

Ciencia del clima y conocimiento de un planeta acoplado

Juan Seguro

Pregunta central

¿Cómo llegó la ciencia del clima a tratar atmósfera, océano, hielo, tierra, radiación y emisiones humanas como partes de un sistema planetario acoplado cuyos cambios podían medirse, modelarse y contrastarse a lo largo de décadas?

Contexto histórico y evolutivo

El conocimiento climático creció a partir de varias líneas inicialmente separadas. La física del siglo XIX estableció que los gases atmosféricos interactúan selectivamente con la radiación. En 1896 Svante Arrhenius calculó cómo los cambios en el dióxido de carbono atmosférico podían alterar la temperatura de la superficie. En 1938 Guy Stewart Callendar combinó estimaciones de combustión, argumentos radiativos y registros de temperatura para sostener que el dióxido de carbono antropogénico ya estaba afectando al clima. Estas afirmaciones seguían siendo inciertas porque las observaciones eran escasas, el ciclo del carbono estaba insuficientemente restringido y los primeros cálculos simplificaban la atmósfera y los océanos.

Una segunda transición llegó con la medición sostenida. El programa de seguimiento de Charles David Keeling desde 1958 y su análisis de 1960 mostraron que el dióxido de carbono atmosférico variaba sistemáticamente con la estación y la latitud mientras aumentaba también con el tiempo. Una tercera transición procedió del modelado numérico. En 1967 Syukuro Manabe y Richard Wetherald utilizaron un modelo radiativo-convectivo para calcular el equilibrio térmico atmosférico con retroalimentación del vapor de agua. En 1979, el informe del National Research Council *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment* trató el dióxido de carbono, las retroalimentaciones y la incertidumbre de los modelos como un problema integrado de evaluación científica. El Primer Informe de Evaluación del IPCC de 1990 organizó después observaciones, forzamientos, modelado, impactos e incertidumbre a escala internacional.

¿Qué podían saber las comunidades antes de esta transición?

Los meteorólogos podían registrar el tiempo local, construir promedios climatológicos e identificar grandes patrones estacionales y geográficos. La espectroscopia y la termodinámica podían explicar partes de la transferencia de calor atmosférica. La oceanografía, la glaciología y la geología aportaban evidencia de cambios ambientales más lentos, mientras PIO-088 había hecho posible la observación planetaria repetida desde satélites. La limitación era la integración: todavía no existía un único marco observacional o computacional que conectara composición atmosférica, transferencia radiativa, circulación, absorción de calor oceánico, hielo, tierra y emisiones humanas con incertidumbre cuantificada.

¿Qué cambió?

El forzamiento de efecto invernadero se convirtió en un problema físico cuantitativo

Arrhenius en 1896 y Callendar en 1938 conectaron el dióxido de carbono con la temperatura planetaria mediante física radiativa. Sus cálculos eran incompletos según los estándares modernos, pero convirtieron la sensibilidad climática en una cuestión numérica y no solo en una especulación cualitativa.

La composición atmosférica se convirtió en un registro planetario continuo

El trabajo de Keeling de 1960 mostró que mediciones cuidadosamente calibradas podían separar el ciclo estacional de un aumento persistente del dióxido de carbono atmosférico. Las series temporales largas transformaron un gas invisible en una variable planetaria trazable cuya tendencia podía compararse con emisiones, intercambio oceánico y procesos biosféricos.

Los modelos se convirtieron en laboratorios para procesos acoplados

Los cálculos radiativo-convectivos de Manabe y Wetherald de 1967 mostraron cómo podían incorporarse retroalimentaciones a un modelo físicamente restringido. Modelos posteriores de circulación general acoplaron de forma más explícita atmósfera, océano, criosfera y tierra. La simulación, desarrollada como práctica epistémica general en PIO-090, se volvió central porque el sistema climático no puede duplicarse experimentalmente a escala planetaria.

La evaluación se convirtió en una institución científica

La evaluación del National Research Council de 1979 y el proceso del IPCC desde 1988 crearon métodos estructurados para comparar observaciones, modelos, incertidumbre y líneas de evidencia competidoras. La evaluación no sustituyó la investigación primaria; convirtió el propio estado de la evidencia distribuida en objeto de síntesis disciplinada.

¿Por qué pudo surgir esta capacidad?

La transición requirió espectroscopia de precisión, termodinámica, redes meteorológicas globales, observaciones oceánicas, registros de hielo y sedimentos, satélites, ordenadores digitales y métodos numéricos. PIO-088 aportó observación remota repetida de la Tierra; PIO-090 aportó simulación ejecutable. También requirió estándares de calibración, intercambio internacional de datos y compromisos institucionales de larga duración, porque las señales climáticas suelen emerger solo en registros mantenidos durante décadas.

A escalas geológicas más largas, la síntesis de tectónica de placas descrita en PIO-089 aportó un marco indirecto para comprender las condiciones de contorno climáticas: las configuraciones continentales cambiantes y las puertas oceánicas alteran la circulación, mientras el vulcanismo, el levantamiento y la meteorización de rocas participan en el ciclo del carbono a largo plazo. Esta relación se clasifica deliberadamente como indirecta. La tectónica de placas no es una explicación del calentamiento antropogénico moderno tratado aquí; forma parte del marco geológico utilizado para interpretar el cambio climático a lo largo del tiempo profundo.

¿Qué formas posteriores de conocimiento hizo posibles?

La ciencia climática acoplada hizo posibles la atribución del cambio observado, las proyecciones bajo vías alternativas de forzamiento, la evaluación regional de riesgos, el razonamiento mediante presupuestos de carbono, la detección de la absorción de calor oceánico y la comparación sistemática de escenarios de mitigación y adaptación. Más ampliamente, estableció un modelo para estudiar la Tierra como sistema interactuante y no como compartimentos atmosféricos, oceánicos y geológicos separados.

Nuevos límites y riesgos

Un modelo global puede ocultar incertidumbre local, procesos no resueltos y cobertura observacional desigual. Los conjuntos de simulaciones cuantifican parte de la incertidumbre, pero no garantizan que se hayan muestreado todos los errores estructurales. Los registros largos pueden verse interrumpidos por cambios de instrumentos, traslados de estaciones y variaciones de calibración. La salida de un modelo también puede confundirse con observación directa, mientras resúmenes políticamente importantes pueden fomentar falsa precisión o citas selectivas. Por ello, el conocimiento climático depende de conservar procedencia, rangos de incertidumbre, comparaciones modelo-observación y sistemas independientes de medición.

¿Qué cambió en la arquitectura del conocimiento?

El planeta se convirtió en un **sistema acoplado, instrumentado y contrastable computacionalmente**. El conocimiento dejó de consistir únicamente en registros meteorológicos o mecanismos aislados. Surgió de la coherencia entre teoría física, largas series temporales, observaciones satelitales, evidencia paleoclimática y modelos numéricos que operan sobre componentes y escalas temporales interactuantes.

Pérdida, exclusión e incertidumbre

La historia del clima se reduce a veces a una sola predicción o a una sola institución. La transición real estuvo distribuida entre física, meteorología, oceanografía, geoquímica, computación y redes globales de observación. Las primeras contribuciones de Arrhenius y

Callendar no deben describirse como modelos climáticos modernos completos, y las evaluaciones posteriores no deben tratarse como fuentes de datos primarios. La cobertura observacional también ha sido geográficamente desigual, con una dependencia sustancial de infraestructuras nacionales y financiación pública sostenida. Debe mantenerse explícita la distinción entre tendencia medida, mecanismo modelado, atribución y escenario proyectado.

Mapa de dependencias

- DIRECTO ← PIO-088 Satélites y la perspectiva planetaria
- INDIRECTO ← PIO-089 Tectónica de placas: mecanismo, síntesis y evidencia convergente
- INDIRECTO ← PIO-090 Redes, simulación y aprendizaje automático

Referencias

1. Arrhenius, S. «On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.» *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 41(251), 237-276 (1896). DOI: 10.1080/14786449608620846.
2. Callendar, G. S. «The Artificial Production of Carbon Dioxide and Its Influence on Temperature.» *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 64(275), 223-240 (1938). DOI: 10.1002/qj.49706427503.
3. Keeling, C. D. «The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere.» *Tellus* 12(2), 200-203 (1960). DOI: 10.1111/j.2153-3490.1960.tb01300.x.
4. Manabe, S. & Wetherald, R. T. «Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity.» *Journal of the Atmospheric Sciences* 24(3), 241-259 (1967). DOI: 10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2.
5. National Research Council. *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment*. National Academy of Sciences, Washington, DC (1979).
6. Houghton, J. T., Jenkins, G. J. & Ephraums, J. J. (eds.). *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press for the Intergovernmental Panel on Climate Change (1990).