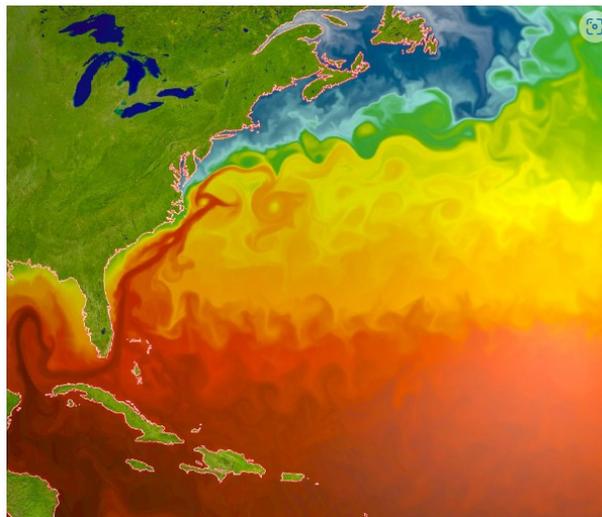


¿Se está acercando la circulación de retorno del Atlántico a un punto de inflexión?

Por [Stefan Rahmstorf](#)

RESUMEN DEL ARTÍCULO

La Circulación Meridional de Retorno del Atlántico tiene un gran impacto en el clima, no solo en el Atlántico norte sino en todo el mundo. Los datos paleoclimáticos muestran que ha sido inestable en el pasado, lo que ha provocado algunos de los cambios climáticos más dramáticos y abruptos conocidos. Estas inestabilidades se deben a dos tipos diferentes de puntos de inflexión, uno vinculado a la amplificación de las retroalimentaciones en el transporte de sal a gran escala y el otro en la mezcla convectiva que impulsa el flujo. Estos puntos de inflexión suponen un grave riesgo de que se produzcan cambios bruscos en la circulación oceánica y el clima, a medida que nuestro planeta se aleja del clima estable del Holoceno y se adentra en aguas desconocidas.



Temperaturas de la superficie del mar a partir de una simulación con el modelo climático global CM2.6 del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos de Princeton, EE.UU. Las cálidas aguas de la Corriente del Golfo se ven en rojo.

Traductor: Luis Lluna Reig

INTRODUCCIÓN

En 1751, el capitán de un barco inglés de comercio de esclavos hizo un descubrimiento histórico. Mientras navegaba a 25 °N en el Océano Atlántico Norte subtropical, el capitán Henry Ellis bajó un "medidor de mar de cubo", ideado y proporcionado por el clérigo británico Reverendo Stephen Hales, a través de las cálidas aguas superficiales hacia las profundidades. Por medio de una cuerda larga y un sistema de válvulas, el agua de diferentes profundidades podía ser llevada hasta

la cubierta donde se leía su temperatura en un termómetro incorporado. Para su sorpresa, el capitán Ellis descubrió que las aguas profundas estaban heladas.

Informó de sus hallazgos al reverendo Hales en una carta: "La temperatura descendió regularmente, a medida que crecía la profundidad, hasta alcanzar los 3900 pies [1188,7 m]: en donde el mercurio del termómetro llegó a 53 grados (Fahrenheit) [11,7 °C]; y aunque después lo hundí a la profundidad de 5346 pies [1629,5 m], es decir, una milla y 66 pies, no bajó más".

Estas fueron las primeras mediciones de temperatura registradas en las profundidades del océano. Revelaron lo que ahora se sabe que es una característica física fundamental y sorprendente del océano mundial: las aguas profundas siempre están frías. Las aguas cálidas de los trópicos y subtropicos están confinadas a una fina capa superficial; el calor del sol no calienta lentamente las profundidades durante siglos o milenios como podría esperarse.

La carta de Ellis a Hales sugiere que no tenía ni idea de la trascendental importancia de su descubrimiento. Escribió: "Este experimento, que al principio no parecía más que movido por la curiosidad, se convirtió entretanto en algo muy útil para nosotros. Gracias a él nos hemos podido dar un baño frío y enfriar el vino o el agua a voluntad, lo que nos resulta muy agradable en este clima tan caluroso" (Ellis, 1751).

De hecho, Ellis había dado con el primer indicio de la circulación de retorno del océano, el sistema de corrientes oceánicas profundas que hace circular las aguas frías de origen polar alrededor del planeta.

Pero no fue hasta varias décadas después, en 1797, que otro inglés, el conde Rumford, publicó una explicación correcta del "útil" descubrimiento de Ellis: "Parece ser extremadamente difícil, si no del todo imposible, explicar este nivel de frío en el fondo del mar en la zona tórrida, si no se supone que sea debido a las corrientes frías de los polos; y la utilidad de estas corrientes para atemperar los excesivos calores de estos climas es demasiado evidente para requerir cualquier ilustración" (Thompson, 1797).

Ahora, más de 200 años después, tenemos una comprensión razonable del complejo sistema de circulación oceánica profunda y, lo que Rumford encontró tan evidente, el papel que desempeña en el clima. Sin embargo, quedan algunos enigmas importantes que pueden ser de importancia fundamental para nuestro futuro.

CINCUENTA VECES EL USO DE ENERGÍA HUMANA

En este artículo, analizo la rama atlántica de la circulación global de retorno, un actor importante en el cambio climático pasado y muy probablemente futuro. Se denomina AMOC (abreviatura de Atlantic Meridional Overturning Circulation). Su flujo hacia el norte de aguas superficiales cálidas y su flujo profundo de retorno frío convierten el Atlántico Sur en una curiosidad: transporta calor desde las altas latitudes meridionales hacia el ecuador, de frío a cálido ([Figura 1](#)). Todas las demás

cuencas oceánicas se comportan "normalmente", alejando el exceso de calor de los trópicos bañados por el sol.

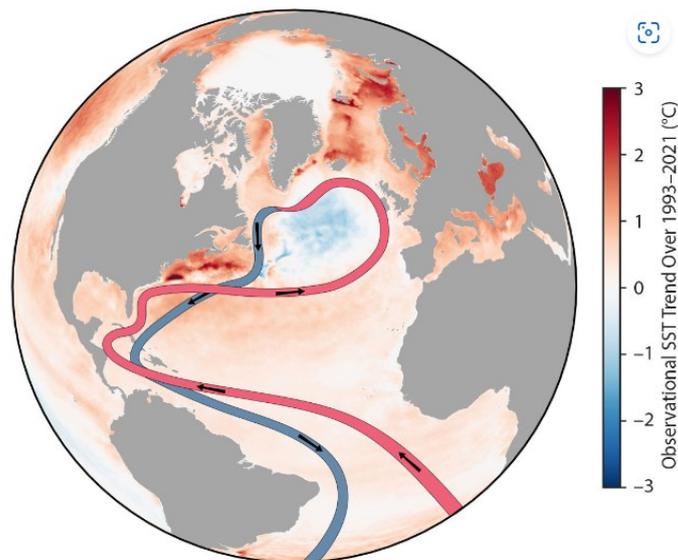


FIGURA 1. Este gráfico muestra un esquema muy simplificado de la Circulación de Retorno Meridional del Atlántico (AMOC) en un contexto de la tendencia de la temperatura de la superficie del mar (SST, por sus siglas en inglés) (°C) de 1993 a 2021 del Servicio de Cambio Climático de Copernicus (<https://climate.copernicus.eu/>). Crédito de la imagen: Ruijian Gou.

En el Atlántico Norte, la circulación de retorno transporta el calor a razón de un petavatio (10^{15} Watio; Trenberth et al., 2019), aproximadamente 50 veces el consumo de energía de toda la humanidad, o 3,5 veces la tasa de absorción global de calor oceánico en las últimas décadas debido al calentamiento global causado por el hombre (Z. Li et al., 2023). Lleva el calor hasta la región al sur de Groenlandia e Islandia, y algo más al norte, más allá de Islandia, hasta los mares nórdicos. Allí, cede generosamente su calor a los vientos fríos de arriba hasta que el agua está tan fría y densa que se hunde en el abismo, alcanzando los 2.000 o 3.000 m de profundidad. Allí, "fluye como un gran río, a lo largo de todo el Atlántico" (Broecker, 1987). El calor liberado a la atmósfera hace que la región del Atlántico Norte sea más cálida de lo que corresponde a su latitud, particularmente a sotavento del océano (Figura 2). También es la razón principal por la que el hemisferio norte es en promedio $\sim 1,4$ °C más cálido que el hemisferio sur, y por la que el ecuador térmico, la latitud donde la Tierra es más caliente, se encuentra a ~ 10 ° al norte del ecuador geográfico (Feulner et al., 2013).

Anomalía de la temperatura del aire en superficie

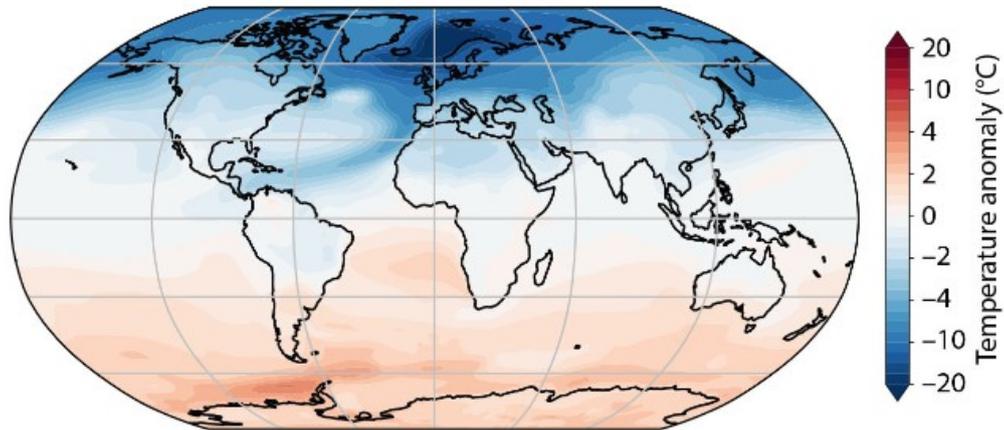


FIGURA 2. "El sistema climático de la Tierra funciona actualmente de una manera beneficiosa para el norte de Europa", escribió el difunto Wally Broecker (Broecker, 1987). Este mapa muestra cómo sería el mundo sin la AMOC. Casi todo el hemisferio norte sería más frío, especialmente Islandia, Escandinavia y Gran Bretaña. *Figura de R. van Westen, adaptada de van Westen et al. (2024).* [Barra de colores: Anomalía de temperatura (°C)]

La temperatura no es el único ingrediente clave de la AMOC, el segundo factor es la salinidad: cuanto más salada es el agua, más densa es. Por lo tanto, la salinidad es un factor importante para el hundimiento descrito anteriormente. Por lo que esta circulación de retorno también se denomina circulación *termohalina*, es decir, una circulación impulsada por diferencias de temperatura y salinidad, en contraste con la circulación impulsada por el viento y las corrientes de marea. Si bien la temperatura tiene una influencia estabilizadora en la AMOC, la salinidad tiene el poder de desestabilizarla.

UNA HISTORIA DE DOS INESTABILIDADES

En 1961, el oceanógrafo estadounidense Henry Stommel (Stommel, 1961) reconoció cómo la salinidad de las aguas atlánticas conduce a un punto de inflexión de la AMOC, un fenómeno que volvió a ocupar los titulares de los periódicos el año pasado y este año. El agua se hunde en el Atlántico Norte porque es lo suficientemente salada (a diferencia del Pacífico Norte; Warren, 1983). El agua es salada porque la AMOC trae agua salada desde los subtrópicos, una región de evaporación neta, a las latitudes más altas, una región de precipitación neta. En otras palabras, la AMOC fluye porque el Atlántico Norte es salado, y es salado porque la AMOC fluye. El huevo y la gallina, o en términos más técnicos, un efecto de retroalimentación autosostenible.

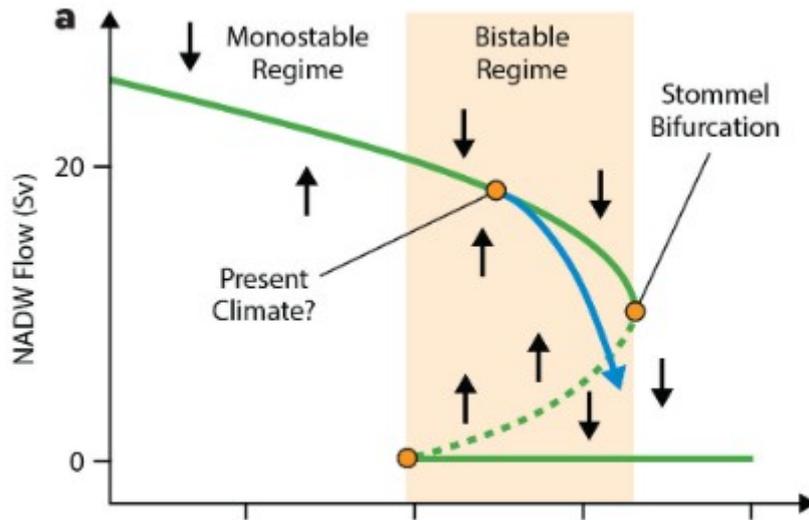
Esto también funciona a la inversa: si el Atlántico Norte se vuelve menos salado debido a una afluencia de agua dulce (lluvia o agua de deshielo), el agua se vuelve menos densa y la AMOC se ralentiza. Por lo tanto, aporta menos sal a la región, lo que ralentiza aún más la AMOC. Este proceso se denomina retroalimentación de transporte de sal. Más allá de un umbral crítico, se convierte en un círculo vicioso que se amplifica a sí mismo, y la AMOC se detiene. Ese umbral es el punto de inflexión de la AMOC (llamado bifurcación de Stommel en la [Figura 3](#)). Como escribió Stommel en 1961: "El sistema está intrínsecamente plagado de posibilidades de especulación sobre el cambio climático".

El modelo de Stommel consistía en una caja de alta latitud y una caja subtropical que estaban conectadas por un flujo de retorno proporcional a la diferencia de densidad entre ellas. El modelo predijo este flujo y la temperatura, salinidad y densidad en ambas cajas. [La Figura 3](#) muestra la fuerza de equilibrio de la AMOC calculada por el modelo de caja de Stommel y el punto de inflexión que encontró.

**NADW
(Aguas profundas del Atlántico norte)**

**Ordenadas:
NADW Flow (Sv) (Caudal de NADW (Sv))**

**1 Sv = 10⁶
m³ / s**

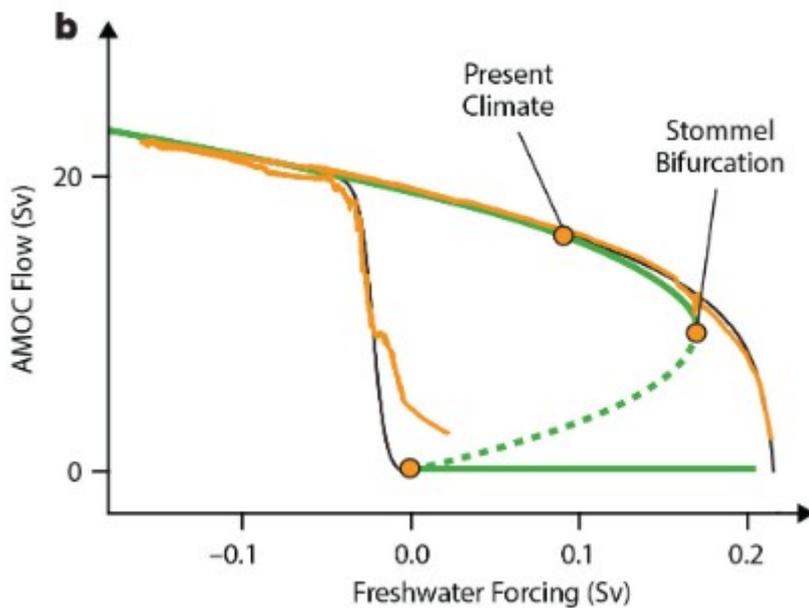


**Eje de abscisas:
forzamiento de agua dulce (Sv)**

**AMOC
(Circulación meridional de retorno del Atlántico)**

**Ordenadas:
AMOC Flow, caudal de la AMOC (Sv)**

**1 Sv = 10⁶
m³ / s**



Eje de abscisas: forzamiento de agua dulce (Sv)

FIGURA 3. (a) Diagrama de estabilidad de la AMOC en el modelo de caja de Stommel, dependiendo de la cantidad de agua dulce que entra en el Atlántico Norte. Las líneas verdes continuas muestran estados de equilibrio estables, la línea verde discontinua es inestable. La curva azul muestra una trayectoria que sale de las líneas de equilibrio durante el cambio climático rápido. Según Rahmstorf (2002) (b) Aquí, la línea naranja traza los equilibrios de AMOC en un modelo tridimensional de circulación oceánica global. La línea negra es el mismo experimento de trazado realizado con el modelo de caja. Las líneas superiores naranja y negra se trazan de izquierda a derecha a partir de la AMOC "activado", las inferiores de derecha a izquierda a partir de la AMOC "desactivado". Según Rahmstorf (1996).

NADW (North Atlantic Deep Water, Aguas profundas del Atlántico Norte)

AMOC (Atlantic Meridional Overturning Current, Circulación de retorno meridional del Atlántico)

Para modelos de caja como el de Stommel, las curvas de equilibrio se pueden calcular analíticamente: la solución para la curva verde es simplemente una

parábola. Para trazar los estados de equilibrio de un modelo complejo, el agua dulce se añade al Atlántico norte a un ritmo que aumenta muy lentamente (por ejemplo, aumentando 0,1 Sv durante 2.000 años; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) para permanecer cerca del equilibrio y ver dónde las retroalimentaciones internas comienzan a dominar el debilitamiento, lo que ocurre más allá del punto de inflexión. Un equipo de investigación holandés en Utrecht desarrolló métodos para calcular directamente los estados de equilibrio en modelos oceánicos tridimensionales (Dijkstra et al., 1995), pero no funcionan en modelos complejos acoplados océano-atmósfera, por lo que es necesario aplicar el enfoque de rastreo de agregar lentamente agua dulce.

En el régimen monoestable (a la izquierda del forzamiento cero de agua dulce en la [Figura 3](#)), un apagado de la AMOC aún puede ser forzado por una gran adición temporal de agua dulce, pero la AMOC se recuperará después de que termine el forzamiento. En el régimen biestable, el sistema puede estar permanentemente en cualquiera de los dos estados estables, estado de la AMOC "encendido" o "apagado", dependiendo de las condiciones iniciales. Por lo tanto, el flujo de la AMOC interrumpido por un forzamiento temporal no se recuperará, sino que permanecerá en el estado estable de "apagado". Los experimentos con una adición temporal de agua dulce muestran que muchos, si no la mayoría, de los modelos climáticos se encuentran en el régimen monoestable y, por lo tanto, comparativamente lejos del punto de inflexión. Esto no implica que no tengan este punto de inflexión o que no tengan un régimen biestable; simplemente muestra que no están en él por su clima actual (lo que probablemente puede ser erróneo, consulte la sección "¿Se puede confiar en los modelos climáticos?" más abajo).

El cambio climático puede alejar a la AMOC de la línea de equilibrio, siguiendo algo parecido a la trayectoria azul de la [Figura 3a](#), porque el calentamiento global moderno avanza demasiado rápido para que el océano se ajuste [a él] por completo. Después de cruzar la línea discontinua, la AMOC será atraída hacia el estado "apagado" incluso sin más empuje. Obsérvese que la AMOC es todavía más vulnerable si el forzamiento es más rápido (Stocker y Schmittner, 1997). Eso significa que los experimentos de rastreo de equilibrio muy lentos que se muestran en la [Figura 3b](#) subestiman lo cerca que está el punto de inflexión de la AMOC en una situación de cambio climático rápido, como en la que nos encontramos hoy.

Que este punto de inflexión y el régimen biestable son reales, y no solo un artificio del modelo simple de Stommel, se ha confirmado en numerosos modelos de todo el espectro de modelos desde el artículo de Stommel de 1961, incluidos sofisticados modelos tridimensionales de circulación oceánica, modelos de sistemas terrestres de complejidad intermedia y modelos climáticos acoplados completos, por ejemplo, el Modelo Comunitario del Sistema Tierra (CESM, [Community Earth System Model]) (van Westen et al., 2024). Una primera comparación de modelos detectó el régimen biestable en los 11 modelos participantes (Rahmstorf et al., 2005), y no conozco ningún modelo que haya sido probado y no tenga esta propiedad. Si bien este tipo de experimento no se puede realizar con modelos que simulen explícitamente remolinos de mesoescala en el océano [dependiendo de su localización, los remolinos pueden ser muy energéticos, tener un tiempo de vida considerable (que va de días a meses), ocupar varios kilómetros (del orden de 1 km a 200 km) y desplazarse a grandes distancias, influenciando así el medio que los rodea], no espero que esto suponga una gran diferencia, dado que la retroalimentación de advección salina relevante opera a gran escala.

Un segundo tipo de punto de inflexión también puede afectar a la AMOC. Una parte importante del proceso de hundimiento en el Atlántico Norte (llamado "formación de

aguas profundas") es la mezcla vertical profunda (convección) cuando la columna de agua se vuelve verticalmente inestable, debido a que el agua más densa se encuentra sobre agua menos densa. El oceanógrafo sueco Pierre Welander demostró en 1982 que la convección también podía apagarse como un interruptor, de nuevo debido al efecto desestabilizador de la salinidad (Welander, 1982). En las regiones de latitudes altas, el océano generalmente obtiene agua dulce de la lluvia en la superficie, por lo que una vez que la convección se detiene durante el tiempo suficiente, el agua dulce puede acumularse y formar una capa superficial de baja densidad. Eso hace que sea cada vez más difícil reiniciar la convección y, en algún momento, se apaga permanentemente. En trabajos posteriores, mostramos cómo funciona esto incluso si la convección es intermitente en presencia de variabilidad climática aleatoria (Kuhlbrodt et al., 2001; Rahmstorf, 2001).

Hay dos regiones principales de convección dentro de la actual AMOC: una en la región del giro subpolar del Atlántico Norte (que incluye los mares de Labrador e Irminger) y otra más al norte en los mares nórdicos. En muchos experimentos con modelos, la convección del mar de Labrador ha sido propensa a apagarse (Weijer et al., 2019), ralentizando no solo la AMOC sino también el giro subpolar, un enorme flujo giratorio en sentido contrario a las agujas del reloj al sur de Groenlandia e Islandia (Figura 4). Una vez que la convección (que normalmente extrae calor de la columna de agua mezclando agua más caliente hacia la superficie, donde el calor se pierde en la atmósfera) se ha tapado de esta manera [la convección se ha detenido (por la entrada de agua dulce en la superficie) y la parte superior de la columna de agua permanece fría (tapa fría)], se pierde menos calor a través de la superficie del mar y toda la columna de agua se vuelve menos densa. Esto ralentiza la AMOC, que después de todo es impulsada por las aguas frías y de alta densidad que empujan hacia el sur desde las latitudes altas. Por lo tanto, un apagado por convección puede ayudar a desencadenar un apagado de la AMOC. Y debido a que la convección es un proceso a pequeña escala, no se recoge bien en la mayoría de los modelos actuales (Jackson et al., 2023), lo que agrega un motivo adicional de incertidumbre sobre el futuro.

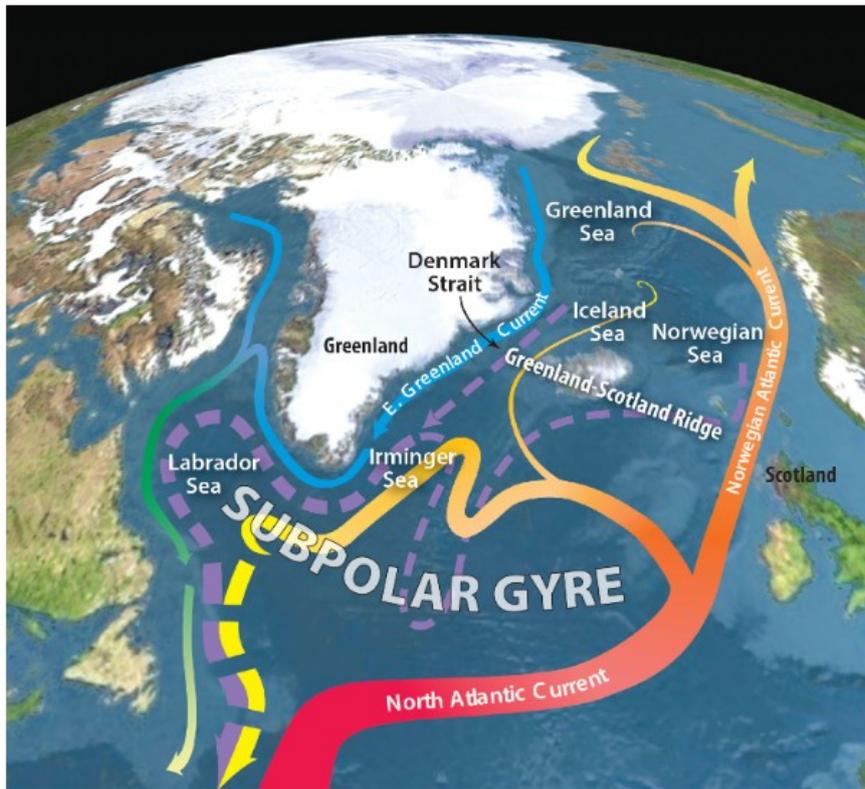


Figura 4. Se muestran los flujos superficiales actuales (líneas continuas) y los flujos profundos (líneas discontinuas) para el Atlántico Norte y los mares nórdicos. Figura modificada de R. Curry y C. Mauritzen © Woods Hole Oceanographic Institution

CAMBIOS DRÁSTICOS EN EL PASADO DE AMOC

Sobre la base de esta comprensión de los mecanismos de inestabilidad de la AMOC, podemos examinar algunos cambios climáticos dramáticos que han ocurrido en el pasado reciente --"reciente", es decir, desde una perspectiva paleoclimática, o sea, en los últimos 100.000 años.

En 1987, Wally Broecker publicó un artículo ahora famoso en la revista *Nature* titulado "¿Sorpresas desagradables en el invernadero?" (Broecker, 1987). En él, analiza los datos de los núcleos de sedimentos de aguas profundas y de agujeros perforados en la capa de hielo de Groenlandia, señalando que estos datos revelan que "el clima cambió con frecuencia y a grandes saltos" en lugar de hacerlo de forma suave y gradual. Dado los patrones regionales de estos cambios, identificó a la AMOC (en ese momento conocida como la "cinta transportadora del Atlántico") como la culpable. Advirtió que al liberar gases de efecto invernadero, "jugamos a la ruleta rusa con el clima [y] nadie sabe lo que hay en la recámara activa del arma".

En las décadas transcurridas desde entonces, hemos llegado a distinguir dos tipos de eventos climáticos abruptos que ocurrieron repetidamente durante la última Edad de Hielo, centrados en el Atlántico Norte pero con repercusiones globales (Rahmstorf, 2002).

NdT.- Edad de Hielo. Último período glacial que ha acontecido en la historia geológica de la Tierra. Comenzó hace unos 110 000 años y finalizó alrededor del 9700 a. C., dando paso al Holoceno, el período de clima templado actual.

El primer tipo son los eventos Dansgaard-Oeschger (DO), llamados así por el investigador danés Willy Dansgaard y su colega suizo Hans Oeschger. Los datos de los núcleos de hielo de Groenlandia muestran más de 20 eventos que se manifiestan como picos bruscos de calentamiento de entre 10 °C y 15 °C en una o dos décadas (Dansgaard et al., 1982). Pueden explicarse como repentinos inicios de convección oceánica en los mares nórdicos cuando la convección de la Edad de Hielo sólo se producía en su mayor parte en el Atlántico abierto al sur de Islandia (Figura 5). Al parecer, la configuración de la circulación oceánica cálida que llegó hasta el norte no era estable en las condiciones de la Edad de Hielo: se fue debilitando gradualmente hasta que, al cabo de unos cientos de años, la convección y el fenómeno cálido volvieron a terminar. Se trata, por tanto, de un ejemplo de flip-flop convectivo como el comentado anteriormente, con la convección de los mares nórdicos encendiéndose y apagándose.

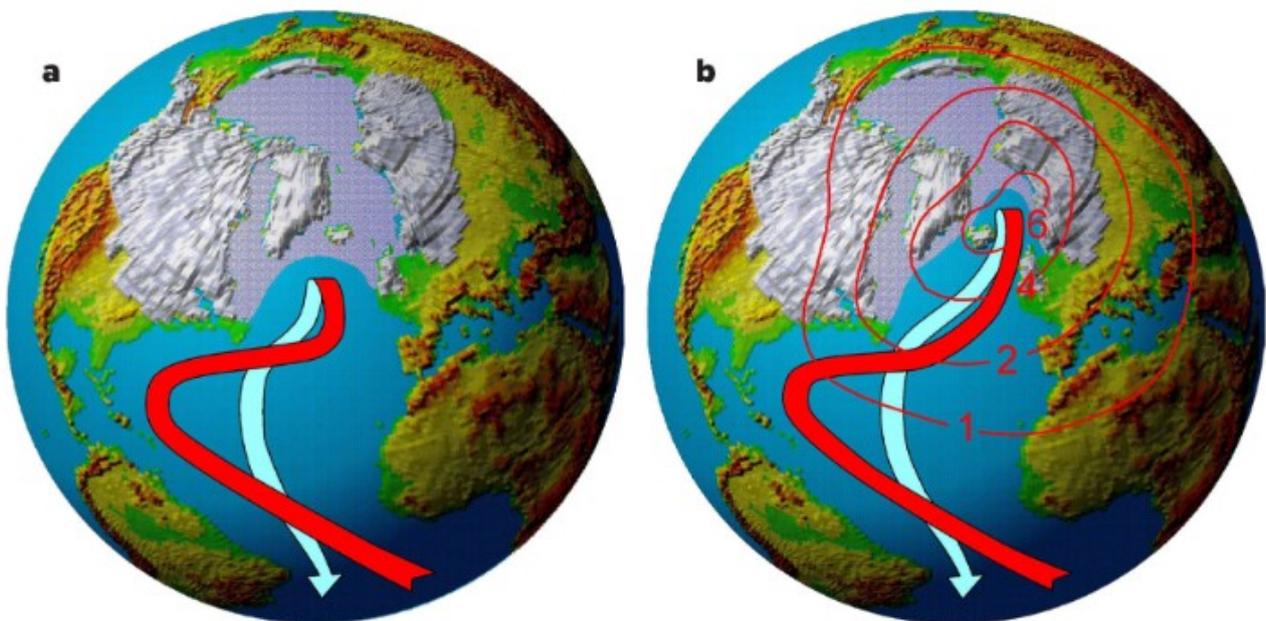


FIGURA 5. La AMOC durante la última Edad de Hielo. a) El estado frío (estadial) predominante. (b) El estado más cálido (interstadial) durante los eventos de Dansgaard-Oeschger, que muestra el cambio de temperatura modelado por Ganopolski y Rahmstorf (2002). La resolución muy baja de ese modelo subestima el efecto de calentamiento de los eventos de Dansgaard-Oeschger.

El segundo tipo son los eventos Heinrich, llamados así por el científico alemán Hartmut Heinrich (Heinrich, 1988). Se trata de enormes masas de hielo que se deslizaron incidentalmente hacia el mar desde la capa de hielo Laurentide de miles de metros de espesor que cubría el norte de América en ese momento. Estas flotas de icebergs se desplazaron a través del Atlántico, dejando tras de sí reveladoras capas de los derrubios transportados en el fondo del océano y añadiendo agua dulce de deshielo a su superficie. Esto condujo a cambios climáticos aún más dramáticos, vinculados a un colapso completo de la AMOC. Entró tanto hielo en el océano que el nivel del mar subió varios metros (Hemming, 2004). La evidencia de que esta

cantidad de agua dulce que ingresó al Atlántico norte detuvo la AMOC se encuentra en el hecho de que la Antártida se calentó mientras que el hemisferio norte se enfrió (Blunier et al., 1998), lo que indica que el enorme transporte de calor de la AMOC desde el extremo sur a través del ecuador hasta el norte se había prácticamente detenido.

Tanto los eventos Dansgaard-Oeschger como los eventos Heinrich, aunque más fuertes en torno al Atlántico norte, tuvieron importantes repercusiones climáticas globales incluso lejos del Atlántico, ya que afectaron a los cinturones de lluvias tropicales que resultan del movimiento ascendente del aire cálido por encima del "ecuador térmico". Durante los eventos cálidos de Dansgaard-Oeschger, estos cinturones de lluvia se desplazaron hacia el norte, lo que provocó condiciones cálidas y húmedas en los trópicos septentrionales hasta Asia. Pero durante los eventos Heinrich, los cinturones de lluvia se desplazaron hacia el sur, lo que provocó una sequía catastrófica en la región del monzón afroasiático (Stager, 2011). ¿Podrían producirse cambios similares en los cinturones de lluvias tropicales en el futuro?

LA "MANCHA FRÍA": ¿UNA SEÑAL OMINOSA DE UNA DESACELERACIÓN DE LA AMOC?

Veamos cómo la AMOC ya está respondiendo al calentamiento global en curso, que ya ha empujado el clima de la Tierra fuera de los límites del Holoceno estable (Osman et al., 2021) en el que *el Homo sapiens* desarrolló la agricultura y comenzó a construir ciudades.

Desgraciadamente, los datos de la AMOC sólo se remontan a unas pocas décadas atrás, procedentes de un puñado de cruceros a través del Atlántico desde la década de 1950 y del conjunto de estaciones RAPID-AMOC que ha recogido mediciones continuas de la salinidad y las velocidades de las corrientes desde cerca de la superficie hasta el fondo marino a través del Atlántico a 26° N desde 2004 (Smeed et al., 2020). Por lo tanto, debemos recurrir a la evidencia indirecta. La prueba Nº 1 es el "agujero de calentamiento" o "mancha fría" ["cold blob"] que se encuentra en los mapas del cambio de temperatura global observado (Figura 6). Mientras que el mundo entero se ha calentado, el Atlántico Norte subpolar ha resistido e incluso se ha enfriado. Esta es exactamente la región donde la AMOC entrega gran parte de su calor, y exactamente la región donde los modelos climáticos han predicho durante mucho tiempo el enfriamiento como resultado de la desaceleración de la AMOC.

Calentamiento entre 1850-1900 y 2011-2021

Cold blob

Mancha
fría→

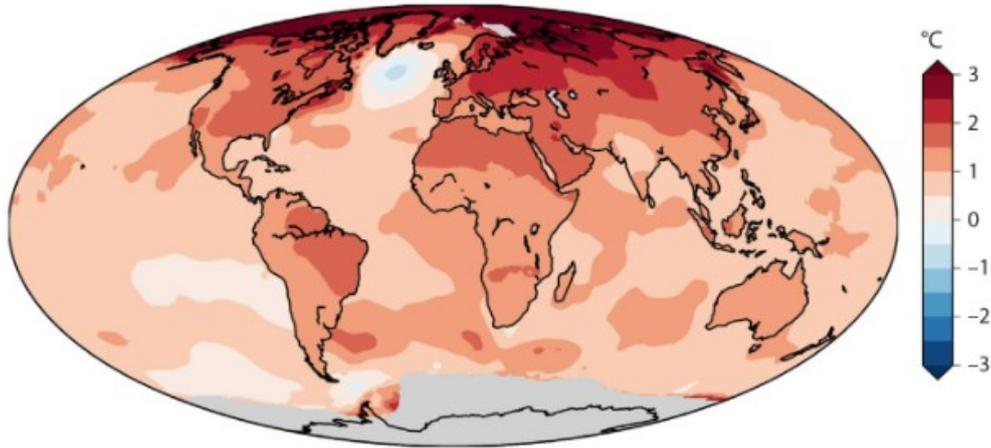


FIGURA 6. Mapa de los cambios observados en la temperatura del aire (°C) cerca de la superficie desde finales del siglo XIX. Las áreas grises indican falta de datos. *Crédito de la imagen: Zeke Hausfather, Berkeley Earth.*

Un importante estudio realizado por Dima y Lohmann (2010) analizó los patrones globales de los cambios en la temperatura de la superficie del mar desde el siglo XIX y concluyó "que la cinta transportadora oceánica global se ha estado debilitando desde finales de la década de 1930 y que la celda de retorno del Atlántico Norte sufrió un cambio abrupto alrededor de 1970". Dos años más tarde, un grupo holandés, analizando un conjunto de resultados de modelos, confirmó que una ralentización de la AMOC causa el enfriamiento del Atlántico Norte y lo denominó el "agujero de calentamiento" (Drijfhout et al., 2012). En 2015, uní mis fuerzas a las del climatólogo estadounidense Michael Mann y otros colegas en el uso de la reconstrucción paleoclimática indirecta de Mann de las temperaturas de la superficie a partir de registros geológicos para sugerir que la desaceleración moderna de la AMOC es probablemente única en al menos el último milenio (Rahmstorf et al., 2015). El término "mancha fría" ["cold blob"] tuvo su origen en una cita de Mann en un artículo del *Washington Post* sobre nuestro estudio (Mooney, 2015), y desde entonces se ha mantenido.

En teoría, la mancha fría también podría haber surgido de un aumento de la pérdida neta de calor en la superficie del océano (He et al., 2022). En cuanto a la variabilidad a corto plazo de un año a otro, se espera que las condiciones meteorológicas desempeñen un papel dominante en el cambio de la temperatura de la superficie del mar, especialmente en verano, cuando la capa mixta superficial es fina y su inercia térmica es pequeña (por ello, en estudios posteriores, nos centramos en el periodo noviembre-mayo). Sin embargo, los datos de los reanálisis basados en observaciones muestran que, desde mediados del siglo XX, la pérdida neta de calor a través de la superficie del océano en la región de la mancha fría ha disminuido, no aumentado --exactamente lo que cabría esperar cuando el océano aporta menos calor a esa región, por lo que se transmite menos a la atmósfera. (Figura 7). Además, el análisis de los modelos climáticos, en los que se conocen los cambios de la AMOC, muestra que la fuerza de la AMOC se correlaciona estrechamente con el cambio de temperatura de la mancha fría (Caesar et al., 2018). Este resultado confirma que, en escalas de tiempo más largas, la AMOC es el factor dominante, lo que permite concluir que la mancha fría hasta ahora corresponde a un debilitamiento de aproximadamente el 15% de la AMOC.

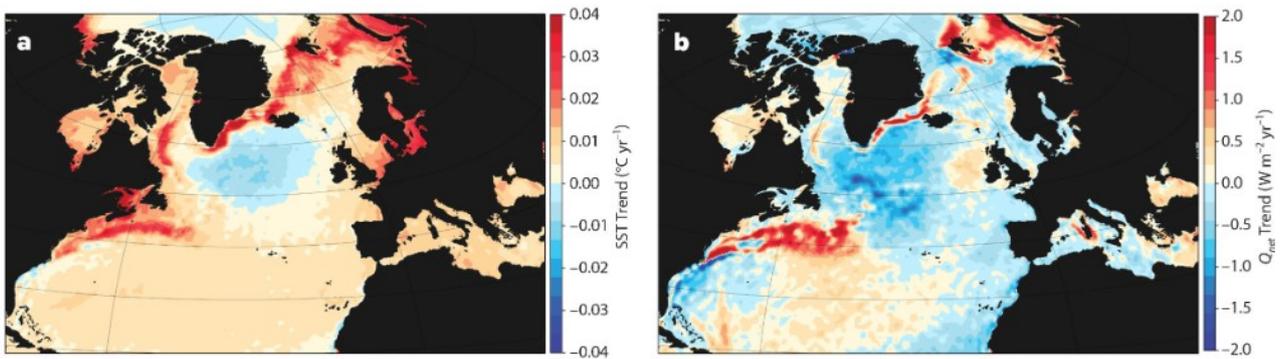


FIGURA 7. La huella digital de la desaceleración de la AMOC en los datos de reanálisis basados en observaciones de 1940 a 2022. a) Tendencias de la temperatura de la superficie del mar (TSM) ($^{\circ}\text{C} / \text{año}$). b) Tendencia de la pérdida neta de calor de la superficie oceánica (sensible, latente y radiativa) ($\text{W} / (\text{m}^2 \text{ año})$). Las tendencias del flujo de calor van en la dirección opuesta de la que deberían para ser una causa de las tendencias de la TSM. *Tomado de Jendrkowiak (2024).*

La mancha fría no es solo un fenómeno superficial; también es claramente visible (Figura 8) en la tendencia del contenido de calor oceánico de los 2.000 m superiores (Cheng et al., 2022).

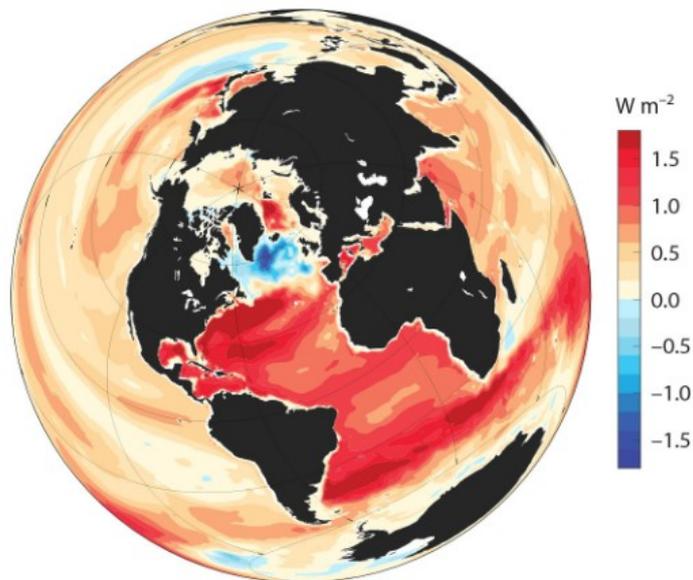


FIGURA 8. Tendencia del contenido de calor oceánico de los 2.000 m superiores (W / m^2), 1958-2023. Datos de IAP. *Crédito de la imagen: Lijing Cheng.*

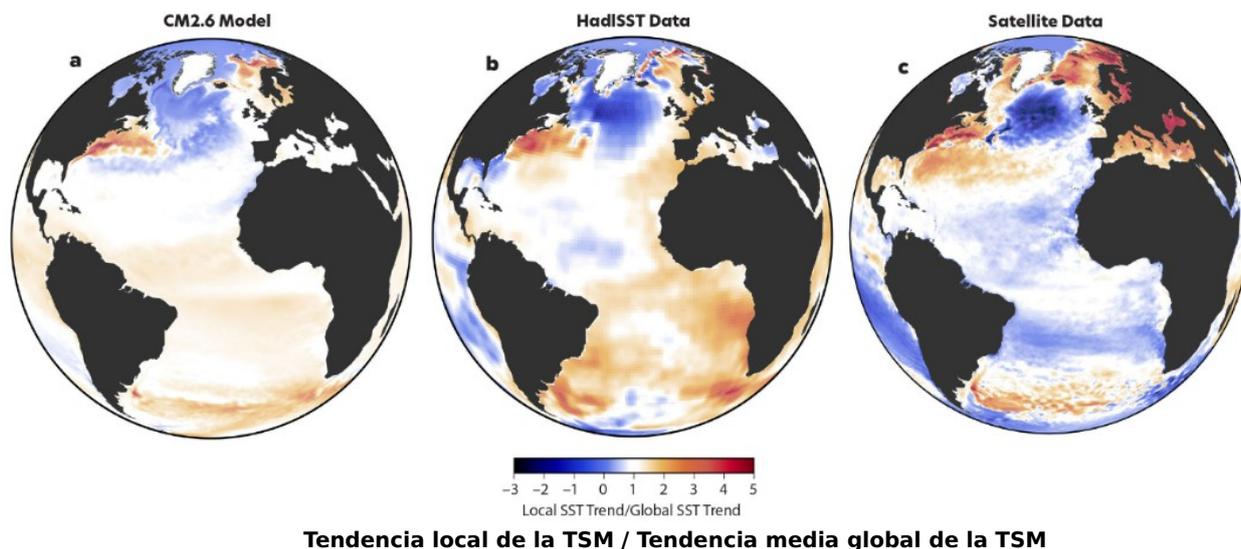
Pero aparte de la mancha fría, la desaceleración de la AMOC tiene otro efecto revelador.

UNA CORRIENTE DEL GOLFO CAMBIANTE

La dinámica de fluidos en un globo terráqueo giratorio como la Tierra tiene algunos efectos peculiares que no son intuitivos. Son el resultado del hecho de que la fuerza de Coriolis cambia con la latitud. En 2007 y 2008, dos estudios realizados por el investigador de la AMOC Rong Zhang demostraron cómo una ley básica de la física, la conservación del momento angular, que actúa en el punto donde el flujo profundo de la AMOC hacia el sur cruza por debajo de la Corriente del Golfo, hace que la corriente se desplace más cerca de la costa cuando la AMOC se debilita (Zhang y Vallis, 2007; Zhang, 2008). Sus estudios describen una "huella dactilar" de un debilitamiento de la AMOC que no solo incluye la mancha fría, sino también una anomalía de la temperatura de la superficie del mar de signo opuesto frente a la costa atlántica estadounidense al norte del cabo Hatteras.

Caesar et al. (2018) compararon esta huella dactilar con los cambios observados en la temperatura de la superficie del mar desde finales del siglo XIX y encontraron un fuerte acuerdo (véase la [Figura 9](#)). Los datos observacionales son mucho menos detallados porque se basan en mediciones relativamente escasas hechas por barcos, pero hay más detalles en los datos satelitales. Aunque los períodos de tiempo para los datos observados y los datos satelitales son diferentes, las tendencias se dividen por el cambio de la temperatura media global para que sean aproximadamente comparables en magnitud. Por lo tanto, durante el período relativamente corto del satélite hay una variabilidad aleatoria mucho más fuerte en relación con la señal ("ruido"), y la relación señal/ruido disminuye de arriba a abajo en las tres imágenes. A pesar de las diferencias en otras variabilidades, la huella digital de la disminución de la AMOC es muy clara en los tres gráficos de la [Figura 9](#).

Cambios observados en la temperatura de la superficie del mar (TSM)
2016 (Observaciones) **Duplicación CO₂**
1993-2021 (Satélite Copernicus) **1870-**



Tendencia local de la TSM / Tendencia media global de la TSM

FIGURA 9. En estos mapas de tendencias de la temperatura de la superficie del mar (TSM) divididas por su tendencia media global, el blanco significa la misma tendencia que la media global. a) Resultado de un experimento de duplicación de CO₂ con el modelo climático CM2.6 que también aparece en la portada de este artículo, (b) muestra la tendencia observada durante 1870-2016, y (c) representa los datos del satélite Copernicus recopilados durante 1993-2021. (a) y (b) de Caesar et al. (2018). c) Cortesía de Ruijian Gou.

Como nota al margen, los tres diagramas muestran un parche de calentamiento en el Ártico frente a Noruega; en el modelo, esto se debe al aumento del transporte de calor oceánico desde el Atlántico hacia el Océano Ártico (Fiedler, 2020). Este flujo puede no estar relacionado con la AMOC, o posiblemente anticorrelacionado con la AMOC y, por lo tanto, podría constituir una tercera parte de su huella digital.

El fuerte calentamiento de la costa atlántica de América del Norte tampoco es causado por los flujos de calor de la superficie, ya que los datos del nuevo análisis muestran que el flujo de calor de la superficie ha cambiado en la dirección opuesta, hacia una mayor pérdida de calor (Figura 7). Además, la generación actual de modelos climáticos (CMIP6) indica una clara correlación de la fuerza de la AMOC con este patrón de huellas dactilares de las temperaturas de la superficie del mar, incluyendo tanto la mancha fría como la parte de calentamiento (Latif et al., 2022).

Además, un estudio reciente que utiliza los datos oceánicos observacionales tridimensionales recopilados por las boyas Argo de elaboración de perfiles (<https://argo.ucsd.edu/>) muestra que la Corriente del Golfo se ha desplazado unos 10 km más cerca de la costa desde principios de este siglo (Todd y Ren, 2023). A partir de la matriz RAPID sabemos que la AMOC se ha debilitado durante este período de tiempo. Además, durante las últimas cuatro décadas se ha observado un "fuerte debilitamiento de la Corriente del Golfo en el Estrecho de Florida" (Piecuch y Beal, 2023), que, aunque no está necesariamente vinculado a un debilitamiento de la AMOC, al menos es coherente con él.

La evidencia adicional consistente con la desaceleración de la AMOC también proviene de los cambios en la salinidad. El Atlántico subpolar nororiental está reduciendo su salinidad (Figura 10), probablemente debido a una combinación del aumento de la entrada de agua dulce de las lluvias y los ríos, así como el derretimiento del hielo marino y la capa de hielo de Groenlandia, además del efecto de los cambios en la circulación oceánica que traen aguas subtropicales menos

saladas hacia el norte. La cuenca de Islandia registra la salinidad más baja en 120 años de mediciones (Holliday et al., 2020).

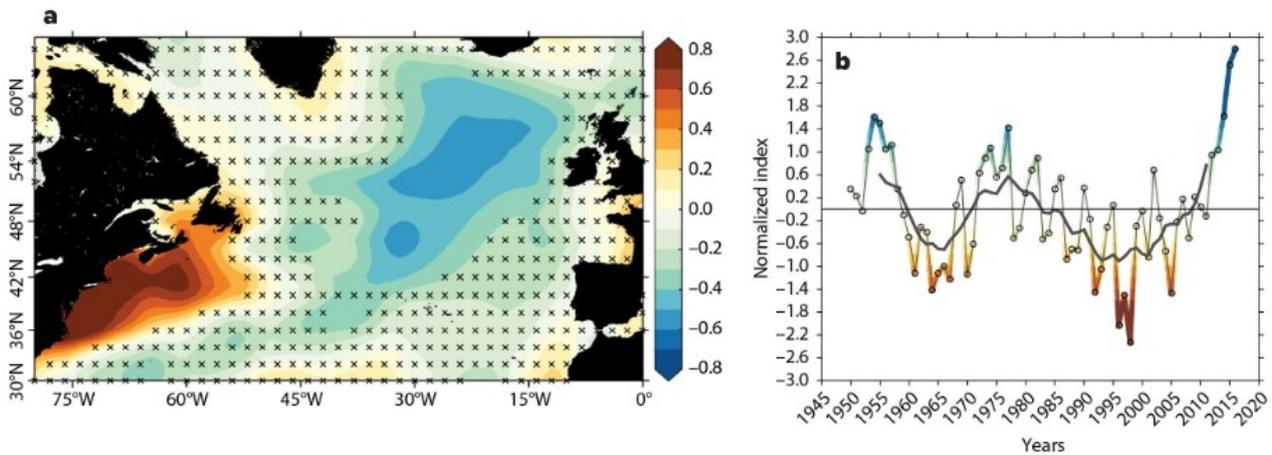


FIGURA 10. La "mancha de baja salinidad" ["fresh blob"] en el noreste del Atlántico Norte, con una anomalía salada correspondiente a lo largo de la costa de América del Norte y la evolución temporal asociada. El azul indica una salinidad anómalamente baja y el marrón una salinidad alta. Compare la huella dactilar de la temperatura de la superficie del mar en la Figura 9. *Crédito de la imagen: N. Penny Holliday, © Centro Nacional de Oceanografía, 2020, CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.*

Al mismo tiempo, la salinidad está aumentando en el Atlántico Sur subtropical, que se considera una huella de la AMOC menos afectada por las variaciones a corto plazo que la huella de temperatura del Atlántico Norte; esto sugiere una aceleración de la ralentización de la AMOC desde la década de 1980 (Zhu et al., 2023).

Sin embargo, una mayor evidencia proviene del análisis de la densidad del agua de mar en los 1.000 m superiores en la región del giro subpolar, que se correlaciona estrechamente con la AMOC y muestra una disminución en los últimos 70 años. Esta disminución implica un debilitamiento de la AMOC de ~13% durante este período (Chafik et al., 2022), consistente con el debilitamiento del 15% sugerido por los datos de la mancha fría.

MÁS LECCIONES DEL PALEOCLIMA

Para comprender las condiciones existentes antes de que comenzaran las mediciones periódicas de la temperatura, debemos recurrir a los datos indirectos [proxy data]: los rastros de cambios climáticos pasados que quedan en archivos que se acumulan lentamente, como las capas de hielo o los sedimentos del fondo marino. Estos indicadores nos permiten reconstruir las temperaturas pasadas de la superficie del mar y otros parámetros. Por ejemplo, la proporción de isótopos de oxígeno que se encuentran en los esqueletos microscópicos que componen gran parte de los sedimentos del fondo marino profundo proporcionan un registro de las temperaturas pasadas del agua superficial, y los tamaños de los granos de sedimento en el fondo del océano revelan las velocidades de las corrientes por

encima de él. Caesar et al. (2021) compilaron una serie de reconstrucciones publicadas del flujo de AMOC en el pasado y concluyeron que la AMOC se encuentra actualmente en su punto más débil del último milenio (Figura 11).

NdT.- En paleoclimatología un **indicador paleoclimático** o **proxy climático** (traducción literal es "apoderado climático") es un registro natural que conserva características físicas o biofísicas del pasado que permiten al investigador medir condiciones meteorológicas para reconstruir las condiciones climáticas sobre una fracción de otros momentos no presentes en la historia escrita. Los registros globales convencionalmente fiables del clima sólo se iniciaron en la década de 1880, y estos paleoindicadores proporcionan el único medio científico para determinar los patrones climáticos antes de que comenzara el mantenimiento de registros directos por el ser humano. Fuente: [Indicador paleoclimático - Wikipedia, la enciclopedia libre](#) [EXTRACTO]

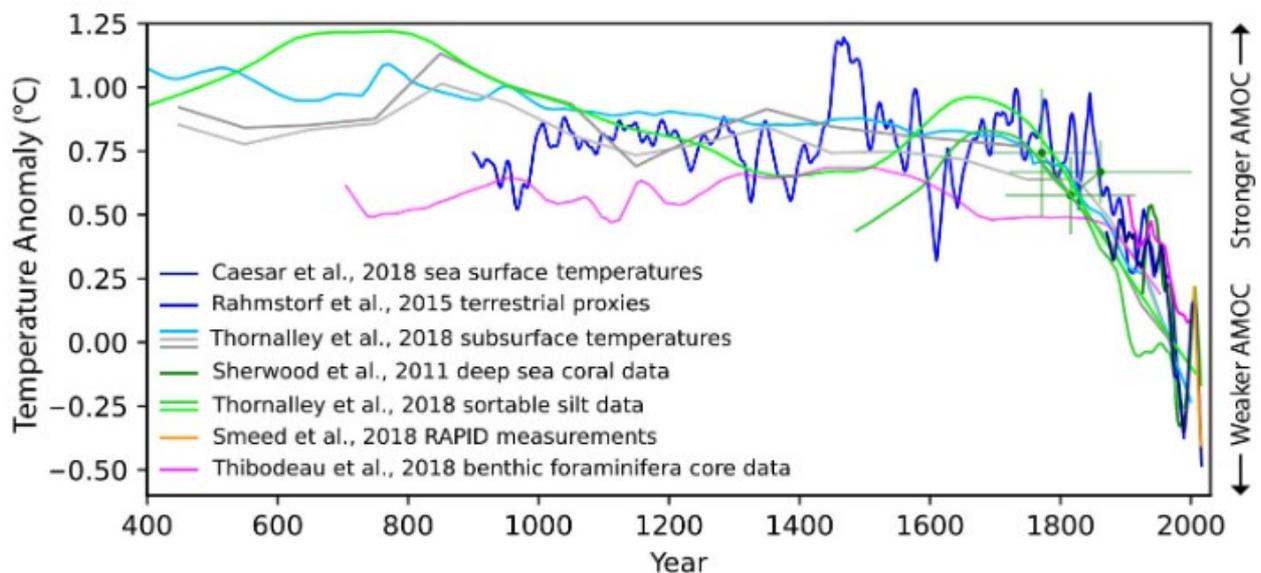


FIGURA 11. La fuerza de la AMOC durante los últimos 1.600 años reconstruida a partir de diferentes conjuntos de datos paleoclimáticos. Según *Caesar et al. (2021)* El eje vertical muestra la anomalía de temperatura en la región de la "mancha fría" de *Caesar et al. (2018)* (°C); los demás datos se ajustan a esa escala. [Eje vertical derecho, Stronger AMOC (AMOC más fuerte); Weaker AMOC (AMOC más débil)]

Aunque siempre se puede cuestionar la validez de los datos proxy [datos indirectos], existe una concordancia general en los datos recogidos en diferentes regiones y analizados por distintos equipos de investigación utilizando métodos muy diferentes. En el caso de las series de datos indirectos que se extienden hasta las últimas décadas, la concordancia entre las reconstrucciones de la AMOC basadas en observaciones y en modelos es buena (*Caesar et al., 2022*).

Dadas las muchas líneas de pruebas independientes, existe evidencia abrumadora de un debilitamiento a largo plazo de la AMOC desde principios o mediados del siglo XX. Hay que tener en cuenta que existe una variabilidad decenal sustancial en la AMOC, además de su declive a largo plazo, lo que hace que sea esencial tener claro el período de tiempo exacto cuando se discuten los cambios de la AMOC.

¿El debilitamiento de la AMOC a largo plazo es causado por el hombre? Múltiples líneas de evidencia apuntan a que es el resultado del calentamiento global causado por los combustibles fósiles. En primer lugar, los modelos climáticos llevan tiempo prediciendo su declive en respuesta al calentamiento global, y la física que subyace a estas predicciones es comprensible. Al menos dos estudios que analizan modelos y observaciones climáticas de última generación han demostrado "que el reciente agujero de calentamiento del Atlántico Norte es de origen antropogénico" y está causado por la reducción del transporte de calor oceánico hacia el norte relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero (Chemke et al., 2020; Qasmi, 2023). Además, los datos paleoclimáticos que se muestran en la [Figura 11](#) también apuntan fuertemente a las actividades humanas como la causa, ya que el debilitamiento de la AMOC coincide con el período de calentamiento global moderno sin precedentes.

¿SE PUEDE CONFIAR EN LOS MODELOS CLIMÁTICOS?

Los modelos climáticos han predicho durante mucho tiempo una deceleración significativa de la AMOC en respuesta al calentamiento global, incluida una mancha fría correspondiente (véase [la Figura 12](#) para una versión reciente). De hecho, escribí dos artículos de comentarios para *Nature* sobre ese tema en la década de 1990 (Rahmstorf, 1997, 1999), y entonces, como ahora, la cantidad de debilitamiento pronosticado difería mucho entre los diferentes modelos. El último y sexto informe del IPCC encontró que, incluso para un escenario de bajas emisiones, la AMOC se debilitará entre un 4% y un 46% para el año 2100, según el modelo. En el escenario de altas emisiones, la reducción oscila entre el 17% y el 55% (IPCC, 2021). El informe del IPCC también concluyó: "Si bien existe una confianza media en que la disminución proyectada en la AMOC no implicará un colapso abrupto antes de 2100, tal colapso podría ser provocado por una afluencia inesperada de agua de deshielo de la capa de hielo de Groenlandia".

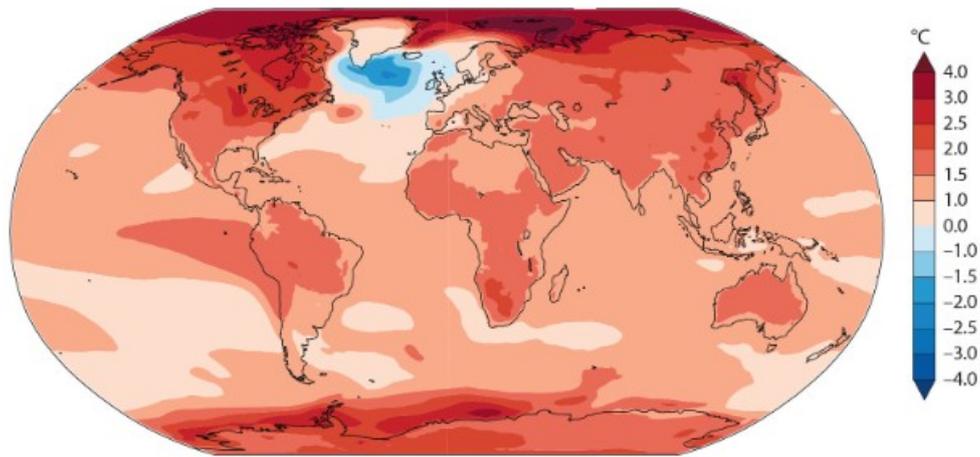


FIGURA 12. Esta figura del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ilustra los cambios de temperatura mundial para el año 2100 en un escenario de bajas emisiones (SSP1-2.6) en modelos de alto calentamiento (IPCC, 2021, figura 1 del recuadro RT.3)

Esto nos lleva a una pregunta importante: ¿Podemos fiarnos de los modelos climáticos? En general, los modelos climáticos han hecho un gran trabajo en la predicción de las temperaturas medias globales. Incluso los modelos bastante simples de la década de 1980 hicieron predicciones cuantitativas del calentamiento global correctamente, incluidos los modelos de Exxon (Supran et al., 2023). Pero eso es relativamente fácil, ya que solo depende del balance energético de la Tierra.

Los cambios en la circulación oceánica termohalina son mucho más difíciles de predecir, ya que dependen de sutiles diferencias de temperatura y salinidad a través del océano, en tres dimensiones. Los modelos no han funcionado bien a la hora de reproducir los cambios de la AMOC en el pasado (McCarthy y Caesar, 2023). El último informe del IPCC muestra que los modelos climáticos actuales, en promedio, ni siquiera generan la mancha fría observada (aunque muchos modelos anteriores sí lo hicieron; véase la [Figura 13](#)).

Cambio observado para un calentamiento global de 1 °C Cambio simulado para un calentamiento global de 1 °C

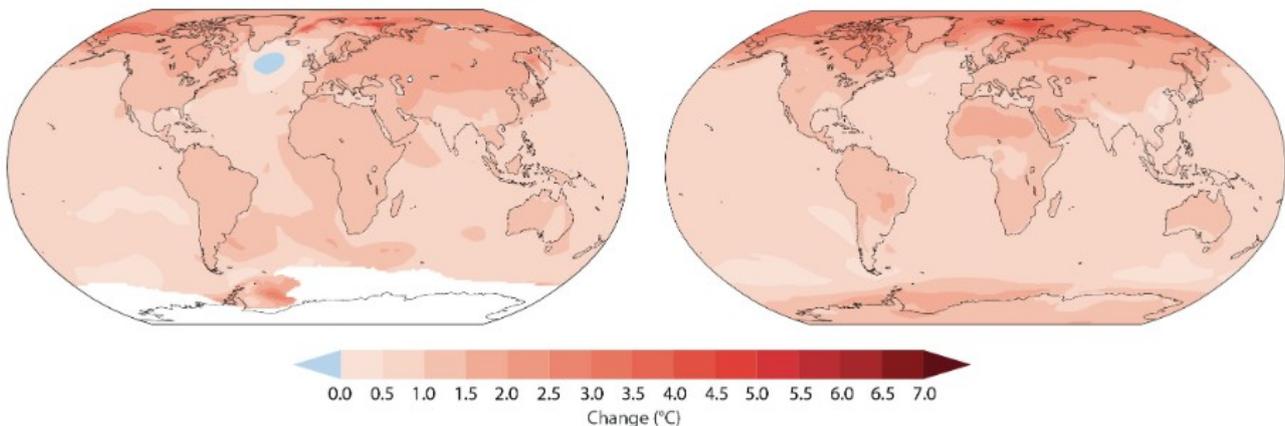


FIGURA 13. Comparación del cambio de la temperatura media anual observada y simulada de la temperatura media de la superficie (°C) para un calentamiento global de 1 °C (IPCC, 2021, Figura RRP.5). Por término medio, los modelos no reproducen la mancha fría observada.

De hecho, existen numerosas investigaciones que sugieren que la AMOC es, en general, demasiado estable en los modelos climáticos. Una de las razones podría ser lo que el IPCC ha llamado "sintonía hacia la estabilidad". Si un modelo tiene una AMOC demasiado inestable que ya colapsa para el clima actual, como ha sucedido en varios modelos (por ejemplo, Manabe y Stouffer, 1988), el modelo se "reparará" (es decir, se mejorará para reflejar mejor la realidad). Pero si la AMOC es demasiado estable, ese modelo no parecerá erróneo porque el clima actual se reproduce correctamente.

Otro problema aparece incluso en el éxito de taquilla de Hollywood de 2004 *The Day After Tomorrow*, donde el científico Jack Hall (Dennis Quaid) dice: "¡Nadie ha tenido en cuenta cuánta agua dulce se está vertiendo en el océano debido al derretimiento del hielo polar! Creo que hemos llegado a un punto crítico de desalinización". Hasta ahora, la mayoría de los modelos climáticos no han incorporado una capa de hielo interactiva de Groenlandia (que tiene su propio punto de inflexión; por ejemplo, Robinson et al., 2012) y descuidan su creciente aporte de agua de deshielo.

Este "punto crítico de desalinización" es, por supuesto, el punto de inflexión de Stommel del que hablábamos antes, y averiguar a qué distancia estamos de ese punto es un problema realmente difícil.

¿DÓNDE ESTÁ ESE PUNTO DE INFLEXIÓN?

Una forma de encontrar el punto de inflexión es realizar un experimento como el que se muestra en la [figura 3](#). Pero esto es muy costoso desde el punto de vista computacional, y en los modelos en los que se ha probado, la distancia al punto de inflexión difiere mucho. En 1996 propuse que el hecho de que la AMOC transporte agua dulce fuera o dentro del Atlántico en la latitud de Sudáfrica determina si se encuentra en el régimen biestable señalado en la Figura 3, o más lejos del punto de inflexión hacia la izquierda (Rahmstorf, 1996). Otros estudios han apoyado esta idea, y los datos observacionales sugieren que la AMOC real se encuentra en el régimen biestable, es decir, relativamente cerca del punto crítico. Por el contrario, en la mayoría de los modelos, la AMOC se encuentra en régimen monoestable, lejos del punto de inflexión (véase la revisión de Weijer et al., 2019). La razón son unos sesgos en apariencia sutiles en la distribución de la salinidad atlántica en los modelos. Esta distribución de salinidad se puede orientar hacia valores de salinidad observados más realistas, en lugar de dejar que la salinidad evolucione libremente bajo la influencia de precipitaciones computadas, la evaporación y las corrientes oceánicas. Cuando esto se hizo en un modelo climático, la AMOC colapsó en un escenario de duplicación de la concentración de CO₂, mientras que se mantuvo estable en el modelo original sin ajustar (Liu et al., 2017).

Dadas las limitaciones de los modelos climáticos actuales, algunos investigadores han recurrido a métodos tomados de la física no lineal para buscar en los datos de observación señales de alerta temprana de un punto de inflexión próximo. Se basan en el hecho de que, en un sistema "ruidoso" como el clima, parámetros como la fuerza de la AMOC se "menean" un poco al azar bajo la influencia de variaciones estocásticas (aleatorias), como el tiempo [meteorológico]. Pero cuando el sistema se acerca a un punto de inflexión, las fuerzas que lo empujan de vuelta a su equilibrio

estable se debilitan progresivamente, de modo que el sistema tarda más tiempo en balancearse hacia atrás. Esto se denomina "ralentización crítica".

Varios estudios han analizado los datos de la AMOC desde ese punto de vista. Boers (2021) analizó cuatro series de datos de temperatura y cuatro de salinidad que se han relacionado con la fuerza de la AMOC y concluyó que existe "una fuerte evidencia de que la AMOC se está acercando a una transición crítica inducida por la bifurcación". En otro estudio, Michel et al. (2022) utilizaron 312 series de datos paleoclimáticos que se remontan a un milenio atrás y encontraron una "estimación sólida, ya que se basa en observaciones suficientemente largas, de que la variabilidad multidecadal atlántica puede estar acercándose ahora a un punto de inflexión tras el cual el sistema de corrientes atlánticas podría sufrir una transición crítica". En 2023, investigadores daneses aparecieron en los titulares de las noticias con su "advertencia de un próximo colapso de la AMOC", que comenzaría en cualquier momento entre 2025 y 2095 y muy probablemente a mediados de este siglo (Ditlevsen y Ditlevsen, 2023). Un estudio reciente realizado por el grupo holandés de la Universidad de Utrecht --uno de los principales grupos de investigación del mundo sobre la estabilidad de la AMOC-- introdujo una "nueva señal de alerta temprana basada en la física [que] muestra que la AMOC está en curso de inflexión" (van Westen et al., 2024).

Todas estas predicciones tienen sus limitaciones --por ejemplo, los cambios en la variabilidad podrían tener otras razones además de un punto de inflexión que se aproxima--. Pero el hecho de que todos estos estudios, utilizando métodos diferentes, apunten en la misma dirección, hacia un riesgo mucho mayor y más temprano de lo que habíamos pensado hasta hace unos años, es una gran preocupación. Mi evaluación de estos estudios de señales de alerta temprana es que para cuando puedan proporcionar una advertencia razonablemente confiable de una inminente inflexión de AMOC, será demasiado tarde para impedirlo. En esta situación, la única reacción política responsable es guiarse por el principio de precaución (es decir, la responsabilidad de proteger al público de daños cuando la investigación científica ha encontrado un riesgo plausible).

Hasta cierto punto, la inflexión puede incluso depender de los caprichos del tiempo. En el modelo climático de la NASA, en 10 simulaciones que utilizan el mismo escenario de calentamiento de efecto invernadero "intermedio" (SSP2-4,5) con un calentamiento global inferior a 3 °C, la AMOC colapsa en dos, pero se recupera después de un debilitamiento significativo en ocho; la diferencia es meramente variabilidad interna estocástica (Romanou et al., 2023). Esto también es parte de la naturaleza de los puntos de inflexión.

Aparte de un colapso total de la AMOC, todavía hay que tener en cuenta el segundo tipo de punto de inflexión, aquel en el que la convección se apaga en una región. Eso sucede en un número sorprendente de modelos climáticos, y hasta ahora no ha recibido la atención pública que merece. El primer caso documentado, el modelo del British Hadley Centre, se publicó en 1999 (Wood et al., 1999). De la última generación de modelos (CMIP6), en cuatro de los 35 modelos, la convección del giro subpolar colapsa --y los cuatro están en el grupo de los 11 mejores modelos en términos de reproducción de los perfiles de densidad vertical en el giro subpolar (Swingedouw et al., 2021)--. Es decir, eso sucede en el 36% de los modelos de alta

calidad. En la anterior generación de modelos (CMIP5), esa cifra era del 45%. Y lo que es más, suele producirse a partir del año 2040 y para escenarios de emisiones moderadas --incluso sin contabilizar adecuadamente el deshielo de Groenlandia--. Así pues, un colapso de la convección en el giro subpolar, que provoque un rápido debilitamiento de la AMOC y un brusco enfriamiento regional, debe considerarse un alto riesgo que requiere atención urgente.

¿Qué significa esto para nuestro futuro? Veamos primero los impactos de una ralentización o colapso de AMOC y, a continuación, analicemos sus implicaciones.

¿CÓMO SERÍA DE MALO?

La actual mancha fría ya está afectando a nuestro clima, aunque no de la manera que cabría esperar: un Atlántico Norte subpolar frío se correlaciona con el calor del verano en Europa (Duchez et al., 2016). El enfriamiento de la superficie del mar es suficiente para influir en la distribución de la presión atmosférica de forma que se fomente la entrada de aire caliente desde el sur hacia Europa. Por ejemplo, en el verano de 2015, el Atlántico subpolar fue el más frío desde que comenzaron los registros en el siglo XIX, mientras que Europa sufrió una fuerte ola de calor. Estudios posteriores han demostrado que las olas de calor están aumentando de tres a cuatro veces más rápido en Europa que en otras regiones del hemisferio norte, relacionadas con cambios en la corriente en chorro que bien podrían estar influenciados por la mancha fría (Rousi et al., 2022).

Varios estudios muestran que si la AMOC se debilita, el nivel del mar en la costa noreste de Estados Unidos aumentará más bruscamente (por ejemplo, Levermann et al., 2005; Yin et al., 2010). La fuerza de Coriolis empuja el agua en movimiento, en este caso, en la Corriente del Golfo, hacia la derecha [el este], lejos de la costa estadounidense. Cuando la Corriente del Golfo se debilita, se mueve menos agua hacia el norte, lo que hace que los niveles de agua aumenten en la costa de la Corriente del Golfo, y los modelos proyectan un aumento de 15 a 20 cm para 2100 solo por este efecto, existen además otras causas que contribuyen a un aumento [adicional muy importante] del nivel del mar. La erosión costera, la frecuencia de las inundaciones molestas y el alcance de los daños causados por las marejadas ciclónicas aumentarán sustancialmente.

Un colapso de la convección en el giro subpolar magnificaría significativamente estos problemas. [La Figura 14](#) muestra el cambio de temperatura esperado en este caso. No es tanto el cambio absoluto, sino los cambios en el contraste de temperatura entre las regiones vecinas --en este caso, el océano frío en relación con las masas de tierra cálida adyacentes-- lo que cambiará en gran medida la dinámica del clima, ya que los gradientes de temperatura impulsan la actividad climática en formas que no podemos prever en detalle. Incluso este cambio oceánico limitado desplazaría los cinturones de lluvias tropicales, aunque no tanto como un cierre total de la AMOC.

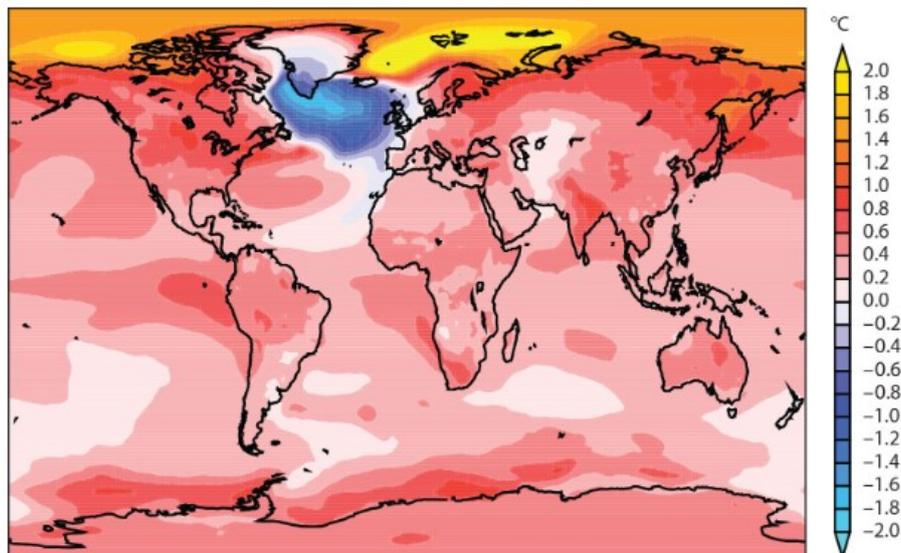


FIGURA 14. Aquí se representan los cambios medios de temperatura antes y después de un colapso de la convección en la región del giro subpolar. *Tomado de Swingedouw et al. (2021)*

Un cierre total de la AMOC tendría consecuencias verdaderamente devastadoras para la humanidad y muchos ecosistemas marinos y terrestres. La [Figura 15](#) muestra el modelo de Liu et al. (2017) después de una duplicación de CO₂, con un colapso de la AMOC causado por este aumento de CO₂. Las temperaturas frías del aire se expanden para cubrir Islandia, Gran Bretaña y Escandinavia. El contraste de temperatura entre el norte y el sur de Europa aumenta en 4 °C, probablemente con un gran impacto en el clima, como tormentas sin precedentes.

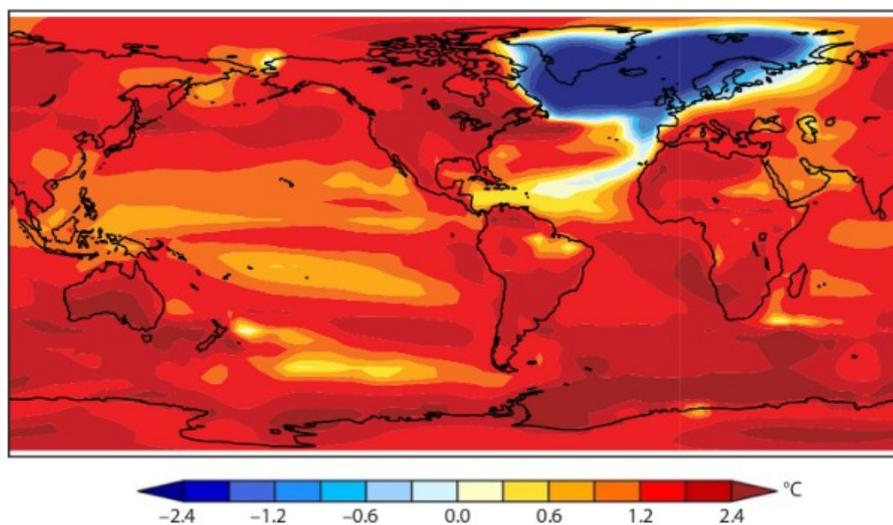


FIGURA 15. Cambio medio anual de la temperatura del aire cerca de la superficie resultante de la duplicación de CO₂ y el colapso de la AMOC. Mientras que la Tierra es mucho más cálida, la región del Atlántico Norte se ha vuelto más fría. En invierno, el enfriamiento allí es aún mucho mayor. *Tomado de Liu et al. (2017).*

La [Figura 16](#) muestra los cambios de precipitación en este modelo. Como hemos visto en los datos paleoclimáticos de los eventos Heinrich, los grandes cambios en las precipitaciones en los trópicos probablemente causarían problemas de sequía en los trópicos del norte de América, así como en Asia. Los cambios estacionales serán

incluso mayores que estos cambios medios anuales. Otras simulaciones predicen un aumento significativo de las tormentas invernales en Europa y una "fuerte reducción del rendimiento de los cultivos y los pastos" (Jackson et al., 2015).

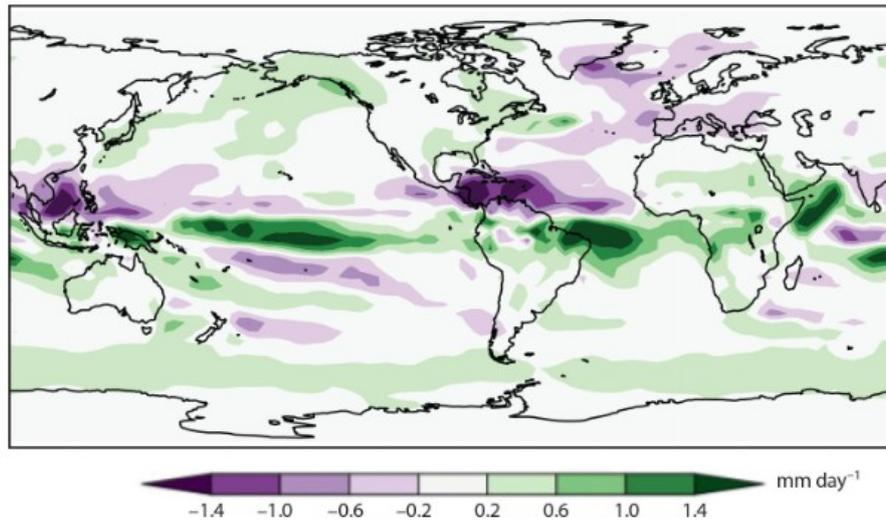


FIGURA 16. Cambio en la precipitación media anual resultante de la duplicación de CO₂ y el colapso de la AMOC. Lo más preocupante es el desplazamiento hacia el sur de los cinturones de lluvias tropicales y una Europa generalmente más seca. *Tomado de Liu et al. (2017).*

El IPCC resumió así los impactos: "Si se produjera un colapso de la AMOC, muy probablemente causaría cambios abruptos en los patrones climáticos regionales y el ciclo del agua, como un desplazamiento hacia el sur en el cinturón de lluvias tropicales, y podría provocar el debilitamiento de los monzones africanos y asiáticos, el fortalecimiento de los monzones del hemisferio sur y la sequía en Europa" (IPCC, 2021, TS p. 73). Algunas otras consecuencias incluyen un importante aumento adicional del nivel del mar, especialmente a lo largo de la costa atlántica estadounidense, una reducción de la absorción de dióxido de carbono en los océanos, una gran reducción del suministro de oxígeno a las profundidades oceánicas y un probable colapso del ecosistema en el Atlántico Norte.

IMPLICACIONES: LA INCERTIDUMBRE NO ES NUESTRA AMIGA

El riesgo de una transición crítica de AMOC es real y muy grave, aunque no podamos predecir con certeza cuándo ocurrirá y si lo hará. Ya hemos dejado atrás el clima estable del Holoceno en el que ha prosperado la humanidad (Osman et al., 2021), y el último informe del IPCC nos advierte de que más allá de 1,5 °C de calentamiento global, nos movemos hacia el terreno del "alto riesgo" con respecto a los puntos de inflexión climáticos (IPCC, 2023).

También está en riesgo el equivalente en el hemisferio sur de la formación de aguas profundas del Atlántico Norte: la formación de aguas de fondo de la Antártida. Un estudio reciente realizado por investigadores australianos concluyó que el aumento de la afluencia de agua de deshielo alrededor de la Antártida ralentizará

drásticamente la circulación de retorno de la Antártida, con un posible colapso este siglo (Q. Li et al., 2023). Eso ralentizará el ritmo a la que el océano absorbe CO₂ (por lo tanto, se acumulará más en la atmósfera) y reducirá el suministro de oxígeno a las profundidades marinas.

Un colapso total de la AMOC sería un desastre masivo a escala planetaria. *Realmente* queremos evitar que esto suceda.

En otras palabras: estamos hablando de análisis de riesgos y prevención de desastres. No se trata de estar seguros al 100% o incluso al 50% de que la AMOC rebasará su punto de inflexión este siglo; el problema es que nos gustaría estar seguros al 100% de que no lo hará. El hecho de que el IPCC sólo tenga una "confianza media" en que no sucederá este siglo es cualquier cosa menos tranquilizador, y los estudios aquí comentados, posteriores al informe del IPCC de 2021, apuntan a un riesgo mucho mayor de lo que se pensaba.

En diciembre de 2023 se publicó *el Informe Global de Puntos de Inflexión 2023 [The Global Tipping Points Report 2023]*, un esfuerzo de 500 páginas realizado por 200 investigadores de 90 organizaciones de 26 países (Lenton et al., 2023). Su conclusión resumida dice así: "Los puntos de inflexión perjudiciales en el mundo natural plantean algunas de las amenazas más graves a las que se enfrenta la humanidad. Su desencadenamiento dañará gravemente los sistemas de soporte vital de nuestro planeta y amenazará la estabilidad de nuestras sociedades".

Para la AMOC y otros puntos de inflexión climáticos, la única acción que podemos tomar para minimizar el riesgo es eliminar gradualmente el uso de combustibles fósiles y detener la deforestación lo más rápido posible. Si podemos llegar a cero emisiones, el calentamiento global se detendrá en unos años, y cuanto antes suceda esto, menor será el riesgo de rebasar puntos de inflexión devastadores. También minimizaría muchas otras pérdidas, daños y sufrimiento humano de los impactos "regulares" del calentamiento global (por ejemplo, olas de calor, inundaciones, sequías, malas cosechas, incendios forestales, aumento del nivel del mar), que ya están ocurriendo a nuestro alrededor, incluso sin que se hayan rebasado los principales puntos de inflexión climáticos.

Como concluye otro informe *sobre los puntos de inflexión climáticos [Climate Tipping Points]* publicado en diciembre de 2022 por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE): "Sin embargo, la evidencia científica actual respalda inequívocamente una acción climática sin precedentes, urgente y ambiciosa para abordar los riesgos de los puntos de inflexión del sistema climático" (OCDE, 2022).

Sería irresponsable, incluso temerario, que los encargados de formular políticas, los líderes empresariales y, de hecho, el público votante siguieran ignorando esos riesgos.

CITACIÓN

Rahmstorf, S. 2024. Is the Atlantic overturning circulation approaching a tipping point? *Oceanography*, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2024.501>.

REFERENCIAS

- Blunier, T., J. Chappellaz, J. Schwander, A. Dällenbach, B. Stauffer, T.F. Stocker, D. Raynaud, J. Jouzel, H.B. Clausen, C.U. Hammer, and J.S. Johnsen. 1998. Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period. *Nature* 394:739–743, <https://doi.org/10.1038/29447>.
- Boers, N. 2021. Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Nature Climate Change* 11(8): 680–688, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01097-4>.
- Broecker, W. 1987. Unpleasant surprises in the greenhouse? *Nature* 328:123–126, <https://doi.org/10.1038/328123a0>.
- Caesar, L., S. Rahmstorf, A. Robinson, G. Feulner, and V. Saba. 2018. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature* 556(7700):191–196, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0006-5>.
- Caesar, L., G.D. McCarthy, D.J.R. Thornalley, N. Cahill, and S. Rahmstorf. 2021. Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience* 14:118–120, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>.
- Caesar, L., G.D. McCarthy, D.J.R. Thornalley, N. Cahill, and S. Rahmstorf. 2022. Reply to: Atlantic circulation change still uncertain. *Nature Geoscience* 15:168–170, <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00897-3>.
- Chafik, L., N.P. Holliday, S. Bacon, and T. Rossby. 2022. Irminger Sea is the center of action for subpolar AMOC variability. *Geophysical Research Letters* 49(17), <https://doi.org/10.1029/2022GL099133>.
- Chemke, R., L. Zanna, and L.M. Polvani. 2020. Identifying a human signal in the North Atlantic warming hole. *Nature Communications* 11(1), <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15285-x>.
- Cheng, L., G. Foster, Z. Hausfather, K.E. Trenberth, and J. Abraham. 2022. Improved quantification of the rate of ocean warming. *Journal of Climate* 35(14):4,827–4,840, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0895.1>.
- Dansgaard, W., H.B. Clausen, N. Gundestrup, C.U. Hammer, S.F. Johnsen, P.M. Kristinsdottir, and N. Reeh. 1982. A new Greenland deep ice core. *Science* 218:1,273–1,277, <https://doi.org/10.1126/science.218.4579.1273>.
- Dijkstra, H.A., M.J. Molemaker, A. Van der Ploeg, and E.F.F. Botta. 1995. An efficient code to compute non-parallel steady flows and their linear stability. *Computers and Fluids* 24:415–434, [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00042-W](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00042-W).
- Dima, M., and G. Lohmann. 2010. Evidence for two distinct modes of large-scale ocean circulation changes over the last century. *Journal of Climate* 23(1):5–16, <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2867.1>.
- Ditlevsen, P., and S. Ditlevsen. 2023. Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature* 14:4254, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>.

Drijfhout, S., G.J. van Oldenborgh, and A. Cimatoribus. 2012. Is a decline of AMOC causing the warming hole above the North Atlantic in observed and modeled warming patterns? *Journal of Climate* 25(24):8,373–8,379, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00490.1>.

Duchez, A., E. Frajka-Williams, S.A. Josey, D.G. Evans, J.P. Grist, R. Marsh, G.D. McCarthy, B. Sinha, D.I. Berry, and J.J.M. Hirschi. 2016. Drivers of exceptionally cold North Atlantic Ocean temperatures and their link to the 2015 European heat wave. *Environmental Research Letters* 11(7):074004, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074004>.

Ellis, H. 1751. A letter to the Rev. Dr. Hales, F.R.S. from Captain Ellis, F.R.S. dated Jan. 7, 1750–51, at Cape Monte Africa, Ship Earl of Halifax. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 47:211–214.

Feulner, G., S. Rahmstorf, A. Levermann, and S. Volkwardt. 2013. On the origin of the surface air temperature difference between the hemispheres in Earth's present-day climate. *Journal of Climate* 26(18):7,136–7,150, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00636.1>.

Fiedler, L. 2020. *Investigating the North Atlantic Heat Transport in the Global Climate Model CM2.6*. Bachelor's thesis, University of Potsdam.

Ganopolski, A., and S. Rahmstorf. 2002. Abrupt glacial climate changes due to stochastic resonance. *Physical Review Letters* 88:038501, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.038501>.

He, C., A.C. Clement, M.A. Cane, L.N. Murphy, J.M. Klavans, and T.M. Fenske. 2022. A North Atlantic warming hole without ocean circulation. *Geophysical Research Letters* 49(19), <https://doi.org/10.1029/2022GL100420>.

Heinrich, H. 1988. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research* 29:143–152, [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(88\)90057-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90057-9).

Hemming, S.R. 2004. Heinrich events: Massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint. *Reviews of Geophysics* 42(1), <https://doi.org/10.1029/2003RG000128>.

Holliday, N.P., M. Bersch, B. Berx, L. Chafik, S. Cunningham, C. Florindo-Lopez, H. Hatun, W. Johns, S.A. Josey, K.M.H. Larsen, and others. 2020. Ocean circulation causes the largest freshening event for 120 years in eastern subpolar North Atlantic. *Nature Communications* 11(1):585, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14474-y>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 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*. V. Masson-Delmotte, 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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2,391 pp., <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

IPCC. 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, H. Lee, and J. Romero, eds, IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

Jackson, L.C., R. Kahana, T. Graham, M.A. Ringer, T. Woollings, J.V. Mecking, and R.A. Wood. 2015. Global and European climate impacts of a slowdown of the AMOC in a high resolution GCM. *Climate Dynamics* 45(11-12):3,299–3,316, <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2540-2>.

Jackson, L.C., H.T. Hewitt, D. Bruciaferri, D. Calvert, T. Graham, C. Guiavarc'h, M.B. Menary, A.L. New, M. Roberts, and D. Storkey. 2023. Challenges simulating the AMOC in climate models. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 381(2262):20220187, <https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0187>.

Jendrkowiak, J. 2024. *Heat Budget Analysis over the North Atlantic*. Bachelor's thesis, Potsdam University.

Kuhlbrodt, T., S. Titz, U. Feudel, and S. Rahmstorf. 2001. A simple model of seasonal open ocean convection. Part II. Labrador Sea stability and stochastic forcing. *Ocean Dynamics* 52:36–49, <https://doi.org/10.1007/s10236-001-8175-3>.

Latif, M., J. Sun, M. Visbeck, and M. Hadi Bordbar. 2022. Natural variability has dominated Atlantic Meridional Overturning Circulation since 1900. *Nature Climate Change* 12:455–460, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01342-4>.

Lenton, T.M., D.I. Armstrong McKay, S. Loriani, J.F. Abrams, S.J. Lade, J.F. Donges, M. Milkoreit, T. Powell, S.R. Smith, and others, eds. 2023. *The Global Tipping Points Report 2023*. University of Exeter, Exeter, UK, 479 pp.

Levermann, A., A. Griesel, M. Hofmann, M. Montoya, and S. Rahmstorf. 2005. Dynamic sea level changes following changes in the thermohaline circulation. *Climate Dynamics* 24(4):347–354, <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0505-y>.

Li, Q., M.H. England, A.M. Hogg, S.R. Rintoul, and A.K. Morrison. 2023. Abyssal ocean overturning slowdown and warming driven by Antarctic meltwater. *Nature* 615(7954):841–847, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05762-w>.

Li, Z., M.H. England, and S. Groeskamp. 2023. Recent acceleration in global ocean heat accumulation by mode and intermediate waters. *Nature Communications* 14(1):6888, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42468-z>.

Liu, W., S.-P. Xie, Z. Liu, and J. Zhu. 2017. Overlooked possibility of a collapsed Atlantic Meridional Overturning Circulation in warming climate. *Science Advances* 3(1), <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601666>.

Manabe, S., and R.J. Stouffer. 1988. Two stable equilibria of a coupled ocean-atmosphere model. *Journal of Climate* 1:841–866, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1988\)001<0841:TSEOAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1988)001<0841:TSEOAC>2.0.CO;2).

McCarthy, G.D., and L. Caesar. 2023. Can we trust projections of AMOC weakening based on climate models that cannot reproduce the past? *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 381(2262):20220193, <https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0193>.

Michel, S.L.L., D. Swingedouw, P. Ortega, G. Gastineau, J. Mignot, G. McCarthy, and M. Khodri. 2022. Early warning signal for a tipping point suggested by a millennial Atlantic Multidecadal Variability reconstruction. *Nature Communications* 13(1):5176, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32704-3>.

Mooney, C. 2015. "Why Some Scientists Are Worried about a Surprisingly Cold 'Blob' in the North Atlantic Ocean." *Washington Post*, September 4, 2015, <https://www.washingtonpost.com/news/energy-environment/wp/2015/09/24/why-some-scientists-are-worried-about-a-cold-blob-in-the-north-atlantic-ocean/>.

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). 2022. *Climate Tipping Points: Insights for Effective Policy Action*. Paris, 89 pp, <https://doi.org/10.1787/abc5a69e-en>.

Osman, M.B., J.E. Tierney, J. Zhu, R. Tardif, G.J. Hakim, J. King, and C.J. Poulsen. 2021. Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum. *Nature* 599(7884):239–244, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03984-4>.

Piecuch, C.G., and L.M. Beal. 2023. Robust weakening of the Gulf Stream during the past four decades observed in the Florida Straits. *Geophysical Research Letters* 50(18), <https://doi.org/10.1029/2023GL105170>.

Qasmi, S. 2023. Past and future response of the North Atlantic warming hole to anthropogenic forcing. *Earth System Dynamics* 14(3):685–695, <https://doi.org/10.5194/esd-14-685-2023>.

Rahmstorf, S. 1996. On the freshwater forcing and transport of the Atlantic thermohaline circulation. *Climate Dynamics* 12(12):799–811, <https://doi.org/10.1007/s003820050144>.

Rahmstorf, S. 1997. Risk of sea-change in the Atlantic. *Nature* 388(6645):825–826, <https://doi.org/10.1038/42127>.

Rahmstorf, S. 1999. Shifting seas in the greenhouse? *Nature* 399(6736):523–524, <https://doi.org/10.1038/21066>.

Rahmstorf, S. 2001. A simple analytical model of seasonal open-ocean convection: Part I. Theory. *Ocean Dynamics* 52:26–35, <https://doi.org/10.1007/s10236-001-8174-4>.

Rahmstorf, S. 2002. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* 419(6903):207–214, <https://doi.org/10.1038/nature01090>.

Rahmstorf, S., M. Crucifix, A. Ganopolski, H. Goosse, I.V. Kamenkovich, R. Knutti, G. Lohmann, R. Marsh, L.A. Mysak, Z. Wang, and A.J. Weaver. 2005. Thermohaline circulation hysteresis: A model intercomparison. *Geophysical Research Letters* 32(23), <https://doi.org/10.1029/2005GL023655>.

Rahmstorf, S., J.E. Box, G. Feulner, M.E. Mann, A. Robinson, S. Rutherford, and E.J. Schaffernicht. 2015. Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature Climate Change* 5(5):475–480, <https://doi.org/10.1038/nclimate2554>.

Robinson, A., R. Calov, and A. Ganopolski. 2012. Multistability and critical thresholds of the Greenland ice sheet. *Nature Climate Change* 2(6):429-432, <https://doi.org/10.1038/nclimate1449>.

Romanou, A., D. Rind, J. Jonas, R. Miller, M. Kelley, G. Russell, C. Orbe, L. Nazarenko, R. Latta, and G.A. Schmidt. 2023. Stochastic bifurcation of the North Atlantic circulation under a midrange future climate scenario with the NASA-GISS ModelE. *Journal of Climate* 36(18):6,141-6,161, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0536.1>.

Rousi, E., K. Kornhuber, G. Beobide-Arsuaga, F. Luo, and D. Coumou. 2022. Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent double jets over Eurasia. *Nature Communications* 13(1):3851, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31432-y>.

Smeed, D.A., B.I. Moat, E.L. McDonagh, G. McCarthy, B.A. King, W.E. Johns, and H.L. Bryden. 2020. Reduction in ocean heat transport at 26°N since 2008 cools the eastern Subpolar Gyre of the North Atlantic Ocean. *Journal of Climate* 33(5):1,677-1,689, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0323.1>.

Stager, J.C., D.B. Ryves, B.M. Chase, and F.S. Pausata. 2011. Catastrophic drought in the Afro-Asian monsoon region during Heinrich Event 1. *Science* 331(6022):1,299-1,302, <https://doi.org/10.1126/science.1198322>.

Stocker, T., and A. Schmittner. 1997. Influence of CO₂ emission rates on the stability of the thermohaline circulation. *Nature* 388:862-865, <https://doi.org/10.1038/42224>.

Stommel, H. 1961. Thermohaline convection with two stable regimes of flow. *Tellus* 13:224-230, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v13i2.9491>.

Supran, G., S. Rahmstorf, and N. Oreskes. 2023. Assessing ExxonMobil's global warming projections. *Science* 379(6628):eabk0063, <https://doi.org/10.1126/science.abk0063>.

Swingedouw, D., A. Bily, C. Esquerdo, L.F. Borchert, G. Sgubin, J. Mignot, and M. Menary. 2021. On the risk of abrupt changes in the North Atlantic subpolar gyre in CMIP6 models. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1504(1):187-201, <https://doi.org/10.1111/nyas.14659>.

Thompson, B. 1797. The complete works of Count Rumford (1870). *Boston, American Academy of Sciences* 1:237-400.

Todd, R.E., and A.S. Ren. 2023. Warming and lateral shift of the Gulf Stream from in situ observations since 2001. *Nature Climate Change* 13:1,348-1,352, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01835-w>.

Trenberth, K.E., Y. Zhang, J.T. Fasullo, and L. Cheng. 2019. Observation-based estimates of global and basin ocean meridional heat transport time series. *Journal of Climate* 32(14):4,567-4,583, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0872.1>.

van Westen, R., M.A. Kliphuis, and H.A. Dijkstra. 2024. Physics-based early warning signal shows AMOC is on tipping course. *Science Advances* 10(6), <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk1189>.

Warren, B.A. 1983. Why is no deep water formed in the North Pacific? *Journal of Marine Research* 41:327-347.

Weijer, W., W. Cheng, S.S. Drijfhout, A.V. Fedorov, A. Hu, L.C. Jackson, W. Liu, E.L. McDonagh, J.V. Mecking, and J. Zhang. 2019. Stability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A review and synthesis. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 124(8):5,336-5,375, <https://doi.org/10.1029/2019JC015083>.

Welander, P. 1982. A simple heat-salt oscillator. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 6:233-242, [https://doi.org/10.1016/0377-0265\(82\)90030-6](https://doi.org/10.1016/0377-0265(82)90030-6).

Wood, R.A., A.B. Keen, J.F.B. Mitchell, and J.M. Gregory. 1999. Changing spatial structure of the thermohaline circulation in response to atmospheric CO₂ forcing in a climate model. *Nature* 399:572-575, <https://doi.org/10.1038/21170>.

Yin, J., S.M. Griffies, and R.J. Stouffer. 2010. Spatial variability of sea level rise in twenty-first century projections. *Journal of Climate* 23(17):4,585-4,607, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3533.1>.

Zhang, R., and G.K. Vallis. 2007. The role of bottom vortex stretching on the path of the North Atlantic western boundary current and on the northern recirculation gyre. *Journal of Physical Oceanography* 37(8):2,053-2,080, <https://doi.org/10.1175/PO3102.1>.

Zhang, R. 2008. Coherent surface-subsurface fingerprint of the Atlantic meridional overturning circulation. *Geophysical Research Letters* 35(20), <https://doi.org/10.1029/2008GL035463>.

Zhu, C., Z. Liu, S. Zhang, and L. Wu. 2023. Likely accelerated weakening of Atlantic overturning circulation emerges in optimal salinity fingerprint. *Nature Communications* 14(1):1245, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36288-4>.

NdT. Sobre el autor:

Stefan Rahmstorf es un climatólogo alemán. El foco de su trabajo científico es la oceanografía y la paleoclimatología. Es uno de los autores principales del Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) publicado en 2007. Es considerado uno de los principales oceanógrafos del mundo y se ocupa del calentamiento global y sus consecuencias.

En el año 2000, asumió la cátedra de física de los océanos en la Universidad de Potsdam, donde imparte clases sobre temas de paleontología y circulación oceánica.

Rahmstorf ha comentado sobre el cambio climático y la política climática en televisión y radio. Fue considerado como uno de los 10 principales científicos del clima del mundo por el Financial Times en 2009. Recibió el *Deutscher Umweltmedienpreis* (Premio Alemán de Medios Ambientales) en 2007.