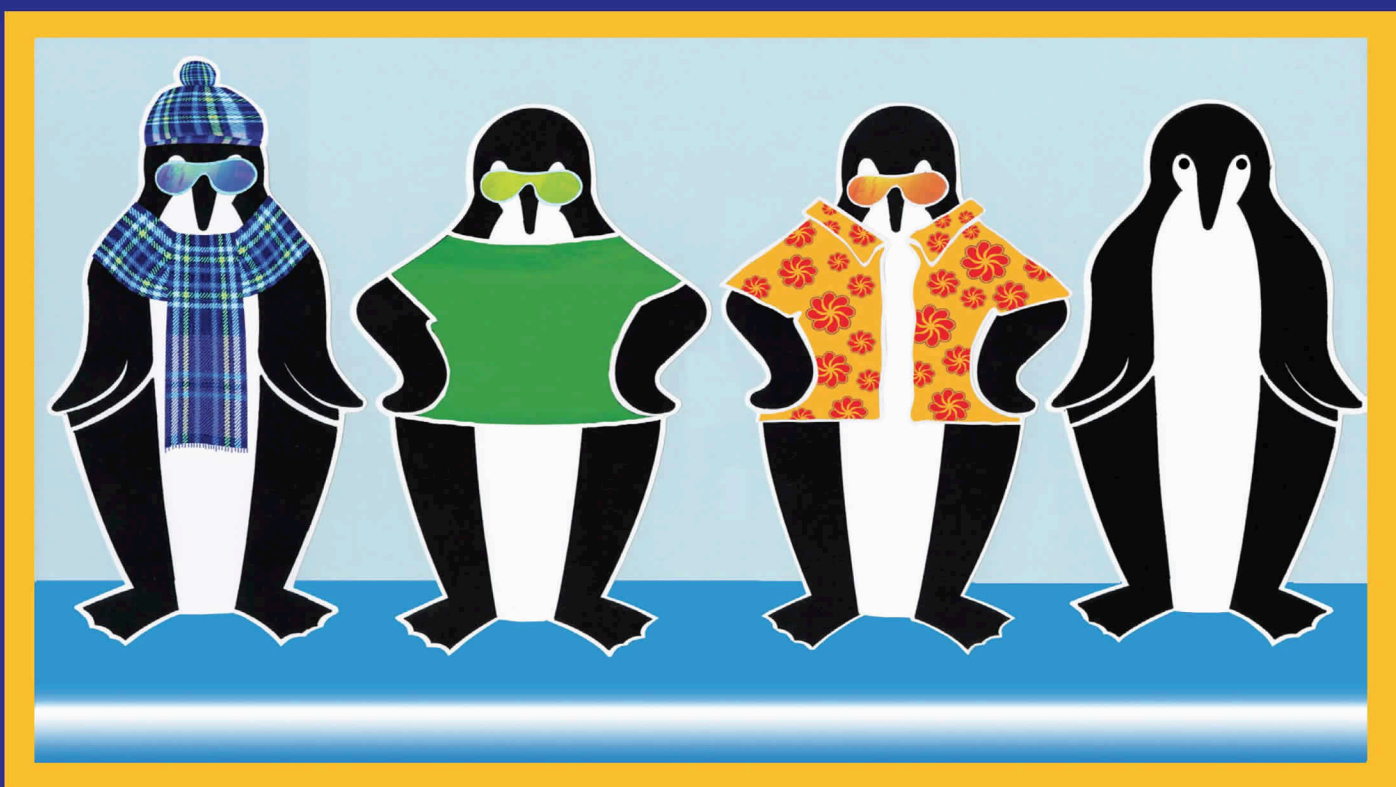


# CAMBIO CLIMÁTICO

## Glaciaciones y calentamiento global



**JOSÉ FERNANDO ISAZA DELGADO**  
**DIÓGENES CAMPOS ROMERO**



UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ  
JORGE TADEO LOZANO

# **Cambio climático**

**Glaciaciones y calentamiento global**

# **Cambio climático**

## **Glaciaciones y calentamiento global**

**José Fernando Isaza Delgado**

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

**Diógenes Campos Romero**

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

Academia Colombiana de Ciencias

Exactas, Físicas y Naturales

Isaza Delgado José Fernando

CAMBIO CLIMÁTICO. Glaciaciones y calentamiento global / José Fernando Isaza Delgado, Diógenes Campos Romero. — Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2007.

294 p. il., grafcs., mapas, 24 cm.

ISBN: 978-958-902-989-3

1. CALENTAMIENTO GLOBAL. 2. EFECTO INVERNADERO. 3. CAMBIO CLIMÁTICO. I. Campos Romero, Diógenes. II. Tít.

CDD363.73874'176

Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano  
Carrera 4 N° 22-61 – Bogotá D.C., Colombia  
PBX: 242 7030 – www.utadeo.edu.co

CAMBIO CLIMÁTICO.  
*Glaciaciones y calentamiento global*

ISBN: 978-958-902-989-3

© José Fernando Isaza Delgado

© Diógenes Campos Romero

© Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

Primera edición: abril de 2007

Rector: José Fernando Isaza Delgado  
Vicerrector Académico: Juan Manuel Caballero Prieto  
Decano de la Facultad de Ciencias Naturales: Diógenes Campos Romero  
Director de Publicaciones (E): Jaime Melo Castiblanco

Revisión de textos: Andrés M. Londoño Londoño  
Diagramación: Diógenes Campos Romero  
Asesor de edición: Fabio Lozano Uribe  
Coordinación gráfica y de producción: Luis Carlos Celis Calderón  
Graficadores: Luis Carlos Celis Calderón  
Samuel Fernández Castro  
Felipe Duque Rueda  
Escáner: Francisco Jiménez Montero

PORTADA

Concepto: Christian Schrader Valencia  
Armada digital: Felipe Duque Rueda  
Fotografías: Luis Carlos Celis Calderón

Fotomecánica digital: Sistemas Holograma  
Impresión: Ultracolor Ltda.  
Coordinación administrativa: Henry Colmenares Melgarejo  
Distribución: Dirección administrativa UJTL, Juan Sastoque Johnson

IMPRESO EN COLOMBIA - PRINTED IN COLOMBIA

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio de este material sin autorización escrita de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

# Contenido

<b>1. Prefacio</b> .....	13
--------------------------	----

---

## **Parte I. Evidencia del cambio climático**

---

<b>2. Evidencia del cambio climático global</b> .....	27
2.1. Introducción .....	27
2.2. La evidencia del cambio climático .....	28
2.3. Hipótesis explicativa .....	32
2.4. Estudio científico del clima .....	35
2.4.1. Detección de las huellas climáticas .....	36
2.4.2. La estrategia isotópica .....	37
2.4.3. Núcleos de hielo en la Antártida y en Groenlandia	43

---

## **Parte II. Glaciaciones**

---

<b>3. Evolución del clima de la Tierra</b> .....	49
3.1. Evolución de la atmósfera terrestre .....	49

3.2. Configuración actual de la Tierra .....	53
3.3. Las eras geológicas .....	54
3.4. Vida y clima durante las éras geológicas .....	58
3.5. El clima en los últimos 65 MA .....	60
3.5.1. Transición paleoceno-eoceno .....	60
3.5.2. Clima en el pleistoceno y en el holoceno .....	61
3.5.3. Conclusiones generales .....	67
3.6. La última glaciación .....	67
3.6.1. Los eventos más significativos .....	68
3.6.2. El Younger Dryas .....	72
3.6.3. Del lejano pasado al presente .....	74
3.7. El clima postglacial .....	78
3.7.1. Del holoceno a las antiguas civilizaciones .....	78
3.7.2. Beringia: el punto de cruce .....	82
3.7.3. De tierra verde al glacial nórdico .....	84
3.7.4. El mito del Salto del Tequendama puede tener bases históricas .....	88
<b>4. Origen de los grandes cambios climáticos .....</b>	<b>91</b>
4.1. Elementos históricos .....	91
4.2. Fenomenología de las corrientes marinas .....	93

4.2.1. Circulación termosalina .....	93
4.2.2. La corriente del Golfo .....	98
4.3. Cierre del istmo de Panamá .....	101
4.4. Teoría de Milankovitch .....	105
4.4.1. Elementos básicos .....	105
4.4.2. Elementos de la teoría de Milankovitch .....	107
4.4.3. Análisis de los factores astronómicos .....	113
4.5. Transición del período Eemian al Würm .....	121
4.6. El Younger Dryas .....	123
4.7. Erupciones volcánicas .....	126

---

**Parte III. Calentamiento global**

---

<b>5. calentamiento climático global .....</b>	<b>131</b>
5.1. Introducción .....	131
5.2. Si la atmósfera no existiese .....	134
5.3. Efecto de la existencia de la atmósfera .....	140
5.3.1. El modelo .....	140
5.3.2. Efectos de la duplicación del CO <sub>2</sub> .....	144
5.4. Efecto invernadero .....	145
5.5. Capas de la atmósfera .....	151

5.6. Composición de la atmósfera .....	154
5.7. Vapor de agua .....	157
5.8. Dióxido de carbono .....	158
5.8.1. Contribuciones naturales y antropogénicas .....	158
5.8.2. Algo más sobre el dióxido de carbono .....	162
5.8.3. Ciclo global del carbono .....	165
5.9. Metano .....	167
5.10. Gases invernadero fluorinados .....	171
5.11. La Tierra: un sistema complejo .....	172
5.12. Cinturón oceánico portador .....	177

---

## **Parte IV. Consecuencias del calentamiento global**

---

<b>6. Causas antropogénicas del calentamiento .....</b>	<b>183</b>
6.1. Introducción .....	183
6.2. Forzamiento radiativo .....	188
6.3. ¿Por qué influye tanto el CO <sub>2</sub> ? .....	195
6.4. El futuro .....	196
6.4.1. Población y producción de CO <sub>2</sub> .....	196
6.4.2. Los escenarios SRES .....	200
6.5. El ciclo del carbono y la fotosíntesis .....	203



<b>7. Consecuencias del calentamiento global</b> .....	211
7.1. Cinturón oceánico portador .....	211
7.2. Cambios en los ecosistemas .....	213
7.3. Cambio climático y salud .....	216
7.4. Cambio en el nivel de los mares .....	217
7.5. Acidificación de los océanos .....	221
7.6. Impacto sobre las regiones polares .....	225
7.7. Efectos sobre el paisaje .....	227
7.8. Glaciares de Colombia .....	228
<b>8. Protocolo de Kyoto</b> .....	233
8.1. Objetivos y compromisos .....	233
8.2. Colombia y el Protocolo de Kyoto .....	236
8.3. Reforestación y reducción de gases invernadero .....	238
8.4. Impuestos a las emisiones de CO <sub>2</sub> .....	241
8.5. Negociación de derechos de emisión .....	245
8.6. Consecuencias económicas .....	247
8.7. Política reciente sobre cambio climático .....	249
8.8. ¿Hay consenso sobre el cambio climático? .....	254
8.9. La sexta extinción de las formas de vida .....	257

8.10. Principio de precaución .....	259
8.11. Reflexiones finales .....	261
<b>Bibliografía</b> .....	<b>265</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>277</b>
<b>Índice de cuadros</b> .....	<b>282</b>

## 1. Prefacio

En el año 1983 se reunió en Bogotá el denominado “Club de Roma”. En esta ocasión uno de los autores (JFI) presentó un ensayo titulado *Calentamiento o glaciación. Un ensayo sobre las perspectivas climáticas mundiales*. El documento fue publicado en noviembre del mismo año por el Centro “Las Gaviotas”.

En dicho documento se analizaba el denominado “efecto de invernadero”. Se hacía mención a la no existencia, en el mundo científico de ese momento, de una clara mayoría de opinión sobre el hecho que la atmósfera terrestre iba en un camino de calentamiento continuo.

Algunos científicos del prestigio de Fred Hoyle, por el contrario, planteaban que la temperatura atmosférica podía descender y sumir al mundo en una nueva pequeña glaciación, como la que se produjo en Europa en el período del Renacimiento. El profesor Budyko planteaba, en su libro *The Earth's Climate* (1982), que el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico podría tener efectos positivos por alejar el riesgo de una glaciación. Escribía:

El primer resultado del impacto global producido por el hombre en la biosfera está ligado a recuperar el CO<sub>2</sub>, como un efecto no buscado de la actividad económica. Este cambio en la composición de la atmósfera ha aumentado la estabilidad de

la biosfera y ha disminuido la posibilidad de una completa o parcial destrucción por glaciación.

Ya que la atmósfera perdió CO<sub>2</sub> en los últimos 100 millones de años, aumentando el riesgo de desaparición de la biosfera, por el descenso de la productividad de la fotosíntesis, y por la posibilidad de una glaciación, el presente impacto antrópico sobre la biosfera parece ser un factor que eleva los riesgos anteriores (traducción libre, págs. 285-287).

Algo similar pudo ocurrir hace 8 000 años, cuando las prácticas agrícolas de nuestros antepasados modificaron la tendencia de la temperatura atmosférica y evitaron una nueva edad de hielo.<sup>1</sup>

La preocupación de algunos científicos por la posibilidad de una nueva glaciación llevó a la CIA a elaborar un informe en 1974, con el apoyo de la Universidad de Wisconsin, acerca del efecto sobre la seguridad de los Estados Unidos si este fenómeno se producía.<sup>2</sup> Es casi inútil mencionar que las medidas propuestas se dirigían a impedir, aun con medidas militares, la inmigración de los países que resultasen afectados por el cambio climático.

Por supuesto, no todos los científicos compartían el temor de una glaciación. Por el contrario, la inquietud se orientaba hacia los efectos sobre la civilización y la biosfera, en caso de reanudarse el aumento de temperatura que se había detectado entre 1860–1940.

---

<sup>1</sup> Ruddiman W.F., “How Did Humans First Alter Global Climate?”, *Scientific American*, pág. 46, March (2005).

<sup>2</sup> CIA Report, *A Study of Climatological Research as it Pertains to Intelligence Problems*, August (1974).

El debate entre el calentamiento y la glaciación permeaba el mundo científico en los años 1980 y, poco a poco, se mencionaba en los círculos políticos.

Si bien la temperatura media de la atmósfera muestra una tendencia creciente en los últimos 170 años, esta propensión no es continua. Así, en el período entre 1856 y el año 2005, la temperatura aumentó cerca de  $0.7^{\circ}\text{C}$ . Este aumento acumulado no ha sido el resultado de un calentamiento continuo: así, en el período 1860-1900, el aumento es de  $0.1^{\circ}\text{C}$ . Entre 1900-1910, la temperatura desciende en una cifra ligeramente superior; en el período 1910-1940, crece en forma sostenida en  $0.4^{\circ}\text{C}$ ; entre 1940-1980 es casi constante, descendiendo entre 1940-1950, y creciendo entre 1977-1980.

Entre 1977 y la actualidad (2006) el aumento de la temperatura atmosférica ha sido sostenido y, en estos 29 años, ha crecido tanto como en el período 1910-1940.

En síntesis, el crecimiento reciente de la temperatura ha tenido lugar en los períodos 1910-1940, y 1977 hasta el presente. Hasta el presente los estimativos de cambio en la temperatura se han deducido de las gráficas presentadas en [1, pág. 461] y en [2, pág. 263]; para el período 2001-2005 se utilizaron los datos del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Las temperaturas que existieron entre 1940-1977 explican el porqué en el ensayo mencionado (Calentamiento o glaciación) se hizo énfasis en la controversia entre quienes se preocupaban por una posible glaciación, similar a la que vivió la humanidad durante la llamada “pequeña edad del hielo” entre los siglos XIV-XVII.

No les faltaban razones de temor a quienes creían que la atmósfera, lejos de calentarse, se estaba enfriando. Algunos hechos parecían confirmar esta hipótesis.

La situación en los años 1970-1980 podía esquematizarse así:

El profesor Reid Bryson, de la Universidad de Wisconsin, plantea que el clima que disfrutó el mundo entre 1920-1970 no fue “normal” sino “anormal”. Lo “normal” son temperaturas más bajas que los promedios de 1920-1970. Durante esos años se disfrutaron las mejores condiciones climáticas que el mundo ha tenido desde el siglo XI. En el transcurso de esa época, y especialmente en la década de los 60, se produce adicionalmente la “revolución verde”. La producción agrícola creció, los monzones se produjeron con regularidad en la India, África Occidental y China. Hacia 1955 los glaciares alpinos se habían retirado casi 1 km comparado con la posición en 1860.

La situación empieza a cambiar más marcadamente hacia 1970: ya se mencionó la disminución promedio de temperatura, que comienza a detectarse en los últimos 30 años. Los siguientes hechos se citan como argumentos de apoyo a la hipótesis según la cual el período interglacial parece estar llegando a su fin:

1. La capa de hielo en el hemisferio norte se incrementó en un 12 % en 1972; esta capa de hielo ha permanecido.
2. La gran masa de hielo de la Antártida creció en un 10 % en 1966-1967 y el promedio de hielo y nieve es alto y creciente.
3. Las fotografías de satélite entre 1967-1973 muestran una mayor duración del invierno en el hemisferio norte.

4. Groenlandia ha tenido las más bajas temperaturas desde 1970, que en todo el siglo anterior.
5. Islandia, por su localización cerca al círculo polar Ártico, es un adecuado barómetro para predecir cambios climáticos. Esta isla muestra que en los últimos 30 años la temperatura promedio ha descendido en 0.6 °C.
6. Se han producido patrones de migraciones de animales diferentes a los usuales. Por ejemplo, en 1880 y 1940, período más cálido en los últimos 800 años, el armadillo tropical invadió el norte de Estados Unidos y llegó hasta Nebraska. Desde 1940 los armadillos están migrando hacia el sur.
7. A principios de 1970 la región de Moscú sufrió las peores sequías en los últimos 300 a 500 años.
8. En el oeste medio americano los ríos produjeron avenidas masivas. Se presentaron inundaciones anormales en América central, el sudoeste de Asia, la región del Sahel, China y Australia, en los años 70.
9. En septiembre de 1983, cuatro convoyes con 90 buques fueron atrapados en el mar Chukotsk (Siberia oriental), al congelarse prematuramente los canales navegables. Oficiales de la marina mercante han observado que los bloques de hielo han avanzado en los años recientes hacia el sur y pueden bloquear otros canales.

El profesor Mekhail Budyko considera que una disminución de 1.5 °C en la temperatura media actual conllevaría el avance de los gla-

ciades, y una disminución adicional de  $0.4^{\circ}\text{C}$  llevaría al mundo a una situación similar a la “pequeña glaciación”.<sup>3</sup>

Estas hipótesis contribuyen a explicar las inquietudes de los climatólogos al registrar descensos leves, pero persistentes, de la temperatura.

Dentro de esta línea de pensamiento se inserta el informe de la Universidad de Wisconsin preparado por la CIA. Este informe es muy pesimista sobre los resultados, en el desarrollo de la civilización, de continuar la tendencia al enfriamiento observado en los años 1960. Dentro de la enumeración de sus casi apocalípticas predicciones se destacan:

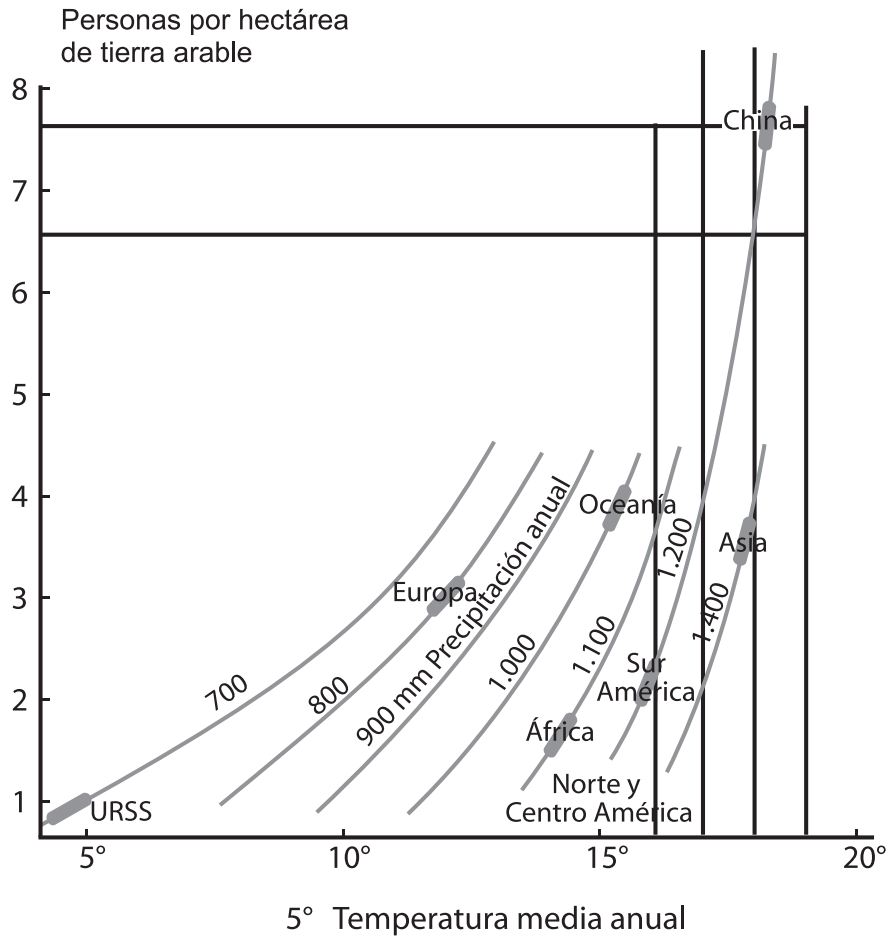
- En China se producirán hambrunas cada cinco años y será necesario importar 50 millones de toneladas anuales de cereales, para evitar cientos de millones de muertes por inanición.
- En períodos de cuatro años, se producirán en la India grandes inundaciones, que afectarán las cosechas en grados tales que será necesario importar entre 50 y 90 millones de toneladas de granos. De no obtenerlas, el número de muertes por la hambruna superaría los 100 millones de personas.

Es importante mencionar que una glaciación, o una catástrofe climática, sólo requiere pequeños cambios permanentes de temperatura. Pequeñas variaciones de temperatura afectan en muy alto grado la producción agrícola. Es decir, existe una elevada elasticidad de la

---

<sup>3</sup> Citado en *The Weather Conspiracy*, Ballantine Books (1977), y en Riabchikov A.M., *Estructura y dinámica de la esfera geográfica, su desarrollo natural y transformación por el hombre* (1976).





**Figura 1.1.** Población alimentada por hectárea de tierra arable en función del clima. Gráfica tomada de *The Weather Conspiracy*.

productividad de la tierra con relación a la temperatura media. A medida que aumenta la pluviosidad, el efecto se acentúa. La figura 1.1 permite la visualización de este fenómeno. Pueden deducirse, entre otros, los siguientes hechos:

Europa alimenta 3 personas por hectárea de tierra utilizable; una disminución de la temperatura promedio en 1 °C, disminuye la producción en un 33 %. China produce alimentos para 7 personas por hectárea cultivada; si disminuye 1 °C la temperatura media, sólo alimentaría 4 personas por hectárea, una caída del 43 %.

Aunque una serie de factores políticos y administrativos contribuyen a explicar los resultados de las cosechas de granos en la URSS, hoy extinta, no deja de presentarse el hecho de significativas reducciones en la producción. Así, en 1975 la disminución llegó al 45 %; los años 76 y 78 mostraron aumentos en las cosechas, pero a partir de esos años la producción disminuyó persistentemente.

En la actualidad la mayoría de los científicos, en especial los que pertenecen al Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, no avalan las anteriores previsiones, en particular por la tendencia de la temperatura atmosférica a incrementar que se observa desde finales de la década de 1970-1980.

La gran mayoría de los analistas coinciden en que por efectos antrópicos la temperatura de la tierra se elevará entre 1 °C y 5 °C en las próximas centurias. Sin embargo, siguen existiendo opiniones y análisis en sentido contrario. Algunos afirman que no deben descartarse las hipótesis que sostienen que el calentamiento global tiene como causas no las antrópicas, sino las planetarias; que no existe una clara distinción entre causa y efecto, en el sentido de que, por alguna circunstancia, el mar redujo la capacidad de almacenar anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) y al aumentar la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera crece la temperatura y disminuye la capacidad del mar de disolver el CO<sub>2</sub>, creándose un efecto de retroalimentación positiva (*feedback*).

Hoy en día, el tema del efecto de invernadero salió del ámbito científico para pasar al político y económico. La suscripción del Protocolo de Kyoto es una muestra de lo anterior; la opinión pública se ha sensibilizado sobre el tema e inclusive se han producido buenas películas comerciales. Como ejemplo, *El día después de mañana* (Roland Emmerich, Director, Twentieth Century Fox Film Corp., 2004) muestra el efecto paradójico de cómo el aumento de temperatura puede desencadenar una glaciación en un período corto.

El *objetivo* del presente ensayo es presentar un resumen, en lenguaje lo menos técnico posible y sin renunciar totalmente a las herramientas analíticas de la física, de la situación actual del debate sobre el efecto de invernadero, exponiendo las diferentes teorías que lo explican, las opciones de política y los impactos económicos que se deducen de adoptar una u otra senda.

Para Colombia el tema es particularmente significativo. Por una parte, el encarecimiento, vía impuestos a los combustibles convencionales del carbón y del petróleo, afectaría drásticamente la balanza de pagos del país y podría afectar sustancialmente la exportación del carbón. Por el contrario dicho impuesto puede traer un efecto positivo al hacer viable explotaciones forestales con el objetivo de captar el CO<sub>2</sub> atmosférico y vender este efecto de sumidero a las empresas que lo requirieren para cumplir las normas derivadas del Protocolo de Kyoto.

Los diferentes actores económicos se están preparando para el escenario que genera el Protocolo de Kyoto y, en consecuencia, analizan la manera de obtener ventajas del temor, que parece ser justificado, a los efectos del calentamiento atmosférico. Los propietarios de las re-

servas de gas natural, los productores de centrales nucleares, los países ricos en yacimientos de carbón, los habitantes de las islas fácilmente sumergibles, los países para los cuales un aumento de temperatura incrementa su frontera agrícola, entre otros, pueden tener diferentes visiones e intereses sobre el tema.

Veamos la problemática desde el punto de vista termodinámico. El gas natural emite por unidad de energía el equivalente a sólo el 58 % de anhídrido carbónico de la emisión de la combustión del carbón y el equivalente a un 74 % de la emisión del  $\text{CO}_2$  de la combustión del petróleo. Pero para lograr esta reducción de emisión del  $\text{CO}_2$ , al utilizar gas natural con preferencia a los otros combustibles, la combustión del  $\text{CH}_4$  debe ser casi “perfecta”, dado que el gas natural es una muy importante fuente de gas de invernadero. Así, por unidad de volumen, su efecto es 58 veces mayor que el  $\text{CO}_2$ , a pesar de que la vida media del metano en la atmósfera es menor que la del  $\text{CO}_2$ . Al cabo de 100 años de emitidos ambos gases el efecto de invernadero del  $\text{CH}_4$  es 21 veces mayor que el del  $\text{CO}_2$  y a los 500 años solo se ha reducido al 6.5 [1, pág. 503].

Es interesante mencionar que la propaganda para promover el uso del  $\text{CH}_4$  sobre los otros combustibles no mencionan este hecho. Un cálculo inicial muestra que si en la combustión del metano se emite más del 1.72 % de este gas sin quemarse, el efecto sobre la temperatura atmosférica es más nocivo que el de un combustible tradicional. Lo anterior no niega que, desde el punto de vista ambiental, la reducción de hollín y de otras partículas, es mucho más amable el gas natural que los otros combustibles.

Luego de los accidentes nucleares de Three Mile Islands y de Chernobyl se creía que la posibilidad de construir nuevas centrales de energía nuclear –con fines de generación eléctrica– era casi nula. Sin embargo, dado que dichas centrales no emiten CO<sub>2</sub>, los promotores de la energía nuclear han encontrado un importante argumento para que esta fuente de energía juegue un papel significativo. En un reciente artículo (traducido por El Nuevo Siglo, julio de 2006), James Lovelock, científico de amplio reconocimiento por su teoría de Gaia,<sup>4</sup> propone que a la energía nuclear se la despoje de sus temores y se convierta en la alternativa energética del futuro. En su opinión, se ha exagerado el alcance de la tragedia de Chernobyl; afirma que sólo murieron inicialmente entre 45 y 75 personas; de los 30 000 muertos que se le atribuyen en los años siguientes no existe un sustento en análisis serios de radiobiología. Agrega que el Instituto Paul Scherrer, en un informe de 2001, concluyó que la energía nuclear es la más segura de las grandes fuentes de energía, hasta 40 veces más que la energía producto de la combustión de carbón o petróleo y hasta más segura que la hidroelectricidad renovable.

No obstante que se habla del *consenso del cambio climático*, la verdad es que se encuentran voces minoritarias que consideran que no está probado el hecho de que el calentamiento atmosférico tenga origen antropogénico<sup>5</sup>. De tanto en tanto publican libros para sustentar esta hipótesis; un ejemplo es *Global Warning and Other Eco-Myths*:

---

<sup>4</sup> Esta teoría plantea que la Tierra puede considerarse como un organismo vivo que se adapta a cambios de su estructura física y química para preservarse como un ser vivo, así sea a costa de sacrificar algunos organismos que en ella habitan. Es de Lovelock la frase “El hombre podrá destruirse como especie, pero no destruirá la biosfera”.

<sup>5</sup> La palabra *antropogénico* se usa como un adjetivo para indicar que está relacionado o que resulta de la influencia de los seres humanos sobre la naturaleza.

*How the Environmental Movement Uses False Science to Scare Us to Death* (Forum, 2002). En las páginas de Internet se encuentran artículos de científicos y premios Nobel que no avalan la teoría de la catástrofe climática, lo cual hace pensar que, más que consenso, lo que existe es una mayoría de científicos que suscriben las conclusiones del cambio climático.

Como todo fenómeno no lineal, la evolución climática es una de las más representativas y estudiadas. Las acciones que se toman en un sentido pueden afectar en forma no deseable la evolución del fenómeno. Así, el Protocolo de Montreal, que prohibió el uso de fluorocarbonos por su efecto de reducir el ozono estratosférico, que protege contra la peligrosa radiación ultravioleta, al reducir el *agujero de ozono* contribuyó, sin proponérselo, a incrementar el efecto de invernadero, dado que el *agujero de ozono* permite el escape de radiación infrarroja procedente de la superficie terrestre. Claro está que es prioritario reducir el riesgo de cáncer de la piel causado por la radiación ultravioleta, aun a costa de los efectos del calentamiento global.

Las medidas que se están adoptando para reducir las emisiones de azufre, causante de la lluvia ácida, han disminuido las partículas de azufre en la atmósfera y éstas tienen el efecto de dispersar la luz solar y así reducir el efecto de invernadero.

Para ayudar a comprender estos fenómenos y conocer su impacto sobre la vida en la biosfera se ha escrito este libro. En forma simplificada se presenta la situación actual de la temperatura atmosférica, su evolución probable y algunos de sus efectos sobre la dinámica de la población.

Parte I

## **Evidencia del cambio climático**





## **2. Evidencia del cambio climático global**

### **2.1 Introducción**

Hay múltiples fenómenos, infundados o no, que generan temor al hombre contemporáneo. Entre ellos pueden citarse los siguientes:

1. El cambio climático de la Tierra y el efecto invernadero.
2. El agotamiento de la capa de ozono.
3. El agotamiento de los recursos naturales no renovables.
4. Los efectos nocivos del cigarrillo en los fumadores secundarios.
5. La obesidad (en algunas sociedades lo contrario).
6. La anorexia.
7. La grasa de origen animal.
8. Los efectos de los electrodomésticos sobre la salud.
9. Los efectos del uso de teléfonos celulares sobre la tumoración cerebral.
10. Los efectos de las líneas de alta tensión o subestaciones eléctricas sobre la salud.

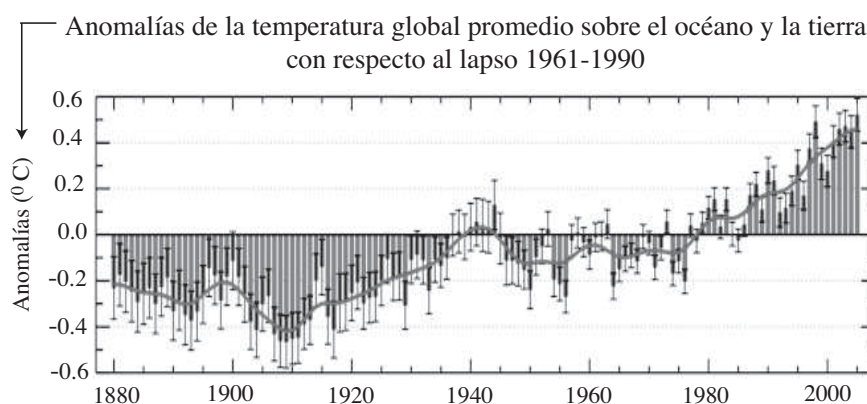
11. Los efectos sobre el estado mental por no orientar los muebles de acuerdo a la dirección del campo magnético terrestre o la radiación solar.
12. Los efectos de ingerir alimentos genéticamente modificados.
13. La posibilidad de una catástrofe cósmica por el choque de un gran aerolito contra la Tierra.
14. La llegada del Anticristo el 6 de junio de 2006 (problema ya superado).
15. La posibilidad de ser secuestrado por extraterrestres.
16. El temor por el VIH SIDA y por epidemias como la gripe aviar.
17. El temor de las doncellas a quedar embarazadas y el de los jóvenes afortunados a asumir la “paternidad responsable”.

En este trabajo sólo se analizará el primero de estos problemas, que sí constituye un riesgo, es decir, “el cambio climático de la Tierra y el efecto invernadero”, incorporando antecedentes históricos de los cambios climáticos en escala global y analizando posibles consecuencias de las actividades antropogénicas sobre el clima de la Tierra.

## **2.2 La evidencia del cambio climático**

En las últimas décadas se ha incrementado la evidencia de que la Tierra está experimentando un cambio en la temperatura global promedio, que se manifiesta en el aumento de las temperaturas superficiales

de la tierra, de los océanos, al igual que del sistema combinado tierra-océanos.



**Figura 2.1.** Cambios en la temperatura global promedio superficial de la Tierra medidos con respecto al lapso 1961-1990.

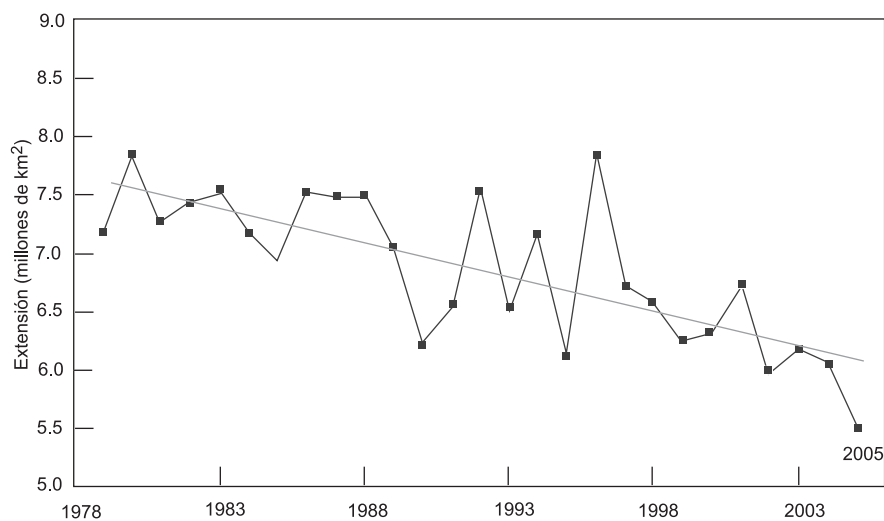
La evidencia es contundente, como lo sugiere la figura 2.1 (adaptada de [3]). Tomando como nivel de referencia el lapso 1961-1990, la curva muestra que desde 1980 hasta el presente la temperatura global promedio de la Tierra tiene la tendencia a aumentar, sin detrimento de la existencia de ciclos de pequeñas disminuciones. Con respecto al nivel de referencia, en el año 2005 el incremento en la temperatura global anual promedio para las superficies del sistema cambiando océano-tierra fue de  $0.58^{\circ}\text{C}$ ; con datos más refinados,  $0.62^{\circ}\text{C}$  por encima del valor promedio del lapso 1880-2004, que es de  $13.9^{\circ}\text{C}$ .

La figura 2.1 incluye para cada año la incertidumbre de los datos, incertidumbre que disminuye a medida que nos aproximamos a los años más recientes como consecuencia de la existencia de mejores instrumentos y técnicas de medición [3]. En los pasados 50 a 60 años

las medidas de la temperatura se hicieron arriba de la superficie de la tierra mediante instrumentos en globos (radiosondas); en los pasados 27 años usando satélites. Los registros indican lo siguiente [3]:

- En el lapso 1880-2004, el valor promedio de la temperatura superficial global promedio para el sistema combinado tierra-océano es de  $13.9^{\circ}\text{C}$ . Si se considera sólo la tierra (continentes, islas) el promedio es de  $8.5^{\circ}\text{C}$  y si se tiene en cuenta sólo las superficies de los océanos el promedio es de  $16.1^{\circ}\text{C}$ .
- En el siglo pasado, la temperatura superficial global promedio tuvo un incremento aproximado de  $0.6^{\circ}\text{C}/\text{siglo}$ .
- Desde 1976, la tendencia en el aumento de esa temperatura ha sido tres veces mayor, observándose los mayores incrementos en las regiones del planeta caracterizadas por grandes latitudes, que incluyen Rusia, Escandinavia, Canada, Alaska. Durante los pasados 25 a 30 años, la tasa de incremento de la temperatura global promedio ha sido de  $1.8^{\circ}\text{C}/\text{siglo}$ .
- En el pasado reciente han existido períodos de un calentamiento marcado: uno comenzó en 1910 y terminó en 1945, y el más cercano se inició en 1976. El año 2005 fue excepcionalmente caliente a nivel global con respecto al promedio; en las regiones de latitudes altas ya mencionadas, la temperatura promedio fue de  $3\text{-}5^{\circ}\text{C}$  por encima del promedio del lapso 1961-1990. Las temperaturas máximas alrededor de  $40^{\circ}\text{C}$  afectaron los Estados Unidos en Nevada, California, Arizona y el sur de Utah; en Las Vegas se reportaron temperaturas de  $47.2^{\circ}\text{C}$ , en el Valle de la Muerte durante siete días consecutivos la temperatura estuvo alrededor de  $51.7^{\circ}\text{C}$ .

En el 2006 se experimentan inclemencias climáticas similares [5]: En ciudades como Milán o Turín, las temperaturas llegan a 40 °C; en Los Angeles y Fresno, California, se tienen picos de temperatura entre 46 y 49 grados centígrados, con algún centenar de muertos; en Buenos Aires la tormenta de granizo del 26 de julio dañó más de 800 viviendas y cerca de 30 000 vehículos; las aseguradoras no cubren los daños en la mayoría de los casos.



**Figura 2.2.** Cambio en la extensión de la capa polar ártica medida en kilómetros cuadrados desde 1980 hasta el 2005 (NOAA, National Snow and Ice Data Center).

- Como consecuencia del calentamiento global promedio de la temperatura superficial de la Tierra, las capas de hielo en diferentes partes del planeta van en una progresiva disminución; los tres mínimos de la figura 2.2 (adaptada de [3]) indican que en el lapso entre 1980 y el 2005 la capa polar ártica ha disminuido su extensión en una magnitud que supera las variabilidades anuales que le son inherentes.

### 2.3 Hipótesis explicativa

Los hechos antes relacionados, entre muchos otros indicadores, sugieren la existencia de una problemática que afecta la Tierra como un todo, con efectos regionales y locales. Para explicar los fenómenos observados, en la literatura científica se sugiere lo siguiente:

*Hipótesis del cambio climático global.* El aumento de la temperatura global superficial promedio (anual) que se observa en la Tierra tiene, en buena parte, su origen en causas antropogénicas que resultan de las actividades de una sociedad humana industrializada.

Por definición, el calentamiento de la Tierra debido a actividades humanas es el fenómeno que se denomina *calentamiento global*. Este fenómeno abarca, entre otros elementos, dos temas centrales:

1. *Intensificación del efecto invernadero.* A partir de la revolución industrial, en el siglo XVIII, las actividades humanas (industria, fábricas, vehículos, . . . ) han contribuido de manera dramática a incrementar la presencia de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y de otros gases en la atmósfera, conllevando a la intensificación del efecto invernadero natural, lo que genera el calentamiento global.
2. *Destrucción de la capa de ozono.* La contaminación atmosférica originada en aerosoles y otros contaminantes producidos en el proceso de industrialización afectan destructivamente la capa de ozono, que absorbe radiación ultravioleta proveniente del Sol y crea condiciones adecuadas para la vida en la Tierra.

En las últimas décadas el estudio del tema del calentamiento global ha atraído la atención de la comunidad científica y de los gobiernos, por el impacto a nivel global, regional y local que puede tener ese fenómeno. Para la literatura básica, consúltese por ejemplo [7, 8] y las referencias allí incorporadas. Es de anotar que uno de los autores del presente trabajo (J.F. Isaza) inició su interés por el tema en la década de 1980 cuando publicó el libro titulado *Un ensayo sobre las perspectivas climáticas mundiales* [9].

En 1896 el químico sueco Svante Arrhenius predijo, por primera vez, que la actividad industrial podría eventualmente tener un impacto sobre el clima global de la Tierra. Antes de la revolución industrial, que se inicia hacia 1750, la economía dependía de manera preponderante de la agricultura a pequeña escala y del comercio. Los avances tecnológicos de la era industrial, la construcción de fábricas, la agricultura a gran escala han incrementado la producción de gases invernadero como el dióxido de carbono y el metano. La hipótesis de que el clima global de la Tierra está cambiando por causas antropogénicas puede ser difícil de creer, pero es un hecho que hoy en día existe un número importante de científicos que aceptan la hipótesis y la evidencia sobre su validez [10], aunque naturalmente existe también un grupo de escépticos.

El calentamiento global es un proceso gradual con graves consecuencias, entre otras [11]: elevamiento del nivel de los mares, daños en las cosechas, hambre, cambios en los regímenes de lluvias, cambios en las poblaciones de plantas y animales, efectos serios en la salud, y propagación de enfermedades infecciosas.

La preocupación mundial sobre el cambio climático global se ilustra con casos específicos como, por ejemplo, lo que se desprende del “Plan de Acción para el Cambio Climático” del Estado de Wisconsin (EE.UU). El DNR<sup>1</sup> considera creíbles los siguientes escenarios hacia mediados del presente siglo [12]:

- Inviernos más húmedos y veranos más secos con olas de calor más largas, más calientes y más frecuentes.
- Cambios climáticos y del estado atmosférico que podrían conllevar a que los agricultores tengan que cambiar el tipo de cultivos.
- Hatos lecheros agobiados por el calor e incremento de la peste en las poblaciones.
- Empeoramiento de la calidad del aire y concentraciones más altas de ozono en su nivel base,<sup>2</sup> un contaminante que causa graves problemas de salud.
- Ríos con aguas menos profundas y más calientes que podrían afectar las poblaciones de peces.
- Proliferación de algas más densas y menores niveles de oxígeno en pozos y lagos.
- Inundaciones, sequías, incendios forestales más frecuentes y tormentas más destructivas.
- Cambios en las especies de árboles que pueden afectar la industria maderera y poblaciones de la vida silvestre.

---

<sup>1</sup> DNR, Wisconsin Department of Natural Resources.

<sup>2</sup> “Ground-level ozone”.



Los científicos que defienden la hipótesis del cambio climático global aseguran que el impacto de los factores antropogénicos sobre el clima de la Tierra es tan importante que puede ocultar otras causas que influyen en el clima de nuestro planeta, como pueden ser los cambios en la actividad solar y otros fenómenos naturales. Por lo tanto, con el propósito de profundizar en el problema del cambio climático global y entender su real dimensión, en los siguientes capítulos se revisarán algunos elementos históricos del clima de la Tierra, para épocas en las que los efectos antropogénicos estaban ausentes o eran despreciables. Se analizarán las siguientes temáticas:

- Evolución del clima de la Tierra.
- El origen de los grandes cambios climáticos.
- El calentamiento global.
- Las causas antropogénicas del calentamiento.

## **2.4 Estudio científico del clima**

Al mirar la historia de la Tierra, se puede entender la manera como ella se comportó bajo condiciones distintas a las que la caracterizan hoy en día. Este conocimiento es útil para construir modelos apropiados y validarlos, al igual que para ganar cierto grado de confiabilidad sobre las predicciones de éstos con respecto a los escenarios futuros de la Tierra.

### 2.4.1 Detección de las huellas climáticas

Sólo existen registros escritos del clima de la Tierra desde hace unos 150 años. Pero las condiciones climáticas que han existido han dejado sus huellas en el ambiente, huellas que permiten a los científicos extraer conclusiones sobre el clima de la Tierra en los últimos miles de años [12]:

- *Núcleos de hielo*.<sup>3</sup> El hielo en las regiones polares contienen burbujas de aire atrapadas desde hace miles de años. El estudio de los gases en esas burbujas proporciona información sobre la temperatura en ese entonces. Igualmente, el espesor de las capas de hielo da información sobre el clima en el pasado.
- *Anillos anuales de los árboles*. Los árboles pueden vivir durante siglos y por cada año de su vida añaden al diámetro un anillo en su crecimiento. El ancho de estos anillos puede dar información sobre el clima durante ese año de crecimiento.
- *Fósiles*. Los fósiles de los animales indican las especies que vivieron en ciertas áreas y la época en que estuvieron en la región. Como cada especie tiene requerimientos alimenticios y de temperatura, de los fósiles se puede inferir el clima existente en la región.
- *Núcleos sedimentarios*. Una columna de sedimento del fondo de un lago contiene granos de polen en cada capa. Entre más profunda la capa, más antiguo es el sedimento. Después de determinar la edad de las capas, los científicos pueden extraer información sobre las plantas que crecían cuando el sedimento se formó.

---

<sup>3</sup> “Ice cores”.

- *Registros arqueológicos.* Durante todas las épocas los humanos han dejado sus huellas a través del mundo. La manera como ellos vivieron y lo que necesitaron para sobrevivir proporciona información sobre el clima que ellos experimentaron.

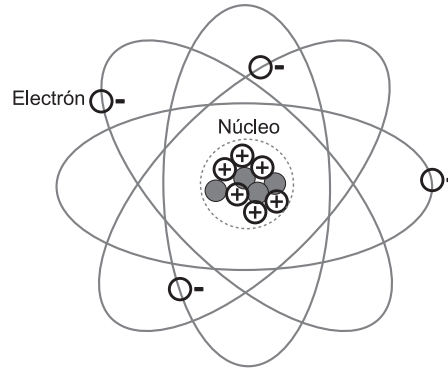
Cada método tiene sus ventajas y desventajas, como lo ilustra E.W. Wolff en su artículo sobre la historia climática de la Antártida [4].

### 2.4.2 La estrategia isotópica

Cada elemento de la tabla periódica consta de un núcleo y de un conjunto de electrones; el núcleo está formado por protones y por neutrones (ver figura 2.3). Los *isótopos* de un elemento dado se localizan en la misma posición de la tabla periódica pero se distinguen entre sí por el número de neutrones presentes en el núcleo. Los isótopos se especifican por el nombre del elemento seguido por un guión y un número que indica el número de nucleones (protones y neutrones) en el núcleo atómico, por ejemplo:

oxígeno-16,  $^{16}\text{O}$ ; oxígeno-18,  $^{18}\text{O}$ .

Es decir, todos los isótopos de un mismo elemento tienen el mismo número de electrones y de protones, pero se distinguen entre sí por el número de neutrones, por ejemplo: todo átomo de oxígeno eléctricamente neutro tiene 8 protones (y 8 electrones), así que el oxígeno-16 tiene 8 neutrones mientras que el oxígeno-18 tiene 10 neutrones. El cuadro 2.1 incluye información de los isótopos de algunos elementos y su abundancia.



**Figura 2.3.** Un átomo consta de un núcleo (formado por protones y neutrones) y una nube electrónica. El modelo atómico de Bohr, que se muestra en esta figura, es una simplificación de carácter cualitativo de la estructura del átomo.

Elemento	Isótopo	Abundancia (%)
Hidrógeno	$^1\text{H}$	99.985
	$^2\text{H}$	0.015
Carbono	$^{12}\text{C}$	98.89
	$^{13}\text{C}$	1.11
Nitrógeno	$^{14}\text{N}$	99.63
	$^{15}\text{N}$	0.37
Oxígeno	$^{16}\text{O}$	99.759
	$^{17}\text{O}$	0.037
	$^{18}\text{O}$	0.204

**Cuadro 2.1.** Lista de algunos isótopos estables y su abundancia para elementos de la tabla periódica de uso frecuente en investigaciones del cambio climático.

Elemento	Estándar	R	Valor
Hidrógeno	SMOW	$^2\text{H} / ^1\text{H}$ (D/H)	0.0001558
Carbono	PDB	$^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$	0.0112372
Nitrógeno	AIR	$^{15}\text{N} / ^{14}\text{N}$	0.0036765
Oxígeno	SMOW	$^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$	0.0020052
Azufre	CDT	$^{34}\text{S} / ^{32}\text{S}$	0.045005

**Cuadro 2.2.** Estándares reconocidos internacionalmente para algunos elementos comunes. SMOW = Standard Mean Ocean Water (agua oceánica media estándar), PDB = Pee Dee Belemnite, AIR = Atmospheric air (aire atmosférico).

La proporción de isótopos estables de un elemento (digamos,  $^xE$ ) se representa a través de la notación delta ( $\delta$ ), en relación con un estándar, según la siguiente ecuación:

$$\delta ^xE := \left( \frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{estándar}}} - 1 \right) 1000 \text{‰},$$

donde  $R_{\text{muestra}}$  y  $R_{\text{estándar}}$  son los cocientes molares de los isótopos pesados sobre los livianos presentes en la muestra y el estándar, respectivamente; el resultado se expresa en “por mil”. Si  $\delta = 0$ , la muestra coincide con el patrón; si  $\delta > 0$ , predomina el isótopo pesado en la muestra; si  $\delta < 0$ , predomina el isótopo ligero en la muestra.

La espectrometría de masas es la herramienta que se utiliza para la medición de las proporciones de los elementos químicos que existen en una muestra dada. En el cuadro 2.2 se relacionan estándares reconocidos internacionalmente para algunos elementos comunes. Algunos patrones para carbonatos (PDB) y para agua (SMOW) son:

$$\begin{aligned}\delta\text{O}^{18}(\text{SMOW}) &= 1.03086 \delta\text{O}^{18}(\text{PDB}) + 30.86, \\ \delta\text{O}^{18}(\text{PDB}) &= 0.97006 \delta\text{O}^{18}(\text{SMOW}) - 29.94.\end{aligned}$$

Históricamente se ha demostrado que las proporciones de los isótopos del oxígeno son muy útiles en relación con estudios del clima debido a que, primero que todo, existe una gran reserva de oxígeno en los océanos; segundo, el oxígeno es muy reactivo y forma compuestos con la mayoría de los elementos; y finalmente, las variaciones de abundancia naturales son relativamente fáciles de medir. En la práctica, para una muestra dada, se mide la proporción del isótopo existente ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) en relación con el estándar:

$$R_{\text{muestra}} = \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{muestra}}.$$

Como se indicó en el cuadro 2.2, el SMOW (standard mean ocean water) es un estándar de uso común. Un valor positivo  $\delta^{18}\text{O}$  significa que la muestra en consideración está enriquecida en  $^{18}\text{O}$  en relación con el agua de mar (quiere decir isotópicamente “más pesada”) y un valor negativo  $\delta^{18}\text{O}$  significa que la muestra está empobrecida en  $^{18}\text{O}$  en relación con el agua de mar (isotópicamente “más ligera”).

En el caso del ciclo del agua, cuando el agua se evapora se favorece el paso de las moléculas de agua constituidas por el isótopo ligero en detrimento de aquellas que tienen el isótopo pesado; de allí que el vapor de agua resulte empobrecido aproximadamente en un 1 % en  $^{18}\text{O}$  en relación con el agua de mar de la que procede [106]. Una nube al transportarse hasta las latitudes más altas se condensa parcialmente. Como la condensación es el fenómeno inverso a la evaporación, las moléculas de agua (en forma de líquido, en sobrefusión o de cristales

de hielo) presentes en la nube contienen preferentemente el isótopo pesado  $^{18}\text{O}$ . Éstas son las que desaparecen en las lluvias o en las tormentas de nieve. El vapor de agua que permanece en la nube tiende a empobrecerse hasta constituirse en un isótopo pesado. Este empobrecimiento alcanza su nivel máximo en las latitudes más altas, de manera que la composición isotópica del oxígeno de las nieves que caen en Groenlandia o en el Antártico es pobre en  $^{18}\text{O}$ , de un 3 a un 5 en relación con el agua de mar. Los geoquímicos pueden medir con precisión una variación de la proporción  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  mil veces más pequeña que dicha diferencia. Se trata, por tanto, de un fenómeno importante que se puede explotar desde el punto de vista paleoclimático. Similarmente [106]:

Cuando un casquete glacial se desarrolla en la superficie de los continentes, bloquea una importante cantidad de agua y el nivel general de los mares desciende. Para evaluar la magnitud del fenómeno, los oceanógrafos sondan la zona costera para encontrar el rastro de varios bajos de niveles marinos. De esta forma han podido seguir, en especial entre cien y ciento veinte metros de profundidad, el nivel alcanzado por el mar en el parosismo de la última glaciación. Puesto que los hielos polares siempre son pobres en  $^{18}\text{O}$ , las moléculas de agua que contienen este isótopo pesado se quedaban preferencialmente en el océano cuando crecían los casquetes glaciales. Esta destilación fraccionada tiene como consecuencia que la relación  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  del agua del mar aumenta conforme crece el volumen de los hielos compactados en los continentes.

Es de anotar que hoy en día existen espectrómetros de masa de altísima precisión que sirven para medir la abundancia de los isótopos.

Con el propósito de registrar las variaciones de la composición isotópica del agua de mar y reconstruir las fluctuaciones de los volúmenes de los hielos continentales a lo largo de la historia, Cesare Emiliani<sup>4</sup> aportó elementos para obtener registros mediante mediciones realizadas en conchas de foraminíferos ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) (organismos pertenecientes al zooplancton) que le permitieron estudiar las variaciones isotópicas del oxígeno y del carbono marino. Así mismo, el análisis de la concentración de algunos elementos químicos presentes en pequeñas cantidades le permitieron extraer conclusiones sobre las temperaturas del agua, el volumen de los hielos, e incluso, el funcionamiento de las corrientes marinas.

Por medio del método propuesto por Emiliani es posible encontrar, además, las variaciones en el hábitat marino de sus diferentes especies, las cuales también son indicativas de la evolución climática. En su publicación de 1955 registra a partir de una de las muestras más antiguas, la existencia de por lo menos cinco glaciaciones. Los depósitos glaciares incluyendo las morrenas se identificaron en los Alpes (de la más antigua a la más moderna) como Günz, Midel, Riss y Würm. Estas mismas glaciaciones se encontraron en Estados Unidos y se denominaron, respectivamente: Nebraska, Kansas, Illinois y Wisconsin, y definen cuatro oscilaciones en los avances y retrocesos continentales de las placas de hielo. Éstas son las más grandes de todos los episodios glaciales; las evidencias sedimentarias más antiguas de las

---

<sup>4</sup> Cesare Emiliani (1922-1995) es el fundador de la paleo-oceanografía.



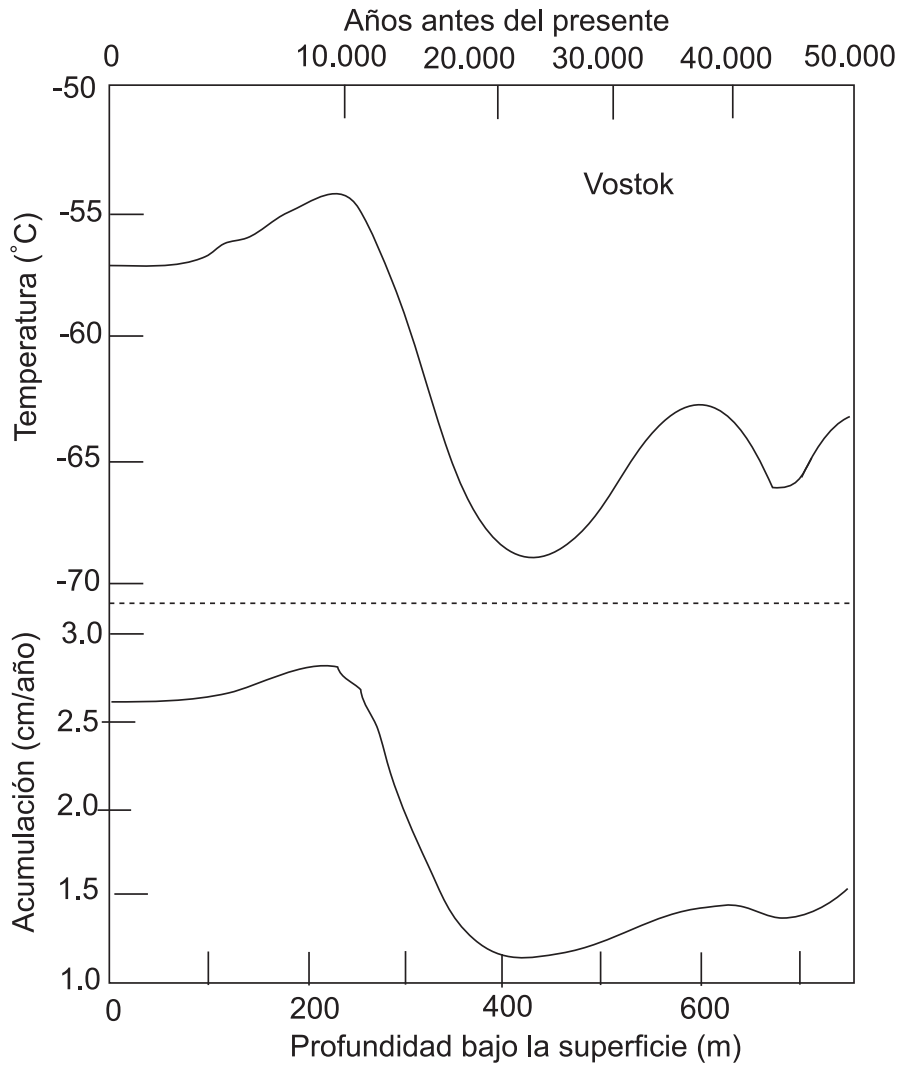
oscilaciones continentales de las placas de hielo fueron borradas por avances mayores posteriores.

### 2.4.3 Núcleos de hielo en la Antártida y en Groenlandia

Las capa de hielo de la Antártida y de Groenlandia son las dos masas de hielo más grandes de la Tierra. La capa de hielo de la Antártida tiene una área de unos  $13 \times 10^6 \text{ km}^2$  y contiene más del 80 % de las reservas de agua del mundo. La capa de hielo de Groenlandia (la contraparte de la Antártida en el hemisferio norte) es diez veces menor y presenta respuestas más rápidas a los cambios ambientales [26]. Otra gran capa de hielo se encuentra en la meseta del Tíbet.

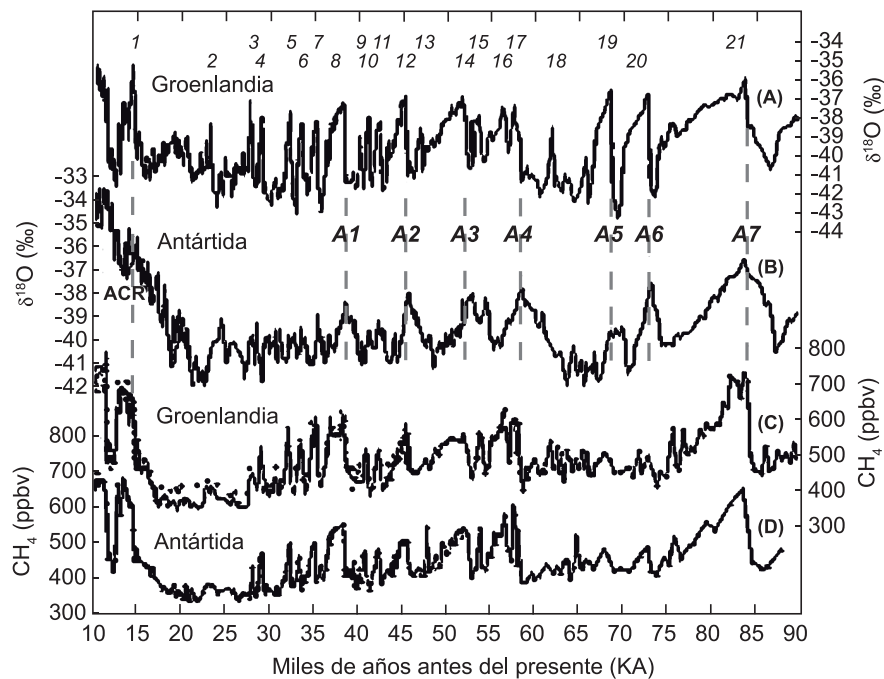
Los núcleos de hielo obtenidos en las perforaciones de la Estación de Vostok por Rusia, Francia y los Estados Unidos –a 3 623 m por debajo y 130 m por encima del lago subglacial de Vostok– han permitido obtener registros sobre la composición atmosférica y el clima en los últimos cuatro períodos glaciales-interglaciales pasados. La figura 2.4 (adaptada de [27]) muestra, por ejemplo, la temperatura superficial en la Antártida central durante el máximo del último glacial, al igual que la acumulación anual de nieve: el incremento de la temperatura en Vostok desde el máximo del último glacial hasta el período caliente actual es alrededor de  $8^\circ\text{C}$ , pero el perfil de temperatura en las capas de hielo sugieren que la diferencia de temperatura pudo haber sido de  $15^\circ\text{C}$ .

En la Antártida se han identificado más de 70 lagos bajo la capa de hielo antártico, entre ellos se destaca el lago de Vostok que es un gigantesco lago subglacial de  $14\,000 \text{ m}^2$ : unos 240 km de largo por 50



**Figura 2.4.** Temperatura y tasa de acumulación de nieve en Vostok.

km de ancho, ubicado bajo 3 750 m de hielo en su parte sur y bajo 4 150 m de hielo en su parte norte [28, 29]. La existencia de este lago es especialmente importante para investigaciones microbiológicas en búsqueda de vestigios de antiguas formas de vida en la Tierra.



**Figura 2.5.** Comparación de la presencia de ciertos gases en núcleos de hielo en la Antártida y en Groenlandia. Obsérvese que el tiempo corre de derecha hacia la izquierda.

Los núcleos de hielo de Groenlandia también proporcionan registros de alta precisión sobre el cambio del clima de la región para el último período glacial y para la desglaciación. La relación de isótopos de oxígeno  $\delta^{18}\text{O}_{\text{hielo}}$  en los núcleos, al igual que otros gases, es un indicador convencional de la temperatura ( $T$ ), como se ilustra en la figura 2.5 (adaptada de [31]) y en los resultados de [30]:

$$T = \frac{\delta^{18}\text{O}_{\text{hielo}} - 0.6}{0.356} + 67.5 (\text{°C}).$$

El calentamiento abrupto más reciente ocurrió al finalizar el período frío Younger Dryas (YD), hace unos 11 570 años antes del presente. Se estima que la magnitud de la transición YD/AP fue entre 5 °C y 10 °C. Cuando se aplica la fórmula antes enunciada se obtienen los siguientes resultados [30]: temperatura promedio de  $-46.5\text{°C}$  durante los últimos 100 años del Younger Dryas (11.74 KA-11.64 KA) y  $-36.2\text{°C}$  durante los últimos 60 años del período preboreal (correspondiente al lapso 11.615 KA-11.555 KA), con un cambio de temperatura total de  $10.3\text{°C}$ . Análisis adicionales en el mismo trabajo conllevan a un resultado final de  $10 \pm 4\text{°C}$ .





Desde la segunda mitad del siglo XIX, los avances en la medicina profiláctica permitieron un alto ritmo del crecimiento de la población, la llamada explosión demográfica. La producción agrícola en buena medida respondió a esta creciente demanda gracias a la denominada revolución verde, que incluyó fertilizantes sintéticos y encontró un clima más apropiado: un aumento de la temperatura promedio mundial, que dejó atrás la denominada pequeña glaciación. En la década de 1970, el fenómeno de aumento de la temperatura pareció revertirse y la temperatura atmosférica descendió, hecho que encendió alarmas. No pocos estudios prevenían sobre las consecuencias geopolíticas que una hambruna masiva podría generar si bajaba la temperatura media; no se descartaban guerras como consecuencia de migraciones masivas. A mediados de la década de 1980, se revertió nuevamente la tendencia y la temperatura creció en forma sostenida.

Hoy las comunidades científica, económica y política alertan sobre posibles cataclismos que pueden desencadenar el efecto invernadero. El “principio de previsión”, hace necesario tomar medidas que atenúen, o eliminen las consecuencias de un calentamiento anormal de la temperatura de la atmósfera. Estas acciones deben realizarse aun cuando no existe un consenso sino una educada opinión altamente mayoritaria, sobre la causa antrópica del calentamiento atmosférico.

El libro “CAMBIO CLIMÁTICO. Glaciaciones y calentamiento global” desarrolla la temática anterior, remontando la historia a un pasado que sólo deja huellas geológicas pues es anterior a la existencia de la humanidad.