
ACUERDO DE COPENHAGUE: UN FUTURO CATASTRÓFICAMENTE CALIENTE ¿NECESITAMOS UN PLAN B?

Eugenio Sanhueza

RESUMEN

El Acuerdo de Copenhague (diciembre 2009) reconoce que el cambio climático es uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo y destaca la voluntad política de combatirlo de acuerdo al principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas. También reconoce que son necesarias reducciones significativas de las emisiones globales de gases de invernadero para mantener el aumento de temperatura por debajo de 2°C, límite que evitaría efectos desastrosos en el sistema climático. Desafortunadamente, las reducciones propuestas (mitigación) en el marco del Acuerdo distan mucho de lograr este objetivo. Del análisis de la situación actual parece inevitable un mayor calentamiento global en este siglo, con posibles aumentos catastróficos de temperatura (4°C para 2100), por lo que urge a todos los países adelantar planes y estrategias de adaptación. Adicionalmente, para aliviar la si-

tuación será necesario apelar a todos los recursos de mitigación disponibles, incluyendo compuestos de vida corta y tecnologías de captura de CO₂ atmosférico. La participación de los países en desarrollo es crucial, ya que contribuyen ~58% de las emisiones, las que siguen aumentando. Por otra parte, para la eventualidad de una crisis climática, sería apropiado desarrollar un plan B. Actualmente se discuten propuestas de geoingeniería que podrían contrarrestar el calentamiento en un plazo relativamente breve tras su aplicación, como la inyección de compuestos de azufre en la estratosfera. Esto daría tiempo para seguir implementando políticas de mitigación, la verdadera solución del problema. Obviamente, la manipulación intencional del clima podría traer consecuencias ambientales negativas, que deberían ser exhaustivamente investigadas antes de proceder.

Introducción

El cambio climático está aquí, al parecer vino para quedarse, se está acelerando y podría transformarse en una catástrofe. El uso de combustible fósiles, la deforestación y otras actividades que producen compuestos de invernadero siguen aumentando. Las emisiones mundiales de CO₂ provenientes de combustibles fósiles en 2008 fueron casi un 40% más altas que en 1990 (TCD, 2009). La concentración atmosférica de compuestos que producen el calentamiento global son las más altas producidas en el último millón de años. La temperatura promedio global sigue aumentando (GISS-NA-SA, 2010), la descongelación de los glaciales se puede apreciar a simple vista (WGMS, 2009), el nivel del mar está subiendo, las inundaciones y

sequías son más frecuentes e intensas (TCD, 2009). Los modelos climáticos predicen una agudización de éstos y otros efectos (Bersen *et al.*, 2010). El derretimiento estival del hielo marino del Ártico se ha acelerado, superando los pronósticos de los modelos climáticos (TCD, 2009); la zona de derretimiento del hielo marino en 2007-2009 fue un 40% mayor que la predicción promedio de los modelos climáticos del IPCC AR4 (IPCC, 2007a). También, una revisión del pronóstico del nivel del mar (TCD, 2009) indica que hacia el 2100, el nivel del mar promedio probablemente se eleve por lo menos a el doble de lo pronosticado por el IPCC (2007a).

La Convención Marco sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas (UNFCCC, 1994) aprobada en 1992 como resultado de la Cumbre de

Río de Janeiro, es la plataforma internacional que debe tomar medidas para evitar el calentamiento global. Bajo este marco internacional, en 1998 se aprobó el Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 1998), cuyo seguimiento se hizo en diciembre del 2009, en Copenhague (COP-15). El propósito de esta última conferencia era producir un acuerdo que actualizara el Protocolo de Kyoto, especialmente lo relacionado con las reducciones de las emisiones de gases de invernadero (GI), el cual expira en 2012.

En el presente trabajo se hace una breve presentación del Acuerdo de Copenhague (UNFCCC, 2009a), el cual no es vinculante ni tiene validez legal, y solo se "tomó nota" de éste. Se discuten las consecuencias sobre el clima de las reducciones de emisiones propuestas en el marco

del Acuerdo. Brevemente se presenta una proposición para controlar los compuestos de vida atmosférica corta y los avances de la geoingeniería, en relación a su posible aporte a la problemática del calentamiento global.

El Acuerdo de Copenhague

Este Acuerdo confirma la vigencia de la UNFCCC y la continuación del Protocolo de Kyoto. Reconoce que el cambio climático es uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo y destaca la voluntad política de combatirlo de acuerdo al principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas y respectivas capacidades.

La COP-15 estuvo de acuerdo con las evaluaciones científicas, en relación a que son necesarias reducciones significativas de las emisio-

PALABRAS CLAVES / Acuerdo Copenhague / Calentamiento Global / Clima Catastrófico / Geoingeniería / REDD /

Recibido: 05/03/2010. Modificado: 07/07/2010. Aceptado: 13/07/2010.

Eugenio Sanhueza. Doctor en Ciencias, Universidad de Chile. Investigador, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Venezue-

la. Dirección: Laboratorio de Química Atmosférica, IVIC. Apdo. 22117, Caracas 1020A, Venezuela. e-mail: esanhuez@ivic.gob.ve

THE COPENHAGEN ACCORD: A CATASTROFIC WARM FUTURE. DO WE NEED A PLAN B?

Eugenio Sanhueza

SUMMARY

The Copenhagen Accord (December 2009) underlines that climate change is one of the greatest challenges of our time and emphasizes the political will to urgently combat it, in accordance with the principle of common but differentiated responsibilities. Also, it recognizes that deep cuts in global emissions of greenhouse gases are required to maintain the temperature increase below 2°C; the limit to prevent dangerous interference with the climate system. Unfortunately, the proposed emission reduction commitments (mitigation) submitted to the Accord fall short of required levels. From the analysis of the present situation, a significant global warming during the current century appears to be inevitable, with likely catastrophic increases of temperature (4°C by 2100). Urgently, all countries should establish comprehensive adaptation programs. Furthermore, in order to alleviate the situation, it will be necessary to appeal to all the available mitigation options, including short lived compounds and atmospheric CO₂ sequestration techniques. The participation of developing countries is crucial, as they currently contribute with ~58% of global emissions, which are growing substantially. On the other hand, to confront an eventual climatic crisis, it may be a good idea to develop a plan B. At present, several geoengineering proposals which could counteract warming in a relatively short time after implementation, such as injection of sulfur compounds in the stratosphere, are being discussed. This would give some extra time for mitigation options, the real solution. Obviously, the intentional alteration of the climate system could have negative environmental consequences, which should be fully investigated before proceeding.

der to alleviate the situation, it will be necessary to appeal to all the available mitigation options, including short lived compounds and atmospheric CO₂ sequestration techniques. The participation of developing countries is crucial, as they currently contribute with ~58% of global emissions, which are growing substantially. On the other hand, to confront an eventual climatic crisis, it may be a good idea to develop a plan B. At present, several geoengineering proposals which could counteract warming in a relatively short time after implementation, such as injection of sulfur compounds in the stratosphere, are being discussed. This would give some extra time for mitigation options, the real solution. Obviously, the intentional alteration of the climate system could have negative environmental consequences, which should be fully investigated before proceeding.

ACORDO DE COPENHAGUE: UM FUTURO CATASTROFICAMENTE QUENTE, PRECISAMOS DE UM PLANO B?

Eugenio Sanhueza

RESUMO

O Acordo de Copenhague (dezembro 2009) reconhece que a mudança climática é um dos maiores desafios de nosso tempo e destaca a vontade política de combatê-lo de acordo ao princípio de responsabilidades comuns, mas diferenciadas. Também reconhece que são necessárias reduções significativas das emissões globais de gases de efeito estufa para manter o aumento de temperatura abaixo de 2°C, limite que evitaria efeitos desastrosos no sistema climático. Desafortunadamente, as reduções propostas (mitigação) no marco do Acordo distam muito de alcançar este objetivo. Da análise da situação atual parece inevitável um maior aquecimento global neste século, com possíveis aumentos catastróficos de temperatura (4°C para 2100), o que torna urgente em todos os países adiantar planos e estratégias de adaptação. Adicionalmente, para aliviar a situação será

necessário apelar a todos os recursos de mitigação disponíveis, incluindo compostos de vida curta e tecnologias de captura de CO₂ atmosférico. A participação dos países em desenvolvimento é crucial, já que contribuem ~58% das emissões, que continuam aumentando. Por outro lado, para uma eventual crise climática, seria apropriado desenvolver um plano B. Atualmente são discutidas propostas de engenharia que poderiam neutralizar o aquecimento em um prazo relativamente breve depois de sua aplicação, como a injeção de compostos de enxofre na estratosfera. Isto daria tempo para seguir implementando políticas de mitigação, a verdadeira solução do problema. Obviamente, a manipulação intencional do clima poderia trazer consequências ambientais negativas, que deveriam ser exaustivamente investigadas antes de proceder.

nes globales para mantener el aumento de temperatura por debajo de 2°C. También se acordó que se debería cooperar para conseguir que el máximo de las emisiones globales y nacionales ocurran lo antes posible, reconociendo que el lapso de tiempo sería más largo para los países en desarrollo. Desde el punto de vista económico, se estableció que los países desarrollados proveerán recursos financieros adecuados, predecibles y sustentables, tecnologías y capacitación necesarios para implementar las acciones de adaptación de los países en

desarrollo; en forma colectiva, se proporcionarán 30 millardos de USD “adicionales” a los países en desarrollo para el período 2010-2012, y 100 millardos anuales a partir del 2020.

Desafortunadamente, el Acuerdo carece de acciones jurídicamente vinculantes en cuanto a la reducción de emisiones, no establece obligaciones individuales, ni metas globales de emisión. Solamente los países industrializados firmantes del Protocolo de Kyoto estarían obligados a reducir sus emisiones. Sin embargo, el Acuerdo solo dice

que éstos deben profundizar las reducciones de emisiones comprometidas en el Protocolo de Kyoto, pero no establece nuevos montos ni fechas. Las negociaciones seguirán durante 2010 y en diciembre tendrá lugar la próxima conferencia anual en México, donde se espera alcanzar compromisos jurídicamente vinculantes sobre la reducción de emisiones. De acuerdo con Yvo de Boer, jefe de UNFCCC, el desafío es transformar lo acordado políticamente en Copenhague en algo real, cuantificable, verificable y legalmente vinculante (UNFCCC, 2009b).

Reducciones de emisiones propuestas

Como lo requería el Acuerdo, las metas de emisión propuestas por los países desarrollados y en desarrollo para 2020 (voluntariamente y no jurídicamente vinculantes), están siendo remitidas al secretariado. Para la fecha (16/06/2010) 135 países, los cuales contribuyen con 86,75% a las emisiones globales de GI, se habían “asociado” al Acuerdo. En la Tabla I se encuentra una selección de los países que ya se han

asociado al Acuerdo, con sus respectivas propuestas de reducción de emisiones. La tabla muestra que, con algunas excepciones, los países industrializados (Anexo I del Protocolo de Kyoto) estarían, al menos, mejorando el 5% de reducción con respecto a las emisiones de 1990, comprometido en dicho Protocolo. Las reducciones propuestas por China e India son referidas a una disminución de la “intensidad de carbono”, que es la emisión de GI en relación al Producto Doméstico Bruto (GDP). Debido a la incertidumbre sobre el crecimiento económico (GDP) para el 2020, es difícil estimar para estos países la reducción o aumento de las emisiones con respecto a 1990. Sin embargo, las estimaciones de los analistas (USCAN, 2010) indican que los incrementos de emisión con respecto a 1990 de China e India, pudieran ser >200%.

En la Tabla I también se muestran las contribuciones porcentuales, con respecto a la emisión mundial total, y sus respectivas emisiones *per cápita*. Incluyendo las emisiones por deforestación, los países industrializados en la actualidad emiten ~42% del total, correspondiendo la mayor parte (~58%) a los países en desarrollo. Sin embargo, con algunas excepciones las mayores emisiones *per cápita* corresponden a los países industrializados, que fluctúan entre 10 y 27 ton de CO₂-equivalente por habitante. Claramente, los países en desarrollo, cuyas emisiones seguirán aumentando, cada vez tendrán una mayor incidencia en los cambios futuros del clima y su participación en la búsqueda de soluciones se hace cada vez más imprescindible. Alrededor de 2030, el CO₂ acumulado en la atmósfera proveniente de los países en desarrollo será similar al correspondiente a los países industrializados (Wheeler y Ummel, 2007).

TABLA I
SELECCIÓN DE PAÍSES ASOCIADOS AL ACUERDO DE COPENHAGUE Y HAN REMITIDO SUS PLANES DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GI (USCAN, 2010)

País	Reducción para 2020 (año base)	Tipo de reducción	Reducción (-) o aumento (+) en escala de 1990	Fracción de la emisión global (%) ^a	Emisión <i>per-cápita</i> (ton CO ₂ -eq)
Países Industrializados (Anexo I del Protocolo de Kyoto)					
Australia	5-25% (2000)	Absoluto	-3,9% a -24%	1,3	27,4
Belarus	5-10% (1990)	Absoluto	-5% a -10%	0,19	8,5
Canadá	17% (2005)	Absoluto	+0,25%	1,86	24,9
Comunidad Europea (27 países)	20% (1990)	Absoluto	-20%	11,69	10,3
Croacia	[30% 1990] 5% (1990)	Absoluto	[-30%] -5%	0,07	6,9
Estados Unidos	17% (2005)	Absoluto	-3,67%	15,78	23,1
Japón	25% (1990)	Absoluto	-25%	3,14	10,6
Kazakhstan	15% (1992)	Absoluto	-7,40	0,48	13,6
Noruega	30-40% (1990)	Absoluto	-30% a -40%	0,12	11,2
Nueva Zelanda	10-20% (1990)	Absoluto	-10% a -20%	0,18	19,1
Rusia	15-25% (1990)	Absoluto	-15% a -25%	4,64	14
Suiza	20-30% (1990)	Absoluto	-20% a -30%	0,12	7,2
Ucrania	20% (1990)	Absoluto	-20%	1,14	10,5
Países no-Anexo I (con contribución a la emisión global >1%)					
Brasil	[36-39%]	Crecimiento ^b	+6,4% a +1,7%	6,6	15,3
China	[40-45%]	Intensidad de C	Ver texto	16,64	5,5
Corea del Sur	[30%]	Crecimiento	+63,9%	1,3	11,8
India	[20-25%] (2005)	Intensidad de C	Ver texto	4,32	1,7
Indonesia	[26%]	Crecimiento	+22%	4,73	9,3
México	[30%]	Crecimiento		1,58	6,6
Sur África	[34%]	Crecimiento	+48,2%	0,98	9,0

^a Incluye cambio de uso de la tierra.

^b Reducción del “crecimiento” de las emisiones (escenario BaU); es un valor relativo con aumentos netos de emisión para el 2020.

Reducción de la deforestación y degradación de bosques (REDD)

La REDD formó parte importante de las discusiones en Copenhague (UNFCCC, 2009c); actualmente la deforestación contribuye con ~20% de la emisión global de GI (IPCC, 2007a). El Acuerdo: “reconoce el rol crucial de reducir las emisiones provenientes de la deforestación y degradación de bosques y la necesidad de aumentar la remoción de gases de invernadero, y está de acuerdo en la necesidad de proporcionar incentivos positivos para tal acción a través del establecimiento inmediato de un mecanismo que incluye REDD-plus, para facilitar la movilización de recursos financieros desde los países desarrollados” (UNFCCC, 2009a). Desafortunadamente, no se establecieron acuerdos jurídicamente vinculantes. Se destaca la ayuda pero no se dice nada de controles ni es-

estructuras legales para cumplir los acuerdos; la mayoría de los países que se beneficiarían de los fondos de REDD no tienen un adecuado conocimiento de sus bosques (Olander *et al.*, 2007) ni de su monitoreo, el cual incluye medición, reporte y verificación (MRV) del inventario de carbono (FAO, 2009).

Se acepta generalmente que la protección de los bosques ofrece una forma rápida y poco costosa de reducir las emisiones de GI, pero lograr acuerdos de cómo hacerlo no es una tarea fácil. Dos reportes recientes (RRI, 2010; Global Witness, 2010) hacen énfasis sobre la falta de claridad de la propiedad de las tierras y la poca transparencia para los servicios ambientales y de negociaciones de carbono. En estas condiciones, la transferencia de fondos podría provocar un agudo aumento de la especulación y corrupción, colocando presiones sin precedente sobre los propios bosques y las comunidades que

los habitan. Sin duda, el éxito del programa REDD sería muy beneficioso, no solo para el clima sino también para la conservación de la biodiversidad (Strassburg *et al.*, 2010). Sin embargo, las negociaciones hasta ahora han sido difíciles (Schrope, 2009), lo cual seguramente continuará en el futuro. Muy posiblemente, mientras no desaparezcan las causas que impulsan la deforestación (Defries *et al.*, 2010; Persson y Azar, 2010) será difícil lograr, a través de este mecanismo, una efectiva reducción de las emisiones de CO₂ a escala global.

Un Futuro Caliente y Catastrófico

El cambio climático está ganando la pelea. La ONU, en el Acuerdo de Copenhague, ya está aceptando que para el 2100 se produzca un aumento de 2°C con respecto a la temperatura pre-industrial. Los modelos de cambio climático indican que si el aumento de

la temperatura se mantiene por debajo de 2°C, se evitarían cambios climáticos desastrosos, y serían manejables desde el punto de vista de adaptación al cambio. Muchos científicos creen que la mayoría de los ecosistemas del mundo tendrían problemas para adaptarse a un aumento térmico mayor. Desde 1880 la temperatura ha aumentado en “solo” 0,8°C (GISS-NASA, 2009) y ya los cambios producidos son palpables (IPCC, 2007b), posiblemente no catastróficos pero significativos.

Emissiones futuras y aumentos catastróficos de temperatura

Las evidencias científicas deberían estar al centro de las decisiones y se debería entender las consecuencias de elegir, o elegir y no cumplir, una determinada meta de emisiones. Las proyecciones de los modelos climáticos muestran que estas decisiones son cruciales en el comportamiento futuro del clima. En general, las predicciones basadas en modelos son muy similares entre los diferentes grupos que investigan el cambio climático. A título de ejemplo, en la Tabla II se dan las predicciones hechas por la Oficina Meteorológica del Reino Unido (Met Office, 2009a). Los resultados muestran que aun en el escenario más optimista, que implica una disminución de emisión a partir de 2010, la cual sería implementada rápidamente (3% anual, con un 47% de disminución para el 2050), la temperatura para 2100 subiría entre 2 y 3°C, el CO₂ que ya está en la atmósfera estará allí por muchos años, y al clima le toma tiempo responder a los cambios. Por otra parte, si las reducciones son iniciadas oportunamente, pero se implementan lentamente, el aumento de temperatura para 2100 sería ~3°C. Ahora, si las acciones son tardías y lentas, el aumento sería >4°C. Ninguna acción (escenario BaU) llevaría a aumentos >5,5°C. Parece inevitable que ocurra

TABLE II
AUMENTO DE LA TEMPERATURA PARA EL 2100, RELATIVO A LA ÉPOCA PRE-INDUSTRIAL, PRONOSTICADOS POR LOS MODELOS DE LA OFICINA METEOROLÓGICA DEL REINO UNIDO, PARA VARIOS ESCENARIOS DE EMISIÓN*

Escenario de control de emisiones	Emisión global para 2050 ^a	Aumento de la temperatura global para 2100	
		Más posible (50% de probabilidad)	Caso peor (10% de probabilidad)
Sin control (BaU)	Aumento de 132%	5,5°C	7,1°C
Tardío (iniciado 2030) y lenta implementación	Aumento de 76%	4°C	5,2°C
Temprano (iniciado 2010) pero lenta implementación	Similares a 1990	2,9°C	3,8°C
Temprano y rápida implementación	Disminución de 47%	2,1°C	2,8°C

* Met Office, 2009a. ^a Con respecto a 1990.

un aumento de la temperatura a lo largo del siglo; sin embargo, lo oportuno y la magnitud de las reducciones condicionan lo que ha de ocurrir con el clima futuro.

Concordando con las proyecciones dadas en la Tabla II, un estudio más reciente (O'Neill *et al.*, 2010) indica que para una probabilidad 50:50 de mantener el aumento de temperatura por debajo de 2°C para el 2100, se deberían reducir las emisiones globales del año 2000 a la mitad, para mediados de siglo. Según estos autores, esto significa que el 70% de la producción global de energía debería producir cero emisiones de GI para el 2050. Esto, aun poniendo al límite la producción de energías alternas, parece tecnológicamente imposible; actualmente las emisiones globales, principalmente provenientes de los países en desarrollo, están aumentando ~1% por año.

El impacto/efecto que tendrían las reducciones de emisiones de GI propuestas en el marco del Acuerdo de Copenhague (ver Tabla I) están siendo continuamente evaluadas por el modelo del *Climate Scoreboard* (Climate Interactive, 2010). Las simulaciones indican que las reducciones propuestas son totalmente insuficientes y que el aumento que se producirá en las concentraciones atmosféricas de GI, llevará a un forzamiento radiativo tal, que para 2100 habría un aumento prome-

dio de ~4°C, con una incertidumbre indicando un posible máximo de ~6°C (Climate Interactive, 2010; Parry, 2010). Las propuestas remitidas a la UNFCCC pronostican un aumento promedio de emisiones de GI de ~0,8% por año entre ahora y el 2020. Después de 2020, las emisiones globales tendrían que caer en ~3% por año para lograr la meta de una reducción de 60% para el 2050, necesaria para evitar un aumento por encima de 2°C. Obviamente, esto representa una tarea titánica en las negociaciones climáticas futuras.

Es importante señalar que los modelos tienen una alta incertidumbre, especialmente resultante de la evaluación de los procesos de retroalimentación, los cuales podrían tener respuestas inesperadas. Además, la no linealidad del fenómeno puede en cualquier momento desencadenar cambios abruptos. Por ejemplo, el derretimiento del *permafrost* podría dispararse cuanto se llegue a una cierta temperatura límite, liberando grandes cantidades de metano a la atmósfera (Heimann, 2010), que a su vez harían aumentar aun más la temperatura.

Efectos pronosticados y acciones necesarias

Claramente, las actuales circunstancias pronostican, con una alta probabilidad, una catástrofe climática durante este siglo. Los efectos incluyen un derretimiento acelerado

de los glaciales, que aceleraría el aumento del nivel del mar, produciendo millones de refugiados ambientales, como también el aumento de la ocurrencia de intensas inundaciones, sequías y tormentas. Los rendimientos agrícolas decrecerían para todos los cereales (Met Office, 2009b). Es evidente que los humanos podemos vivir en un amplio rango de condiciones y que el clima de los últimos milenios ha sido asombrosamente favorable, permitiendo poblar casi todas las regiones del mundo y alcanzar el desarrollo bajo condiciones ecológicas favorables. Sin embargo, un cambio en la temperatura global reducirá el rango de lugares que puede mantener la vida humana. Por ejemplo, el potencial global de producción de alimentos muy probablemente disminuya con un aumento de la temperatura de ~3°C (IPCC, 2007b).

Si se quiere mantener al mundo con un aumento por debajo de 2°C, es decir, revertir la situación actual, habría que hacer una agresiva descarbonización de la energía, una reducción efectiva de la deforestación, implementar tecnologías ambientalmente amigables de captura de CO₂ atmosférico y controlar las emisiones de compuestos climáticamente activos de vida corta (ver más adelante). Considerando la alta emisión (~58%) de GI por parte de los países en desarrollo, la activa participación de éstos será

imprescindible en la búsqueda de soluciones (Wheeler y Ummel, 2007). Desafortunadamente, debido a las limitaciones económicas, lentitud del desarrollo y transferencia de energías alternas, acelerado aumento poblacional, lucha por hegemonías geopolíticas, etc., la posibilidad de evitar una catástrofe climática parece poco factible.

Lo recomendable sería empezar a prepararse para una adaptación a aumentos de temperatura por encima de 2°C. Los países pobres son los más vulnerables y necesitan urgentemente ayuda económica. Sin embargo, los recursos financieros ofrecidos por los países industrializados en el marco del Acuerdo de Copenhague serían insuficientes. Algunas estimaciones sugieren que el mundo en desarrollo requerirá por encima de 100 millardos de USD por año para adaptarse a los efectos del calentamiento global (Nature, 2009). Por otra parte, establecer en los países en desarrollo una economía baja en carbono, que contribuiría a la mitigación del problema, cuesta varios cientos de millardos de USD adicionales cada año.

Mitigación por Compuestos Climáticamente Activos de Vida Atmosférica Corta

El forzamiento radiativo sumado del carbón negro (CN) y ozono troposférico (O₃) contribuyen significativamente, después del CO₂, al calentamiento global (IPCC, 2007a). Sin embargo, estos compuestos no fueron incluidos en el Protocolo de Kyoto y ahora fueron dejados de lado del Acuerdo de Copenhague. Estudios recientes sugieren que el CN podría ser responsable del 30-50% del reciente calentamiento del Ártico, contribuyendo al acelerado derretimiento del hielo marino, el cual, a su vez, conduciría a una aceleración del calentamiento global. El CN (y el CO, precursor del O₃) son emitidos en la combustión de biomasa, la cual se está empleando como fuente alterna-

tiva a los combustibles fósiles. El desconocimiento del alto potencial de calentamiento global del CN (2000 veces superior al CO₂) estaría propiciando algunas actividades que, en vez de favorecer la recuperación del clima, estarían aumentando el forzamiento radiativo y, por ende, el calentamiento global (Sanhueza 2009a, b).

La actual estrategia de mitigación de Kyoto y Copenhague se basa exclusivamente en la reducción de emisiones de gases de vida larga, lo que produce una respuesta lenta. El tiempo para reducir 37% de la cantidad atmosférica inicial de estos gases sería de ~100 años (Jackson, 2009). Considerando lo acelerado del calentamiento actual y la posibilidad que ocurran cambios abruptos tempranos, con consecuencias irreversibles, una estrategia que produzca respuestas climáticas en las próximas décadas sería altamente pertinente (Jacobson, 2002; Bond, 2007; Artic Council, 2009a, b; Jackson, 2009; Molina *et al.*, 2009). Una forma de lograr una respuesta rápida, sería controlando las emisiones de CN y de los gases precursores de O₃ (CO, NO_x, hidrocarburos reactivos). El tiempo para reducir 37% de la cantidad atmosférica inicial de estos contaminantes es del orden de días a semanas (Jackson, 2009) y la reducción de sus emisiones produciría una rápida respuesta del sistema climático. La ciencia relacionada con los gases y partículas de vida atmosférica corta es más compleja que la de los gases de vida larga. Sin embargo, los modelos climáticos globales, permiten establecer con cierta certidumbre el forzamiento radiativo producido por la emisión de estos compuestos (Bernsten *et al.*, 2005; Johnson y Derwent, 1996; Fuglestvedt *et al.*, 2006; Shindell *et al.*, 2008) y, así, la posibilidad de controlarlos.

En los próximos años, la inclusión de los compuestos climáticamente activos de vida corta en las discusiones sobre

el clima global debería ser algo prioritario. Mike Hulme, de la Universidad de East Anglia, propone que se haga un tratado aparte (pragmático y basado en la tecnología) para los compuestos de vida corta (Heffernan, 2010). La estrategia de “acción rápida” propuesta por Molina *et al.* (2009), incluye medidas reguladoras dentro de los próximos 2-3 años e implementación sustancial dentro de 5-10 años, para producir respuestas en las próximas décadas. El rápido efecto sobre el clima, retardando el aumento de la temperatura en un lapso de tiempo corto, ayudaría a evitar la ocurrencia de máximos irreversibles en el sistema climático. La participación de los países en desarrollo en la mitigación de estos compuestos de vida corta, especialmente el CN, podría ser crucial (Moore y MacCracken, 2009a, b).

Geoingeniería: ¿Un plan B de emergencia?

La imposibilidad de reducir sustancialmente la emisión de GI y mantener el aumento de temperatura por debajo de 2°C ha impulsado con nuevos bríos la idea de combatir el calentamiento global utilizando la geoingeniería (alteración intencional de los sistemas físicos y biológicos de la Tierra para contrarrestar el calentamiento global; Royal Society, 2009). Para muchos sería esencial tener un plan de respaldo, o plan B, especialmente en caso de una emergencia climática futura (Blackstock *et al.*, 2009; Inman, 2010; Blackstock y Long, 2010; Robock *et al.*, 2010). Ésta se define como aquellas circunstancias donde consecuencias severas del cambio climático ocurren demasiado rápido como para ser significativamente reducidos por esfuerzos inmediatos de mitigación (Blackstock *et al.*, 2009).

La idea de controlar el clima con geoingeniería ha tenido poco respaldo de los científicos (Cicerone, 2006) y, por

ende, existe poca información al respecto. Esto se debería a varios factores o circunstancias: a) el sistema climático es muy complejo y cualquier intervención humana podría producir impredecibles efectos secundarios, b) puede ser percibida como un sustituto de la reducción de emisiones de gases de invernadero y desentenderse del problema original, c) de ser exitosa, podrían emerger tensiones internacionales sobre quién define cual es el clima “óptimo”, y d) aspectos éticos del rol de la humanidad sobre el mundo natural. Los argumentos sobre la validez e importancias de estas preocupaciones constituyen el centro del debate actual y las soluciones propuestas tienden a ser controversiales.

Las propuestas pueden ser agrupadas en técnicas que remueven GI de la atmósfera y las que reflejan la radiación solar al espacio. La *Royal Society* de Londres hizo una exhaustiva revisión de las opciones propuestas hasta ahora (Royal Society, 2009); se evaluaron 12 técnicas, todas se encuentran en las primeras etapas de desarrollo y todavía requieren de investigación intensiva. Aquí se presentan brevemente algunos aspectos relevantes a este trabajo.

Remoción de CO₂ de la atmósfera

El proceso más estudiado es la “fertilización de los océanos”. Consiste en agregar sales de hierro con el objeto de impulsar un rápido crecimiento del plankton y así consumir CO₂ atmosférico. Es difícil de hacer a una escala significativa y existen dudas sobre cuán profundo se hundiría el plankton y, por lo tanto, sobre la duración del secuestro de carbono. Recientemente, Strong *et al.* (2009) indican que el agregar hierro al océano no es una forma efectiva de combatir el calentamiento global, y la evaluación de Royal Society (2009) la cataloga como de baja seguridad, debido a los posibles efectos secundarios que podría traer

una fertilización de grandes áreas del océano, y además su efectividad sería relativamente baja.

La captura de CO₂ atmosférico por procesos químicos o el aceleramiento de la meteorización de minerales son técnicamente factibles y efectivas, pero muy caras a una escala significativa (Royal Society, 2009). La reforestación es poco efectiva pero viable, y está más bien considerada como un proceso de mitigación.

Una posibilidad a la cual actualmente se le está prestando mucha atención es la producción de material bio-carbonizado (*biochar*) a partir de la pirólisis de residuos vegetales, el cual posteriormente sería enterrado en el suelo (Lehmann *et al.*, 2006; Fowles, 2007). Varios estudios muestran que esto mejora la fertilidad (Lehmann *et al.*, 2006; Liang *et al.*, 2006). El CN del *biochar* es estable, produciéndose un secuestro de carbono, pero existen discrepancias sobre el tiempo de residencia de éste en los suelos (Forbes *et al.*, 2006; Hammes *et al.*, 2008; Ohlson *et al.*, 2009). Se ha descrito esta alternativa como una tecnología nueva pobremente evaluada, cuyo impacto sobre la biodiversidad y sustentabilidad de la agricultura a largo plazo es desconocido (UNEP, 2009). Una evaluación crítica de esta tecnología se encuentra en Biofuel Watch (2009). Royal Society (2009) indica que su viabilidad y efectividad son relativamente bajas.

Cabe señalar que todas las tecnologías de remoción de CO₂ propuestas tendrían un efecto a largo plazo, después de su implementación, y ninguna produciría una respuesta rápida, que pudiera contrarrestar cambios repentinos del clima. En caso de tener éxito, reforzarían los esfuerzos de mitigación.

Reflexión de la radiación solar al espacio

Esta solución se basa en evitar el desbalance de energía

producido en la atmósfera, debido a la menor salida de radiación de onda larga (infrarroja) producida por el aumento de gases de invernadero, disminuyendo la entrada de radiación solar (onda corta). Las evidencias muestran que una reducción de la entrada de la radiación solar produce un descenso de la temperatura. Esto se puede lograr, por ejemplo, aumentando el número de partículas reflectantes en la estratosfera, colocando "espejos" fuera de la atmósfera, o aumentando el espesor de las nubes oceánicas. También se ha planteado el aumento del albedo de la superficie, por ejemplo, pintando de blanco las áreas urbanas y carreteras, o por cambio a cultivos de alta reflectividad, o colocando un plástico reflectante en los desiertos (Royal Society, 2009). Algo muy importante es que estas acciones producirían una respuesta rápida del sistema climático.

La opción que ha tenido mayor atención (y polémica) es la inyección de compuestos de azufre en la estratosfera (Crutzen, 2006; Blackstock *et al.*, 2009; Hegerl y Solomon, 2009; Blackstock y Long, 2010). Es bien sabido que las grandes erupciones volcánicas, que inyectaron azufre en la estratosfera, produjeron un enfriamiento significativo al poco tiempo de las erupciones, el cual se mantuvo por varios años (Robock, 2002). Considerando lo difícil de reducir las concentraciones atmosféricas de GI, la factibilidad de esta opción de geoingeniería, que tiene la mayor viabilidad y efectividad (Royal Society, 2009), debería investigarse a fondo, incluyendo los posibles efectos secundarios (Brovkin *et al.*, 2009; Hegerl y Solomon, 2009).

Claramente, la reducción de las emisiones de GI (mitigación) es la solución definitiva para detener el calentamiento global, pero es recomendable que se lleven a cabo investigaciones a nivel internacional para el desarrollo de las técnicas de geoingeniería, especialmente las que producen

una repuesta rápida, con el objeto de estar preparados y poder enfrentar una posible emergencia climática futura.

Visión Sinóptica Pesimista

Del análisis de la situación actual, es difícil ser optimista. Ya ha tenido lugar un aumento de la temperatura de 0,8°C desde la época pre-industrial, y los efectos se hacen sentir. En el Acuerdo de Copenhague se acepta que ocurra un aumento de 2°C, que supuestamente no tendría efectos catastróficos, durante el siglo 21. Sin embargo, las reducciones de emisiones propuestas, las cuales ni siquiera son vinculantes, predicen aumentos muy por encima de esa temperatura. El escenario que se vislumbra es el de un inicio temprano (2010) pero de lenta implementación (Tabla II), donde recién en el 2050 las emisiones se igualarían a las de 1990 y la temperatura en 2100 subiría al menos 3°C.

Para lograr el objetivo de los 2°C para 2100, las emisiones globales deberían reducirse en ~50% para 2050 con respecto a 1990; es decir, todas las emisiones de los países industrializados (~42%), más un porcentaje significativo de la correspondiente a los países en desarrollo. Sin embargo, de acuerdo a los escenarios de crecimiento, especialmente de los países en desarrollo, las emisiones globales seguirían aumentando en ~1% por año; es decir que para el 2050 habrán aumentado sobre el 40%, en vez de bajar 50%. El desarrollo ha sido y seguirá estando basado en los combustibles fósiles, que son significativamente más baratos que las energías alternativas "descarbonizadas". Reducir la deforestación tiene múltiples beneficios pero parece poco probable que ocurra en forma importante a escala global; de todas formas, aun un cese total de la deforestación solo aportaría una reducción de ~20%.

Al parecer, es inevitable un calentamiento global del clima durante el siglo 21, con posi-

bles aumentos catastróficos de temperatura. Todos los países deberían adelantar sus planes y estrategias de adaptación. Sin duda, la comunidad internacional continuará con las conversaciones, acuerdos y tratados que tiendan, por lo menos, a aliviar la situación. Bajo las actuales promesas de mitigación, para mantener el aumento de temperatura por debajo de 2°C serán necesarias acciones muy agresivas de reducción de las emisiones después de 2020. En la medida de las posibilidades, será necesario apelar a todos los recursos disponibles, tanto por parte de los países industrializados como los en desarrollo, especialmente los llamados emergentes, con un alto ritmo de crecimiento. Habría que propiciar una rápida transferencia de tecnologías hacia los países en desarrollo, con el objeto de descarbonizar la energía, auspiciar el control de los compuestos climáticamente activos de vida corta, que ayudarían a ganar tiempo mientras se consolidan otras medidas de mitigación, y propiciar que se detenga la deforestación. También, adelantar las investigaciones de geoingeniería de procesos que remueven CO₂ de la atmósfera. Para enfrentar una posible crisis climática futura es muy recomendable preparar un plan B de respuesta rápida.

REFERENCIAS

- Artic Council (2009a) *Tromsø Declaration*. <http://artic-council.org/filearchive/Tromsoe%20Declaration-1.pdf>.
- Artic Council (2009b) *Black carbon: A short-lived climate-forcing agent*. www.arcticpeoples.org/2009/10/02/black-carbon-a-short-lived-climate-forcing-agent/
- Benser MA, Knutson TR, Tuleya RE, Sirutis JJ, Vecchi GA, Garner ST, Held IM (2010) Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes. *Science* 327: 454-458.
- Berntsen TK, Fuglestedt, JS, Joshi MM, Shine KP, Stuber N, Ponater M, Sausen R,

- Hauglustaine A, Li L (2005) Response of climate to regional emissions of ozone precursors: sensitivities and warming potentials. *Tellus 57B*: 283-304.
- Biofuel Watch (2009) Biofuel watch comments on draft methodology "General methodology for the greenhouse gas emission reduction from the production and incorporation into soil of biochar in agricultural and forest management systems", Submitted by Carbon Gold. www.biofuelwatch.org.uk/docs/Comments-CarbonGold.pdf
- Blackstock JJ, Long JCS (2010) The politics of geoengineering. *Science 327*: 527.
- Blackstock JJ, Battisti DS, Caldeira K, Eardley DM, Katz JI, Keith DW, Patrinos AAN, Scharag DP, Socolow RH, Koonin SE (2009) *Climate Engineering Responses to Climate Emergencies*. Nov. 2009. 66 pp. <http://arxiv.org/pdf/0907.5140>
- Bond T (2007) Can warming particles enter global climate discussions? *Env. Res. Lett.* 2: 045030. 9pp.
- Brovkin V, Petoukhov V, Claussen M, Bauer E, Archer D, Jaeger C (2009) Geoengineering climate by stratospheric sulfur injections: Earth system vulnerability to technological failure. *Clim. Change 92*: 243-259.
- Cicerone R (2006) Geoengineering: Encouraging research and overseeing implementation. *Clim. Change 77*: 221-226.
- Climate Interactive (2010) Copenhagen accord pledges do not meet climate goals. Comunicado de prensa del Sustainability Institute. <http://climateinteractive.org/scoreboard/press/copenhagen-cop15-analysis-and-press-releases/Copenhagen%20Accord%20Submissions%20Press%20Release%204%20February%202010.pdf/view>
- Crutzen PJ (2006) Albedo enhancement by stratospheric sulfur injection: A contribution to resolve a policy dilemma? *Clim. Change 77*: 211-219.
- DeFries RS, Rudel T, Uriarte M, Hansen M (2010) Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nature Geosci.* publicado en línea, febrero 7, DOI:10.1038/NGEO756.
- FAO (2009) Global forest monitoring to help mitigate climate change. FAO Media Centre. www.fao.org/news/story/en/item/36408/icode
- Forbes MS, Raison RJ, Skjemstad JO (2006) Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. *Sci. Tot. Env.* 370: 190-206.
- Fowles M (2007) Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy. *Biomass and Bioenergy 31*: 426-432.
- Fuglestedt JS, Isaksen ISA, Wang WC (1996) Estimates of indirect global warming potential for CH₄, CO and NO_x. *Clim. Change 34*: 405-437.
- GISS-NASA (2009) 2009: second warmest year on record; End of warmest decade. Press News Release. www.giss.nasa.gov/research/news/20100121
- Global Witness (2010) Annual forest transparency report 2009. *Making the Forest Sector Transparent*. www.forest-transparency.info/report-card
- Hammes K, Torn MS, Lapenas A.G, Schmidt WI (2008) Centennial black carbon turnover observed in a Russian steppe soil. *Biogeosciences 5*: 1339-1350.
- Heffernan O (2010) The road from Copenhagen: the experts' views. *Nat. Rep. Clim. Change 4*: 15-17.
- Hegerl C, Solomon S (2009) Risk of climate engineering. *Science 325*: 955-956.
- Heemann M (2010) How stable is the methane cycle? *Science 327*: 1211-1212.
- Inman M (2010) Planning for plan B. *Nat. Rep. Clim. Change 4*, Jan. 2010 www.nature.com/reports/climatechange
- IPCC (2007a) *WG I. The Physical Science Basis. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. www.ipcc.ch
- IPCC (2007b) *WG II. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. www.ipcc.ch
- IPCC (2007c) *WG III. Mitigation of Climate Change. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. www.ipcc.ch
- Jackson SC (2009) Parallel pursuit of near-term and long term climate mitigation. *Science 326*: 526-527.
- Jacobson MZ (2002) Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming. *J. Geophys. Res.*, 107D: 4410, doi:10.1029/2001JD001376
- Johnson CE, Derwent RG (1996) Relative radiative forcing consequences of global emissions of hydrocarbons, carbon monoxide, and NO_x from human activities estimated with a zonally-averaged two-dimensional model. *Clim. Change 34*: 439-462.
- Lehmann J, Gaunt J, Rondón M (2006) Bio-chart sequestration in terrestrial ecosystem - A review. *Mitig. Adapt. Strat. Global Change 11*: 403-427.
- Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, O'Neill B, Skjemstad JO, Thies J, Luizao FJ, Petersen J, Neves EG (2006) Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1719-1730.
- Mett Office (2009a) *The Scientific Evidence for Early Action on Climate Change*. www.metoffice.gov.uk/climatechange/policymakers/action/evidence.html
- Mett Office (2009b) *Mapping Climate Impacts*. www.metoffice.gov.uk/corporate/pressoffice/2009/pr20091022.html
- Molina M, Zaelke D, Sarmaa KM, Andersen SO, Ramathan V, Kaniaru D (2009) Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 106: 20616-20621.
- Moore FC, MacCracken MC (2009a) Mitigation of short-lived greenhouse gases as the foundation for a fair and effective climate compromise between china and the west. Climate Institute, International Action. (www.climate.org/topics/international-action/Mitigation_of_Short-Lived_Greenhouse_Gases.html)
- Moore FC, MacCracken MC (2009b) Lifetime-leveraging: An approach to achieving international agreement and effective climate protection using mitigation of short-lived greenhouse gases. *Inter. J. Clim Change Strat. Manag.* 1: 42-62.
- Nature (2009) Editorial: Climate of compromise. *Nature* 461:1027-1028; News: Time running out for climate talks. *Nature* 461: 1034-1035.
- Ohlson M, Dahlberg B, Okland T, Brown KJ, Halvorsen R (2009) The charcoal carbon pool in boreal forest soils. *Nat. Geosci.* 2: 692-295.
- Olander LP, Gibbs HK, Steninger M, Swebson JJ, Murray BC (2008) Reference scenarios for deforestation and forest degradation in support of REDD: a review of data and methods. *Env. Res. Letters* 3. 11 pp. (DOI: 10.1088/1748-9326/3/2/025011)
- O'Neill BC, Riahi K, Keppo I (2010) Mitigation implication of mid century targets that preserve long-term climate policy options. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 107: 1011-1016.
- Parry M (2010) Copenhagen number crunch. *Nat. Rep. Clim. Change*; doi:10.1038/climate.2010.01. www.nature.com/climate/2010/1002/full/climate.2010.01.html
- Persson UM, Azar C (2010) Preserving the world's tropical forest: A price on carbon may not do. *Env. Sci. Technol.* 44: 210-215.
- Robock A (2002) Pinatubo eruption: The climatic aftermath. *Science* 295: 1242-1244.
- Robock A, Bunzi M, Kravitz B, Stenchihov G (2010) A test for geoengineering? *Science*: 327: 530-531.
- Royal Society (2009) *Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty*. Reporte de la Royal Society, London. <http://royalsociety.org/Geoengineering-the-climate>
- RRI (2010) *The End of Hinterland: Forest Conflict and Climate Change*. Rights and Resources Initiative. www.rightsandresources.org/documents/files/doc_1400.pdf
- Sanhueza E. (2009a) Potential emissions of Kyoto and non-Kyoto climate active compounds in the production of sugarcane ethanol. *Interciencia* 34: 8-16.
- Sanhueza E (2009b) Agroetanol ¿Un combustible ambientalmente amigable? *Interciencia* 34: 106-112.
- Schrope M (2009) When money grows on trees. *Nat. Rep. Clim. Change* 3: 301-303.

- Shindell DT, Levy IHH, Schwarzkopf MD, Horowitz LW, Lamarque JF, Faluvegi G (2008) Multimodel projections of climate change from short-lived emissions due to human activities, *J. Geophys. Res.*, 113, D11109, doi:10.1029/2007JD009152. 18 pp. www.agu.org/pubs/crossref/2008/2007JD009152.shtml
- Strassburg BBN, Kelly A, Balmford A, Davies RG, Gibbs HK, Lovett A, Miles L, Orme DL, Price J, Turner RK, Rodrigues ASL (2010) Global congruence of carbon storage and biodiversity in terrestrial ecosystems. *Cons. Lett.* Accepted article, DOI: 10.1111/j.1755-263X.2009.000092.x
- Strong A, Chisholm S, Miller C, Cullen J (2009) Ocean fertilization: time to move on. *Nature* 461: 347-348.
- TCD (2009) *The Copenhagen Diagnosis: Updating the World on the Latest Climate Science*. Climatic Change Research Centre. University of New South Wales. www.ccr.unsw.edu.au/Copenhagen/Copenhagen_Diagnosis_LOW.pdf
- UNEP (2009) *The Natural Fix? The Role of Ecosystems in Climate Mitigation*. United Nations Environment Programme, 68 pp; ISBN No: 978-82-7701-057-1. www.grida.no/publications/rr/natural-fix/ebook.aspx
- UNFCCC (1994) Fact Sheet: An Introduction to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and its Kyoto Protocol. http://unfccc.int/essential_background/convention/item/2627.php
- UNFCCC (1998) *Kyoto Protocol*. <http://unfccc.int/kyoto-protocol/item/2830.hpd>
- UNFCCC (2009a) *Copenhagen Accord*. http://unfccc.int/files/meetings/cop15_cph_aug.pdf
- UNFCCC (2009b) Comunicado de Prensa. Convención Marco sobre el Cambio Climático, http://unfccc.int/press/news_archive/items/4692.php
- UNFCCC (2009c) Fact sheet: Reducing emissions from deforestation in developing countries: Approaches to stimulate action. http://unfccc.int/files/press/backgrounders/application/pdf/fact_sheet_reducing_emissions_from_deforestation.pdf
- USCAN (2010) Who's on board with the Copenhagen accord? U.S. Climate Action Network. www.usclimatenetwork.org/policy/copenhagen-accord-commitments
- WGMS (2009) Preliminary glacier mass balance data 2007/2008. *World Glacier Monitoring Service Report*. www.geo.uni-zh.ch/wgms/mbb/sum08.html
- Wheeler D, Ummel K (2007) Another inconvenient truth: A carbon-intensive south faces environmental disaster, no matter what the North does. Center for Global Development, Working Paper Number 134 December 2007. www.cgdev.org/content/publications/detail/14947