

Modelización y predicción en distintas escalas temporales

Servicios de atribución de eventos extremos al cambio climático

Ernesto Rodríguez Camino y Alfonso Hernanz Lázaro

Área de Evaluación y Modelización del Clima, AEMET

El clima de un lugar o región se define como el estado promedio del tiempo y más formalmente como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años. El período promedio habitual es de 30 años, según las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial. Las magnitudes empleadas son casi siempre variables de superficie como la temperatura, la precipitación o el viento. En un sentido más amplio, el clima es la descripción estadística del estado del sistema climático, de sus componentes, la atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera y de las interacciones entre ellas. El concepto de clima hace referencia a escalas temporales superiores a las

asociadas a la meteorología, refiriéndose el clima medio de una localidad o región al promedio de toda la sucesión de estados meteorológicos. El concepto de variabilidad climática hace referencia a las desviaciones respecto a ese estado medio, incluido la ocurrencia de extremos. Desde un punto de vista probabilista, la variabilidad se representa por la anchura de la distribución de probabilidad de una determinada variable (p.ej., la desviación típica) y los extremos se caracterizan por la forma de las colas de la distribución. Es importante distinguir entre variabilidad climática y cambio climático. La variabilidad se representa como fluctuaciones alrededor de la evolución media. Si la evolución media presenta variaciones persistentes en periodos largos (generalmente decenios o períodos más largos) tenemos, adicionalmente, cambio climático. El cambio climático siempre está relacionado con una alteración del equilibrio energético del planeta, bien debida a variaciones en el forzamiento externo que originan cambios en la energía extraterrestre que entra en el sistema, o bien debida a cambios internos o externos que modifican el albedo superficial o la composición química de la atmósfera, alterando así la energía saliente.

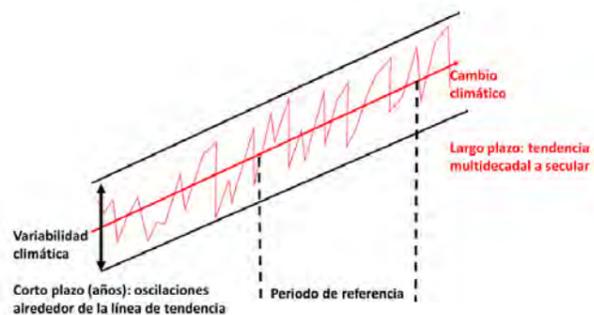
La comprensión del sistema climático y de sus cambios recientes se apoya en una combinación de observaciones, estudios teóricos de los procesos de retroalimentación y simulaciones con modelos climáticos

La variabilidad climática puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático o a variaciones del forzamiento externo tanto natural como antropogénico. La variabilidad interna está asociada a la naturaleza caótica del sistema climático, debida a la presencia de procesos no lineales en cada subsistema, a la existencia de constantes de tiempo físicas diferentes y al modo en que los diferentes subsistemas se acoplan. La variabilidad natural externa es el resultado de forzamientos externos de origen natural, como son los cambios en los parámetros orbitales de la Tierra, los cambios en el forzamiento solar o las erupciones volcánicas. La variabilidad natural es una de las principales causas de los cambios de un año a otro en el clima global de la superficie y puede desempeñar un papel destacado en las tendencias durante varios años o incluso décadas. La contribución de la variabilidad natural al calentamiento global de la superficie durante todo el período



Sentinel es un proyecto multi satélite para la vigilancia terrestre, oceánica y atmosférica de la Tierra © ESA/ Copernicus

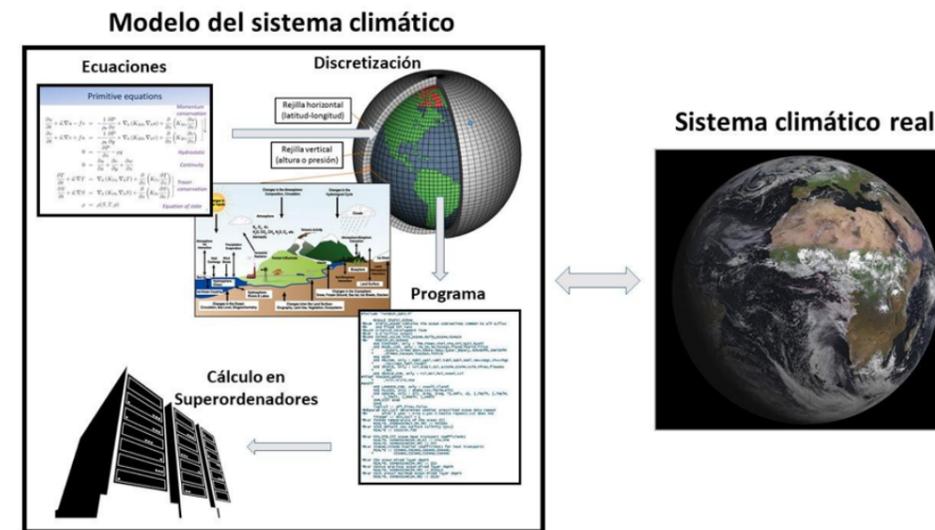
histórico (1850-2020) es pequeña (de $-0,23^{\circ}\text{C}$ a $0,23^{\circ}\text{C}$) en comparación con el calentamiento de aproximadamente $1,1^{\circ}\text{C}$ observado durante el mismo período, que se ha atribuido casi en su totalidad a la influencia humana. La variabilidad climática también puede responder a causas externas no naturales, antropogénicas. Esta variabilidad es debida a la respuesta a las actividades de origen humano, como la perturbación del efecto invernadero por la emisión de gases de efecto invernadero o la alteración de las propiedades físicas de la superficie por cambios en los usos y cobertura vegetal del terreno.



Esquema de los conceptos de variabilidad y cambio climáticos

Modelos climáticos

Los modelos climáticos son una de las principales herramientas para analizar y estudiar el clima. Los modelos climáticos son programas informáticos basados en las ecuaciones que describen la evolución de los distintos componentes del sistema climático (atmósfera, océano, hielos, biosfera,...), sus interacciones y sus procesos de retroalimentación. La utilización de modelos nos permite estudiar y analizar sistemas que, por su complejidad, son inabordables. Los modelos climáticos simulan la dinámica de la atmósfera y el océano en tres dimensiones a partir de las ecuaciones fundamentales que gobiernan estos sistemas, es decir, de principios físicos fundamentales. Estas ecuaciones pueden resolverse para cualquier instante y punto del espacio aunque, por contener términos no lineales, no pueden resolverse analíticamente. Por esta razón, su resolución se lleva a cabo numéricamente reemplazando las ecuaciones continuas, en derivadas parciales, por las correspondientes ecuaciones discretizadas espacial y temporalmente con una resolución determinada y esquemas adecuados para resolver numéricamente las ecuaciones. Un aspecto importante es que al resolver las ecuaciones se hacen ciertas aproximaciones en éstas que simplifican su solución, sin que se pierda información relevante desde un punto de vista climático.



Representación esquemática de un modelo climático que simula el sistema climático real

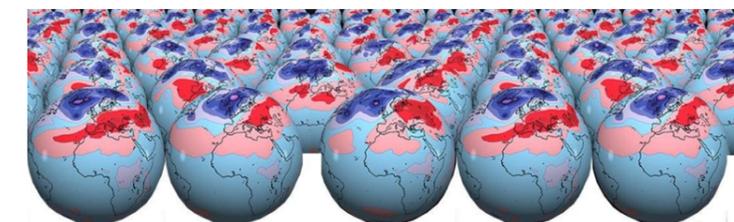
La discretización de las ecuaciones fundamentales a una resolución espacio-temporal dada está limitada por la capacidad computacional. La resolución típica de los modelos climáticos (actualmente entre 100 y 150 km. para los modelos globales) ha aumentado en paralelo con el aumento de los recursos computacionales a lo largo del tiempo. Un aspecto muy importante es que a cualquier resolución espacial siempre habrá procesos que el modelo resolverá explícitamente y otros que no, por ocurrir a escalas inferiores a la resolución del modelo. Estos procesos no pueden ignorarse por ser fundamentales desde el punto de vista físico y afectar a los campos resueltos explícitamente por el modelo.

En general, existe una relación directa entre la escala temporal de interés y el número de componentes del sistema terrestre que deben considerarse. Mientras que la predicción meteorológica (hasta 1 o 2 semanas) precisa solamente de la resolución de las componentes atmosférica y de suelo, la predicción estacional y/o anual precisa adicionalmente la resolución del componente oceánico. Los modelos climáticos más completos, que se utilizan para realizar simulaciones en escalas decadales y seculares, incluyen módulos adicionales para hielo marino, vegetación dinámica, mantos de hielo, química atmosférica, aerosoles, etc. La última generación de modelos climáticos — denominados modelos del sistema terrestre— también incluye el ciclo de carbono y las fuentes y sumideros de éste asociados a la biosfera terrestre y la biogeoquímica marina.

Múltiples simulaciones para explorar incertidumbres

La naturaleza caótica del sistema climático viene determinada por su evolución fuertemente dependiente de las condiciones

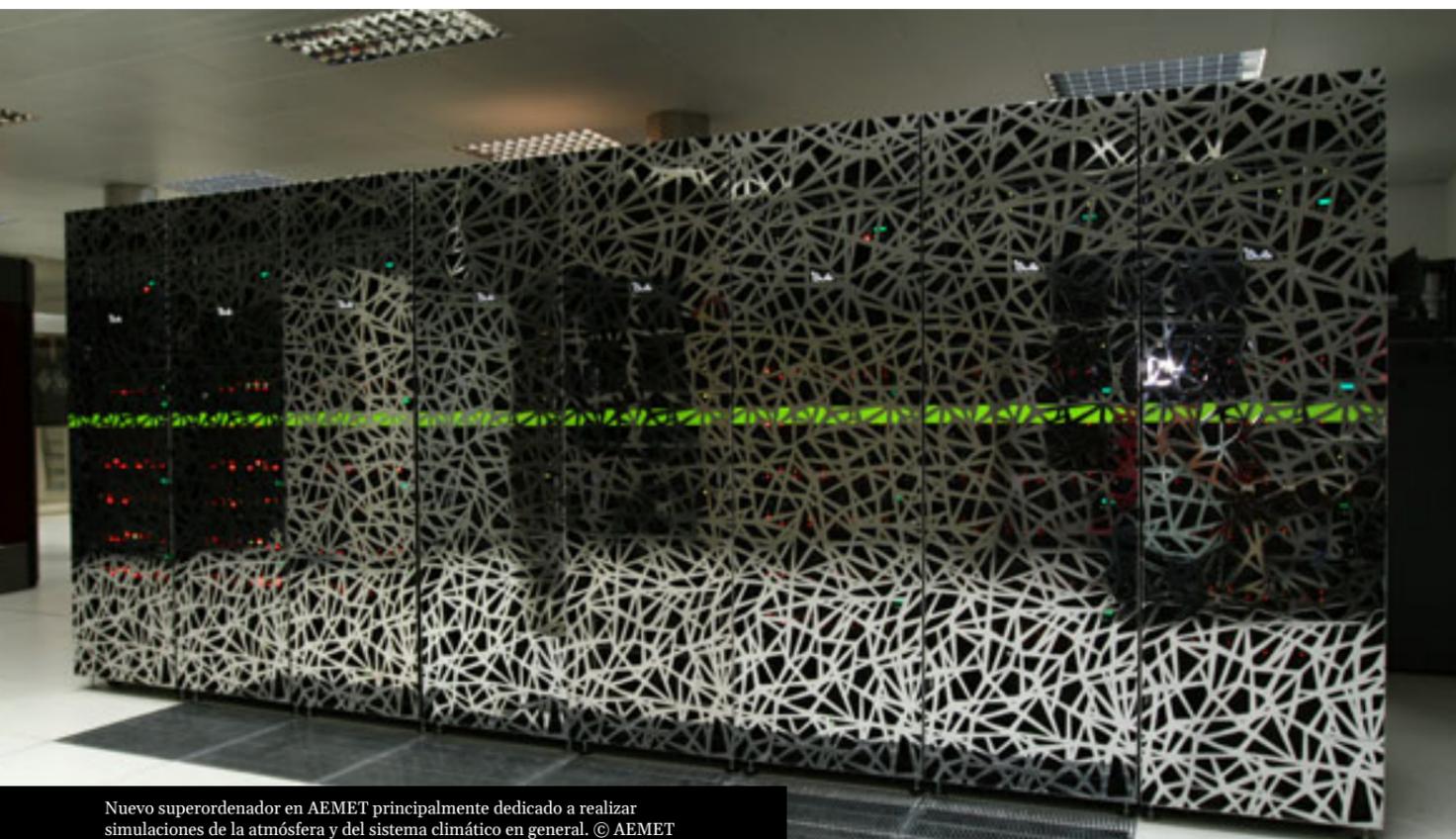
iniciales, por lo que se precisan múltiples realizaciones para estimar la evolución del mismo. Además, en el caso de las simulaciones climáticas, las múltiples simulaciones (o ensembles) exploran la incertidumbre proveniente del forzamiento externo, de la variabilidad natural, de los modelos climáticos, de las técnicas de regionalización o de los modelos de impacto



La multiplicidad de simulaciones permite estimar las incertidumbres en la evolución del sistema climático

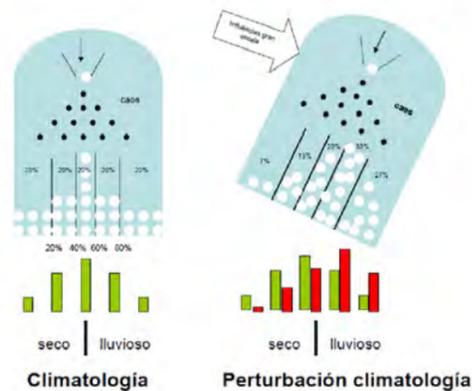
Esta multiplicidad de realizaciones para estimar la evolución del clima (y del tiempo) que explora y describe las distintas fuentes de incertidumbre deberá expresarse en forma probabilística, idealmente mediante funciones de densidad de probabilidad. La figura muestra la analogía utilizando un pinball. El destino de una bola aislada no da cuenta del compor-

Los modelos climáticos son programas informáticos basados en las ecuaciones que describen la evolución de los distintos componentes del sistema climático



Nuevo superordenador en AEMET principalmente dedicado a realizar simulaciones de la atmósfera y del sistema climático en general. © AEMET

tamiento de la distribución de las probabilidades como si lo da la totalidad de las bolas que caen y su distribución en cada casilla inferior. El panel de la izquierda de la figura nos muestra la distribución de probabilidades del clima de referencia, mientras que el de la derecha nos muestra la distribución en un clima perturbado.



Pinball como analogía de una distribución de probabilidades de referencia y perturbada

Predicciones y proyecciones del sistema climático

Una pregunta que surge con frecuencia en el contexto de la simulación numérica del clima, en particular con la realización de proyecciones futuras, es: ¿cómo es posible simular el clima a cien años vista si ni siquiera somos capaces de predecir el tiempo con un horizonte de predicción de dos semanas? La respuesta a esta pregunta es que estos dos problemas son de naturaleza diferente. La predicción del tiempo a corto plazo es un problema de valores iniciales, donde capturar bien las condiciones iniciales es esencial y, por tanto, cualquier desviación con respecto a las condiciones iniciales exactas se traduce en errores que crecen ilimitadamente. Por otro lado, las proyecciones climáticas a largo plazo constituyen un problema de condiciones de contorno, impuestas por los forzamientos. Se trata de problemas de predecibilidad distintos. Mientras que las predicciones del tiempo intentan capturar con la mayor fidelidad posible la trayectoria exacta del sistema, las proyecciones simplemente ofrecen una trayectoria plausible de éste, compatible con las condiciones de contorno. Entre ambas se encuentran las llamadas predicciones climáticas, donde tanto las condiciones iniciales como las condiciones de contorno son relevantes.

Un aspecto importante es que aunque los modelos climáticos se desarrollaron a partir de los modelos de predicción numérica del tiempo adaptados para los objetivos y esca-

las espacio-temporales típicas del clima, en la actualidad se apunta a lo que se denomina una simulación unificada, es decir, la utilización de los mismos modelos para simulación futura en todas las escalas temporales.



Detección y atribución de cambios en el clima

La comprensión del sistema climático y de sus cambios recientes se apoya en una combinación de observaciones, estudios teóricos de los procesos de retroalimentación y simulaciones con modelos climáticos. La detección de cambios en el clima o un sistema afectado por el clima se define como el proceso de demostración de que éstos han cambiado en un sentido estadístico definido, sin indicar las razones del cambio. La atribución de cambios en el clima se define como el proceso de evaluación de las contribuciones relativas de varios factores causales de un cambio o evento con una asignación de confianza estadística. La atribución siempre requiere la utilización de modelos aunque a veces el modelo puede estar implícito en el marco estadístico utilizado.

La realización de experimentos controlados es consustancial al método científico si bien, en general, es muy difícil en el ámbito de las ciencias de la Tierra. En este caso se sustituye el sistema real (la Tierra) por modelos del mismo que permiten la realización de experimentos por medio de simulaciones numéricas. Las simulaciones permiten realizar experimentos controlados con el sistema Tierra, por ejemplo, cambiando la

Un mejor conocimiento de los cambios en la probabilidad y magnitud de eventos extremos relevantes permite una mejor cuantificación de los riesgos de desastres

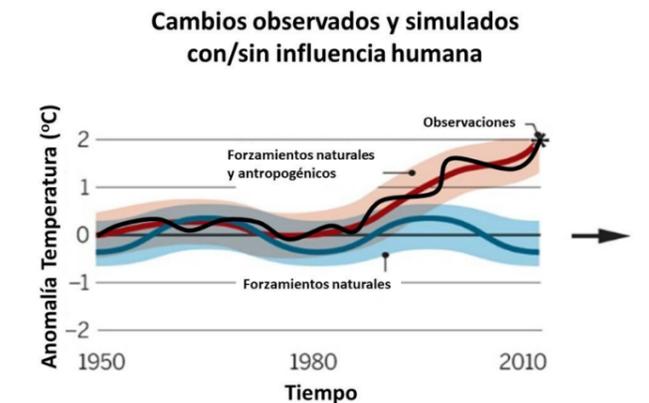


España durante el temporal Filomena © ESA

concentración de gases de efecto invernadero, la radiación solar incidente, la vegetación, etc. Estos experimentos controlados constituyen la base de los estudios de atribución.

Los modelos permiten simular la anomalía de temperatura global en superficie (respecto a un cierto periodo de referencia) observada (y por lo tanto perturbada por el hombre) con razonable precisión y comparar con simulaciones en un clima ideal no perturbado

Una pregunta que surge con frecuencia cuando tiene lugar un evento meteorológico (o climático) o un desastre asociado al evento es si dicho evento o desastre pueden atribuirse o no al cambio climático. Cuando ocurren fenómenos meteorológicos (o climáticos) extremos, tanto la exposición como la vulnerabilidad juegan un papel importante en la determinación de la magnitud y los impactos asociados al desastre resultante. En consecuencia, es difícil atribuir un desastre específico al cambio climático. Sin embargo, la ciencia relativamente nueva de la atribución de eventos permite atribuir aspectos de eventos extremos meteorológicos o climáticos específicos a ciertas causas. No se puede contestar directa y categóricamente a la pregunta de si un evento extremo particular ha sido causado por el cambio climático puesto que los extremos ocurren de forma natural y son el resultado de una mezcla de factores tanto de origen natural como humano. Lo que sí se puede, en



Los modelos permiten simular la anomalía de temperatura global en superficie (respecto a un cierto periodo de referencia) observada (y por lo tanto perturbada por el hombre) con razonable precisión y comparar con simulaciones en un clima ideal no perturbado

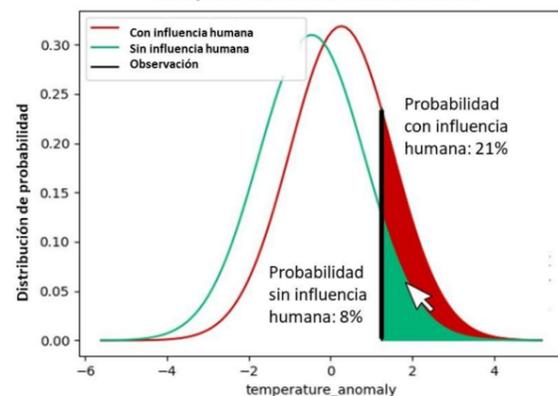
cambio, es cuantificar la importancia relativa de las influencias humana y natural en la magnitud y/o probabilidad de eventos meteorológicos extremos específicos. Esta información es importante para la planificación de la reducción de riesgos de desastres puesto que un mejor conocimiento de los cambios en la probabilidad y magnitud de eventos extremos relevantes permite una mejor cuantificación de los riesgos de desastres.

Analizando caso a caso, se puede cuantificar la contribución de la influencia humana a la magnitud y probabilidad de muchos eventos extremos. Esto se hace mediante la estimación y comparación de la probabilidad o magnitud del mismo tipo de evento entre el clima actual —que incluye el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero y otras influencias humanas— y un mundo alternativo en el que los gases de efecto invernadero han permanecido en niveles preindustriales. Por ejemplo, para un cierto lugar y una estación del año, la función de distribución de probabilidad de la máxima de las temperaturas máximas diarias para los dos periodos climáticos (actual y preindustrial) puede mostrar un desplazamiento hacia las temperaturas más cálidas en el periodo actual perturbado por la influencia humana. Esto se traduce en la mayor probabilidad de valores por encima de un cierto umbral predeterminado. Los modelos climáticos se utilizan para realizar simulaciones que permiten estimar las probabilidades de ocurrencia de un evento específico con ambos climas: sin y con influencia humana. El cambio en la probabilidad del evento extremo en el clima actual en comparación con el clima preindustrial se atribuye a la diferencia entre los dos escenarios, que es la influencia humana. Análogamente al análisis del cambio en las probabilidades de ocurrencia de eventos extremos, se puede también analizar el cambio en la magnitud de una cierta variable climática.

Se han identificado consistentemente aumentos atribuibles en probabilidad y magnitud para muchos extremos calien-

tes. También se han encontrado aumentos atribuibles a algunos eventos de precipitación extrema y sequías. En algunos casos, las grandes variaciones naturales en el sistema climático impiden atribuir cambios en la probabilidad o magnitud de un extremo específico a la influencia humana. A medida que el clima continúa calentándose, se esperan mayores cambios en la probabilidad y la magnitud y, como resultado, será posible atribuir los extremos futuros de temperatura y precipitación en muchos lugares a las influencias humanas. Pueden surgir cambios atribuibles para otros tipos de extremos a medida que aumente la señal de calentamiento.

Cambio de probabilidad con/sin influencia humana

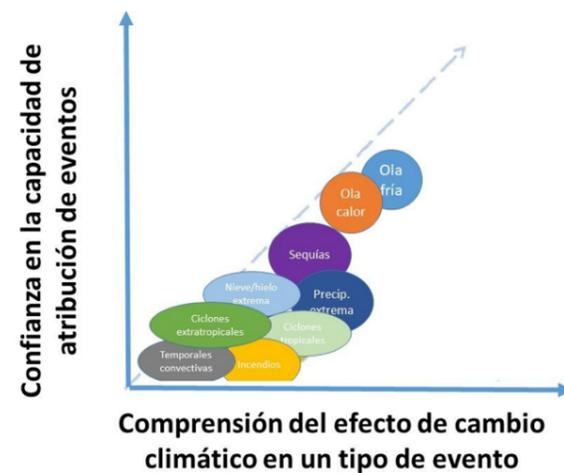


La confianza de los estudios de atribución depende en gran medida de la comprensión del efecto del cambio climático en cada tipo particular de evento extremo y de las actuales capacidades de los modelos climáticos para simular los eventos extremos que se pretenden analizar. En este sentido se puede afirmar que los estudios de atribución pueden ser relativamente fiables para el caso de eventos de escala sinóptica asociados a olas de calor y de frío, mientras que son desaconsejables para eventos tales como temporales convectivos, riesgo de incendios forestales, etc. que no son bien simulados por la actual generación de modelos climáticos bien por razones de resolución o de insuficiente comprensión de los procesos subyacentes.

Atribución rápida de eventos extremos

Los estudios científicos de atribución de eventos extremos al cambio climático normalmente siguen el habitual proceso de revisión por pares y aparecen publicados al menos un año después de que el evento haya tenido lugar, cuando el interés de la atribución de un evento específico ha decaído significativamente tanto entre los medios o entre el público en general. Los estudios de atribución se basan en simulaciones con modelos climáticos que son costosas tanto en tiempo de cálculo como

en recursos humanos para su análisis, lo que impone un retraso considerable para poder contestar de forma científicamente contrastada a la posible relación entre un evento extremo específico y el cambio climático.



Estado de la ciencia de atribución para diferentes tipos de extremos. © NAP 2016)

La experiencia de los servicios meteorológicos muestra la gran importancia que tiene para la comunicación del cambio climático relacionar la ocurrencia de eventos extremos con las condiciones climáticas cambiantes. Es bien sabido que durante e inmediatamente después de que tiene lugar un evento meteorológico o climático extremo hay una gran demanda de información, tanto por parte de los medios de comunicación como del público en general, sobre la posible relación del evento con el cambio climático. Para responder a esta demanda de información durante esta “ventana de oportunidad” para la comunicación del cambio climático, el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (<https://climate.copernicus.eu>) está desarrollando una herramienta de atribución rápida que permite en tiempo casi real analizar eventos específicos y cuantificar en qué medida están relacionados con el cambio climático.

Esta herramienta sienta las bases de un potencial servicio operativo de atribución en Europa. El servicio incluye un protocolo para lanzar el proceso de análisis de atribución, para la realización de estudios rápidos de atribución, así como protocolos de comunicación en cada etapa del análisis. Es esencial para un servicio como éste disponer de nuevos métodos de definición de eventos, de bases de datos observacionales en alta resolución, de simulaciones precalculadas (tanto para el clima actual como para un clima preindustrial no perturbado) y de potentes métodos estadísticos y de análisis de datos. Seguramente, a lo largo de los próximos años veremos que los servicios meteorológicos nacionales disponen de herramientas operativas que permitan estimar, cada vez que tiene lugar un evento meteorológico o climático extremo, el grado de atribución de dicho fenómeno a causas naturales o antropogénicas.

El Servicio de Cambio Climático de Copernicus está desarrollando una herramienta de atribución rápida que permite en tiempo casi real analizar eventos específicos y cuantificar en qué medida están relacionados con el cambio climático

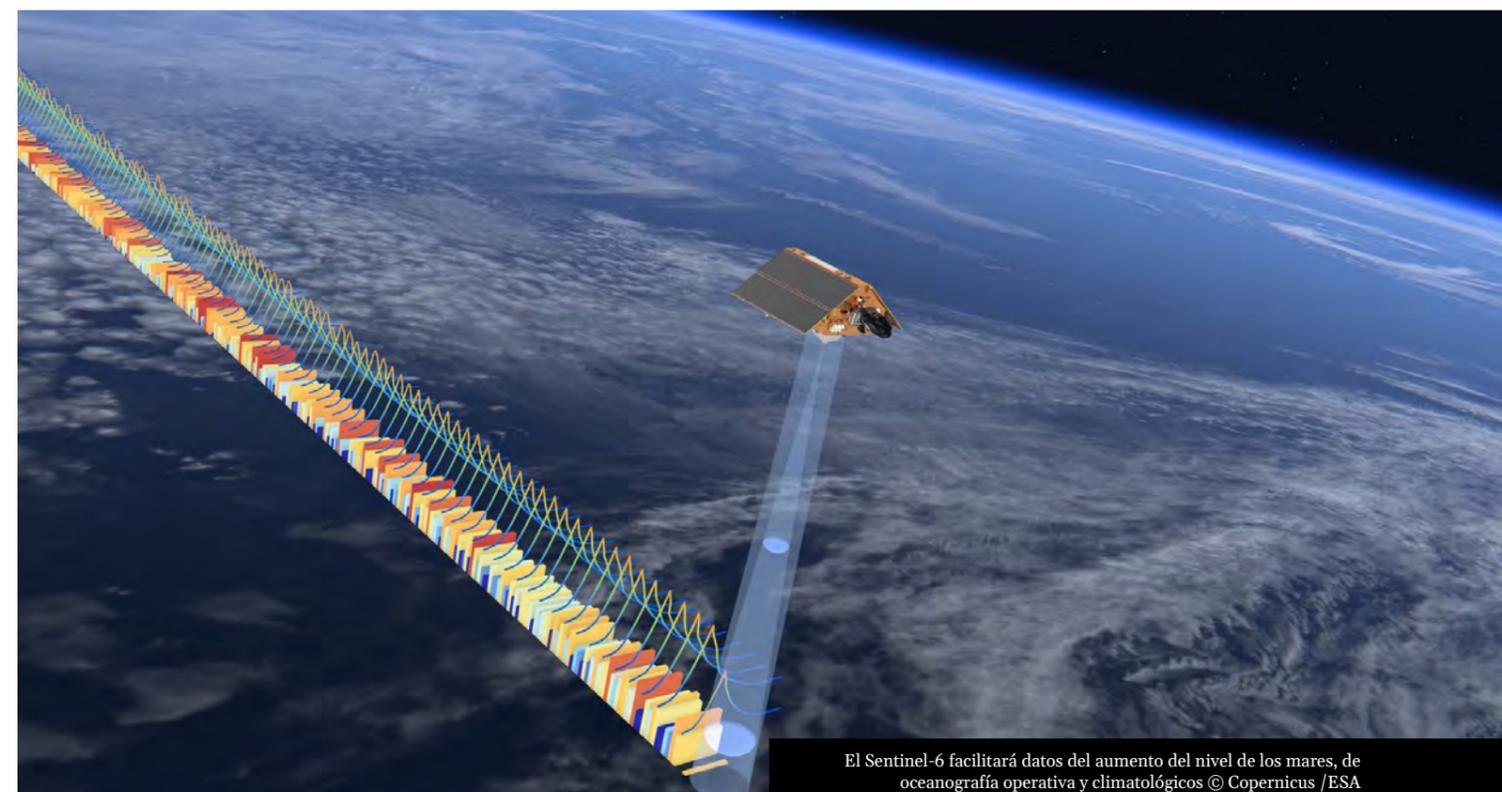
Referencias y lecturas adicionales

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016. Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change. Washington, DC: TheNationalAcademiesPress. <https://doi.org/10.17226/21852>.

Rodriguez-Camino E., J. A. Parodi-Perdomo, J. F. Gonzalez-Rouco, M. Montoya-Redondo, 2018: Proyecciones climáticas. Cap. 29, 470-508. En “ Física del caos en la predicción meteorológica. Historia y fundamentos de la meteorología, sistemas de predicción por conjuntos, predicción probabilista y aplicaciones, cambio climático y aspectos sociales”. Ed. C. Santos Burguete. Pub. AEMET. 1089 pp, 2018, <https://doi.org/10.31978/014-18-009-x.29>

Santos Burguete, C., 2018: Predecibilidad. Cap. 12, 155-166. En “ Física del caos en la predicción meteorológica. Historia y fundamentos de la meteorología, sistemas de predicción por conjuntos, predicción probabilista y aplicaciones, cambio climático y aspectos sociales”. Ed. C. Santos Burguete. Pub. AEMET. 1089 pp, 2018, <https://doi.org/10.31978/014-18-009-x.12>



El Sentinel-6 facilitará datos del aumento del nivel de los mares, de oceanografía operativa y climatológicos © Copernicus /ESA