

Beyond Global Warming: How Numerical Models Revealed the Secrets of Climate Change

(Más allá del calentamiento global: cómo los modelos numéricos revelaron los secretos del cambio climático)

SYUKURO MANABE Y ANTHONY J. BROCCOLI, 2020. EDITORIAL: PRINCETON UNIVERSITY PRESS, 224 PÁGINAS, PRECIO: 33.16 €, ISBN-10: 0691058865, ISBN-13: 978-0691058863.

Los autores, Syukuro Manabe y Anthony Broccoli, hacen en este recomendable libro un recorrido histórico por la modelización numérica del clima desde su perspectiva de protagonistas esenciales del desarrollo de este campo. La modelización del clima ha permitido conformar gran parte de nuestro actual conocimiento tanto de los climas pasados como de los que esperamos para el futuro. Manabe procedía de Japón y se formó en la Universidad de Tokio en el reconocido grupo de meteorología dinámica del profesor Syono. Tras terminar su doctorado se incorporó en 1958 al Weather Bureau de Estados Unidos por invitación de Joseph Smagorisky para trabajar en modelos climáticos. En 1963 se trasladó desde Washington al recién creado Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL, por sus siglas en inglés) en Princeton, New Jersey, donde continuó trabajando en modelos climáticos. Su influyente trabajo le valió el Premio Nobel de Física del año 2021 junto a Klaus Hasselmann y Giorgio Parisi. Compartió la mitad del premio con Hasselmann por, en palabras del comité Nobel, sus descubrimientos acerca de la "modelización física del clima terrestre, cuantificando la variabilidad y prediciendo de manera fiable el calentamiento global". Broccoli ha trabajado en la simulación de climas pasados y colaborado con Manabe en entender la respuesta del clima a los cambios de los movimientos orbitales de la Tierra durante el último periodo glacial. Actualmente es catedrático en el departamento de Medio Ambiente de la Universidad Rutgers, New Jersey. Manabe y Broccoli se conocieron hace más de 45 años, cuando Broccoli era estudiante en un máster de meteorología en Rutgers y realizó un curso de posgrado en la Universidad de Princeton impartido por Manabe y Abraham Oort. Unos pocos años más tarde, Broccoli a su vez pasaría a formar parte del GFDL, donde trabajó desde 1982 hasta 2003. Aunque el libro partió de las notas de clase del curso que dio Manabe, se reformuló

el enfoque y el resultado final es algo diferente. A los autores les gusta utilizar la metáfora de un "viaje científico" para entender este libro ya que en él se analiza la investigación que más influyó en la evolución de la propia comprensión de Manabe sobre el cambio climático conjuntamente con sus propias aportaciones, algunas de las cuales fueron hechas con Broccoli.

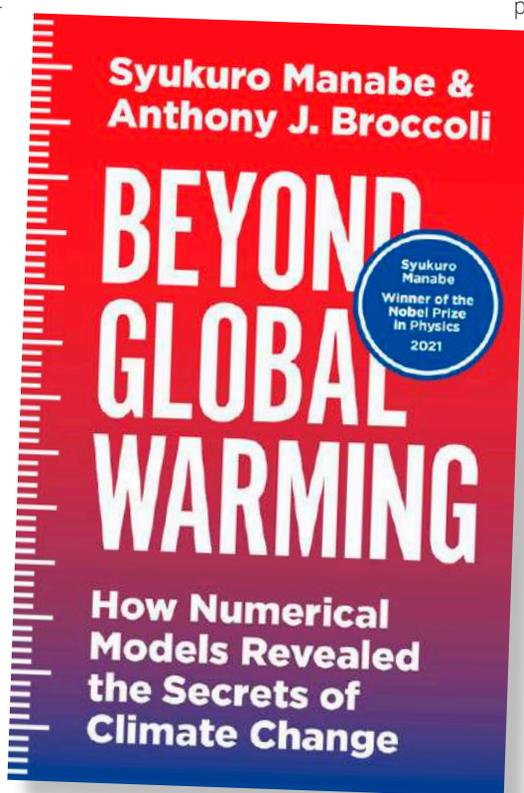
Los dos primeros capítulos del libro repasan brevemente los conceptos fundamentales del efecto invernadero y del calen-

diente modelo de Manabe y Wetherald.

El capítulo dedicado a los modelos climáticos unidimensionales (1D) es esencial ya que éstos han sido fundamentales en el desarrollo de la ciencia del cambio climático. A pesar de su simplicidad en comparación con los modelos tridimensionales (3D) actuales, desempeñaron un papel clave en las primeras etapas de la modelación climática, ya que por su enfoque conceptual facilitaron la exploración de cómo las variables físicas básicas afectaban al clima global. Los modelos 1D permitieron hacer las primeras estimaciones

en los años 1960s del efecto del CO₂ y como el aumento de su concentración en la atmósfera afectaba a la temperatura global. Estos modelos ayudaron a definir y cuantificar el concepto de sensibilidad climática. Los modelos 1D fueron esenciales para explorar los efectos de la retroalimentación del vapor de agua y como el balance radiativo de la atmósfera está influenciado por nubes, aerosoles y otras propiedades atmosféricas. Aunque actualmente los modelos 3D han reemplazado en gran medida a los 1D, estos últimos sirvieron como una base para validar conceptos y algoritmos que luego se integraron en los modelos 3D más sofisticados. Uno de los artículos que se describe en este capítulo, el publicado por Manabe y Richard Wetherald en 1967 titulado "Equilibrio térmico de la atmósfera con una distribución dada de humedad relativa" que se basa en un modelo 1D radiativo-convectivo fue, de hecho, elegido por una encuesta entre especialistas en el tema realizada en el año 2015 (<https://www.carbonbrief.org/the-most-influential-climate-change-papers-of-all-time/>)

como el artículo más influyente en toda la historia de la ciencia del cambio climático. El modelo climático 1D radiativo-convectivo de Manabe y Wetherald incluye una espectroscopia precisa del CO₂, ozono y vapor de agua, convección atmosférica y retroalimentación de vapor de agua. Cuando se introduce en el modelo una concentración atmosférica du-



tamiento global asociado a éste, así como los primeros estudios realizados durante el siglo XIX y principios del XX por Fourier, Chausseure, Tyndall, Arrhenius, Hulbert y Callendar. Mencionemos aquí que las contribuciones de Hulbert han sido durante mucho tiempo no suficientemente reconocidas, si bien su modelo radiativo-convectivo de la atmósfera, aunque tuvo serios problemas anticipó en tres decenios el correspon-

plificada de CO₂ da un cambio de temperatura (sensibilidad climática de equilibrio) de +2.4 °C, que es consistente con las estimaciones más modernas, incluidas las publicadas en el Sexto Informe de Evaluación del IPCC.

En otro capítulo se describen los primeros modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés) de la atmósfera que evolucionaron a partir de los modelos dinámicos de predicción numérica del tiempo (PNT). En 1956 Norman Phillips hizo el primer intento de simular la circulación general de la atmósfera en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, utilizando un modelo simple de dos capas basado en ecuaciones filtradas que se desarrolló para la PNT. El éxito de Phillips en reproducir las características generales de la circulación general con un modelo tan simple contribuyó a que otros grupos desarrollaran nuevos modelos de complejidad creciente. En el libro se describen con cierto detalle dos de ellos: el modelo de UCLA, desarrollado por Minz y Arakawa y el del GFDL, desarrollado inicialmente por Smagorinsky y también por Manabe tras su llegada desde Tokio y su incorporación al grupo en 1958. El grupo del GFDL completó en 1965 un modelo más complejo con ciclo hidrológico y basado en las ecuaciones primitivas con una resolución horizontal de aproximadamente 500 km y 9 niveles. Además, incluía muchas de las parametrizaciones que actualmente poseen los modelos atmosféricos: radiación (onda corta y larga), convección, condensación a gran escala, etc. Este modelo era capaz de simular razonablemente bien, comparado con las observaciones, la distribución global de viento, temperatura y precipitación y parecía ser una herramienta potencialmente muy poderosa para estudiar y predecir el cambio climático.

Tras desarrollarse modelos GCM que reproducían las características esenciales de la circulación general, comenzaron a utilizarse para estudiar los cambios en el clima. En el capítulo dedicado a los primeros experimentos numéricos de cambio de clima se describen con cierto detalle los trabajos que hizo Manabe con Wetherald a mediados de la década de los 1970 en los que se investigó la respuesta del clima primero a una duplicación hipotética de la concentración atmosférica de CO₂ y después a cambios del 2 % en la irradiancia solar. Estos trabajos contribuyeron a comprender el efecto climático de los forzamientos térmicos y a facilitar el desarrollo posterior de modelos aplicados a las proyecciones de cambio climático y modelos

aplicados a la simulación de los periodos glaciales e interglaciales.

Una de las tareas más desafiantes de la ciencia del clima es obtener una estimación fiable de la sensibilidad del clima, que se define como la respuesta de la temperatura superficial media global a un forzamiento térmico específico, dado un tiempo suficientemente largo (es decir, la respuesta de equilibrio). Las sensibilidades de los dos primeros modelos climáticos construidos en GFDL y NASA/GISS eran diferentes entre sí en un factor de aproximadamente dos y todavía persiste una diferencia igualmente grande entre las sensibilidades de los modelos climáticos actuales. Manabe fue uno de los primeros científicos en demostrar que la forma en que se parametrizaban las nubes tenía un gran efecto en la sensibilidad climática de un modelo. Esto sigue siendo cierto en todos los modelos climáticos actuales. La mejora de la modelización de los procesos de retroalimentación radiativa que controlan la sensibilidad del clima es una tarea urgente para reducir esta incertidumbre. Se dedica un capítulo entero a esta cuestión y se menciona la gran importancia de estimar la sensibilidad climática con otras fuentes además de los modelos, como, por ejemplo, estudiando la respuesta climática, en forma de un enfriamiento global temporal, a las erupciones volcánicas o bien utilizando datos geológicos del pasado.

A principios de la década de 1970, se celebró una reunión en el GFDL para explorar la posible colaboración entre modelizadores del clima y paleoclimatólogos. En esa época, un grupo de científicos de la Tierra había emprendido un ambicioso proyecto, el proyecto CLIMAP, para reconstruir el estado de la superficie de la Tierra en el último máximo glacial, que ocurrió hace aproximadamente 21 000 años. Un capítulo del libro se centra en la comparación de las reconstrucciones del clima generadas en el proyecto CLIMAP con simulaciones climáticas. Para ello, se empezaron a utilizar modelos bien con condiciones de superficiales prescritas o con un océano que se limitaba a la capa de mezcla. Con la ayuda de estos modelos un poco más complejos, se hicieron diversos tipos de simulaciones del último máximo glacial, se analizaron las retroalimentaciones relevantes y se hicieron nuevas estimaciones de la sensibilidad de estas nuevas versiones de los modelos. En este capítulo se describe el trabajo de Manabe y Broccoli, a mediados de la década de 1980, en el que determinaron que el modelo GFDL tenía una sensibilidad climática de

3.2 °C. Los autores especulan en el libro que esa cifra está cerca de la sensibilidad real del clima de la Tierra.

Hasta principios de la década de 1980, como se analiza en otro capítulo del libro, se comenzó a analizar la respuesta transitoria del clima a un aumento gradual en la concentración atmosférica de CO₂ utilizando modelos acoplados atmósfera-océano-tierra. Estos modelos ya incluían un módulo para simular las capas profundas del océano, y no solamente la capa de mezcla superficial. En el caso del GFDL se utilizó el modelo de circulación general oceánica que Kirk Bryan había desarrollado durante la década de 1970. Estos modelos acoplados permitieron entender el diferente comportamiento de los dos casquetes polares frente a los forzamientos y la relevancia de la circulación oceánica global para entender la diferente capacidad calorífica de las regiones oceánicas. También permitieron entender el papel del océano profundo en la respuesta de equilibrio del clima, dado un tiempo suficientemente largo para que el clima se ajuste, cuando se incorpora a los modelos el intercambio de calor entre las capas oceánicas superficiales y profundas.

El libro concluye con un capítulo final sobre el cambio global en la disponibilidad de agua. Se discuten los cambios en la distribución espacial de evaporación y precipitación que dan lugar cambios en la humedad del suelo y la escorrentía, incluyendo una reducción de ambas en muchas zonas áridas y semiáridas y una amplificación de las diferencias existentes en cuanto a disponibilidad de agua entre las zonas con escasez y con suficiente agua.

En definitiva, este muy recomendable libro documenta exhaustivamente la carrera científica de Manabe en paralelo con los avances en la modelización del clima de la que él fue uno de sus principales protagonistas. Siguiendo un orden histórico desde finales del siglo XIX, cuando Arrhenius realizó su estudio pionero, se presentan y analizan una jerarquía de modelos climáticos con una complejidad creciente, como modelos de balance energético, modelos 1D de tipo radiativo-convectivo y diferentes versiones de modelos 3D acoplados atmósfera-océano-tierra. Todos estos modelos han permitido, junto a los avances en la observación satelitaria, comprender mejor la respuesta climática a los diferentes forzamientos externos y los secretos del cambio climático, tal y como reza el título del libro.

ERNESTO RODRÍGUEZ CAMINO

NOVEDADES EDITORIALES DE LA AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA (AEMET)

MIGUEL ÁNGEL GARCÍA COUTO

Calendario meteorológico 2025

AEMET (2024). 303 PÁGS. PVP: 6,00 € (VERSIÓN EN LÍNEA GRATUITA EN WWW.AEMET.ES)

Edición 83 de la publicación más emblemática de AEMET: el compendio anual de la meteorología y climatología en España que se edita sin interrupción desde 1943. Como en los últimos años, se mantiene la doble edición en papel y en línea a través de la web de AEMET.

El hilo conductor entre las diferentes secciones de esta edición del Calendario es la fenología. Con textos de Javier Cano y fotografías del propio Javier y de su hijo Carlos, tanto las cubiertas de la publicación como las páginas iniciales de presentación de cada sección incluyen información acerca de algunas especies fenológicas animales y vegetales que son objeto de estudios relacionados con el cambio climático.

Tras el calendario de fiestas de 2025, la publicación se inicia con información relativa a la celebración del Día Meteorológico Mundial de 2024 en AEMET y los premios a la colaboración que entregó la Agencia aprovechando el citado evento. Como colofón a ese apartado, esta edición del Calendario incluye además una breve reseña del homenaje impulsado por AEMET que la ciudad de Zamora le ofreció a la figura del ilustre meteorólogo Francisco Morán, padre de la física del aire española, con el descubrimiento de una placa en su casa natal de la capital zamorana.

A continuación se suceden en la publicación las nueve secciones habituales. Las primeras de ellas, «Calendario» y «Datos astronómicos», contienen la información que el Observatorio Astronómico Nacional facilita habitualmente sobre ortos y ocasos del Sol y la Luna, eclipses, fases lunares, almanaques



cristiano, musulmán y judío, etc.

La sección siguiente, «Climatología», la más extensa junto a la de «Colaboraciones», incluye el estudio de los caracteres climáticos de España durante el año agrícola 2023-2024, con datos mensuales de temperatura y precipitación y su comparación con los valores climatológicos normales, mapas y tablas de datos climáticos, efemérides mensuales, estudio de las olas de calor y de frío, etc. para las estaciones climatológicas de la red principal de AEMET. Del citado estudio se desprende que el año agrícola 2023-2024 ha sido en conjunto húmedo y extremadamente cálido.

A la sección anterior le suceden las de

«Fenología», con información agrometeorológica y fenológica del año agrícola 2023-2024 que esta edición incluye un estudio específico de la golondrina común; «Hidrometeorología», con información sobre el agua precipitada en la España peninsular, el balance hídrico y las precipitaciones en el último año agrícola, incluida la variación anual de los embalses; «Medioambiente», con información sobre la red española de vigilancia de la composición química de la atmósfera a escala regional y datos de 2023; «Radiación solar», con datos de radiación y medidas de ozono en columna en España durante el pasado año agrícola; y «Descargas eléctricas», con mapas de la electricidad atmosférica registrada en España en el año agrícola 2023-2024.

La sección siguiente, la polifacética de «Colaboraciones», cuenta en esta edición con diez artículos que abordan los siguientes temas: la astronomía y los planetas enanos; la observación del tiempo para personas ciegas; la evolución de la predicción meteorológica hacia los servicios climáticos; la corriente en chorro y su descubridor Wasaburo Oishi; la inversión térmica; la desinformación meteorológica en el contexto de las noticias falsas; la fenología del almendro; las olas de calor en Canarias; Arcimis, el repositorio institucional de AEMET; y la figura de Walter Findeisen, uno de los padres de la microfísica de nubes.

Los anexos con la relación de estaciones utilizadas a lo largo del libro, las borrascas de gran impacto registradas durante la temporada y la lista de siglas, acrónimos y abreviaturas ponen el punto y final a la publicación.

Publicaciones electrónicas de AEMET

AEMET (2024). Más información, en la web de AEMET (www.aemet.es, «publicaciones en línea»), desde donde pueden descargarse gratuitamente.

Entre las últimas publicaciones electrónicas editadas por AEMET en su web pueden destacarse las siguientes:

- **Mapas climáticos de España (1991-2020) y ETo (1996-2020)**, de Andrés Chazarra y otros autores (116 pp.). Actualización al periodo reseñado de la obra

homónima editada años atrás pero referida entonces al periodo 1981-2010 para los mapas climáticos y al periodo 1996-2016 para la evapotranspiración potencial de referencia (ETo). Los elementos climáticos considerados en esta nueva edición han sido la temperatura del aire,

la precipitación, el número medio anual de días de nieve, la insolación y la ETo.

- **Publicaciones del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI)**. En 2024 AEMET ha publicado el «Informe de actividades 2021-2022» del CIAI (en inglés).

Guía básica de meteorología

JAVIER CANO SÁNCHEZ

AEMET (2024). 520 PP. PVP: 20,00 €

AEMET ha publicado en 2024 esta guía que, sin duda, se convertirá en una obra de referencia en su ámbito de estudio. La publicación se divide en cuatro partes (La atmósfera, Procesos atmosféricos y condensación, Observación del tiempo y predicción, y Climatología) y dieciséis capítulos, que recogen una buena recopilación de temas desarrollados y completos, con definiciones claras. Las numerosas ilustraciones del libro y la ausencia de formulaciones matemáticas complejas propias de otros tratados de meteorología más especializados dan una visión de conjunto sobre la meteorología y la climatología y facilitan su lectura. La guía contiene además numerosos cuadros explicativos distribuidos por todo el texto que permiten una consulta rápida de los temas abordados en ellos.

Este libro es útil especialmente para quienes por su profesión o por su dedicación están interesados por el tiempo atmosférico, como estudiantes y aficionados en general, y profesionales de la observación meteorológica en particular. Pero la guía también puede constituir una primera inmersión en la meteorología y climatología para el lector menos iniciado en la materia.

El autor ha desarrollado toda su vida profesional en el campo de la meteorología y la climatología, primero en el Instituto Nacional de Meteorología y después en la Agencia Estatal de Meteorología. Su entusiasmo por estas disciplinas comenzó desde muy joven como aficionado y ha combinado su profesión con la fenología, llevando a cabo el seguimiento de numerosas especies de plantas y animales pertenecientes a diferentes grupos taxonómicos. Como con-



servacionista y estudioso de la flora y fauna ibéricas le preocupa las consecuencias que puede tener el cambio climático sobre la biodiversidad.

CAMBIO CLIMÁTICO Y SOCIEDAD: DE LA CIENCIA BÁSICA A LOS SERVICIOS CLIMÁTICOS

Editores:
M. Y. Luna
F. González-Rouco

Publicaciones de la
Asociación Española de Climatología (AEC)
Lana, 4, nº 12



Cambio climático y sociedad: de la ciencia básica a los servicios climáticos

M. Y. LUNA Y F. GONZÁLEZ-ROUCO (EDS.)

AEMET Y AEC (2024). VIII + 419 PP. PVP: 25,00 €

Coedición entre AEMET y la Asociación Española de Climatología (AEC) del XIII Congreso de la AEC celebrado en San Lorenzo de El Escorial del 22 al 24 de enero de 2025.

A lo largo de sus más de cuatrocientas páginas este libro recoge 39 comunicaciones científicas presentadas en el citado Congreso, estructuradas en cuatro ponencias: Modelos y escenarios climáticos; Variabilidad climática y extremos; Servicios climáticos; y Vulnerabilidad social al cambio climático.

Material divulgativo «Medina»

AEMET (2024). Más información, en la web del Grupo Medina de AEMET (<https://medina.aemet.es/>), con opción de descarga gratuita de publicaciones.

Entre el material divulgativo editado por AEMET en 2024 destaca el siguiente:

- Folletos: dípticos «El efecto invernadero», «La atmósfera» y «Trabajar en AEMET». Editados todos ellos en papel, con una extensión de 4 páginas cada uno, versiones electrónicas disponibles en la web de Medina).