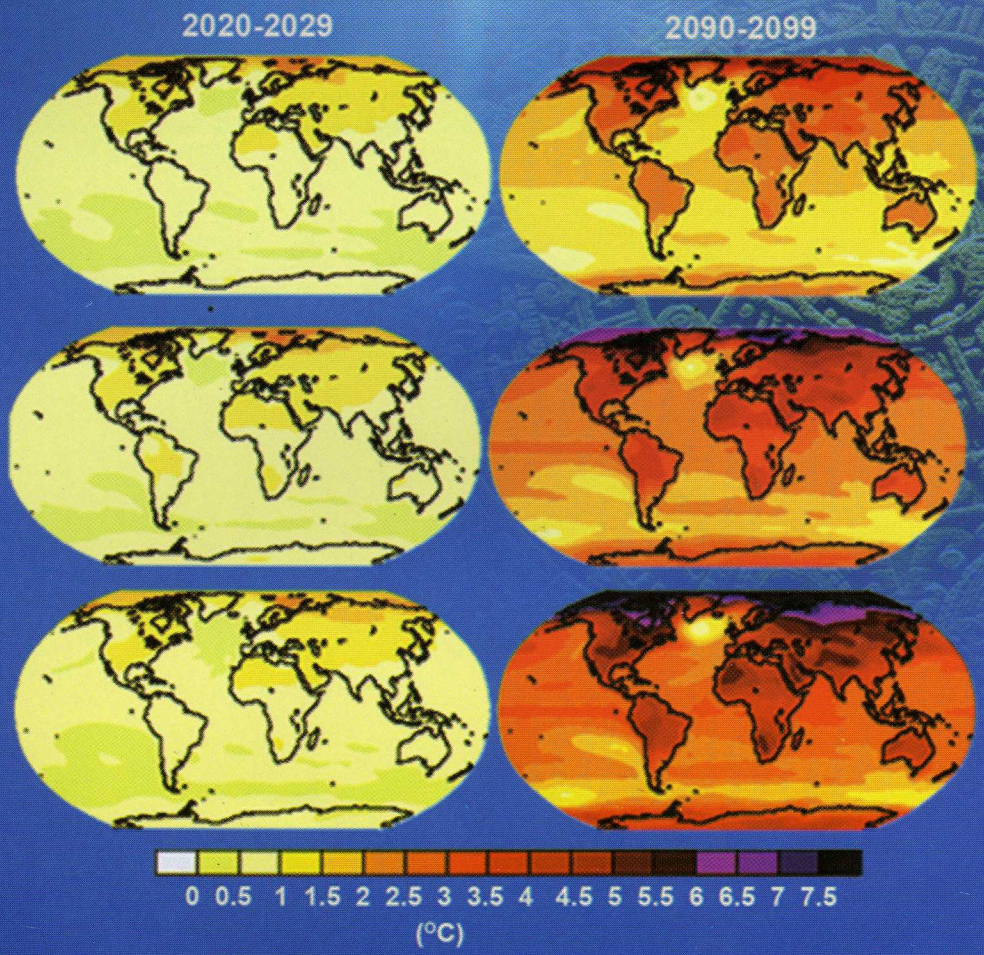
REVISTA SOLAR
ASOCIACIÓN NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
ANES

CAMBIO CLIMÁTICO



CONSEJO XIV - NÚMERO 59 - ENERO 2007

Asociación Nacional de Energía Solar

XXXI Semana Nacional de Energía Solar

Zacatecas, Zac.

1 - 5 de Octubre, 2007

REVISTA *ANES*

NÚMERO 1, 2007

EDITORIAL

Actualmente, no hay duda en la comunidad científica de que el Planeta Tierra está sufriendo cambios que no ha conocido desde hace al menos medio millón de años. Estos cambios tienen su origen en la actividad humana, y lo hemos hecho como ninguna otra especie lo ha logrado en toda la historia del Planeta cuyas características son su severidad extrema. Por dos razones: la rapidez con que han ocurrido y la persistencia o durabilidad de tales cambios, aún tomando en cuenta escalas de tiempo mucho más largas que las de la vida humana.

Es por ello que la **REVISTA *ANES*** presenta en este Número un primer Artículo sobre el ***Cambio Climático*** y su raíz en el CO_2 antropogénico, planteando su origen –directamente relacionado con la quema de combustibles fósiles y otros efectos de quema tales como la deforestación–, así como los efectos colaterales en océanos, las regiones árticas, etc., que podrían alterar la ecología de la Tierra de manera que nos resultará irreconocible antes de que el Siglo XXI termine.

En esta sociedad cada día más global, es ahora imperativo buscar soluciones globales al problema del cambio climático, ello dentro de un marco de responsabilidad individual, así como de todas las naciones. La razón es simple: sólo con la contribución de todos podremos mitigar las consecuencias catastróficas del CO_2 en la atmósfera y los océanos. No hay Nación y persona que deba considerarse ajena al problema, y la urgencia de la situación implica que México, siendo un País con enormes dificultades sociales, económicas y estructurales, entre muchas otras, debe actuar en forma informada, decidida, inmediata y responsable. Ello se logrará cuando el contexto Nacional se maneje de manera integral, pues el cambio hacia una sociedad sustentable es ahora una necesidad y no una opción.

Hoy, más que nunca, el impulso de las energías renovables en México deberá tener una alta prioridad en todos los ámbitos de la actividad humana. La ignorancia del cambio climático o urgencia debida a otros problemas no pueden ser excusa para dejar de lado el calentamiento global. La alternativa es que paguemos con creces esta morosidad.

Enrique Geffroy

Editor

ASOCIACIÓN NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

Ing. Rodolfo Martínez Strevel

PRESIDENTE 2006-2008

Dra. Ernestina Torres Reyes
Vicepresidente

Ing. Ricardo Saldaña Flores
Secretario General

Dr. Alvaro Lentz Herrera
Tesorero

Calzada Acoxpa # 524 Desp. 505-C.
Col. Prado Coapa. C. P. 14350.
México D.F.
Tel: (55) 56 84 41 62
http://www.anes.org/

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

Dr.Enrique Geffroy Aguilar

Editor

Secretario de Publicaciones

Ing. Gerardo Guevara Flores

Responsable de la Publicación Electrónica

CALENTAMIENTO GLOBAL

Por René Garduño y Enrique Geffroy

El *Grupo de Trabajo I –WGI–* del Comité Internacional sobre el Cambio Climático (*International Panel for Climate Change: IPCC*) publicó en febrero pasado su último (Cuarto) Reporte —Asssessment Report 4: *AR4* [1,2]— sobre los efectos en el clima de una concentración creciente de gases con efecto invernadero (*GEIs*) en la atmósfera♦. Los estudios realizados desde el anterior informe del 2001 permiten suponer —con un alto nivel de confianza: mayor al 90%— que ***el calentamiento global es esencialmente resultado de las emisiones de esos gases, productos de la actividad humana***; *de ello no queda duda* [3].

El *IPCC* está integrado por 2,500 científicos, de más de 100 países del mundo, y tiene el mandato de las Naciones Unidas para estudiar el Cambio Climático y sus efectos. Así como el primer informe del *IPCC-WGI* se publicó a principios de febrero del 2007, ahora el *Grupo de Trabajo II* (*WGII*) *para el Impacto, Adaptación y Vulnerabilidad del Cambio Climático* acaba de hacer públicas sus conclusiones (presentadas en abril): ***El cambio climático está actualmente alterando en forma comprobable, sistemática y significativa el gran ecosistema terráqueo*** [4].

Después de una semana de desvelos completos, los científicos del Grupo II del *IPCC* acordaron esta conclusión, ello a pesar de que los Estados Unidos, Rusia, China y Arabia Saudita manifestaron el mayor número de objeciones al texto sugerido por los científicos, habiendo logrado la noche previa darle una "suave diluida" al texto final antes de ser aprobado. Algunos científicos objetaron que los EEUU, China y Rusia no consideraron correcta la afirmación de que "...'se tiene un alto grado de confianza'... que el cambio climático está ya afectando...'a muchos sistemas naturales, en todos los continentes y océanos'...". Estos países no deseaban que se mencionara el nivel de confianza que se tiene para afirmar lo anterior [5,6]. En contraparte, algunas secciones se modificaron reforzando las conclusiones. Por ejemplo, se logró un consenso para afirmar que "África podría tener que dedicar entre el 10 y el 15% de su Producto Neto Total para acciones tendientes a adaptarse al Cambio Climático".

En lo general, el *Reporte del Grupo II* es sin duda la evaluación más sólida sobre los riegos del cambio climático, en el que se predicen desde la falta de agua para miles de millones de seres humanos hasta la elevación del nivel del mar que podría persistir por siglos. En este reporte se concluye que existe un riesgo de calentamiento global entre 1.5 y 4°C para fines de este siglo. Aún más, esta Segunda Parte del Reporte 2007 establece que el

---

M. René Garduño López es Investigador del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.
Enrique Geffroy Aguilar es Secretario de Difusión y Editor de la Revista de ANES e investigador del Inst. de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, México, DF, México 04510. geffroy@servidor.unam.mx .

♦ La mayor opacidad de la atmósfera actual es resultado de la existencia de *GEIs* dado que restringe la capacidad de la tierra de re-radiar al espacio exterior el calor generado en la superficie terrestre (con una temperatura de cuerpo negro de 0-30°C y donde la energía emitida corresponde principalmente a la región del espectro en el infrarrojo, induciendo así una elevación de la temperatura de la atmósfera, equivalente al calentamiento que ocurre en un invernadero. Los principales *GEIs* son el CO_2, el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), los hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs), así como el exafluoruro de azufre (SF_6).

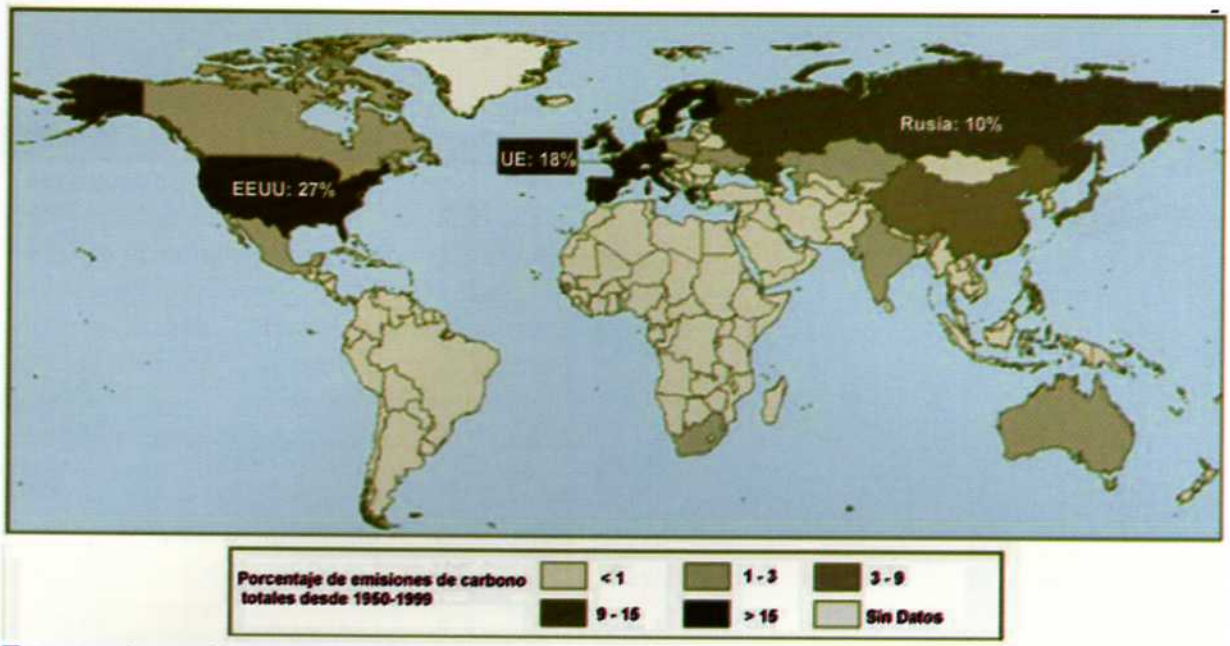


FIGURA 1. Las emisiones de *GEI*s históricas totales para los diferentes países. Los Estados Unidos, con apenas el 5% de la población de la Tierra, ha producido *GEI*s cercanos al 27% del total generado en los últimos 150 años. Las economías desarrolladas integradas por EEUU, la Comunidad Europea –los 13 países que la confor-maban hasta el 2002–, Japón y Rusia, han producido más de la mitad de los *GEI*s totales [8].

"…Cambio Climático no es algo poco definido o una amenaza en el futuro; todo lo contrario, es algo que de hecho ocurre ahora y aquí…". Finalmente, el impacto de este calentamiento es ya cuantificable, con una alta probabilidad de certeza, en amplias regiones del globo como son los océanos y el Ártico, con posibles efectos globales y muy severos [4].

EL CARBÓN QUE QUEMAMOS: MADRE DEL CALENTAMIENTO

El cambio climático se debe a un incremento en la cantidad de CO_2 en la atmósfera que ocurre a partir de la revolución industrial, pasando de las 280 partes por millón (ppm) a más de 381 ppm actualmente (2005)[7]. Los resultados reportados muestran que las concentraciones atmosféricas de *GEI*s, medidas éstas en los últimos 150 años, nunca se han alcanzado, al menos no en los 650,000 años más recientes de nuestra historia.

Este incremento se debe a la actividad humana desarrollada en particular en las economías más avanzadas, como puede verse en la Figura y la Tabla 1. A partir de 1970, la generación de *GEI*s —ponderado cada tipo por su capacidad de efecto invernadero— ha aumentado de 28.7 a 49 Gt CO_2-eq□; un incremento del 70% (o de 24%, a partir del 1990). Este aumento se debió principalmente al sector energético, que creció en más de 145%. Esto es, las economías han progresado apoyándose en un consumo desmedido de combustibles fósiles y que ahora sabemos es insostenible, aun en el corto plazo.

A pesar de que México no puede considerarse una economía desarrollada, nuestro País no está exento de una contribución significativa, en gran medida debido a una dependencia elevada y excesiva en el uso de hidrocarburos[9] para su desarrollo económico (Figs. 2 y 3). Brasil ha sido también un importante emisor, pero en gran parte debido a un segundo efecto: *la deforestación y cambio de uso del suelo*.

□ La definición de CO_2-eq es la cantidad de cualquier gas con efecto invernadero cuyos efectos sean comparables en la intensidad del efecto –forzamiento– radiativo así como en la duración –su permanencia en la atmósfera– al CO_2.

Tabla 1. EIA, Millones ton CO_2 (de combustibles): 2002-2025

País o región	2002	2025	Crecimiento prom. anual	Crecimiento total
Mundo (Totales)	24,410	38,791	2.0%	58.9%
Estados Unidos de América	5,752	7,980	1.4%	38.7%
Europa Occidental	3,550	3,953	0.5%	11.4%
Japón	1,180	1,242	0.2%	5.3%
Canadá	586	806	1.4%	37.5%
Australia/Nueva Zelanda	447	608	1.3%	36.1%
Europa Oriental	725	1,008	1.4%	38.9%
Rusia	1,411	1,865	1.2%	32.2%
Otros "FSU"	989	1,513	1.9%	53.0%
China	3,323	8,134	4.0%	144.8%
India	1,026	1,993	2.9%	94.3%
Corea del Sur	451	722	2.1%	60.2%
Otros países en desarrollo: Asia	1,407	2,689	2.9%	91.1%
M xico	**363**	**590**	**2.1%**	**62.6%**
Brasil	341	678	3.0%	98.9%
Otros América Central/Sur	645	1,129	2.5%	75.0%
Medio Oriente	1,359	2,352	2.4%	73.0%
Africa	854	1,524	2.6%	78.5%

Referencia: Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) Ver. 4.0. (Washington, DC: World Resources Institute, 2007).

¿Y cómo habrán de alcanzar un desarrollo económico los países menos desarrollados? Si ahora analizamos el crecimiento en la emisión de *GEI*s, entonces las contribuciones de América Latina y el Caribe han aumentado 35% más que el promedio mundial, para el periodo entre 1990 y hasta el 2000 que fue de 13%. Durante ese periodo, en Sudamérica se dio un aumento del 40% en la industria y el transporte, con incrementos superiores al 70% en la generación de electricidad, aunque las emisiones de este último sector son todavía menores que las de los anteriores.

En general, un habitante de Latinoamérica produce aproximadamente 2.7 toneladas de CO_2-eq anuales, por debajo del promedio mundial (ver Fig. 2). Y a pesar de que un brasileño genera casi la mitad que un mexicano, los mecanismos asociados al *cambio de uso de suelo* son extremadamente severos en este último país. Lo más preocupante es que Perú, el segundo país latinoamericano con

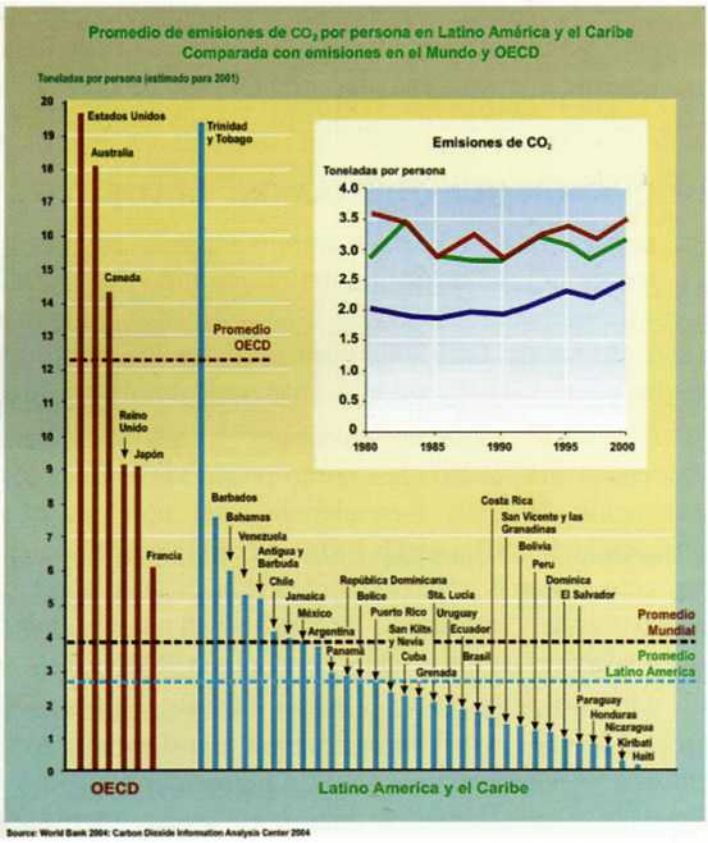


FIGURA 2. Emisión de *GEI*s per cápita. El mexicano emite *GEI*s a una tasa cercana al promedio mundial por lo que cual-quier política de desarrollo que no mitigue un aumento en la emisión de *GEI*s es irresponsable y muy probablemente poco ética. La explotación de gas hace que Trinidad y Tobago tengan una producción alta. Nótese que los países –miembros del OECD– emiten *GEI*s a una tasa más de tres veces el promedio mundial [9].

grandes extensiones selváticas, tiene igualmente un severo problema debido al "cambio de uso de suelo", mientras que las emisiones de CO_2 como resultado del quemado de combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón mineral y otros) son la principal fuente del efecto invernadero. Aún así, la Fig. 3 muestra que una cuarta parte de las emisiones aproximadamente se debe al "cambio del uso del suelo"; de ahí su relevancia.

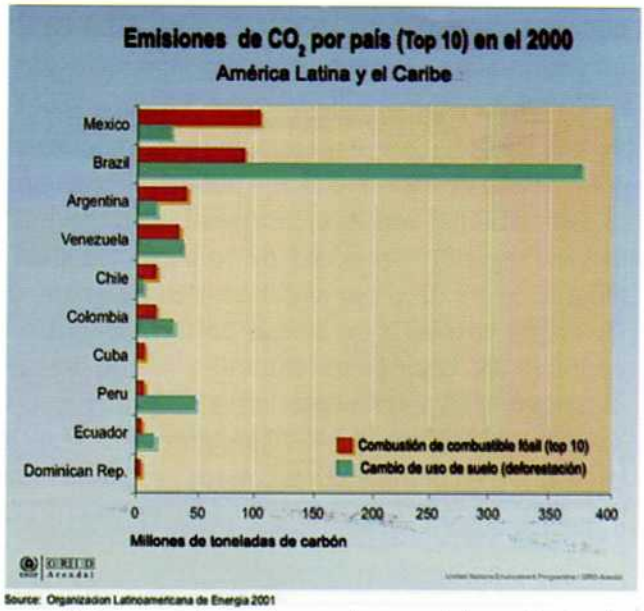


FIGURA 3. Los países emisores más importantes de América Latina. Las dos fuentes consideradas son emisiones por combustión de petróleo, gas y carbón, así como por deforestación [9].

Con base en información recopilada por el *WRI*, la Fig. 3 muestra a Brasil como el principal emisor de CO_2 latinoamericano. Ello es aún más desa-fortunado cuando se observa que el cambio de uso de suelo en Brasil generó el 18% de CO_2 del mundo por este concepto, sólo detrás de Indonesia. En gran medida, la deforestación en Indonesia es causada por las nuevas plantaciones de palma de aceite, la principal fuente internacional de biodiesel para Europa.

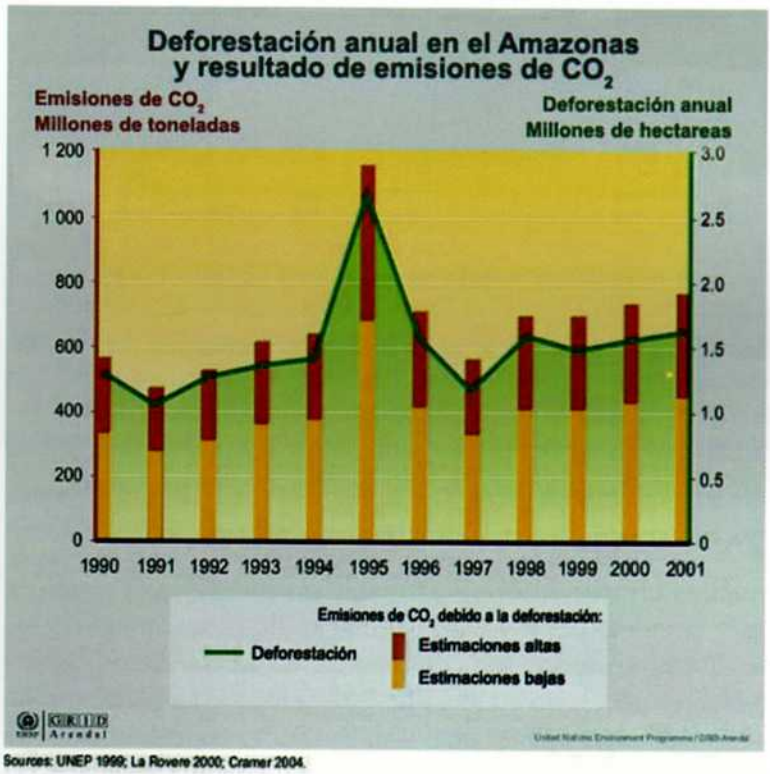


FIGURA 4. La deforestación en la Cuenca Amazónica, así como las emisiones de *GEI*s resultado del cambio de suelo (2004) [9].

Las zonas selváticas localizadas en Brasil y Perú corresponden al 92% de esos recursos sudamericanos. Las enormes extensiones deforestadas en Brasil son extremadamente lesivas al medio ambiente, pues el 0.4% del territorio de tala anual implica entre 1.7-2.7 millones de hectáreas de cambio de uso de suelo (Fig. 4). Y si bien el problema es agudo, también éste ha resultado pernicioso, ya que durante la última década la tala en Brasil se incrementó 32%, pasando de 14,000 a 18,000 km^2 al año; ello equivalente a arrasar, cada año, una superficie comparable a Baja California Sur. La presión sobre el ecosistema tienen su origen en la ganadería y agricultura, la explotación de recursos forestales –extracción de madera, en menor escala–, incendios forestales, —y otros mecanismos, esencialmente asociados a cambios climáticos

regionales, tales como sequía— así como también el crecimiento de las ciudades, que forjan un cambio en el uso del suelo extrema-damente adverso al balance de los *GEI*s.

Aún más, el balance para América Latina es extremadamente preocupante pues las tasas de tala en México y Argentina representan un serio problema para sus habitantes: éstas alcanzan 1.1 y 0.8% de las superficies boscosas, respectivamente. En contraparte, remediar esa adversa situación actual conlleva enormes beneficios posibles para nuestros países. Las selvas tropicales son el segundo sumidero de importancia para el CO_2 atmosférico, después de los océanos (Figura 5). Y si es cierto que existe una gran incertidumbre en cuanto al balance el los flujos de *GEI*s por cambios en el uso del suelo, existe plena confianza de que la restauración de las condiciones ecológicas naturales aporta un enorme beneficio a la mitigación del cambio climático. Es igualmente válido suponer que todos los ecosistemas restaurados aportarán al soporte económico de sus habitantes en igual o mayor medida —pues encierran una enorme riqueza—, en comparación con los escenarios logrados con el cambio del uso del suelo.

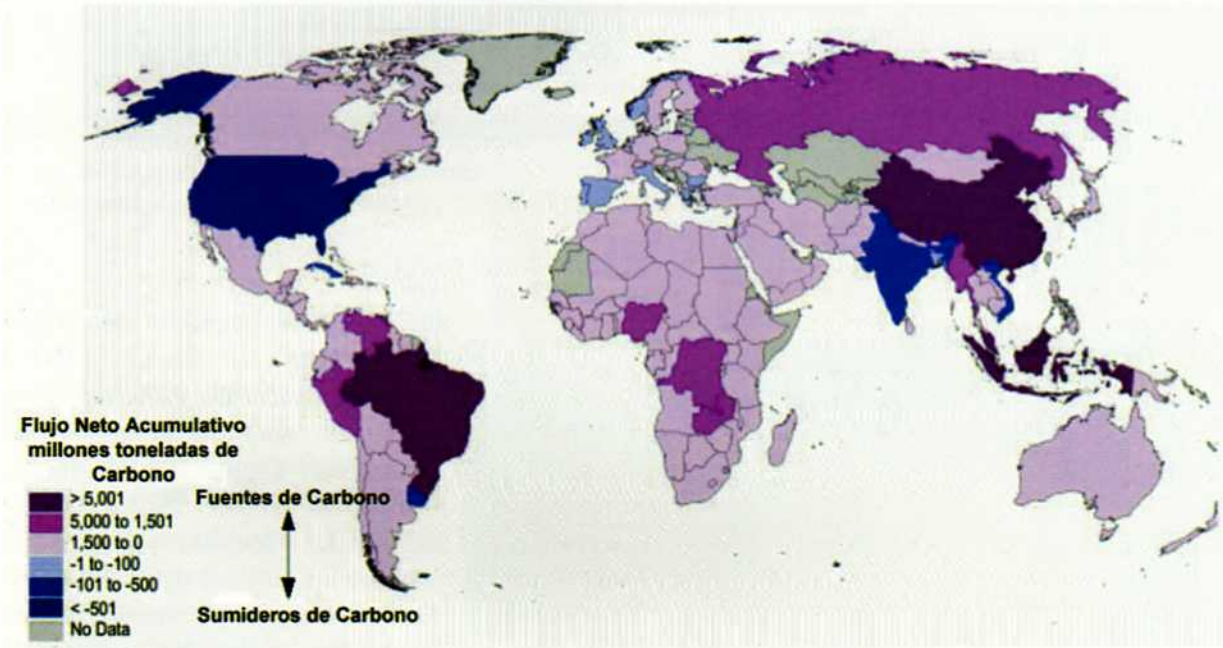


FIGURA 5. Balance neto de flujo de CO_2 como resultado del cambio de uso de suelo para el periodo de 1950 al 2000. Estos flujos, absorbido o emitido, son el resultado de los cambios llevados a cabo por la humanidad, tales como deforestación, cambios de cultivo, crecimiento nuevo de vegetación natural en campos abandonados, entre otros. Los tonos en rojo representan fuentes de CO_2 –emisiones netas a la atmósfera–, y por ello son contribuciones adversas al cambio climático, mientras que los azules absorción de CO_2 por la restauración de vegetación [10,11].

LAS POSIBLES CONSECUENCIAS CATASTRÓFICAS DE MÁS CO2

Se ha informado ampliamente de aquellos efectos en el clima que son severos, tales como la intensidad de las tormentas tropicales y aumento del nivel de los mares, de la severidad de los veranos e inviernos de grandes extensiones en todos los continentes, de la reducción de las masas de hielo polares, etc. Pero también es necesario conocer de otros efectos, en particular de aquéllos cuya severidad y magnitud pueden ser igualmente catastróficos; especialmente de aquéllos cuyo impacto en el medio ambiente —como hoy lo conocemos— puede ser devastador. Entre ellos debemos considerar efectos adversos como la pérdida del segundo sumidero de CO_2 más importante (el proceso natural de generación de masa vegetal a partir del carbono de

la atmósfera), como también la liberación de carbono del permafrost, o de una mayor absorción del CO_2 por los océanos, que los convierte en cuerpos de agua cada vez más ácidos.

DEFORESTACIÓN Y PÉRDIDA DE ABSORCIÓN DE CO_2 POR LA VEGETACIÓN

Las Figuras 5 y 6 muestran los efectos de políticas del uso y del cambio de suelo. Como puede observarse, la aplicación de políticas forestales y de restauración de ecosistemas puede ser una de las soluciones más sensatas para la captura —y reducción de la emisión— de CO_2. Aquí la aplicación de las políticas correctas no sólo elimina una fuente del problema del cambio climático, sino que sistemáticamente incrementa el valor y productividad del suelo una vez que éste se reestablece a su estado natural. Como se observa de la Fig. 6, el potencial de México, es apreciable, pues tiene enormes extensiones sobre las cuales existe gran potencial para producir masa vegetal. Es igualmente cierto que en estas regiones el problema de tala y cambio de uso de suelo es igualmente severo.

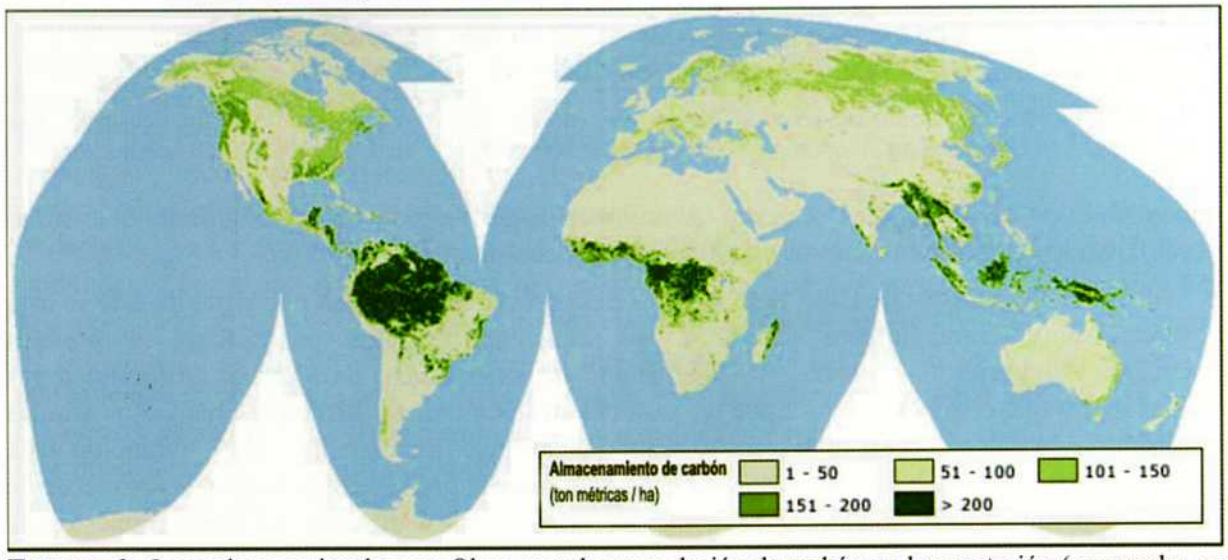


FIGURA 6. Los valores estimados por Olson para la acumulación de carbón en la vegetación (expresados en toneladas métricas de carbón por hectárea). La capacidad para acumular carbón por las selvas tropicales alcanza valores máximos de 250 toneladas métricas por hectárea. Las estimaciones de fuentes y sumideros de CO_2 tienen una alta incertidumbre, ya que no consideran diversas formas de manejo de la agricultura intensiva e industrias forestales, y otras prácticas; en general, ofrecen flujos con incertidumbres que pueden alcanzar ±150% para los flujos más significativos [12,13].

Al aumentar las temperaturas por el cambio climático, la duración de las estaciones de crecimiento es más prolongada, con el inicio de las temporadas de floración ocurriendo más temprano. En este ambiente, la capacidad para acumular CO_2 por la biosfera terrestre ha aumentado de 1.2 ± 0.7 Gt por año (en los 80s) hasta 1.4 ± 0.7 Gt (en los 90s). Aún así, la flora en suelos y océanos sólo absorbe aproximadamente la mitad de las 7.4Gt de carbón antropogénico producidas anualmente.

PERMAFROST

En las regiones árticas se encuentra el *Permafrost*[15,16], a unos cuantos centímetros de la superficie y cuya extensión es de aproximadamente 10.5 millones de km^2, y está sufriendo cambios significativos, posiblemente debido al Cambio Climático. El permafrost es la capa superior del subsuelo congelada permanentemente en las regiones árticas; de hecho, se define *permafrost* como aquellos suelos que por dos años consecutivos no se descongelan —que permanecen por

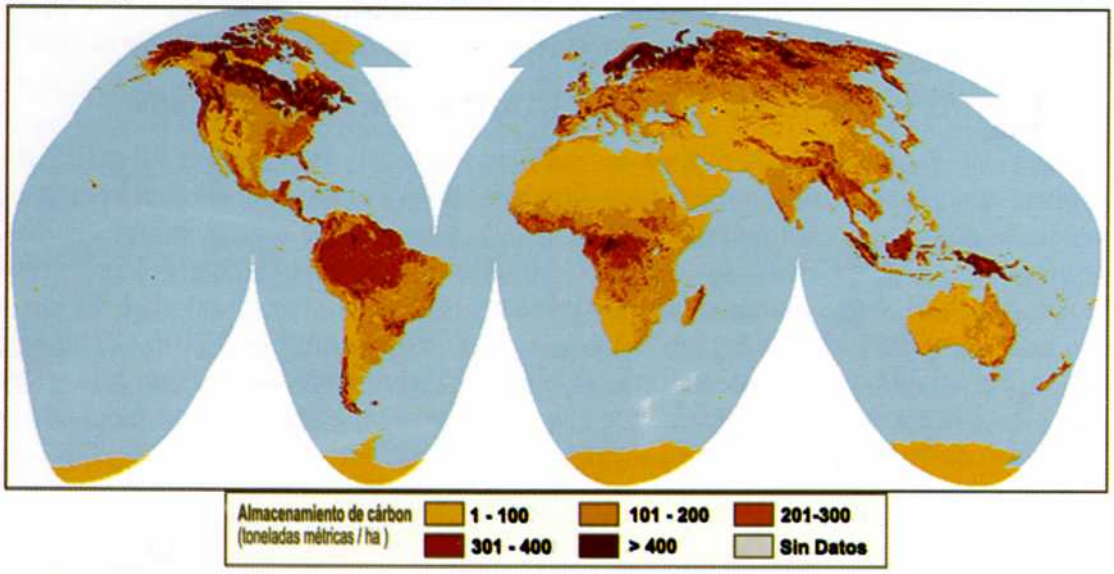


FIGURA 7. Valores del almacenamiento de carbón por encima –como vegetación– y dentro del suelo. Las acumulaciones en Groenlandia y Antártica no consideran el carbón debajo del suelo debido a falta de información [17,18].

debajo de los 0°C. La Figura 7 muestra las regiones de permafrost con profundidades que varían desde 3.4m hasta cientos de metros en otras regiones continentales del Ártico.

En el flujo global de CO_2, la relevancia del permafrost radica en que parte de éste se está descongelando, esencialmente debido a las altas temperaturas observadas en grandes extensiones de las regiones árticas. ¡Sí! Derritiéndose, a tasas hasta de 30cm de profundidad por año; al grado que el suelo ya no ofrece un sustento suficientemente firme para los viejos árboles boreales, los cuales crecen ahora mostrando una notable inclinación. Esta evolución está documentada desde hace varias décadas con mediciones del grosor de los anillos del tronco, que sistemáticamente muestran un grosor asimétrico, fortaleciéndose el sector del tronco opuesto a la inclinación, i.e., agregando más madera en el sector que ahora soporta una mayor carga. Esta evolución se ha podido corroborar en numerosas regiones árticas y por varias décadas. Asimismo, se ha observado un mayor crecimiento de musgo y líquenes en grandes extensiones en las que anteriormente no existían porque el suelo estaba "permanentemente" congelado.

Pero la importancia del Ártico en el cambio climático se debe a que esta región es el almacén más grande en el mundo de materia orgánica en el subsuelo. En el permafrost se encuentra la turba (en Inglés: *peat*), resultado del decaimiento milenario de grandes cantidades de materia orgánica aportada por la flora. Entonces, todo descongelamiento del subsuelo conlleva un proceso acelerado de descomposición de la turba. Para algunos científicos, ello equivale a desconectar el refrigerador y esperar a que lo que contiene simplemente se pudra.

Y eso consecuentemente plantea la posibilidad de una nueva y enorme fuente de CO_2. Una fuente cuya liberación de *GEI*s ocurriría en cantidades extremadamente grandes, ya que tiene la capacidad de liberar del orden de $1.5\square10^{12}$ ton de CO_2. Se estiman entre 350 a 900 Gt de carbón disponibles —cantidades nada despreciables— y su liberación siendo equivalente a más de 150 años de la emisión de *GEI*s antropogénicos, ¡*pero a tasas actuales*!. Puesto de otra manera: ello equivale a ¡duplicar anualmente la inyección de CO_2 en la atmósfera, desde ahora!. Entonces, el calentamiento global se aceleraría pero ahora por un mecanismo propio de la biosfera.

El impacto neto es aún difícil de predecir, y más aún estimar la rapidez de los efectos colaterales. Es decir, cómo se darán los cambios –con qué intensidad, o rapidez– no es fácil de

determinar porque efectos tales como una mayor distribución de musgo en el verano, un adelgazamiento de la capa de nieve en el invierno, la mayor disponibilidad de nutrientes en el subsuelo debido a la descom-posición, o los cambios del albedo representan parámetros ecológico-climáticos significa-tivos, cuyos mecanismos de retroalimentación se desconocen y también son difíciles de inferir.

FIGURA 8. Musgo y líquenes de la tundra boreal tomarán un rol significativo en el desarrollo del nuevo entorno ecológico, pues ahora ocuparán espacios antes helados. Sin embargo, el efecto neto en el balance de carbono es incierto, pues podría aislar el subsuelo, evitando una tasa mayor de pérdida del permafrost. Nature **446**;720(2007).

Mas es innegable que el permafrost retrocede. Es hoy claro que la línea de demarcación boreal del Ártico —en la que crecen árboles— ha tenido una marcha inexorable hacia el norte. Igualmente preocupantes son los posibles procesos anaeróbicos de descomposición de la turba —debidos a la existencia de una capa de agua del deshielo—, pues desafortunadamente éstos generan altas cantidades de metano, cuyo impacto por efecto inver-nadero es 21 —molécula por molécula— veces más pernicioso que el CO_2. Tan sólo en los lagos de Siberia, se calcula que actualmente se liberan a la atmósfera del orden de 4 millones de toneladas de metano. Este metano carece de carbono-14 —que se genera constantemente en la atmósfera y cuya vida media de decaimiento es de varios milenios— lo que implica también que su fuente de carbono ha permanecido ajena al flujo de CO_2 de la atmósfera –esto es, enterrada– durante milenia. En suma, el "efecto permafrost" representa una de tantas posibles consecuencias del calentamiento global que pueden ser extremadamente severas y que definen un punto de no-retorno, que todavía no sabemos cuál es o en qué consiste.

ALGUNOS DE LOS EFECTOS ECOLÓGICOS SEVEROS

EL EN MAR, LA VIDA ES MÁS... ¿ÁCIDA?

El calentamiento global también ha incidido sobre las temperaturas de los océanos del mundo. Una comparación de las temperaturas observadas en el Pacífico Occidental con los records paleoclimáticos indican que el Pacífico, y posiblemente el planeta, están tan calientes ahora como no se ha observado desde el máximo del Holoceno, y estamos a menos de 1°C de las temperaturas máximas observadas desde hace un millón de años. Ello implica que un calentamiento global superior al actual de ≈1°C debería considerarse un cambio climático crítico, cuyo punto de no-retorno podría desencadenar la extinción masiva de especies.

Desde una perspectiva regional este aspecto es extremadamente serio para Centroamérica pues, durante el último siglo, se ha observado un calentamiento del Pacífico ecuatorial occidental superior al observado en su región oriental. Este aumento en el gradiente térmico de occidente a oriente induce una mayor frecuencia y severidad de fenómenos de El Niño, como el que se muestra en la Fig. 9. Ello conlleva una influencia climática determinante para los pueblos de la región.

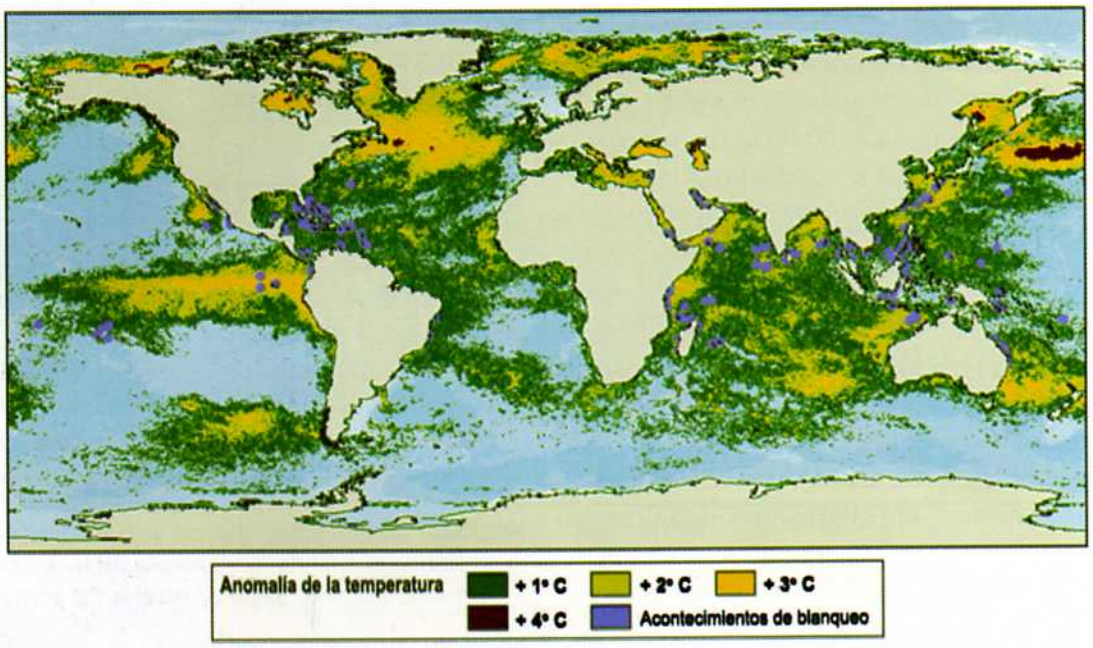


FIGURA 9. Una medida directa de los efectos adversos del aumento de la temperatura de los océanos sobre los arrecifes de coral (denominados: coral stress) son los fenómenos de "blanqueo"[∇] y de la mortalidad del coral que actualmente se han detectado y que abarca grandes extensiones del océano. Un aumento de 1-2°C en la temperatura promedio del agua durante los meses más cálidos es suficiente para causar el fenómeno de blanqueo. El mapa muestra las temperaturas superficiales oceánicas así como aquellas regiones en las que se presentaron situaciones de blanqueo de coral durante el verano boreal de 1998, cuando ocurrió uno de los fenómenos de El Niño más intensos del siglo pasado. Los fenómenos tanto de aguas más cálidas como de blanqueo de coral se espera que se presenten con mayor frecuencia, y en grandes extensiones, en un futuro cercano. Algunas regiones muestran ya un deterioro que alcanza la muerte del 95% de coral, aún para aquellos arrecifes milenarios de grandes masas de carbonatos [19,20].

Los procesos desencadenados por un aumento de CO_2 en la atmósfera son diversos e igualmente adversos. Ante un aumento en el CO_2 en el aire, los océanos absorben consecuentemente una mayor fracción de éste. Actualmente absorben del orden de 2Gt de carbono al año, casi el doble del que se absorbe en los continentes por fotosíntesis, representando el ≈33-50% del carbono emitido antropogénicamente. Esa absorción de carbono por los océanos —en forma de CO_2— se transforma en ácido carbónico. Entonces como resultado del aumento de CO_2 atmosférico, se ha observado una mayor tasa de absorción durante las últimas décadas, e inducido una acidez notable en los océanos, con un pH promedio que pasó de 8.16 (1800s) a menos de 8.05, actualmente[♣]. El pH podría alcanzar valores de 7.9 para fines del Siglo XXI. Y a

---

[∇] El blanqueo de arrecifes ocurre cuando las colonias de pólipos expulsan a las microalgas (Zooxanthellae) con las que mantienen una vida simbiótica. El resultado se observa como colonias coralinas de colores más claros. La expulsión de las microalgas reduce la disponibilidad de nutrientes para los pólipos, su capacidad de generación de aragonita y su reproducción. La expulsión podría deberse a que las altas temperaturas inhiben los procesos fotosintéticos de las microalgas, de ahí que no aporten a la vida simbiótica. El blanqueado podría entonces ser un mecanismo para establecer un nuevo lazo simbiótico con otro tipo de alga que tenga una mayor resistencia a las altas temperaturas.

[♣] Debe recordarse que éste es un cambio verdaderamente significativo, pues las escalas para determinación de alcalinidad-acidez tienen una base logarítmica. En las épocas pasadas, la absorción de CO_2 por los océanos se contrarrestaba cuando las corrientes marinas exponían las aguas superficiales más ácidas a sedimentos carbonatados capaces de reducir la acidez de los mares. Las tasas actuales de acidificación de los océanos son 100 veces superiores a aquellas medidas —mediante uso de isótopos en sedimentos antiguos— en los últimos cientos de milenios. Cabe recordar también la inmensidad de los océanos: $\approx 10^{18}$ toneladas de agua.

medida que la concentración de CO_2 atmosférico aumenta, el pH oceánico se abate, porque los procesos naturales ya no tienen la capacidad para reducir esa acidez. Aún más, la química marina predice que los mares reducirán su capacidad para absorber más CO_2 a medida que decrece su pH.

También es relevante considerar un segundo efecto que la absorción de CO_2 tiene sobre las características básicas oceánicas. Como resultado de mares más ácidos, las poblaciones de organismos pequeños —pico- y microplancton— en los océanos están bajo un cambio del ecosistema que va más allá de aumentos en la temperatura que se muestra en la Fig. 9. En particular, la modelación del océano-atmósfera, con excesos de CO_2, predice una mayor estratificación de las capas de agua superficiales, así como una mayor estabilidad y una concurrente menor mezcla. Si ello ocurriera, las poblaciones de microplancton decrecerán mientras que las de picoplancton aumentarán [21], en particular en las latitudes medianas del Pacífico norte. Esto es, grandes extensiones oceánicas enfrentan un cambio de flora significativo, la cual es la base de la cadena de alimentación; asimismo, como se muestra en la Fig. 10, los procesos de captura de CO_2 por la biota marina y los procesos de mineralización se alterarán.

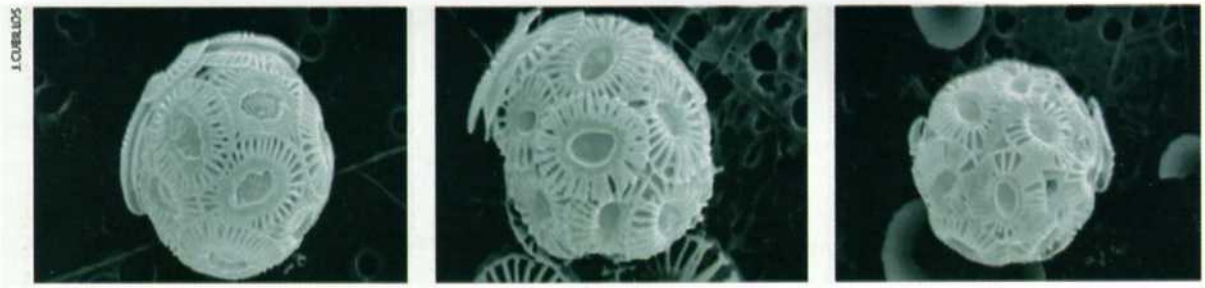


FIGURA 10. Los mares ácidos (fotos central y derecha) reducen la estructura externa de coccolithophoros, fitoplancton unicelular de las aguas superficiales que son parte importante de la base de las cadenas alimenticias oceánicas. Este fitoplancton expuesto a tres veces las concentraciones de CO_2 atmosférico actual reducen su estructura externa a la mitad. La estructura externa –esqueleto– está formada de escamas de carbonatos (calcita: $CaCO_3$), siendo los principales productores de calcita natural: producen 1.5 millones de toneladas al año. Por cada tonelada de coccolitos (escamas) se retiran —secuestran— 145 kg de carbono del aire [22].

El exceso de CO_2 disuelto en el agua aumenta la concentración de iones hidrógeno; i.e., un decremento del pH. Si se toma en cuenta el cambio en la acidez, muchísimas especies marinas, experimentarán condiciones nunca vistas por sus ancestros. La formación de sus esqueletos —basados éstos en el carbonato de calcio disuelto en los mares— será cada vez más difícil, pues la acidez del océano los corroe [22]. Más aún, el exceso de iones hidrogeno reacciona con los iones de carbonato en solución, reduciendo la saturación de carbonato de calcio (respecto de aragonita) en los océanos. Se calcula que tal saturación pasará de 3.34 —observada en el periodo pre-industrial— a cerca de 1.9 para el 2500. La baja de carbonatos en solución –saturación– reducirán a su vez las tasas de calcificación de animales submarinos hasta en un 60% durante este siglo [23].

En particular, el futuro de los corales está en entredicho. Por un lado, los corales han sobrevivido por más de 200 millones de años, habiendo ocurrido durante este tiempo periodos breves en los cuales las concentraciones de CO_2 de la atmósfera fueron muy elevadas. Ello podría indicar la existencia de procesos de adaptabilidad —mediante cambios en la fisiología animal— semejantes al que recientemente se ha estudiado para corales *scleractinians* [20,24]. Éstos han demostrado la capacidad para sobrevivir y prosperar en aguas ácidas ¡pero habiendo perdido su esqueleto duro!. De hecho, los corales podrían sobrevivir en los mares ácidos del futuro como organismos semejantes a anémonas [24,25]. Ello conllevaría a que las principales selvas marinas de los océanos tropicales están a punto se sufrir alteraciones perdurables y

sustanciales. Los fenómenos de blanqueo y muerte de corales son hoy una seria amenaza para las regiones tropicales.

Por otro lado, el blanqueo de arrecifes se atribuye también al desarrollo urbano de zonas costeras, a una recarga de sedimentos pluviales excesiva, a la contaminación marina y la sobreexplotación pesquera. Si se integran todos estos factores en un índice de riesgo para los arrecifes coralinos, entonces hoy existen amplias zonas de la región del Caribe y Latinoamérica seriamente amenazadas por el cambio climático y el impacto de la actividad humana (Fig. 11).

FIGURA 11. El Caribe y Golfo de México muestran un grave deterioro de sus arrecifes coralinos debido a los fenómenos de blanqueo y muerte. En particular, el nivel de riesgo para la mayor parte de éstos en la región oriental se considera como *muy alto*.

Pero ¿qué pasará si las magníficas mega-estructuras de carbonato de calcio de los arrecifes —Fig. 12— desaparecen? Acaso la deforestación submarina es menos dañina que la que ocurre es nuestras selvas. Finalmente, ¿cuántos de los organismos podrán adaptarse al cambio de acidez en forma comparable a los corales scleractinianos[24] ? Lo que se sabe es que muchos animales marinos —erizos, caracoles, etc.— no tienen la capacidad para sobrevivir en aguas con concentraciones de CO_2 gaseoso de 550 ppm por periodos prolongados. En particular, los animales que habitan los lechos marinos tienen una pobre tolerancia a la acidez: un cambio de pH de 0.1 reduce sustancialmente sus poblaciones.

¿Y el futuro? La modelación de la acidez de los océanos indica que sin tomar medidas ahora y permitir el mismo escenario de quema de combustibles hasta el 2100 conlleva a que el pH de las aguas superficiales ¡continuará decreciendo hasta el año 2700!. Y a profundidades de 1,000 metros la acidez continuará incrementándose más allá de principios del próximo milenio. El efecto neto es que ¡los océanos sufrirán cambios por milenia [23]!

El dilema actual se resume así: A partir de 1750, se estima que 2/3 de las emisiones de CO_2 antropogénico se deben a la quema de combustibles fósiles, y el resto por cambios del uso del suelo. Aproximadamente, el 45% de ese CO_2 en exceso permanece todavía en la atmósfera, mientras que una tercera parte ha sido absorbida por los mares; el resto por la biosfera terrestre. Y dado un impulso de CO_2 emitido –expresado como una delta de Dirac, al tiempo t=0–, 30

años después permanece todavía el 50%, con 20% removido en los siguientes siglos. El restante 20% permanece en la atmósfera por varios milenios. El forzamiento del pH oceánico permanecerá en la tierra posiblemente más allá de lo que jamás imaginamos.

La creatividad y análisis del hombre es aún muy limitada para visualizar los mecanismos e interacciones relevantes en los océanos o en las regiones árticas, o para comprender la complejidad de los cambios que como resultado del cambio climático ocurren ya, o de aquellos que están por manifestarse. Y sin embargo, con certeza hoy el progreso de la civilización avanza inexorablemente a un final dantesco.

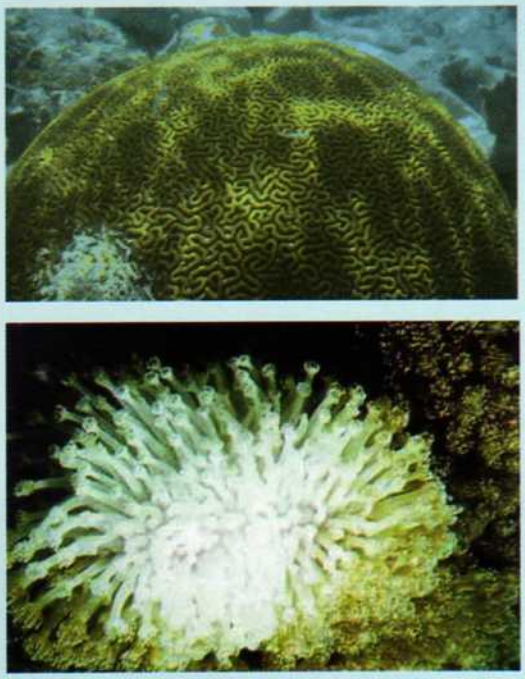


FIGURA 12. Las colonias de pólipos –scleractinians; llamados corales cerebro o corales piedra– aparecieron en el Triásico (hace 240-290 Ma) y son los principales creadores de masa de carbonatos de los arrecifes coralinos tropicales. Éstos evolucionaron de anémonas blandas y hoy existen variedades que habitan mares tropicales, templados y hasta polares, y pueden encontrarse hasta profundidades de 6,000 metros. Los escleractinians tienen un esqueleto de carbonato de calcio (estructura de aragonita). El fenómeno de blanqueo se observa en esta colonia (foto abajo), con una porción todavía saludable por debajo de ella [20,23].

LO QUE SÍ SABEMOS... (90% DE CONFIANZA)

El ecosistema global es extremadamente complejo, pues involucra factores aún poco estudiados de gran magnitud y cuya dinámica involucra desde tiempos relativamente cortos hasta tiempos largos, tanto hacia el futuro como al pasado, tal es el caso del carbono secuestrado en la tundra, o la capacidad enorme pero igualmente finita de los océanos para absorber los *GEI*s. Lo que sí es factible afirmar, y ésta es la conclusión del IPCC-WG1, es que el calentamiento se debe a actividad humana, especialmente a la quema de combustibles fósiles. Y por qué esta afirmación se hace hasta ahora. Veamos.

EL BALANCE TÉRMICO GLOBAL: POR QUÉ NOS ESTAMOS CALENTANDO

La conclusión alcanzada por el WG1 en febrero pasado se resume rápidamente en la Fig. 13. Ahí es factible observar que el clima del ecosistema de la tierra tiene un delicado balance —que de hecho ha variado con las diversas épocas geológicas. En particular, hoy se conoce que en dicho balance térmico se tienen que considerar las variaciones de la concentración de los gases con efecto invernadero[&], así como las variaciones en la nubosidad —y de los factores que sobre ella influyen—, los cambios del albedo continentales —debido al cambio del uso de suelo de grandes extensiones o por una disminución de las regiones de hielo y nieve—, y muchos otros de los cuales aún no se tiene un conocimiento preciso para inferir sus efectos en el balance térmico. Por ejemplo, si bien se han considerado los cambios en el albedo por la nubosidad, los efectos sobre el albedo que tienen los cambios en la biota de los océanos, son algunas de las interrogantes por resolver. Más algo está claro:

[&] Para cada gas, la intensidad del efecto invernadero es diferente —pues son moléculas diferentes— y del tiempo de residencia (o de vida) de éstos en la atmósfera también es diferente.

los efectos principales son suficientemente significativos en su magnitud como para considerar a éstos como los efectos principales. Y que no quede duda: el *Cambio Climático* es consecuencia de la actividad humana, y en particular de un "progreso" basado en la quema de combustibles fósiles.

De la Figura 13, hay que resaltar algunos puntos. El efecto invernadero se debe a la opacidad de las atmósferas con altas concentraciones de *GEI*s; esto es, es equivalente a suponer

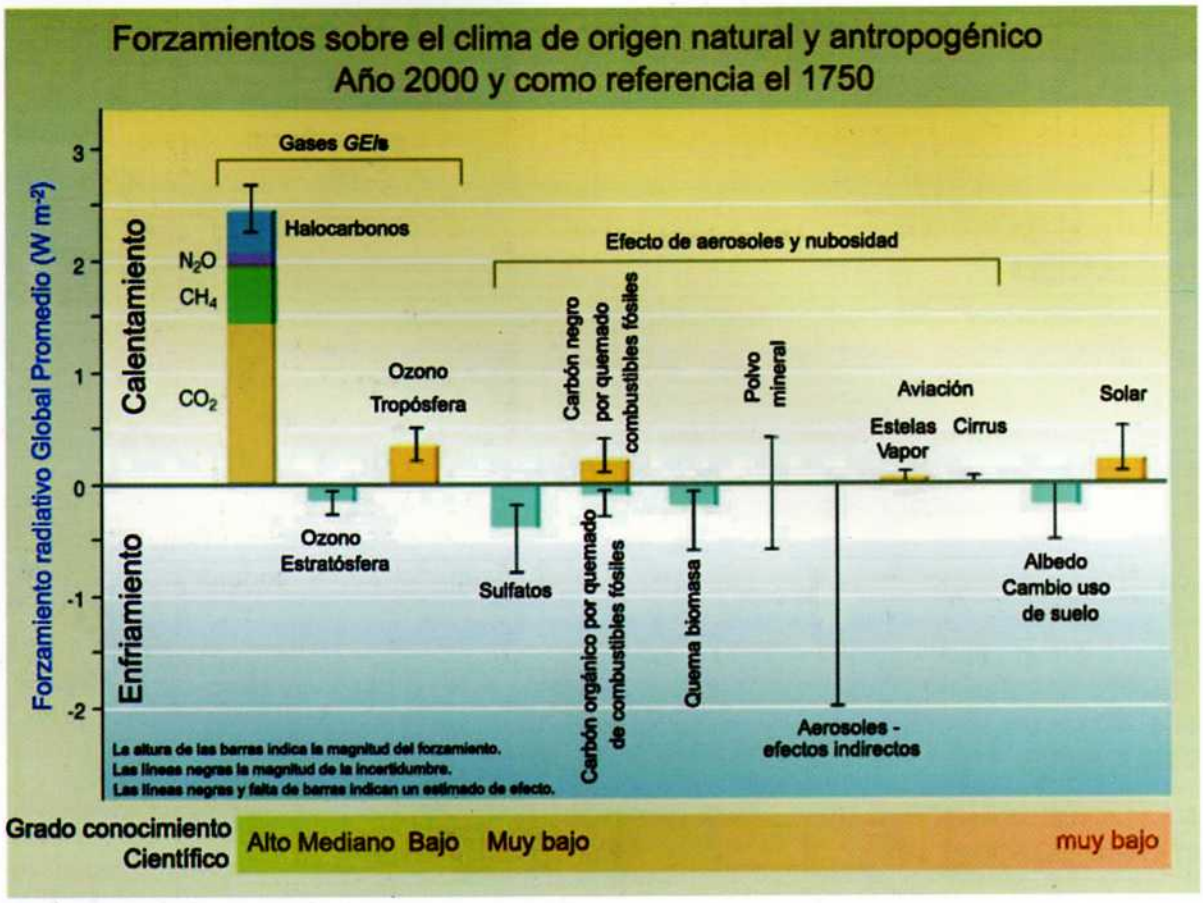


FIGURA 13. La diferencia en el balance del forzamiento antropogénico relativo al existente en el 1750 (tiempos pre-industriales). La regla inferior muestra el nivel de confianza científica que se tiene en cuanto al establecimiento de la intensidad del fenómeno y de las relaciones causa-efecto.

que la porción de la energía solar re-emitida al exterior ya no escapa con la misma facilidad que antes: se recibe la misma cantidad del Sol, pero escapa menos. Y así, esta variación se debe considerar como una fuente extra a la energía recibida del Sol. De ahí que la intensidad de los fenómenos dominantes en el balance térmico global se establece con unidades de Wm^{-2}. Considerando un estado –época– de "equilibrio" para el balance térmico global (digamos pre-industrial), entonces esta Figura muestra aquellos forzamientos que, como resultado de la actividad humana, han variado de intensidad a partir de 1750.

Ahora, ¿son los niveles que se muestran en la Figura 13 significativos? Tan sólo la irradiancia solar para gran parte del territorio Nacional —y a nivel del suelo— es del orden de los 1000 Wm^{-2}, con una irradiancia global aproximada de $1.74\square10^{17}$ Watts. La energía térmica que no escapa por los *GEI*s equivale, al menos, a una disipación del orden de $640\square10^{12}$ W, ¡operando día y noche!, pero que apenas representa el 0.368% de la irradiancia global. En contraste, la capacidad total de generación del "progreso humano" es del orden de $15\text{-}20\square10^{12}$ W

(equivalentes a 500 EJ anuales de energía). Es sorprendente que por aprovechar —esto es, por mantener 20 TW operando para soportar el progreso de la humanidad— ejercemos indirectamente un calentamiento treinta veces mayor ♠.

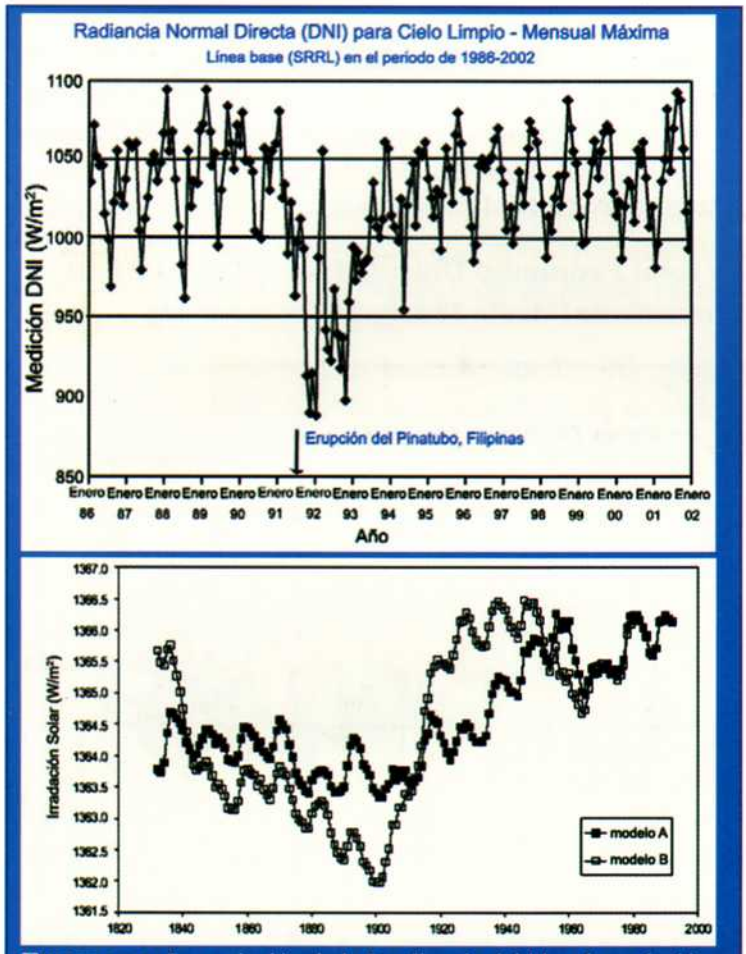


FIGURA 14. La variación de la Irradiancia debida a la variación en la presencia de partículas y aerosoles de sulfatos; e.g., en la estratosfera después de la erupción del Pinatubo, Filipinas, medida ésta en Colorado, USA (arriba); El efecto de inyección de aerosoles por El Chichón, en Chiapas, fue igualmente significativo, aunque éste hizo erupción en 1982. La variabilidad de la insolación solar a partir de 1820, y determinada a partir de las superficies de las manchas solares —manchas oscuras— y faculae —regiones brillantes, de mayor radiación— (abajo).

De igual manera, se han descartado las consecuencias de otros posibles efectos observados, tales como el aumento en la radiación solar —incrementos menores a 0.1 W/m^2 a partir de 1750—, cambios de albedo, efecto de más aerosoles de origen volcánico, etc., que si bien han ocurrido y son significativos, se consideran menos perdurables y por tanto menos probables como causantes del cambio climático.

OTROS EFECTOS QUE MODIFICAN EL BALANCE ENERGÉTICO GLOBAL

Las Figura 14 muestra dos efectos naturales que son difíciles de discriminar en los modelos del clima. El primero es la variabilidad de la radiación solar. Existen diversos modelos para determinar la actividad del Sol, pero en general sólo se tiene un grado de confianza razonable. Por ejemplo, un modelo que no sólo toma en cuenta la frecuencia de manchas solares —como un indicador de la intensidad de actividad solar—, sino que también considera la superficie total de las manchas solares muestra que a principios de Siglo XX se dio una menor luminosidad del Sol, situación opuesta hacia el final del mismo Siglo. Estos efectos enmascaran las consecuencias de un exceso de CO_2 en la atmósfera.

La insolación del Sol, durante los últimos 28 años, muestra que los ciclos de 11 años han fluctuado 0.08% entre el mínimo y máximo. El forzamiento radiativo solar a partir de 1750 es de +0.12 [+0.06 hasta +0.3] Wm^{-2}. Esto es, las fluctuaciones son 10 veces mayores

♠ El equivalente radiativo de la presencia de *GEI*s antropogénicos se ha calculado del orden de 0.6-2.4 W/m^2 durante el periodo post-industrial, calentamiento que supera con creces el cambio de albedo por la presencia de una mayor cantidad de aerosoles antropogénicos. Por el aumento de CO_2 el forzamiento radiativo es de $+1.66 \pm 0.17$ W m^{-2}. El quemado de combustibles fósiles equivale a una potencia instalada de 16-20 TW. Los datos para que se han usado para evaluar los cambios en la temperatura son parte del Reporte del National Research Council (Ref. 26).

que el forzamiento; i.e., la contribución solar al clima en el largo plazo no se conoce suficientemente, pues se desconocen los mecanismos que contribuyen a su variabilidad. Asimismo, la magnitud en las variaciones observadas en la intensidad de la radiación solar muestra claramente la complejidad del problema. En resumen, es indispensable un esfuerzo sostenido para comprender en forma más precisa un sinnúmero de efectos físicos de están modificando drásticamente el clima del planeta.

El segundo efecto que se observa en mediciones de la irradiación solar es consecuencia de las grandes erupciones volcánicas, en particular de aquellas que tuvieron lugar con una liberación de energía enorme, inyectando grandes cantidades de materia a altitudes superiores

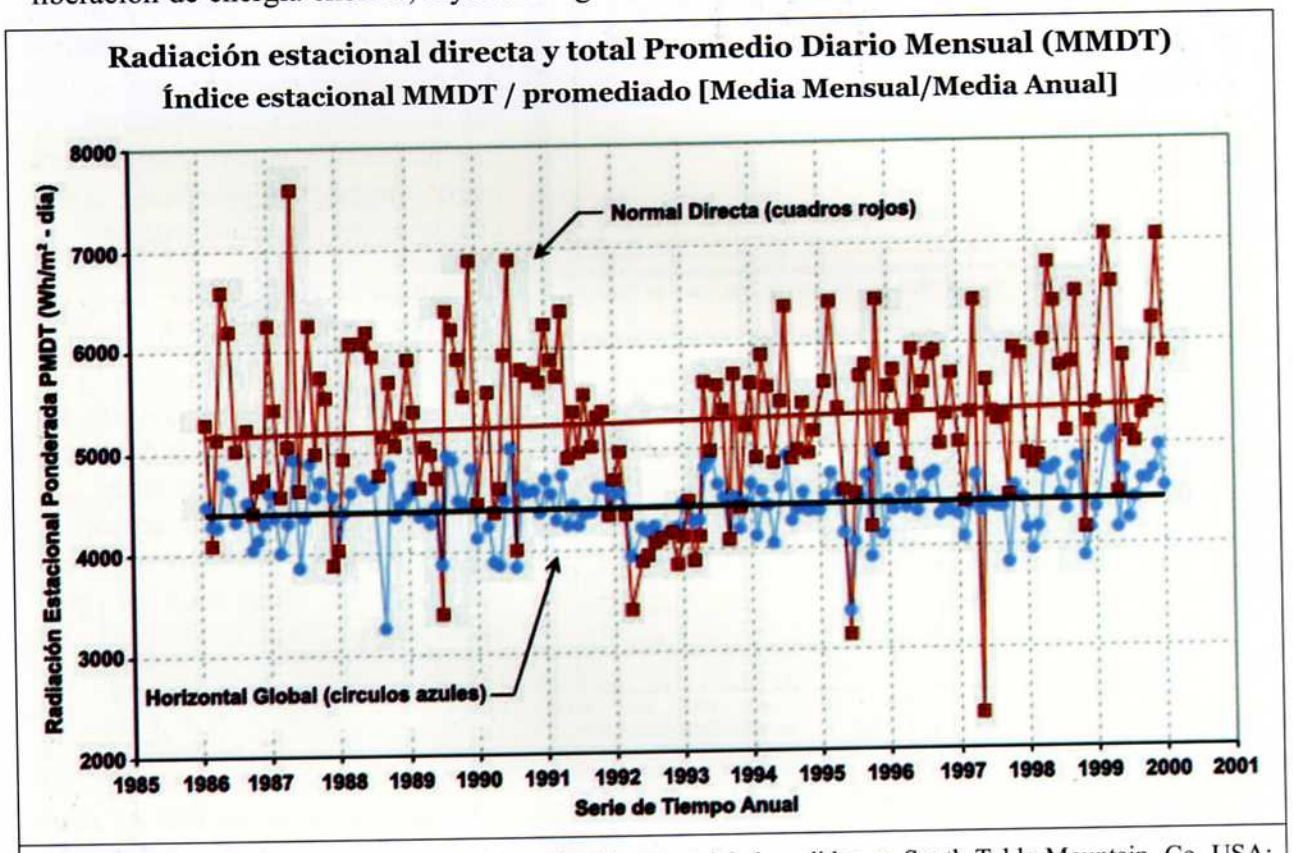


FIGURA 15. La variabilidad de la radiación solar directa y global medidas en South Table Mountain, Co, USA: Estación del Solar Radiation Research Laboratory (SRRL). El efecto Pinatubo pudo observarse en el hemisferio norte durante parte del 1991, el 1992 y gran parte del 1993. El velo de polvo volcánico redujo la radiación directa hasta en 20%. Claramente la presencia de partículas a grandes altitudes afecta adversamente más la irradiación directa que a la global. Las líneas rectas muestran el promedio de irradiación, así como una variación creciente durante el periodo de 1986-2000; el incremento se da con pendientes para la radiación directa de 4.7 y de 2.1% para la radiación global. Estas tendencias podrían indicar efectos invernadero de carácter regional-local.

a los 15 km. Las Figuras 14 y 15 muestran los efectos en Norteamérica por las partículas y los aerosoles del Pinatubo, meses después su erupción en Junio del 1991. Durante esta clase de eventos, la presencia de partículas volcánicas en la atmósfera aumenta el albedo terrestre, y como resultado la radiación directa normal medida en tierra decrece. El gráfico de abajo en la Figura 14 muestra el efecto que la erupción del Volcán Pinatubo de Filipinas tuvo sobre el hemisferio norte. Las columnas de cenizas alcanzaron los 24 km de altura y se introdujeron 20 millones de toneladas de SO_2 a la atmósfera con 10^{10} toneladas de magma. Estas partículas ocasionaron una reducción de la temperatura global promedio de 0.5°C que duró por varios años. La presencia de partículas en la atmósfera redujo en casi un 15% la radiación directa

normal medida en el suroeste de los EEUU, como se muestra en la Fig.15, y puede afirmarse que tal evento afectó el clima del hemisferio norte al menos por dos años. Si bien no es fácil extrapolar esta información a otras regiones del globo, con información de otras regiones del mundo es factible evaluar el efecto que un evento de esta magnitud tiene sobre el clima global.

La Figura 15 nuestra también el efecto que el Pinatubo ocasionó principalmente en las mediciones de la radiación directa total diaria, que persiste también para la radiación global total. La consecuencia inmediata es que la flora y fauna están sujetas a forzamientos no despreciables. En ese mismo gráfico se observa una ligera tendencia de la radiación solar a aumentar durante esos años, que es aplicable probablemente a una amplia región del suroeste americano. Ello podría indicar que el calentamiento global está alterando —reduciendo— ya la cubierta de nubes de la región, con un efecto secundario que muestra un incremento de la insolación superficial directa.

En suma, el balance radiativo total antropogénico, a partir de 1750, es de +1.6 [de +0.6 a +2.4] Wm^{-2}. Este valor es aproximadamente un orden de magnitud mayor que el forzamiento radiativo del Sol, con una contribución por *GEI*s del orden de $+2.63 \pm 0.26$ Wm^{-2}.

EL BALANCE TÉRMICO GLOBAL: ¿QUÉ CALENTAMIENTO NOS RESERVA EL FUTURO?

A partir de 1850, el calentamiento *global* excede ya 0.5°C, y crecerá a una tasa de al menos 0.1°C para las próximas dos décadas, sin que para ello se requiera grandes variaciones en los forzamientos debidos a eventos volcánicos o a la insolación; ver la Figura 16. Lo verdaderamente apremiante es que se prevé una tasa de calentamiento decadal cercana al doble si las emisiones de CO_2 ocurren bajo las condiciones previstas en los diversos escenarios climáticos modelados (SRES) y descritos a continuación. Esto es, debemos partir de la hipótesis que el calentamiento global durante este Siglo se medirá en enteros. Y que no quede duda: Estos modelos se han validado previamente, comparando las predicciones con las bases de datos existentes para las temperaturas terrestres de las últimas décadas [26].

La Figura 16 muestra cómo las tasas de aumento de la temperatura han subido para las décadas más recientes. Por ejemplo, la tasa es de 0.045 ± 0.012°C para el siglo pasado, pero a partir de 1975 la tasa medida es casi cuatro veces mayor. Esto es, la temperatura aumenta ahora notablemente más rápido que a mediados del siglo pasado. Entonces, ¿qué debemos esperar para los próximos decenios?. Lo más preocupante es que las primeras evaluaciones del cambio de la temperatura global muestran una tasa notablemente más alta que la prevista. Estos cambios son muy serios pues indican una inyección sustancial de *GEI*s (aún no cuantificada) o la existencia de forzamientos físicos *acoplados*, cuya *dinámica no-lineal* hace extremadamente difícil predecir sus efectos. Ello implica que las predicciones del aumento de la temperatura global para este Siglo, y presentados por el IPCC hasta ahora, podrían resultar conservadores.

Otro punto igualmente relevante es nuestra "inversión en *GEI*s" —muy redituable por cierto, pues ocurre con tasas cada vez más altas, sin que la inversión se devalúe en décadas— y sus consecuencias en los aumentos de temperatura global. Esto es, para propósitos de las predicciones en el clima de los próximos 20 años, el *cambio de clima ya comprometido* es el debido a la presencia de *GEI*s actual[‡]. De acuerdo a los resultados de las simulaciones, este

---

[‡] El *cambio de clima ya comprometido* se refiere a las condiciones atmosféricas consecuencia inmediata de la presencia de *GEI*s acumulada hasta el día de hoy y que serán las dominantes para las próximas dos décadas —superiores a los 381 ppm de GEIs—. El IPCC estableció este escenario [1-4] como el escenario base para la modelación del sistema atmósfera-océano, y se denomina en sus documentos el *Committed climate change*.

escenario es inevitable, y representa el escenario más bondadoso para un futuro cercano. A pesar de ello, si se considera un escenario en el que se *mantiene fija la generación de GEIs a las tasas actuales*, entonces puede esperarse que la concentración atmosférica de CO_2 en el 2100 será del orden de 520 ppm.

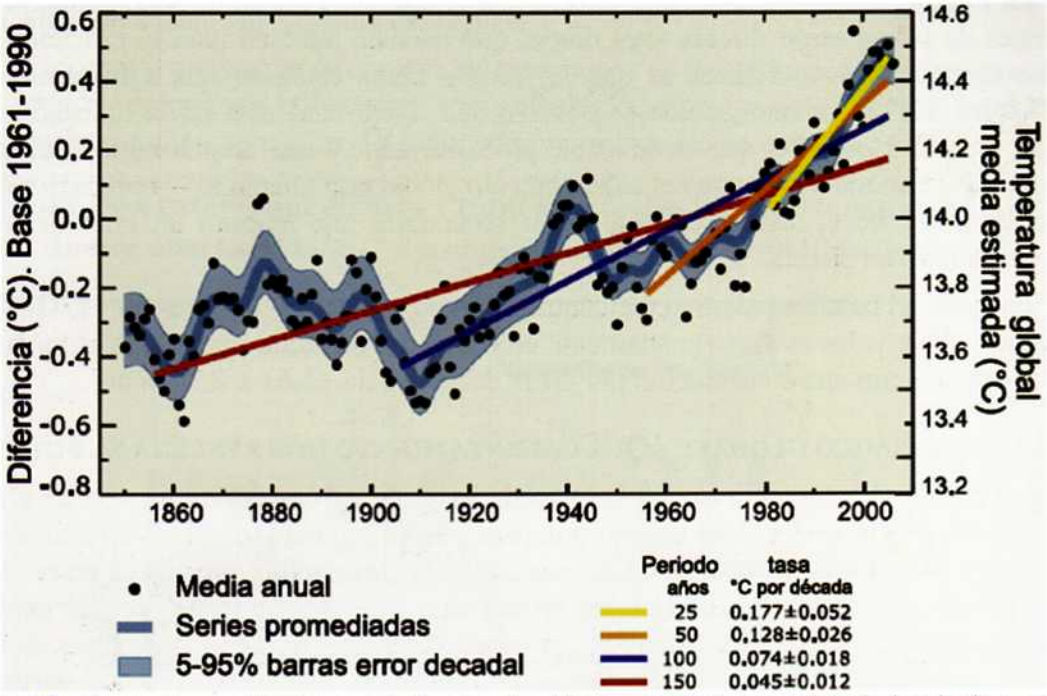


FIGURA 16. Temperaturas globales promedio por año (Puntos negros). La ordenada izquierda muestra las anomalías de las temperaturas relativas al periodo 1961-1990. La ordenada derecha muestra la estimación para la temperatura global promedio actual. Los ajustes lineales para 25 (amarillo), 50 (naranja), 100 (magenta) y 150 años (rojo) respecto del presente. La línea delgada azul, corresponde a las temperaturas promedio decadal, con la franja azul claro correspondiente a las incertidumbres decadal, con un 90% de confianza. El cambio de temperatura entre el periodo 1850-1899 al 2001- 2005 ha sido de 0.76°C ± 0.19°C.

Las simulaciones del clima para este Siglo, sin embargo muestran una ligera dependencia con respecto a las condiciones ambientales que prevalecerán especialmente hacia el final de este periodo. Tales simulaciones consideran los escenarios B1, A1B, y A2 (denominados SRES) que, partiendo de las condiciones hoy presentes —i.e., CO_2 en una concentración de 381 ppm—, alcanzan 600, 850 y 1,250 ppm, respectivamente —para finales del 2100[£]. Entonces, una comparación entre el cambio de clima ya comprometido y el escenario B1 difícilmente mostrará grandes diferencias, especialmente para los próximos años. Aún para el año 2050, los diferentes modelos muestran poca sensibilidad a la selección del escenario SRES (alcanzando incrementos en la temperatura de 1.3 a 1.7°C, respecto de 1980–1999; ver la Fig. 17).

[£] Ninguno de los SRES –escenarios a futuro– considera la aplicación de iniciativas de mitigación de las emisiones. Una cuarta parte del calentamiento será consecuencia directa del forzamiento radiativo por el *cambio climático ya comprometido* y suponiendo que los demás agentes radiativos permanecen estacionarios a las tasas actuales.

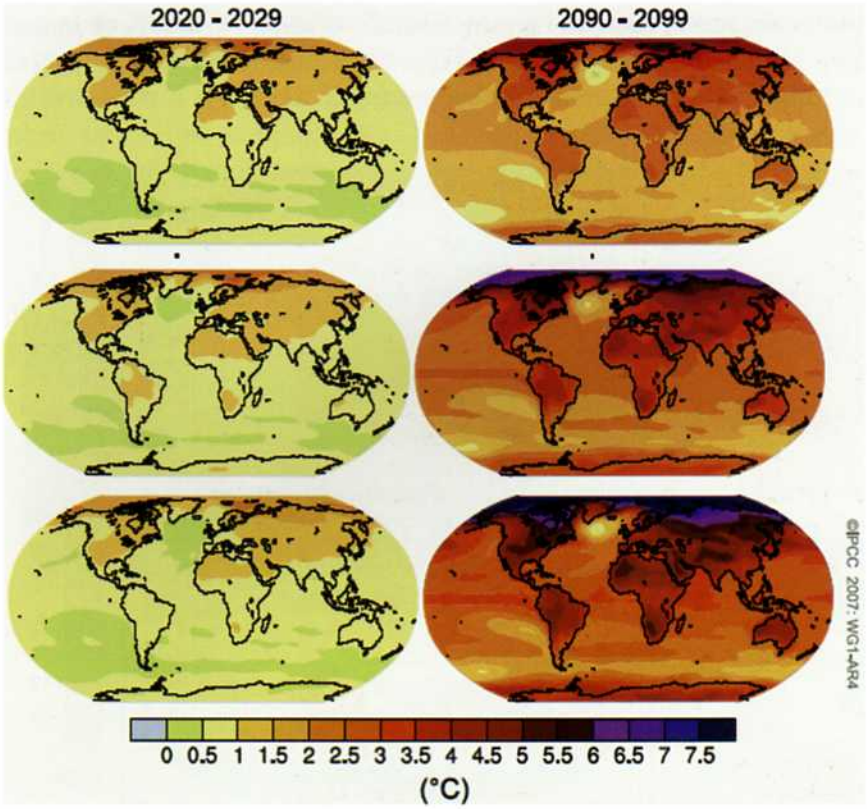


FIGURA 17. Escenarios a futuro del forzamiento radiativo (SRES) al año 2100

B1 Superior	600 ppm
A1B Intermedio	850
A2 Inferior	1,250

Cambios de las temperaturas superficiales estimadas, relativas al periodo de 1980-90, para tres diferentes escenarios: B1 (mapas renglón superior); A1B (mapas renglón intermedio), y el Escenario A2 (mapas renglón inferior). Las predicciones son para las temperaturas promedios (decadal) del 2020-29 y 2090-99. La resolución de los mapas es de 20-25,000 km^2 por punto de malla.

Si se hace un esfuerzo sustancial en la captura de *GEI*s, entonces, el escenario B1 será nuestro mejor resultado posible. Aún así, debemos esperar para fines del presente Siglo que el calentamiento global alcance entre 2.4 y 6.4°C (escenario de poco abatimiento de *GEI*s). En un escenario bajo en emisiones de *GEI*s, es posible predecir —con un alto nivel de confianza— un calentamiento global para el 2100 entre 1.1-2.9°C. Este escenario es poco probable sin la implementación de políticas públicas para el abatimiento de consumo de combustibles fósiles y concertadas entre todos los países, particularmente con la participación de los EEUU y China.

En general, el calentamiento será más acentuado en el hemisferio norte, con probabilidades del 90% de incremento en la frecuencia de ondas de calor. Es con este escenario que se debe trabajar ahora para mitigar el efecto del cambio climático.

EL BALANCE HIDROLÓGICO GLOBAL

Para las sociedades, los cambios en el recurso hidráulico son posiblemente aquellos que conllevan los peores riegos y las consecuencias más indeseables, de ahí la importancia de conocer el impacto del cambio de clima que tiene sobre éste. En particular, la Fig. 18 muestra la excelente concordancia que existe entre los diversos modelos utilizados para las predicciones de la precipitación de las regiones en las altas latitudes. Tales pronósticos predicen —con un alto grado de confianza— aumentos en las precipitaciones, mientras que precipitaciones más raquíticas tienen una alta probabilidad para las regiones subtropicales (serias reducciones del orden del 20%, para el escenario A1B, en el año 2100). Las precipitaciones arriba del paralelo 50° aumentan como resultado de una mayor cantidad de vapor de agua en la atmósfera, que es transferido de las latitudes menores.

En las latitudes entre 20-40° se observa una reducción de las precipitaciones; la tendencia a la aridez, será especialmente pronunciada para las latitudes altas de la región tropical. Asimismo, las predicciones disponibles muestran una tendencia para lluvias copiosas

por día para un número grande de regiones, aún para algunas localizadas en las zonas en la que se ha calculado un decremento neto de la precipitación. Para estos últimos casos, si bien el balance es negativo, ello se debe a una reducción en el número de días con lluvia, y no a lluvias menos intensas.

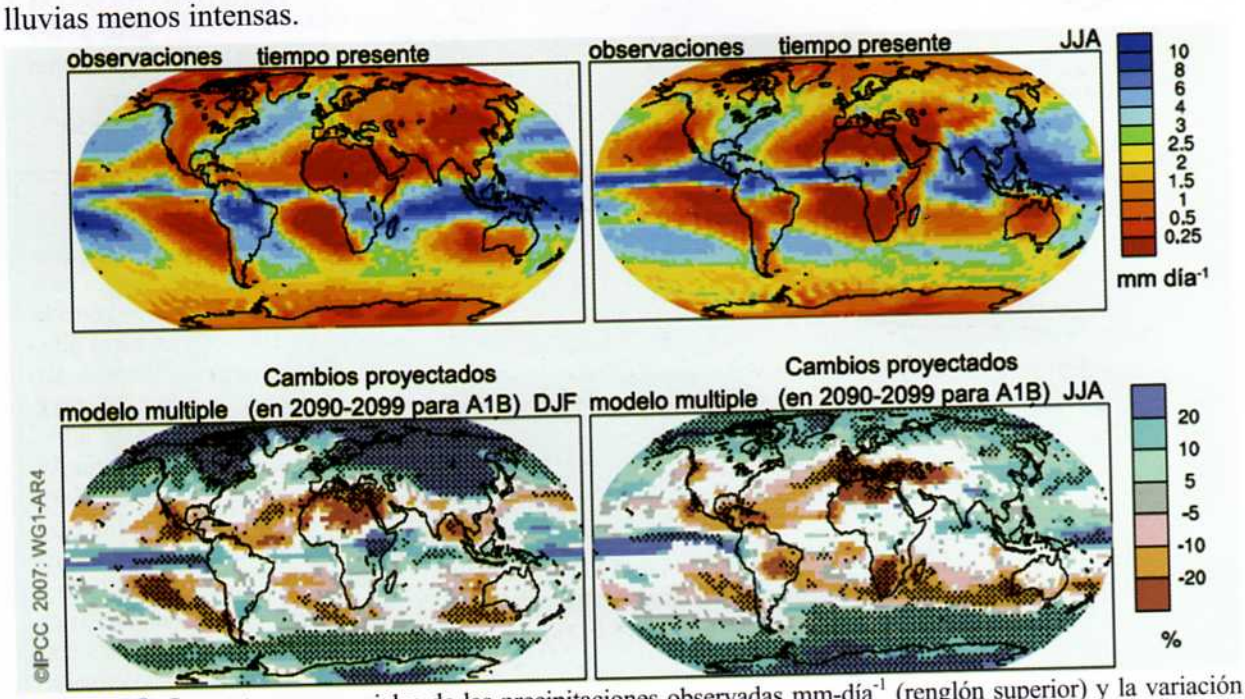


FIGURA 18. Los patrones espaciales de las precipitaciones observadas mm-día^{-1} (renglón superior) y la variación porcentual con base en la precipitación calculada para el periodo del 2090-2099 mediante varios modelos, relativa ésta respecto del periodo de 1980 a 1999 (gráficos, renglón inferior). Para las simulaciones de precipitación, el escenario de CO_2 en la atmósfera corresponde al B1A. La columna derecha corresponde a las precipitaciones desde diciembre a febrero (DJF) y la izquierda a las de junio a agosto (JJA). Las variaciones en la precipitación mostradas son aquéllas en las que los distintos modelos concuerdan. Las regiones con puntos negros, son aquéllas en las que el 90% de los modelos concuerdan en sus predicciones[1-4].

Aún así, existen actualmente un número significativo de fuentes de incertidumbre que limitan la capacidad de predicción del cambio hidrológico regional. Especialmente, para las zonas de transición entre las regiones subpolares y subtropicales, si bien las predicciones son robustas, éstas se caracterizan por una incertidumbre más grande de lo deseable en la determinación de la localización de las fronteras entre las regiones con aumentos o con decrementos de la precipitación. Igualmente existe una incertidumbre significativa en la determinación de las temperaturas oceánicas, pues se requieren mediciones sobre grandes extensiones y cada una con un perfil para diversas profundidades.

CÓMO AFECTA EL CAMBIO CLIMÁTICO A AMÉRICA LATINA

El calentamiento observado para América del Norte, a partir de los años 70s, sobrepasa ya 1°C. Asimismo, no son menos relevantes los cambios en la nubosidad por fenómenos como El Niño, que se presenta recurrentemente en el Pacífico ecuatorial. El efecto de eventos como el Niño y su contraparte La Niña (ENSO) son especialmente notables para América. El cambio del régimen de lluvias en toda América del Norte y la costa oriental de América del Sur resulta ser significativo y la información de las predicciones implica aún cambios más severos.

Los diferentes modelos indican que las temperaturas oceánicas superficiales, *SST*, de la región del Pacífico Ecuatorial Oriental serán más elevadas que para la región Occidental, con un correspondiente corrimiento de las precipitaciones hacia el este (Fig. 19, izquierda). Ello

conlleva efectos directos para la costa oriental de Colombia, Ecuador, Perú y Chile. Asimismo, el fenómeno de El Niño mantiene una alta variabilidad. Más aún, la variabilidad de los pronósticos entre los diversos modelos hace, por ahora, imposible confirmar una tendencia sobre su comportamiento. La Fig. 19 (derecha) muestra las oscilaciones de temperatura oceánicas observadas que dan origen al fenómeno de El Niño, con el diferencial térmico a lo ancho del Pacífico recrudeciéndose para los años de 1983 y 1998, cuyos valores máximos no se observaron durante ningún otro periodo del Siglo XX.

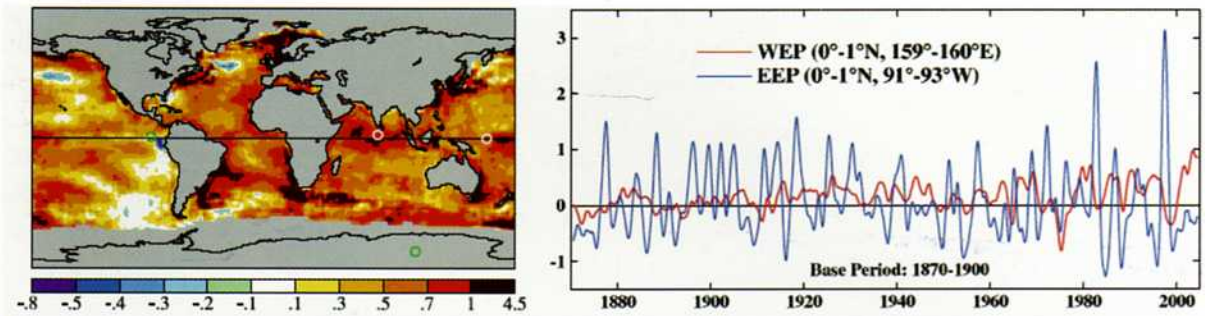


FIGURA 19. Los patrones espaciales para las temperaturas superficiales oceánicas (izquierda) y las variaciones en las temperaturas promedio (derecha) para la región oriental del Pacífico ecuatorial (Línea azul; EEP) y la occidental del Pacífico ecuatorial (línea roja, WEP). Las oscilaciones se han incrementado recientemente especialmente en el Pacífico Ecuatorial Oriental; años de 1983 y 1998. Los efectos sobre las surgencias en el océano, el transporte de humedad a baja altitud, los cambios en la velocidad de las corrientes de aire a baja altura, y el transporte a gran altitud, son algunos de los cambios que ocurren y ocurrirán en el Pacífico [27].

Las consecuencias en las precipitaciones pluviales serán igualmente severas para el norte de México, con reducciones del orden de 10-20% en gran parte del País. Aunque se espera un incremento del nivel del mar —efecto, ya predecible y observado, aunque todavía no cuantificado—, resulta aún difícil afirmarlo en forma categórica, como igualmente resulta difícil de inferir sus consecuencias. Sin embargo, tales consecuencias podrían ser muy severas para grandes extensiones de la Península de Yucatán y otras zonas costeras en el Golfo de México, desembocadura del Río Colorado, etc., especialmente porque el aumento del nivel del mar exacerba el efecto de surgencia que ocurre en la región central de un huracán.

POR QUÉ ES IMPORTANTE INCIAR LA MITIGACIÓN AHORA

Si las concentraciones de *GEI*s y aerosoles se mantuviesen a los niveles actuales después de un periodo de cambio, el clima global continuará evolucionando con base en las concentraciones previas, ello debido a la inercia térmica de océanos y masas de hielo cuyas escalas de tiempo son muy grandes para alcanzar el equilibrio. Esta respuesta tiene su origen en los tiempos característicos de todo sistema requeridos para alcanzar una condición estable después de haber sido perturbado de su estado base. Por ejemplo, la troposfera alcanza un estado –nuevo– estable después de varias semanas de que ocurre una perturbación. La capa superficial del océano, donde gran parte de la microbiota existe, responde en escalas de tiempo de varios años y hasta décadas, y las capas profundas de los océanos —así como las capas de hielo polares— en escalas de siglos y hasta milenia.

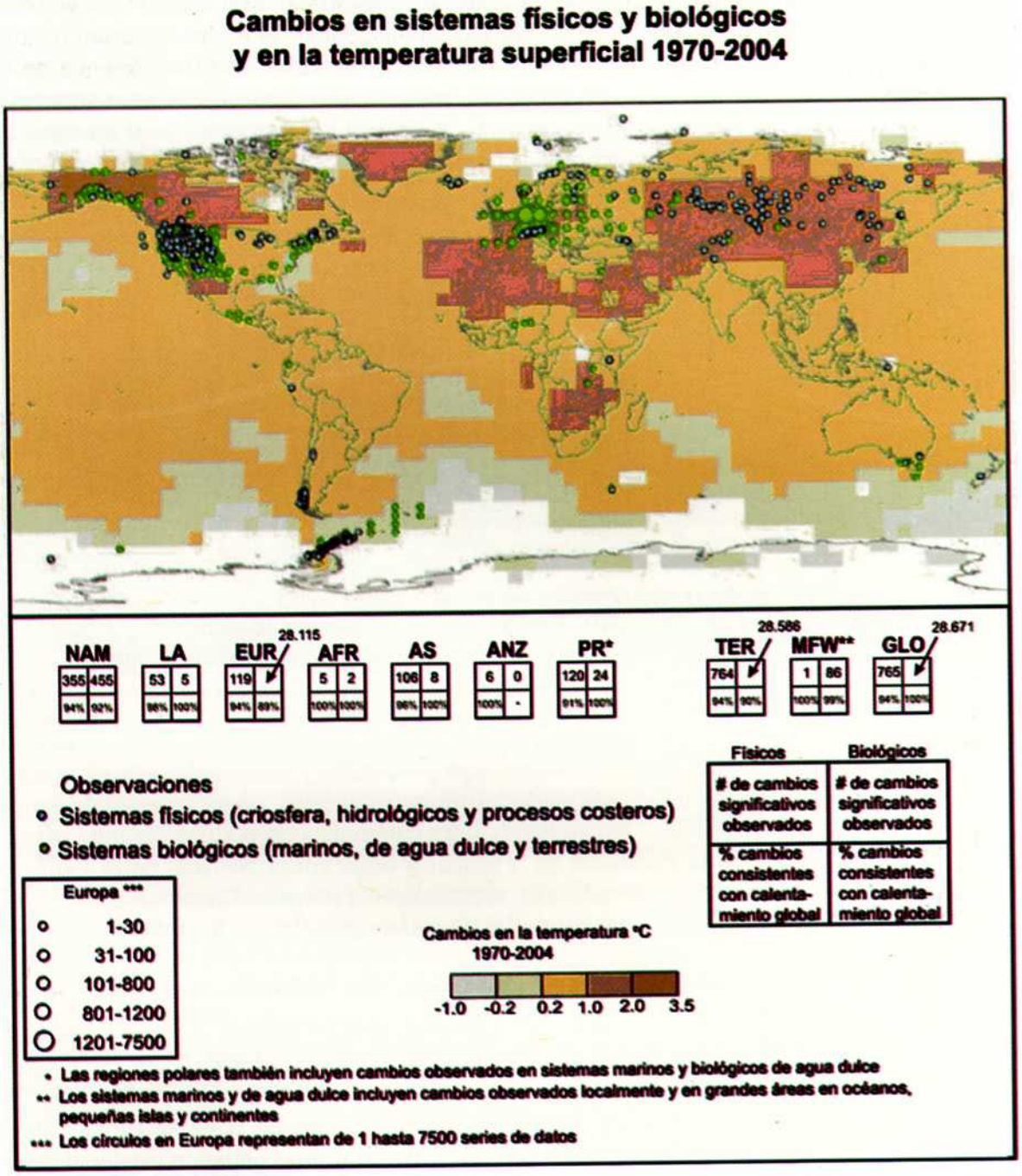


FIGURA 20. Regiones donde se han detectado cambios significativos de los sistemas físicos (nieve, hielo o suelos congelados, hidrología, procesos costeros) y los sistemas biológicos (en los continentes, mares y cuerpos de agua dulce) como consecuencia de los *GEI*s. Los colores muestran también los cambios de temperatura superficial observados a partir del 1970 y al 2004. La información de los sistemas físicos y biológicos se obtuvo de un subconjunto de 29 mil bases de datos (de un total de 88 mil) cuya duración es superior a los 20 años y contiene datos posteriores al 1990. Las matrices de 2□2 muestran el número de bases de datos utilizadas para las diversas regiones del globo: Am. del Norte, NAM; Am. Latina, LA; Europa EU; África, AFR; Asia, AS; Australia Nueva Zelanda, ANZ; polares PR; sistemas terrestres, TER; sistemas marinos y de agua dulce, MFW; y global, GLO. También muestra el porcentaje de concordancia con el calentamiento global. No se cuenta con suficiente información para las regiones en blanco. Nótese la ausencia significativa de información para América Latina, África y otras regiones de países en vías de desarrollo.

Cuando el forzamiento radiativo se modifica, e.g., un volcán muy energético, entonces las propiedades internas de la atmósfera se ajustan rápidamente. Sin embargo, cuando existe un acoplamiento de las interacciones entre la troposfera, y las diversas capas de agua de los océanos, entonces, el resultado neto es que los tiempos característicos más cortos se alargan sustancialmente; esto es, para aquellas variables de la troposfera, que involucran los océanos, ajustarse a nuevos cambios les toma un enorme tiempo.

El '*cambio de clima ya comprometido*' involucra también otros aspectos del cambio climático, por ejemplo, el nivel de los mares que esencialmente se debe hasta ahora al coeficiente volumétrico de expansión térmica de las masas oceánicas. Los océanos han absorbido una enorme cantidad de calor y ese aumento de la temperatura se traduce en un mayor volumen, que eleva el nivel de los mares. Así, el nivel de los mares continuará subiendo por milenios, porque los mares continuarán absorbiendo una mayor cantidad de calor debido a los *GEI*s ya generados —existentes en la atmósfera— y porque éste es el principal reservorio térmico del globo terráqueo.

¿Y qué más podemos esperar? A nivel global se tiene un bosquejo detallado y preciso, aunque nada alentador. Pero a nivel de escalas espaciales menores, la Figura 20 muestra una condición desafortunada de los países en vías de desarrollo, de los cuales México no es la excepción. Para las regiones de Norte América y Europa el conocimiento del cambio climático, tanto en las variables físicas como las características biológicas de escala fina, está adecuadamente documentado para 'certificar' y cuantificar el cambio climático. El nivel de confianza en los datos se basa en la enorme cantidad de muestras y experimentos. Sin embargo, cómo habremos de determinar los efectos climáticos regionales y locales para las diversas zonas en América Latina si sólo se cuenta con cinco bases de datos calificadas para el monitoreo y evaluación del cambio climático. Entonces, el cambio climático en las próximas décadas en México y gran parte de los países no desarrollados en el mundo será simplemente *este clima*, pues no existe documentación suficiente para determinar el *viejo clima* o los cambios que éste tiene y seguramente tendrá. Esta realidad implicará enormes costos económicos para las economías débiles, lo que podría desembocar en economías paupérrimas.

El Nóbel Mario Molina recientemente ha dicho "...más frío, más calor, más lluvias, más inundaciones, más sequías, huracanes más intensos, derretimiento de glaciares; todo eso que está pasando, sobre todo en las últimas décadas, con mucha claridad se lo podemos atribuir a esas emisiones..." Y aún cuando no aumenten significativamente los *GEI*s en las próximas décadas, debemos esperar más de lo mismo: más sequías, más ciclones, más inundaciones y un deterioro generalizado de los ecosistemas; todo ello, con mayor severidad y frecuencia; de ello no queda duda. ¿Y estamos preparados?

El uso de energía presenta actualmente enormes retos, especialmente cuando se restringe a un desarrollo sustentable, pues reducir la pobreza, promover el desarrollo económico y social requieren de mayores consumos de energía. Desafortunadamente, hasta ahora una mayor disponibilidad de energía implicó una enorme presión sobre el clima y los ecosistemas. A partir de ahora, los países del mundo deben enfatizar un desarrollo tecnológico que sea rentable y compatible con las metas de un desarrollo social y económico sustentable.

Y para ello sólo hay un camino: la formación de recursos humanos, a todos los niveles, con una clara conciencia del giro que debemos dar si deseamos preservar la Tierra como la hemos conocido, pues sin éstos no estaremos en posibilidad de conocer los retos a resolver, como tampoco de cómo aplicar aquellos desarrollos tecnológicos más bondadosos.

AGRADECEMOS el apoyo de la Sra. Sara Jiménez, así como del Ing. Gerardo Guevara Flores para la obtención de las fichas bibliográficas y la preparación de las Figuras, respectivamente. Asimismo EG agradece el apoyo otorgado por PAPIIT-DGAPA-UNAM, Proyecto IN122505. Con base en QUADs, las contribuciones al trabajo son $RG^{50,10,50,30}$ and $EG^{50,90,50,70}$; Ver Referencia 29.

REFERENCIAS

1. Informe Ejecutivo *IPCC* en: http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf ;
2. http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_SPM.pdf
3. Solomon, S., et al., "*Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary*". In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [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 (2007)
4. "*Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability*", Summary for Policymakers, Working Group II, IPCC 4th. Assessment Report (2007).
5. http://news.com.com/Harshest+warning+yet+issued+on+climate/2100-11395_3-6173933.html
6. "Scientists Detail Climate Changes, Poles to Tropics", Kanter J & A.C. Revkin; New York Times, 7 abril 2007.
7. Dave Reay, "Spring time for links", *Nature*, **446**;727-8(2007).
8. http://earthtrends.wri.org/maps_spatial/maps_detail_static.php?map_select=184&theme=3
9. http://www.vitalgraphics.net/lac.cfm?pageID=2
10. Houghton, R.A., *Emissions (and Sinks) of Carbon from Land-Use Change (Estimates of national sources and sinks of carbon resulting from changes in land use, 1950 to 2000)*. Woods Hole Res. Center, (2003).
11. http://earthtrends.wri.org/maps_spatial/maps_detail_static.php?map_select=485&theme=3
12. Olson, J.S., J.A. Watts, and L.J. Allison. *Carbon in Live Vegetation of Major World Ecosystems*. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, (1983).
13. http://earthtrends.wri.org/maps_spatial/maps_detail_static.php?map_select=225&theme=3
14. http://earthtrends.wri.org/index.php
15. Gabrielle Walker, "A world melting from the top down", *Science*, **446**;718-21(2007).
16. *http://www.washingtonpost.com/wpdyn/content/article/2007/02/21/AR2007022102095.html?referrer=email* . D. Struck; "In far North, Peril and Promise", Washington Post (2007).
17. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Digital Soil Map of the World (DSMW) and Derived Soil Properties. Version 3.5. CD*-ROM, (1995).
18. Loveland, T.R., et al., GLCCD "Development of a Global Land Cover Characteristics Database and IGBP DISCover from 1-km AVHRR Data" In *Inter. J Remote Sensing* **21**(6-7);1303-1330(1998).
19. http://earthtrends.wri.org/maps_spatial/maps_detail_static.php?map_select=207&theme=3
20. http://www.marinebiology.org/coralbleaching.htm, Coral Reef Bleaching por Buchheim J., (1998).
21. R. T. Barber, "Picoplankton do some heavy lifting", *Science,* **315**;777-8(2007).
22. J. Ruttimann, "Sick Seas", *Nature*, **442**; 978-80 (2007).
23. Cao L., K Caldeira and A. K. Jain, *Geo. Res. Lett.*, **34;** L05607, doi:10.1029/2006GL028605 (2007).
24. Medina M, et al., "Naked Corals: Skeleton loss in Scleractinia ", *PNAS* **103;**9096 (2006).
25. M. Fine & D. Tchernov, *Science,* **315**;1811(2007).
26. Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 years, National Research Council (2006). http://www.nap.edu/catalog/11676.html
27. J. A. Hansen, et al., "Global Temperature Change", *PNAS*, **103**(39);14288-93(2006).
28. http://www.un.org/esa/sustdev/publications/energy_indicators/index.htm . Energy Indicators for Sustainable Development: Country Studies on Brazil, Cuba, Lithuania, México, Russian Federation, Slovakia and Thailand. International Atomic Commission and United Nations Dept. of Economic and Social Affairs (2007).
29. Verhagen J. V., K. J. Wallace, S. C. Collins and T. R. Scott, "QUAD system offers fair shares to all authors", *Nature* **426**; 602 (2003).

A los 32 años de vida...

AXOL

Calentadores Solares Domésticos

POLI HEAT

Calentamiento de albercas

MAXOL

Grandes usuarios

Somos una sólida empresa 100% mexicana que sigue creciendo gracias a la confianza de nuestros clientes y distribuidores, quienes han comprobado la calidad garantizada de nuestros productos.

...de otra manera no tendríamos más de 180,000 m² instalados en todo el país...¡hasta hoy!

Distribuciones disponibles

Módulo Solar mr

Líderes en México en fabricación de equipos solares para calentamiento de agua

Ventas:

Comercializadora General Solar, S.A. de C.V.

(777) 312 8017
Cuernavaca, Mor.

Socios fundadores de ANES

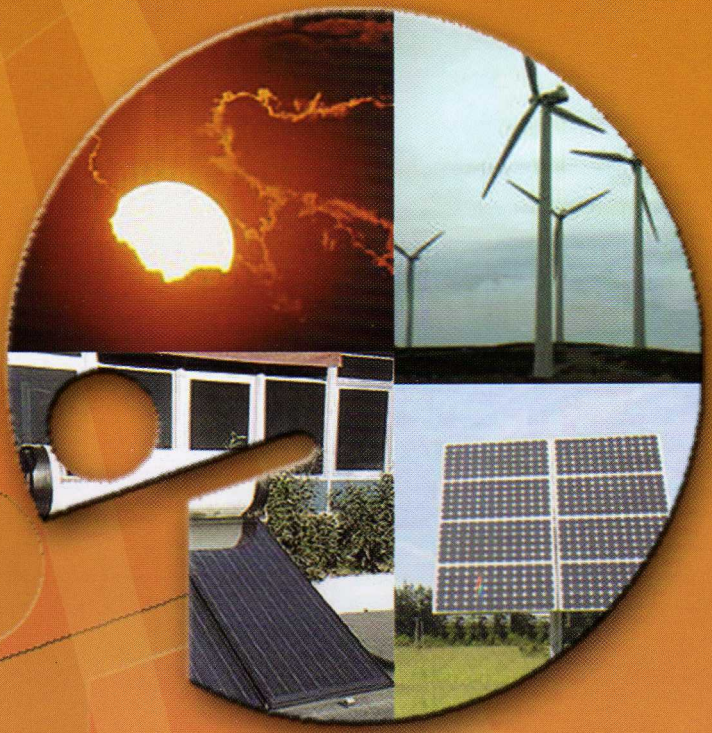
www.modulosolar.com.mx
generalsolar@modulosolar.com.mx
01800 999 5500

XXXI Semana Nacional de Energía Solar

ZACATECAS 2007

1 - 5 de Octubre

Organizada por la Asociación Nacional de Energía Solar,
la Universidad Autónoma de Zacatecas
y el Consejo Zacatecano de Ciencia y Tecnología



HOTEL DON MIGUEL

Cjon. Del Plomo S/N, Centro,

Zacatecas, Zac.

Informes: México D.F. Tel: (55) 56 84 41 62

http://www.anes.org/snes/snes.html

ANES ISES COZCYT ZACATECAS Red Mexicana de Bioenergía