

# La arquitectura en un clima de cambio

Una guía para el diseño sostenible

Peter F. Smith



EDITORIAL REVERTÉ



# La arquitectura en un clima de cambio

Una guía para el diseño sostenible

Peter F. Smith

*Prólogo y epílogo*  
Margarita de Luxán

*Traducción*  
Maysi Veuthey



EDITORIAL  
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México

Edición original:

Copyright © 2001, 2005, Peter F. Smith. *All rights reserved*

*Architecture in a Climate of Change*

Architectural Press

An imprint of Elsevier Limited of The Boulevard, Oangford Lane,  
Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK

Esta edición:

© Editorial Reverté, Barcelona, 2017, 2018

Edición en papel:

ISBN: 978-84-291-2096-7

Edición en ebook (PDF):

ISBN: 978-84-291-9686-3

© Traducción:

Maysi Veuthey

Editorial Reverté, S.A.

Calle Loreto 13-15, local B

08029 Barcelona

Tel: (+34) 93 419 3336

Fax: (+34) 93 419 5189

reverte@reverte.com

www.reverte.com

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede realizarse con la autorización de sus titulares, salvo las excepciones previstas por la Ley 23/2006 de Propiedad Intelectual, y en concreto por su artículo 32, sobre 'Cita e ilustración de la enseñanza'. Los permisos para fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra pueden obtenerse en Cedro (Centro Español de Derechos Reprográficos, [www.cedro.org](http://www.cedro.org)).

# 1449

# Índice

Prólogo .....	XI
Prefacio.....	XV
Agradecimientos .....	XVII
Introducción .....	XIX
<b>1. Cambio climático, ¿proceso natural o humano? .....</b>	<b>1</b>
El ciclo del carbono.....	1
El efecto invernadero .....	2
Cambio climático, el registro paleoclimático .....	3
Causas de la fluctuación climática .....	5
Las pruebas .....	8
<b>2. Predicciones .....</b>	<b>15</b>
Recientes incertidumbres .....	19
¿Qué se está haciendo? .....	21
Perspectivas para la energía .....	23
La opción nuclear .....	26
<b>3. Tecnologías de energías renovables. El medio ambiente marino .....</b>	<b>29</b>
Retrato energético del Reino Unido .....	29
Energía procedente de ríos y mares .....	31
Generación hidroeléctrica .....	31
Hidráulicas de pequeña escala .....	33
Sistemas de «agua fluyente» .....	33
Energía de las mareas .....	34
<b>4. Tecnologías de energías renovables. El resto del espectro .....</b>	<b>45</b>
Energía solar pasiva .....	45
Energía solar activa .....	46
Electricidad solar térmica .....	46
El concentrador parabólico solar térmico .....	47
Energía fotovoltaica .....	48
Energía eólica .....	49
Utilización de la biomasa y los residuos .....	50
Hidrógeno .....	54
Energía nuclear .....	54
<b>5. Técnicas de bajo consumo de energía para viviendas .....</b>	<b>57</b>
Sistemas de construcción .....	58
Diseño solar .....	59
Tipos de colectores solares térmicos .....	67
Ventanas y acristalamiento .....	69

<b>6. Aislamiento</b> .....	<b>75</b>
La variedad de opciones de aislamiento .....	76
Alto aislamiento y superaislamiento .....	79
Materiales aislantes transparentes .....	82
Aislamiento: los riesgos técnicos .....	85
<b>7. Energía doméstica</b> .....	<b>87</b>
Sistemas fotovoltaicos .....	88
Microcogeneración .....	94
Células de combustible .....	97
Energía incorporada y materiales .....	99
<b>8. Edificios de energía avanzada y de energía ultrabaja</b> .....	<b>101</b>
El proyecto Beddington Zero Energy Development (BedZED) .....	102
La ecovivienda Millennium de David Wilson .....	102
Casa del futuro, Sur de Gales .....	104
Las perspectivas para la madera .....	106
El entorno exterior .....	111
Lista de control resumida para el diseño energéticamente eficiente de las viviendas .....	112
Informe de ARUP Research para el programa Innovation Programme 2004 del ministerio de comercio e industria británico .....	115
<b>9. La captación del viento y del agua</b> .....	<b>117</b>
Turbinas eólicas pequeñas .....	117
Tipos de turbinas de pequeña escala .....	120
Sistemas integrados en edificios .....	123
Conservación del agua en las viviendas .....	124
Electrodomésticos .....	126
<b>10. Edificios existentes: un reto y una oportunidad</b> .....	<b>129</b>
El remedio .....	133
Ejemplo práctico .....	133
<b>11. Técnicas de baja energía para edificios de uso distinto     al de viviendas</b> .....	<b>139</b>
Principios de diseño .....	139
Consideraciones medioambientales en el diseño de oficinas .....	140
Diseño solar pasivo .....	141
<b>12. Ventilación</b> .....	<b>151</b>
Ventilación natural .....	151
Flujo interno de aire y ventilación .....	151
Ventilación natural no asistida .....	152
Ventilación asistida mecánicamente .....	159
Estrategias de refrigeración .....	164
Refrigeración por evaporación .....	165

Otras estrategias de refrigeración .....	166
La torre ecológica .....	166
Recapitulación .....	172
Aire acondicionado .....	173
<b>13. Opciones de energía .....</b>	<b>175</b>
La célula de combustible .....	176
Célula de combustible de membrana de intercambio de protones ..	177
Células de combustible de ácido fosfórico (PAFC) .....	178
Célula de combustible de óxido sólido (SOFC) .....	179
Células de combustible alcalinas (AFC) .....	179
Células de combustible de carbonato fundido (MCFC) .....	180
Técnicas de almacenamiento: electricidad .....	183
Aplicaciones de la energía fotovoltaica .....	184
Bombas de calor .....	186
Almacenamiento de energía: calefacción y refrigeración .....	188
Almacenamiento estacional de energía .....	190
Almacenamiento de electricidad .....	191
Sistemas de gestión del edificio .....	192
Herramientas para el diseño ambiental .....	193
Informe de Arup Research and Development para los participantes en el Programa para la Innovación 2004 del ministerio británico de comercio e industria (DTI) .....	194
<b>14. Iluminación: en busca de la luz natural .....</b>	<b>197</b>
Consideraciones a tener en cuenta para el diseño .....	198
El patio .....	199
Repisas de luz .....	201
Acristalamiento prismático .....	201
Tubos de luz solar .....	202
Acristalamiento holográfico .....	202
Pantalla solar .....	202
<b>15. Iluminación: fallos humanos .....</b>	<b>205</b>
Control fotoeléctrico .....	206
Deslumbramiento .....	207
Control de la iluminación y detección de ocupación .....	207
Interruptores .....	208
Gestión del sistema .....	208
Oficinas climatizadas .....	210
Iluminación: condiciones de éxito .....	210
Resumen de las consideraciones de diseño y planificación de la iluminación .....	211
<b>16. Notas de advertencia .....</b>	<b>213</b>
¿Por qué no funcionan las cosas? .....	213
Perfil alto/perfil bajo .....	214
La «demanda de alta tecnología» .....	215

Dificultades de funcionamiento .....	215
Enfermedades relacionadas con los edificios .....	215
Ineficiencias inherentes .....	216
Problemas arquitectónicos habituales .....	216
Problemas técnicos habituales .....	217
Evitar la climatización: las consecuencias .....	217
Fallos habituales que constituyen un despilfarro de energía .....	218
El factor humano .....	218
Resumen de recomendaciones .....	219
Conclusiones .....	219
<b>17. Evaluación del ciclo de vida y reciclaje .....</b>	<b>221</b>
Eliminación de residuos .....	221
Reciclaje .....	222
Evaluación del ciclo de vida .....	224
Coste total de la vida útil .....	225
Materiales ecológicos .....	225
Acabados exteriores .....	226
Pinturas .....	227
Materiales y energía incorporada .....	228
Low energy Conference Centre, Earth Centre, Doncaster .....	229
Revisión de la estrategia de reciclaje .....	231
<b>18 Ejemplos de última generación .....</b>	<b>233</b>
La Asamblea Nacional de Gales .....	233
Zuckermann Institute for Connective Environmental Research (ZICER) .....	235
Viviendas sociales .....	238
Beaufort Court, Lillie Road, Fulham, Londres, 2003 .....	238
Beddington Zero Energy Development (BedZED) .....	239
Edificio de emisiones cero del centro de energías renovables Beaufort Court .....	247
<b>19. Diseño medioambiental integrado de áreas urbanas .....</b>	<b>257</b>
Ciudad ecológica del mañana, Malmö, Suecia .....	258
Hacia una ciudad menos insostenible .....	261
<b>20. Una perspectiva desde los Estados Unidos.....</b>	<b>267</b>
Glenwood Park, Atlanta, Georgia .....	270
<b>21 Tecnologías emergentes y perspectivas para el futuro .....</b>	<b>273</b>
Energía para el futuro .....	274
Próxima generación de células solares .....	278
Fotosíntesis artificial .....	280
Almacenamiento de energía .....	280
Almacenamiento de hidrógeno .....	281
Tecnología del volante de inercia .....	281
Avances en la iluminación .....	282

La revolución fotónica .....	283
Materiales inteligentes .....	284
Fluidos inteligentes .....	286
Factores socioeconómicos .....	286
<b>Apéndice I Indicadores clave para un diseño sostenible.....</b>	<b>291</b>
<b>Apéndice II Programa esquemático de sostenibilidad para diseñadores</b>	<b>293</b>
<b>Epílogo.....</b>	<b>301</b>
<b>Índice alfabético .....</b>	<b>315</b>



# Prólogo

Margarita de Luxán\*

Al abrir el original inglés de este libro, *Architecture in a Climate of Change*, nos encontramos un escrito con vocación de texto clásico para entender y plantear las interacciones, los cambios y las adaptaciones que la arquitectura ha de ir integrando en sus procesos de proyectos, edificaciones y ciudades para alcanzar las nuevas exigencias derivadas del cambio climático y de las cambiantes circunstancias energéticas en el presente y en un futuro ya próximo.

Es un libro clásico en su afán de abarcar y comprender un tema en toda su extensión para darle respuestas, desde lo más general en el planteamiento del cambio climático y la discusión que lo acompaña sobre su dualidad como proceso natural o derivado de las acciones humanas, pasando por el análisis de sistemas y soluciones pasivas y activas, hasta lo más específico de las tecnologías emergentes: tipos de nuevas energías, almacenamiento, materiales inteligentes o la revolución fotónica.

Es un libro clásico también en su interés por observarlo todo en profundidad, ordenando los campos por contenidos con problemas y soluciones, y recogiendo ejemplos específicos en un amplio abanico de propuestas, tendencias y opiniones surgidas en el ámbito del Reino Unido, un territorio sensibilizado ante el cambio climático y capaz –como muestra su historia– de crear soluciones arquitectónicas avanzadas.

Este libro se puede leer también como una guía que nos acompañe en el repaso de factores que hay que tener en cuenta al pensar arquitecturas en este acelerado devenir medioambiental actual, y para encontrar posibles soluciones que, en la inmensa mayoría de los casos, son realidades construidas.

---

\* Margarita de Luxán es Catedrática Emérita de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, directora del Seminario de Arquitectura Integrada en el Medio Ambiente (SAIMA) y miembro del Grupo de Investigación para una Arquitectura y un Urbanismo más Sostenibles (GIAU+S).

Se trata de una obra de divulgación teórica, que no intenta entrar en los métodos de cálculo y dimensionamiento, cosa que por otra parte resultaría inviable en la extensión que permite una sola publicación, y por la diversidad de temas tratados, que en la actualidad necesitarían para su cuantificación muy distintos tratamientos científicos, físicos y matemáticos, estudiados con modelos de simulación y programas informáticos muy dispares, debido a la amplitud y variedad de los campos de estudio que abarca.

Si leemos este libro en territorios más cálidos, como los países mediterráneos y España, así como en otros países latinoamericanos, debemos tener presente que las condiciones en que sitúa su discurso son diferentes. Si comparamos temperaturas y radiación en tres latitudes: Madrid (40° de Latitud Norte) o en las islas Canarias (28° LN) con Londres y otras capitales europeas (50° LN), nos encontraremos con lo siguiente:

	CONDICIONES MEDIAS		
	EN LA PENÍNSULA 40° LN	EN CANARIAS 28° LN	EN CAPITALES EUROPEAS 50° LN
Temperatura media anual	14,0 °C	21,2 °C	9,0 °C
Temperatura media en enero	7,0 °C	17,4 °C	2,0 °C
Temperatura media en julio	23,0 °C	24,3 °C	17,0 °C
Horas de recorrido solar en diciembre	9 h	10 h	7 h
Radiación media global diaria anual	4,4 kWh/m <sup>2</sup>	6,0 kWh/m <sup>2</sup>	2,7 kWh/m <sup>2</sup>
Radiación media global diaria en enero	2,0 kWh/m <sup>2</sup>	4,0 kWh/m <sup>2</sup>	0,6 kWh/m <sup>2</sup>
Radiación media global diaria en julio	7,2 kWh/m <sup>2</sup>	8,0 kWh/m <sup>2</sup>	5,0 kWh/m <sup>2</sup>

Es decir: en el Reino Unido cuentan con una cuarta parte de radiación y menos de un tercio de la temperatura en los meses más fríos, y también en verano sus temperaturas y su radiación son menores en un tercio a las que pueden encontrarse en el centro de la Península Ibérica; y aún son mayores las diferencias con las condiciones de las islas Canarias, y lo serían con climas latinoamericanos.

Las advertencias y datos que Peter Smith aporta sobre las condiciones de calentamiento en un futuro relativamente próximo hay que leerlas con gran atención y son muy importantes para otros territorios más cálidos, precisamente por las circunstancias señaladas en los párrafos anteriores, ya que en otras latitudes y condiciones serán aún más preocupantes y peligrosas.

Con soterrado humor inglés, en el apartado ‘Por qué no funcionan las cosas’, el autor se atreve a descubrir asuntos que habitualmente no aparecen reflejados en las publicaciones profesionales, pero que resultan absolutamente indispensables para entender el estado de la cuestión en la realidad.

En nuestro actual ámbito cultural prima el modelo de la ‘naturaleza en evolución’, un modelo que niega la idea de resistencia de los sistemas, pero que sugiere que hemos entrado en una nueva era, marcada por la interacción mutua de la naturaleza y la humanidad, que no podemos decir cómo evolucionará, ya que nunca antes se han dado las circunstancias medioambientales que conforman nuestro entorno. En este modelo también se reconoce que no sólo es incompleta la ciencia que se ha elaborado hasta hoy, sino que el mismo sistema que hemos de estudiar está en movimiento y deriva hacia una situación que no conocemos. En este contexto, el texto de Smith nos ayuda a dirigir la mirada no sólo hacia atrás, sino también hacia un adelante lleno de inseguridades y preguntas.

Es un libro que hay que leer con interés, por su intención premonitória y de aviso ante la tendencia, cada vez menos discutible, del cambio climático y su afección inevitable a los modos de crear y habitar la arquitectura.

*Madrid, noviembre 2016.*



# Prefacio

La lectura de esta obra es fundamental, pues considera tanto el “porqué” como el “qué” de la arquitectura sostenible. Hay ya un acuerdo generalizado en que detener el calentamiento global y sus consecuencias climáticas es probablemente el mayor reto al que tendremos que enfrentarnos en este siglo. Con el crecimiento de la población y, al mismo tiempo, su gravitación hacia las ciudades, los edificios, tanto viejos como nuevos, deben ser un objetivo primordial en la batalla por invertir la demanda de energía basada en los recursos fósiles.

Es necesario que estudiantes y profesionales, así como la industria de la construcción, sean conscientes de la importancia que tienen en la creación de una arquitectura que no sólo mejore la calidad de vida, sino también en que esa calidad sea sostenible.

*Lord Rogers of Riverside*



# Agradecimientos

Querría mostrar mi agradecimiento por su ayuda al ofrecerme las ilustraciones y comentar el texto a: Bennetts Associates, Bill Dunster Architects, Foster and Partners, Michael Hopkins and Partners, Jestico + Whiles, RMJM, Richard Rogers Partnership, Alan Short Architects, Fielden Clegg Bradley, Studio E Architects, David Hammond Architects, Grimshaw Architects Ove Arup and Partners.

También estoy en deuda con el Dr. Randall Thomas por sus valiosas opiniones sobre el texto, con el Dr. William Borclass por proporcionarme la información de sus estudios «Probe», con el Dr. Adrian Pitts, de la Universidad de Sheffield, con Nick White, del Hockerton Housing Project, con Ray Morgan, de Woking Borough Council y, por último, con Rick Wilberforce, de Pilkington plc, por mantenerme al día en la evolución de la industria del acristalamiento.



# Introducción

Esta es una obra que propone cambios en la manera de construir. Aceptarlos exige que haya razones convincentes para reemplazar prácticas establecidas desde hace ya largo tiempo. La primera parte de este libro pretende exponer estas razones con el argumento de que hay pruebas evidentes de que los cambios climáticos que actualmente vivimos se deben, principalmente, a las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) provocadas por la actividad humana. La construcción está especialmente implicada en este proceso con una responsabilidad de aproximadamente el 47 por ciento de las emisiones de dióxido de carbono en las 25 naciones de la Unión Europea. Por tanto, es conveniente que el diseño y la construcción de edificios sea un factor primordial en la ofensiva por mitigar los efectos del cambio climático.

Un principio directriz en la concepción de edificios es el de diseño integrado, esto significa que desde el origen del proyecto debe haber un diálogo constructivo entre arquitectos y servicios de ingeniería. Este libro está pensado para promover la asociación creativa entre los profesionales que intervienen en la construcción, de modo que se alcancen las condiciones óptimas para los usuarios con las mínimas demandas de combustibles fósiles.

Una dificultad que encuentran muchos arquitectos es la de persuadir a sus clientes de la importancia que tienen los edificios en la estrategia general para reducir las emisiones de dióxido de carbono. Los primeros capítulos de este libro explican el mecanismo del efecto invernadero y resumen después la situación actual en relación con el calentamiento global y el cambio climático. Se continúa con un esquema de los esfuerzos internacionales para contener el incremento de gases de efecto invernadero. Nuestra intención es proporcionar argumentos persuasivos a los diseñadores respecto a por qué la manera de enfocar la arquitectura es un elemento vital en la lucha por evitar las peores consecuencias del cambio climático.

China puede servir de muestra de lo que puede ser el futuro. En 2005, alcanzó los 1.300 millones de habitantes; a este ritmo, en 2030 alcanzará 1.600 millones. El factor crucial es que la mayor parte de

la población se concentra en los grandes valles de los ríos Yangtzé y Amarillo y de sus afluentes, un área del tamaño aproximado al de los Estados Unidos. China está al borde de consumir más de lo que es capaz de producir. En 2025 necesitará importar 175 millones de toneladas de grano al año y, en 2030, 200 millones de toneladas, lo que supone el total de las actuales exportaciones mundiales (US National Intelligence Council). Tiene un apetito voraz por el acero y por los materiales de construcción y ya está causando la subida mundial de los precios.

La principal preocupación de China es el suministro de energía para mantener el índice de crecimiento económico. Entre enero y abril de 2004 la demanda de energía creció un 16 por ciento. En 2003, China invirtió 13.000 millones de libras esterlinas en plantas de energía hidroeléctrica, de combustión de carbón y de energía nuclear, un ritmo de expansión que equivale al rendimiento eléctrico total de Gran Bretaña cada dos años. Según un portavoz de la academia de ingeniería china, el país va a necesitar un suministro adicional equivalente a otras cuatro centrales hidroeléctricas como la de las Tres Gargantas, veintiséis minas carboníferas como la de Yanzhou, seis nuevos yacimientos petrolíferos, ocho gasoductos, veinte centrales nucleares y cuatrocientas centrales térmicas.

Durante millones de años, el carbono se ha ido depositando lentamente en la tierra creando enormes reservas fósiles. El problema reside en que estas reservas de carbono están siendo expulsadas como dióxido de carbono a la atmósfera a un ritmo sin precedentes en el registro paleoclimático. La concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> en la época preindustrial era de alrededor de 270 partes por millón por volumen (ppmv). Actualmente es de 380 partes por millón por volumen, aproximadamente, y sigue creciendo alrededor de 20 partes por millón por volumen cada década. El objetivo de la comunidad científica es conseguir estabilizar el CO<sub>2</sub> atmosférico por debajo de 500 partes por millón por volumen para el año 2050, aunque admite, no obstante, que esta cantidad causará graves daños climáticos. Sin embargo, si se mantiene la tendencia actual, podemos esperar concentraciones por encima de 800 partes por millón por volumen en la segunda mitad de este siglo. Dada la ausencia de consenso político, a causa del rechazo de los Estados Unidos a ratificar el Protocolo de Kioto, parece cada vez más probable que la cifra sea mayor que 800, a no ser que se adopten estrategias drásticas y generalizadas que sobrepasen los acuerdos políticos, y es en este punto donde los arquitectos y los ingenieros juegan un papel crucial.

Anualmente, la Tierra recibe energía solar equivalente a 178.000 teravatios, lo que supone aproximadamente 15.000 veces el actual consumo mundial de energía. De ellos, el 30 por ciento se refleja de nuevo al espacio, el 50 por ciento se absorbe y se irradia de nuevo y el 20 por ciento impulsa el ciclo hidrológico. Sólo el 0,6 por ciento se emplea en la fotosíntesis, origen de toda la vida y de las reservas de combustible fósil. La seguridad del planeta depende de nuestra capa-

cidad y voluntad de usar esta energía libre sin provocar efectos colaterales indeseables, como la variedad de contaminantes que se emiten en la quema de combustibles fósiles. Las mayores posibilidades para llevar a cabo este cambio residen en la esfera de la construcción, que en el Reino Unido supone casi el 50 por ciento del total de emisiones de CO<sub>2</sub>. Tenemos la tecnología necesaria para reducir las emisiones a la mitad tanto en los edificios nuevos como en los existentes. Hay proyectos piloto que han demostrado ya que se pueden reducir las emisiones un 80 o 90 por ciento respecto a la pauta actual. La posibilidad de llevar a cabo este cambio general en la manera de diseñar los edificios depende de los arquitectos y de los ingenieros. En los años 1960-1970, los edificios eran los símbolos de la arrogancia del ser humano, capaz de desafiar a la naturaleza en todos sus niveles. Al final del milenio va cobrando protagonismo una nueva actitud que busca la sinergia entre la actividad humana y las fuerzas de la naturaleza. En ningún otro campo puede manifestarse mejor esta sinergia que en el diseño de edificios.

En el año 2000, la Royal Commission on Environmental Pollution (Comisión Británica sobre Contaminación Medioambiental) elaboró un informe sobre *Energía: El clima cambiante*. Concluía que “Para impedir causar mayor daño del que ya se está causando, serán necesarias drásticas reducciones de emisiones a escala mundial durante este siglo y el siguiente. Hay que emprender inmediatamente acciones firmes y efectivas.”

*Peter F. Smith*



# 1. Cambio climático, ¿proceso natural o humano?

Actualmente, ya está generalmente aceptado que el cambio climático es una realidad, pero la cuestión clave es si se trata de un proceso natural en una secuencia de cambios climáticos que vienen sucediéndose a lo largo de todo el registro paleoclimático o si lo está forzando el hombre. Si nos obstinamos en lo primero, entonces todo lo que podemos hacer es esperar adaptarnos lo mejor posible al trastorno climático. Sin embargo, si aceptamos que en gran parte está inducido por el hombre, entonces tenemos que ser capaces de hacer algo al respecto.

Existe un amplio consenso entre los científicos del clima de todo el mundo de que la evidencia clara del cambio climático actual se debe en un 90 por ciento a la actividad humana, fundamentalmente a través de la quema de combustibles fósiles. Esto debería ser suficiente para persuadirnos de que la acción humana puede interrumpir el progreso del calentamiento global y sus consecuencias climáticas.

Una vez entendido el problema, debería resultar inevitable un compromiso por las fuentes de energía renovable y por un diseño arquitectónico bioclimático. El propósito de la primera parte de este libro es animar a asumir este compromiso; pasaremos después a ilustrar el tipo de arquitectura que deberá realizarse como parte de una campaña más amplia para alejar la apocalíptica perspectiva de un catastrófico cambio climático.

## El ciclo del carbono

El carbono es un elemento clave para la vida en la Tierra. Los compuestos de este elemento conforman la base de las plantas, de los animales y de los microorganismos, y los que hay en la atmósfera desempeñan un papel principal al asegurarle al planeta el calor suficiente para mantener su rica biodiversidad.

El mecanismo del ciclo del carbono actúa liberando gradualmente el carbono contenido en las plantas y en los animales cuando estos mueren y se descomponen. Este carbono atmosférico lo absorben después las plantas, que convierten el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en

tallos, troncos, hojas, etc., por medio de la fotosíntesis. Posteriormente, el carbono entra en la cadena alimentaria cuando los animales ingieren las plantas.

Existe también un componente geoquímico en el ciclo, fundamentalmente compuesto por agua marina profunda y rocas. La primera se estima que contiene 36.000 millones de toneladas de carbono y las segundas 75.000 billones de toneladas. Las erupciones volcánicas y la erosión de las rocas desprenden este carbono a un ritmo relativamente bajo.

En condiciones normales, la emisión de carbono a la atmósfera se compensa con la absorción de  $\text{CO}_2$  por las plantas, con lo que el sistema queda en equilibrio, o quedaría si no hubiera interferencia humana.

La principal actividad humana responsable de desequilibrar la balanza del ciclo del carbono es la quema de combustibles fósiles, que cada año añade a la atmósfera otros 6.000 millones de toneladas de carbono por encima del flujo natural. Además, cuando los bosques se convierten en terrenos cultivados, el carbono de la vegetación se oxida a través de la quema y la descomposición. El cultivo del suelo y la erosión añaden más carbono a la atmósfera.

Si se queman combustibles fósiles y se sigue destruyendo la vegetación al ritmo actual, el  $\text{CO}_2$  contenido en la atmósfera se triplicará en el 2100. Incluso aunque se lleven a cabo acciones drásticas a escala mundial para reducir las emisiones de carbono, las concentraciones atmosféricas seguirán siendo el doble en esa fecha.

Con la actual combinación de combustibles, cada kilovatio hora de electricidad consumido en el Reino Unido desprende un kilogramo de  $\text{CO}_2$ . La quema de una hectárea de bosque emite entre 300 y 700 toneladas de  $\text{CO}_2$ .

Estos son algunos de los factores que causan el grave desequilibrio en el ciclo del carbono, lo que está acelerando el ritmo del efecto invernadero, el cual, a su vez, provoca el aumento global de las temperaturas.

## El efecto invernadero

Una diversidad de gases colaboran en la formación de una bóveda sobre la Tierra, que provoca que la atmósfera refleje parte de la radiación solar hacia la superficie terrestre, la cual se calienta aún más; de ahí la analogía con el invernadero. La causa del efecto invernadero es que la radiación de onda larga que la Tierra refleja a la atmósfera vuelve a ser reflejada por los gases traza que hay en las capas más frías de la misma, ocasionando así un calentamiento adicional de la superficie terrestre (Figura 1.1).

Los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y el ozono troposférico (la troposfera son los 10-15 kilómetros más bajos de la atmósfera).

El Sol proporciona la energía responsable del tiempo meteorológico y el clima. De la radiación solar que llega a la Tierra, un tercio se

refleja hacia el espacio y el resto es absorbido por la tierra, la biomasa, los océanos, las capas de hielo y la atmósfera. Bajo condiciones naturales, la energía solar absorbida por estos elementos se equilibra con la radiación emitida por la Tierra y por la atmósfera. Esta radiación terrestre en forma de energía de onda larga, infrarroja, la determina la temperatura del sistema Tierra-atmósfera. El equilibrio entre la radiación y la absorción puede cambiar por causas naturales, como, por ejemplo, el ciclo solar de 11 años. Sin la bóveda invernadero, la temperatura de la Tierra sería 33 °C más fría, con consecuencias obvias para la vida en el planeta.

Desde la Revolución Industrial, el empleo de combustibles fósiles y la deforestación han incrementado en un 26 por ciento las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera. Además, el crecimiento de la población en los países menos desarrollados ha llevado a doblar las emisiones de metano procedentes de los arrozales, del ganado y de la quema de biomasa, siendo el metano un gas de efecto invernadero mucho más poderoso que el dióxido de carbono. Las emisiones de óxido nítrico han aumentado un 8 por ciento desde la época preindustrial (IPCC 1992).

## Cambio climático, el registro paleoclimático

Un gráfico publicado en junio de 1990 en la revista *Nature* (Figura 1.2) puso en alerta a la comunidad científica. Se trataba de datos de muestras de núcleos de hielo, desde hacía 160.000 años y hasta 1989, que mostraban una notable correlación entre la temperatura y las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Revelaban igualmente que

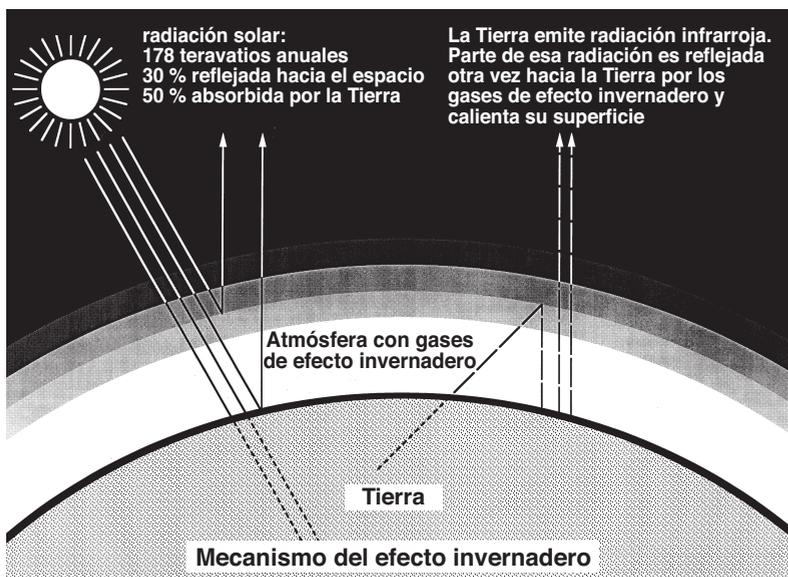


Figura 1.1  
La «manta» invernadero.

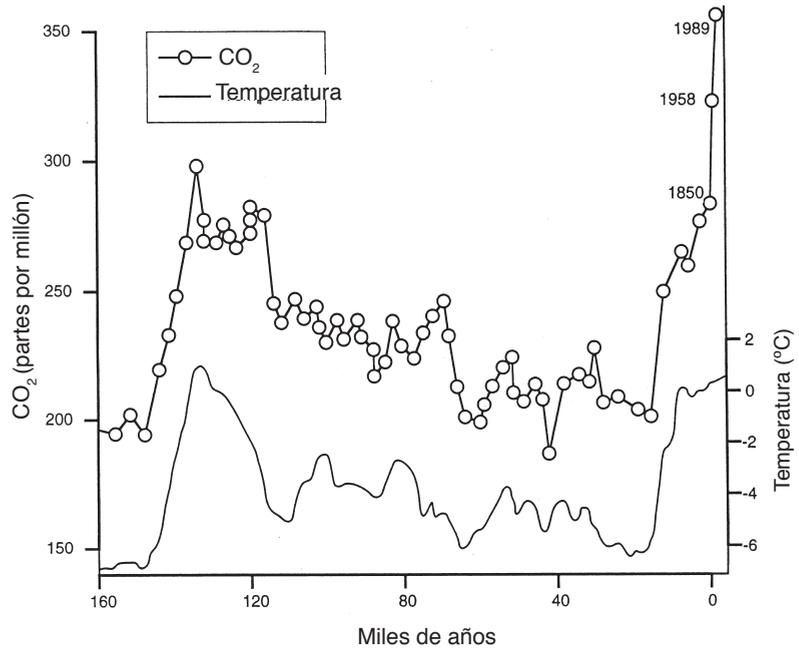


Figura 1.2  
Correspondencia  
histórica entre  
temperatura y dióxido  
de carbono.

las concentraciones actuales de  $\text{CO}_2$  eran más altas que nunca durante ese periodo. Desde entonces, el ritmo de crecimiento, como mínimo, se ha mantenido.

Las muestras de núcleo de hielo proporcionan información por cuatro vías. En primer lugar, las capas fundidas indican el periodo de tiempo que abarca el núcleo. En segundo lugar, la medición de la extensión de hielo fundido y vuelto a congelar después de un verano dado, nos da una imagen de la calidez relativa de ese verano. Un tercer indicador es el isótopo pesado del oxígeno, el oxígeno-18, presente en el aire atrapado en el hielo, que es más abundante en los años cálidos. Por último, el aire contenido en las capas de nieve proporciona una medida del  $\text{CO}_2$  que hay en la atmósfera en un año dado. Otros datos de los núcleos de hielo muestran que en el apogeo de la última Edad de Hielo, hace 20.000 años, el nivel del mar era aproximadamente 150 metros más bajo que el actual.

Otra fuente de lo que se llama datos *proxy* procede del análisis de los anillos de los árboles, los cuales pueden darnos una instantánea del clima de los últimos 6.000 años. Cada anillo de un árbol representa un año de crecimiento, y el tamaño de cada anillo proporciona un indicador fiable del clima de ese año. Cuanto más grueso es el anillo, más favorable es el clima para el crecimiento. En las latitudes del norte, el calor es un factor decisivo. Algunos de las mejores referencias se obtienen en el Círculo Ártico, donde los troncos de los pinos proporcionan registros de 6.000 años.

La Climate Research Unit (Unidad de Investigación Climática) de la Universidad de East Anglia ha realizado un estudio espe-

cial de los datos relativos al cambio climático a partir de diferentes fuentes y ha concluido que existe una estrecha afinidad entre los datos obtenidos de los núcleos de hielo y los obtenidos de los anillos de los árboles. Los registros instrumentales que se remontan hasta el siglo dieciséis son coherentes con los datos *proxy*.

## Causas de la fluctuación climática

Para que sea posible ver los cambios climáticos actuales en contexto, hay que considerar las causas de los drásticos cambios en el pasado.

Una causa principal de la fluctuación climática ha sido la variación de la inclinación del eje terrestre y la trayectoria de su órbita alrededor del Sol. La Tierra está sujeta a la influencia de los planetas vecinos; sus órbitas producen una atracción gravitatoria fluctuante sobre la Tierra, lo que afecta al ángulo de su eje. Cuando la Tierra se inclina, los grandes mantos de hielo crecen y disminuyen a lo largo de un ciclo llamado ciclo de Milankovitch. Sin embargo, gracias a la atracción estabilizadora de la Luna, las variaciones de inclinación se mantienen entre unos límites que permite que se conserve la integridad de las estaciones. Sin la Luna, el eje podría separarse hasta 90 grados de la vertical, lo que supondría que la mitad del planeta tendría un verano permanente y la otra mitad un invierno sin fin.

Se ha calculado que la configuración orbital actual es similar a la del periodo cálido interglaciar de hace 400.000 años. Podríamos, efectivamente, estar en los primeros estadios de un episodio interglaciar con el concomitante calentamiento natural, el cual aumenta con el calentamiento inducido por el hombre. (Para más amplia información sobre las fluctuaciones climáticas durante los pasados millones de años, véase Houghton J. [2004] *Global Warming*, 3ª ed. Cambridge University Press.)

Un segundo factor que provoca el cambio climático es el movimiento de las placas tectónicas y la resultante formación de montañas volcánicas. Las montañas, por sí mismas, aumentan las turbulencias en la atmósfera provocadas por la rotación de la Tierra. También producen fluctuaciones de presión, y todo esto afecta al clima.

Pero es la actividad volcánica lo que puede producir cambios drásticos. La superficie de la Tierra está en constante movimiento. La colisión de las placas explica la formación de montañas. Una característica de la tectónica de placas es que, cuando las placas coliden, una placa se desliza bajo la otra; a esto se le llama subducción. En este proceso, las rocas se calientan y se filtran hacia la superficie formando los volcanes y arrojando grandes cantidades de detritos y CO<sub>2</sub> en el proceso. A corto plazo, esto puede causar un enfriamiento, ya que el polvo impide el paso de la radiación solar, pero en un plazo de tiempo más prolongado, las abundantes inyecciones de CO<sub>2</sub> provocan calentamiento, puesto que el CO<sub>2</sub> tiene una vida relativamente larga en la atmósfera.

Un tercer factor puede considerarse una consecuencia del segundo. Los registros paleoclimáticos muestran que ha habido oleadas periódicas de flujos de hielo en el Atlántico Norte que, a su vez, afectan a las corrientes oceánicas profundas, especialmente a la corriente del Golfo. Para entender por qué las corrientes de hielo afectan a la corriente del Golfo, tenemos que fijarnos en lo que regula esta corriente tan especial.

El agua especialmente salada y cálida de la superficie fluye desde los trópicos hacia el Atlántico Norte. Cuando se va dirigiendo hacia el norte, se va volviendo gradualmente fría y densa y, como consecuencia, cerca de Groenlandia se hunde hacia el lecho oceánico. Esto, por su parte, atrae agua más cálida de los trópicos, y por eso a esta circulación se la llama también el Cinturón transportador oceánico o el Gran convector oceánico. Es el responsable del 25 por ciento del suministro de calor al noroeste de Europa. Entonces, ¿qué relevancia tienen los icebergs?

Cuando estas grandes masas de hielo se fundían en su trayecto hacia el sur, producían enormes cantidades de agua dulce que hacían descender la densidad del agua de la superficie y su capacidad de hundirse en el lecho oceánico disminuía. El efecto era el de impedir el funcionamiento del Convector y, como consecuencia, el norte de Europa estuvo periódicamente inmerso en condiciones árticas. Los científicos están preocupados porque ahora existen pruebas de que este proceso está empezando a suceder debido al deshielo en el extremo sur de Groenlandia. Cuando se dispersó el agua del derretimiento de los icebergs, el Convector oceánico empezó de nuevo a funcionar llevando a un rápido calentamiento. Este ciclo se dio 20 veces en 60.000 años, y los datos indican que mientras que el enfriamiento era relativamente lento, el calentamiento fue rápido: entre 10 °C y 12 °C en cada ciclo. Por alguna razón, estas incursiones de los icebergs se detuvieron hace 8.000 años, permitiendo condiciones relativamente estables que facilitaron el desarrollo de la agricultura y, finalmente, la emergencia de civilizaciones urbanas.

El cuarto factor podría parecer irónico, pues los periodos glaciales pueden estar provocados por rachas cálidas que conllevan la rápida expansión de los bosques, los cuales tienen una gran demanda de CO<sub>2</sub> que toman de la atmósfera. La consecuencia de esta retirada de CO<sub>2</sub> atmosférico es el debilitamiento de la bóveda invernadero, lo que da como resultado un brusco descenso de las temperaturas.

Los cambios en los niveles de energía emitidos por el Sol están también implicados en las fluctuaciones globales. En junio de 1999, la revista *Nature* (vol. 399, p. 437) publicó los resultados de una investigación del Rutherford Appleton Laboratory de Didcot, Oxfordshire, que indicaban que la mitad del calentamiento global durante los últimos 160 años se debía al aumento de la luminosidad solar. Sin embargo, a pesar de que desde 1970 el Sol ha ido siendo menos la causa del calentamiento, el ritmo del mismo ha ido creciendo, lo que indica que debe achacarse al aumento de los gases de efecto invernadero. Algunos de los mejores datos respecto a los efectos climáticos de la variación de los niveles de radiación solar emitida proceden de

África. Los sedimentos del lago Naivasha, en el valle keniano del Rift, revelan los niveles de agua lacustre durante los últimos 1000 años. A los periodos de mucha agua corresponden altas concentraciones de algas en el lecho lacustre, lo que se traduce en un mayor contenido de carbono en el estrato anual de sedimento. Hubo largos periodos de sequía que implicaron hambre y migraciones masivas, siendo el peor periodo entre los años 1000 y 1270 (*Nature*, vol. 403, p. 410).

Por último, no podemos ignorar efectos cósmicos más amplios. Los dinosaurios nos revelarán las repercusiones en el clima de los impactos de meteoritos que causaron la noche perpetua. Todavía se están descubriendo nuevos lugares donde hubo impactos catastróficos, pero si lo que queremos es una imagen real del registro histórico de impactos meteoríticos podemos encontrarla en Venus. La estabilidad de este planeta –sin movimientos de placas ni vegetación que oculten datos– garantiza que tengamos una imagen de bombardeo meteorítico a lo largo de cientos de milenios. La Tierra no habría sido diferente.

Tenemos una clara evidencia histórica de que la vida en la Tierra tiene un punto de apoyo muy precario.

El registro paleontológico muestra que ha habido cinco extinciones masivas en la vida documentada del planeta. La más conocida popularmente es la última, al final del periodo Cretáceo, hace 65 millones de años. Se atribuye al impacto sobre la Tierra de uno o varios grandes meteoritos que en su choque contra la Tierra propulsaron a la atmósfera enormes cantidades de detritos, enmascarando el Sol probablemente durante años. Las plantas fotosintéticas se vieron privadas de su fuente de energía y la cadena alimentaria se colapsó, dando como resultado la extinción del 75 al 80 por ciento de las especies, en particular de los dinosaurios.

Sin embargo, de todas las extinciones masivas, esta es la tercera en importancia, y la mayor atención que se le presta se justifica por su relevancia contemporánea. Al final del periodo Permiano, hace 251 millones de años, una cadena de sucesos catastróficos causó la extinción del 95 por ciento de todas las especies que había sobre la Tierra. La causa principal fue un continuado y prolongado periodo de erupciones volcánicas, erupciones que no procedían de las montañas, sino de grandes fisuras en el suelo, en la región que finalmente se convertiría en Siberia. Una sucesión de acontecimientos causó expulsiones masivas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, lo que llevó a un rápido calentamiento y al crecimiento de las plantas. El efecto fue la absorción de gran parte del oxígeno de la atmósfera, lo que causó el colapso de la mayor parte de la biosfera; las plantas y los animales literalmente se asfixiaron. Durante los 5 millones de años siguientes, el restante 5 por ciento de especies se aferró a una precaria existencia. Hicieron falta 50 millones de años para que el planeta tuviera un grado de biodiversidad semejante al anterior (*New Scientist*, 26 abril 2003, 'Wipeout').

La importancia de esto reside en que la causa de esa extinción masiva fue que el planeta se calentara simplemente 6 °C a lo largo de un breve periodo de tiempo. La razón por la que eso nos afecta

ahora es porque los científicos del clima más prestigiosos del mundo pertenecientes al Grupo Intergubernamental de Expertos del Cambio Climático (IPCC 2002) estimaron que la Tierra podría calentarse alrededor de 6 °C a finales de siglo a no ser que las emisiones globales de CO<sub>2</sub> se hubieran reducido un 60 por ciento en 2050 respecto a las emisiones de 1990.

La evidencia de acontecimientos climáticos anómalos a amplia escala junto al ritmo al que se producen ha convencido a los científicos del IPCC de que gran parte de la responsabilidad depende de la actividad humana.

## Las pruebas

- En las últimas décadas ha habido un notable incremento en la incidencia y en la intensidad de los temporales. Durante los pasados 50 años, los sistemas de altas presiones han aumentado un promedio de tres milibares, mientras que los mínimos de las bajas presiones han descendido en la misma cantidad y, por tanto, se han intensificado las dinámicas de los sistemas meteorológicos. El ciclo hidrológico, al tener extremos más amplios, está llevando, por un lado, al aumento del área desértica, y por otro, a una mayor intensidad de temporales de agua que arrastra las tierras fértiles y las erosiona. En ambos casos hay una pérdida de tierra cultivable y de follaje que fije el carbono.
- En los primeros meses de 2000, Mozambique sufrió catastróficas inundaciones que se repitieron en 2001. En 2002, en toda Europa, se produjeron devastadoras inundaciones que afectaron a ciudades históricas como Praga y Dresde, causando “una de las peores catástrofes por inundación desde la Edad Media” (Philippe Busquin, Comisario Europeo de Investigación). El año siguiente vio un suceso similar con el desbordamiento de los ríos Elba y Ródano.
- En julio de 2004, el sureste asiático vivió unas inundaciones catastróficas debidas a lluvias excepcionales, dejando a 30 millones de personas sin casa en Bangladesh y en el estado indio de Bihar. Al mismo tiempo, China central se vio afectada también por devastadoras inundaciones, mientras que Delhi sufría una importante sequía. Los habitantes de Etiopía se enfrentan a la inanición debido a la falta de lluvias año tras año.
- Las compañías de seguros son un buen barómetro del cambio. Una de las principales, Munich Re, afirma que las reclamaciones debidas a temporales se han doblado cada década desde 1960. En esa década se produjeron 16 desastres con un coste de 30.000 millones de libras esterlinas. En la última década del siglo pasado hubo 70 desastres, que costaron 250.000 millones de libras esterlinas. En los primeros años de este siglo, el ritmo de ha acelerado. Munich Re informó de que los 700 desastres naturales de 2003 se cobraron 50.000 vidas y costaron a las aseguradoras 33.000 millones de li-