geográfica de las poblaciones, debería llevar a modificar los patrones mundiales de conducta

en lo relativo a la emisión de gases invernadero. Sin embargo existe una gran dependencia de la mayoría de los países respecto a los combustibles fósiles, mientras la población mundial y sus expectativas de desarrollo siguen creciendo. Por ello es difícil que se tomen medidas de fondo mientras no surjan trastornos de tal magnitud que obliguen a hacerlo, pese al costo económico y político que puedan implicar.

\* \* \*

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alley, R., Berntsen, T, Bindhoff, N.L. et al, (2007). *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra. 18p.*
2. Appenzeller, T. *El gran deshielo (2007). National Geographic, Junio: 2-41.*
3. Chen, X. y Tung, K-K. (2014). *Varying planetary heat sink led to global warming slowdown and acceleration. Science, 435, 897, 7p.*
4. Duhau, S. (2005). *Long term variations in solar magnetic field, geomagnetic field and climate. Proceedings of 9th Asian-Pacific Regional IAU Meeting (2005), 7 p.*
5. Hallegate, S., Ranger, N., Mestre, O. et al (2011). *Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. Climatic Change. 104: 113-137.*
6. Holmén, K. (2000). *The global carbon cycle, en: Earth System Science: 282-321, M.C. Jacobson et al, eds., Academic Press, San Diego.*
7. Karim, M.F. y Mimura, N. (2008). *Impacts of climate change and sea-level rise on cyclonic storm surge floods in Bangladesh. Global Environment Change, 18: 490-500.*
8. Lambeck, K. y Chappel, J. (2001). *Sea level change through the last glacial cycle. Paleoclimate, Science, 27/04: 679-686.*
9. McGranahan, G., Balk, D. y Anderson, B. (2007). *The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. Environment and Urbanization, 19, 1: 17-37.*
10. Murray, J.W. (2000). *The oceans, en: Earth System Science: 230-278, M.C. Jacobson et al, eds, Academic Press, San Diego.*
11. Nichols, R.J. (2011). *Planning for the impacts of sea level rise. Oceanography. 24, 2: 144-157.*
12. Nichols, R.J. y Cazenave, A. (2010). *Sea-level rise and its impacts on coastal zones. Science, v328, 18/06: 1517-1520.*
13. Oyarzún, J. (2014). *Cambio climático global, ascenso del nivel de los mares y otras consecuencias: Una revisión y síntesis del conocimiento actual. Disponible en [http://www.aulados.net/Ciencia\\_Sociedad/Cambio\\_Climatico/Cambio\\_Climatico\\_J\\_Oyarzun.pdf](http://www.aulados.net/Ciencia_Sociedad/Cambio_Climatico/Cambio_Climatico_J_Oyarzun.pdf)*
14. Rahmstorf, S. (2011). *A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. Science, 18/04: 368-370.*
15. Sallenger, A.H., Doran, K.S. y Howd, P.A. (2012). *Hotspot of accelerated sea-level rise on the Atlantic coast of North America. Letter, Nature Climate Change: 884-888.*
16. Stern, N. (2006). *What is the economics of Climate Change. World Economics, 7, 2: 1-10.*