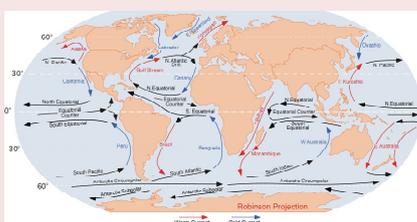


## ¿CÓMO SE MUEVEN LOS OCÉANOS Y CÓMO INFLUYE ESTO EN EL CLIMA?

Enrique Fernández Barrera  
Meteorólogo de AEMET



(publicado en el blog de AEMET  
el 4 de diciembre de 2022)



*Las corrientes oceánicas juegan un papel fundamental en el funcionamiento del sistema climático. Repasaremos en este artículo algunos conceptos básicos para entender dicho papel y cómo el estudio de los mares puede ayudarnos a comprender, tanto el clima del pasado, como su posible evolución futura.*

Tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta están ocupadas por los océanos. Como componente del sistema climático, la hidrosfera, y por tanto, los océanos, juegan un papel importante en el clima. Entre sus principales características podemos destacar que los océanos son la fuente principal de vapor de agua en la atmósfera, regulan el clima de zonas costeras, reducen el gradiente de temperatura entre los polos y el ecuador; por lo que suavizan el clima de latitudes medias y son una importante reserva de carbono y energía. El movimiento global de los océanos, la circulación, es un mecanismo físico fundamental que regula todos estos factores.

La circulación de los océanos es diferente según la profundidad de los océanos. Desde la superficie hasta los 200 m de profundidad (capa Ekman), aproximadamente, el principal factor que controla el movimiento de los océanos es el viento y a partir de esa profundidad, en el océano profundo, son los cambios en la temperatura y en la salinidad del agua los factores que controlan la circulación oceánica.

La fig. 1 muestra: a) la dirección y velocidad del viento promedio en enero; b) en julio; c) las principales corrientes oceánicas. Se aprecia como la dirección de las principales corrientes es similar a la del viento, por ejemplo, en los giros subtropicales sobre el Atlántico norte, que coinciden con los grandes anticiclones subtropicales atmosféricos. La explicación de esta aparente coincidencia nos la dio el oceanógrafo Vagn Walfrid Ekman, a través de un modelo físico. Este modelo surgió gracias a las observaciones que hizo el explorador Fridtjof Nansen durante una expedición al Ártico. Nansen observó que los icebergs no se desplazaban siguiendo la dirección del viento, sino que se movían a la derecha de la dirección del viento y compartió estos conocimientos con Ekman.

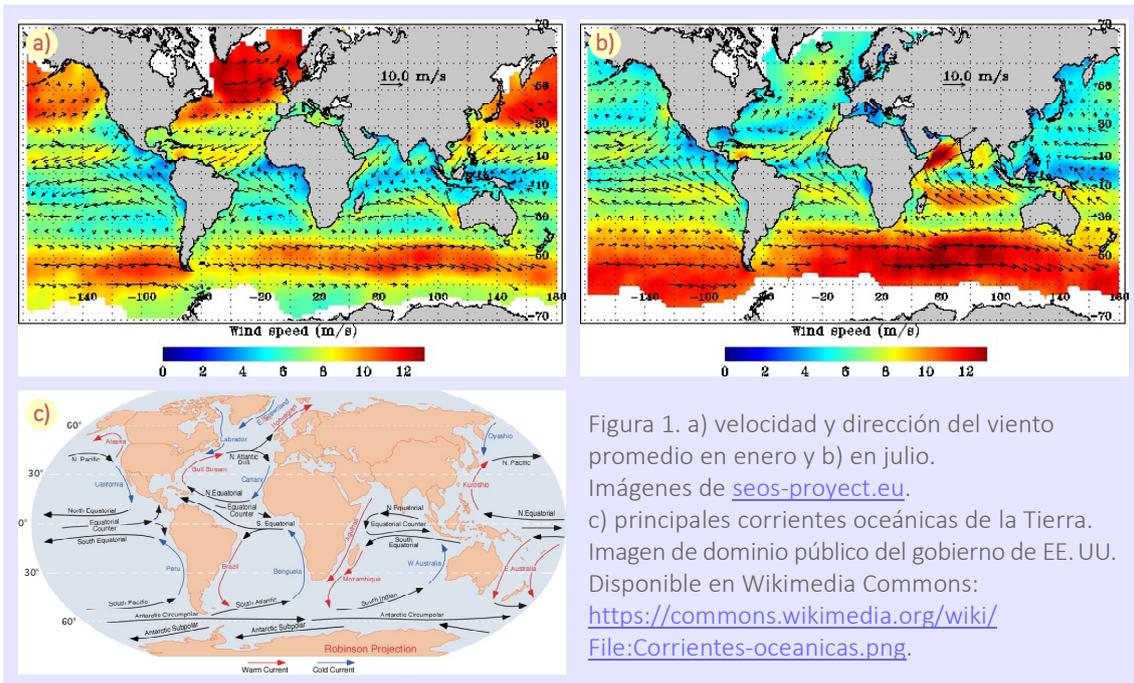


Figura 1. a) velocidad y dirección del viento promedio en enero y b) en julio. Imágenes de [seos-proyect.eu](https://seos-proyect.eu). c) principales corrientes oceánicas de la Tierra. Imagen de dominio público del gobierno de EE. UU. Disponible en Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Corrientes-oceanicas.png>.

### Circulación en superficie: el modelo de Ekman

Según el modelo teórico de Ekman, el viento ejerce una tensión mecánica en el océano, de forma similar a cuando alguien empuja una mesa y esta se mueve. Esta tensión mecánica hace que el agua en superficie siga la dirección del viento, pero con la profundidad, la influencia de esta tensión es menor y el agua va cambiando su dirección, es decir, el vector de corrientes gira en espiral (figura 2). La forma que toma el vector de corrientes se conoce como la espiral de Ekman y abarca toda la capa Ekman.

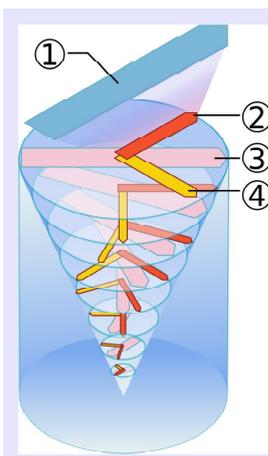


Figura 2. Corrientes oceánicas cambiando de dirección en un cierto ángulo respecto a los vientos de la superficie a causa de la fuerza de Coriolis. Efecto de la espiral de Ekman. 1: viento; 2: fuerza aplicada desde arriba; 3: dirección efectiva del flujo de corriente; 4: efecto Coriolis. Imagen de dominio público de Wikimedia Commons: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ekman\\_spirale.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ekman_spirale.svg).

El efecto neto es transportar la masa de agua unos 90° a la derecha del viento, en el hemisferio norte, y a la izquierda en el hemisferio sur. Esta diferencia se da porque en este movimiento también influyen la fuerza de Coriolis y las fuerzas que producen los cambios espaciales de la presión.

Otra consecuencia importante de este movimiento es un afloramiento de las aguas profundas. Esto es lo que se produce en los límites

costeros occidentales de los continentes, como en la costa de California, en Estados Unidos. En esta zona el viento va dirigido hacia el ecuador, por lo que el transporte de masa es en dirección oeste, de acuerdo con la teoría de Ekman. Como resultado, se produce un afloramiento de aguas frías. Estas aguas frías son las responsables de las típicas nieblas que se producen en San Francisco. Otro ejemplo se da cuando sopla el viento de poniente sobre las costas de Málaga, que produce un afloramiento de aguas

frías en las costas, por eso el agua de la playa de esa zona está más fría en esas situaciones.

Cerca del ecuador, los vientos alisios del noreste en el hemisferio norte y del sureste en el sur producen un transporte de agua hacia el norte y al sur, respectivamente, favoreciendo también el afloramiento de aguas frías. Esto produce, por ejemplo, que no se formen nubes en la zona exacta donde convergen y ascienden los alisios de ambos hemisferios (la zona de convergencia intertropical) sino que las nubes aparecen algo desplazadas sobre esta zona, ya que se inhibe la convección.

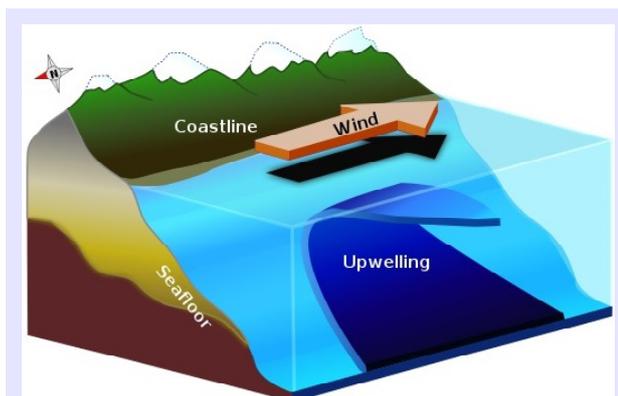


Figura 3. Afloramiento de aguas por el transporte de Ekman. Imagen de Dominio público de Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Upwelling-labels-en.svg>.

El afloramiento de aguas genera altas presiones cerca del ecuador y bajas presiones en los alrededores. Se crea, entonces, un equilibrio entre la fuerza de Coriolis y las de presión (equilibrio geostrófico). El equilibrio geostrófico genera corrientes con bajas presiones a la izquierda en el hemisferio norte y a la derecha en el sur, que fluyen en dirección contraria a los vientos alisios, dando forma a una contracorriente ecuatorial. Las contracorrientes del Pacífico se intensifican en los años que se produce El Niño, por el aumento de presión en el Pacífico occidental.

### Circulación en el océano profundo: la circulación termohalina y su influencia en el clima

Por debajo de la capa Ekman, la circulación es completamente diferente y depende de las propiedades del agua: densidad, salinidad y temperatura. Por este motivo, a la circulación del océano profundo se le llama circulación termohalina (figura 4), su nombre proviene del griego *thermos* y *halos*. Estas propiedades están relacionadas entre sí:

1. A menor temperatura del agua, más densa es, y por tanto se hunde más fácilmente.
2. A más salinidad, más densidad.
3. A más profundidad en el océano, más densidad.

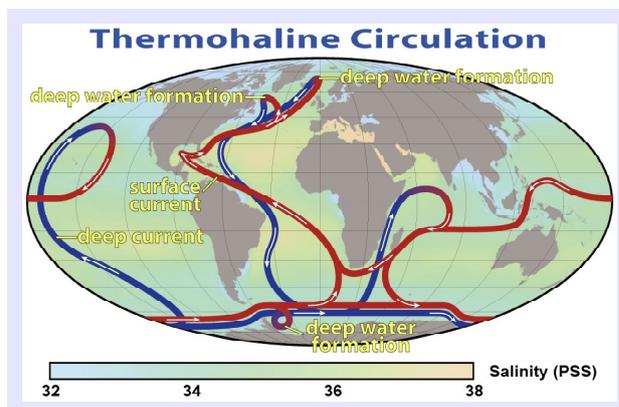


Figura 4. La circulación termohalina. El color azul representa las corrientes de aguas profundas y el color rojo las corrientes de aguas superficiales. Imagen de dominio público de NASA. Disponible en Wikimedia Commons: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermohaline\\_Circulation\\_2.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermohaline_Circulation_2.png).

Las propiedades de esta circulación se conocen por medidas indirectas, como los gases disueltos en los océanos. Gracias a las propiedades de estos gases podemos conocer la fuente de la formación del agua y el momento en el que el agua estuvo en la superficie debido a que, con la profundidad, la concentración de gases como el oxígeno disuelto disminuye debido a, por ejemplo, las bacterias marinas que consumen este gas. Hay un valor para el cual el agua no puede contener más cantidad de un gas disuelto y este acaba siendo expulsado del agua. Este valor se llama punto de saturación y depende de la temperatura y salinidad del agua. La saturación aumenta al disminuir la temperatura.

Actualmente, el cambio climático está alterando la fuerza de la circulación termohalina. El derretimiento del hielo ártico hace que el agua se vuelva más dulce, con lo que es más difícil que se hunda. Una pista de este hecho nos la da la comparación de temperaturas medias entre 2020 y el promedio de 1981-2010, en la figura 6. Se observa como, en el Atlántico norte, al sur de Islandia hay una diferencia negativa de temperatura, al contrario que en el resto de la zona. Esto parece que se está produciendo por el enfriamiento de las aguas del Atlántico norte.

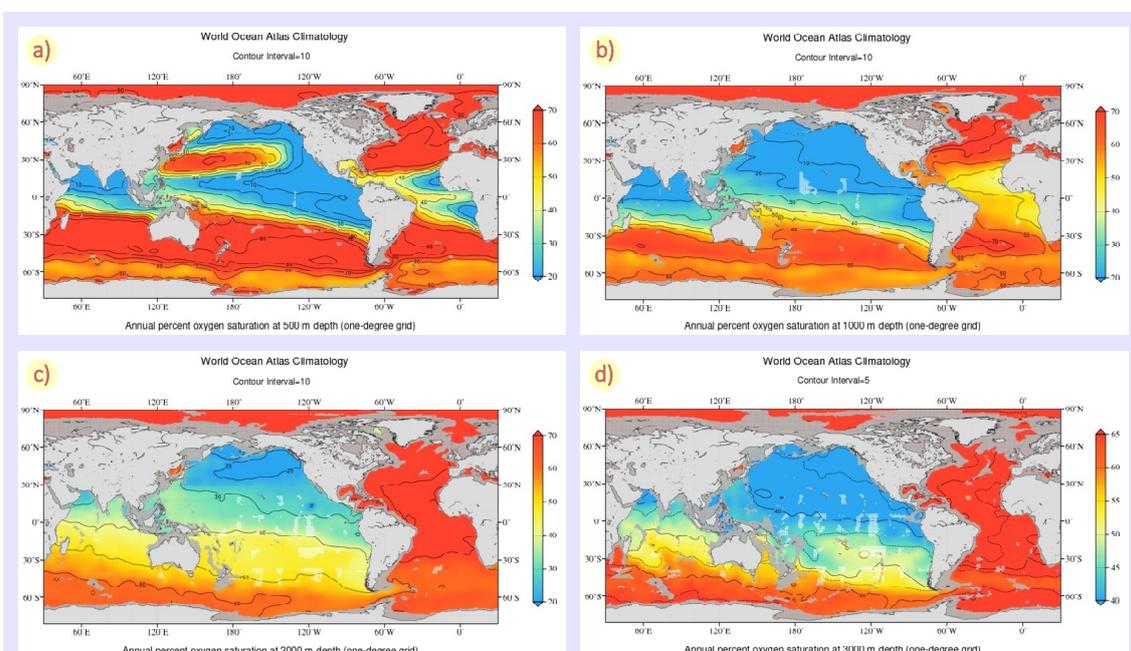
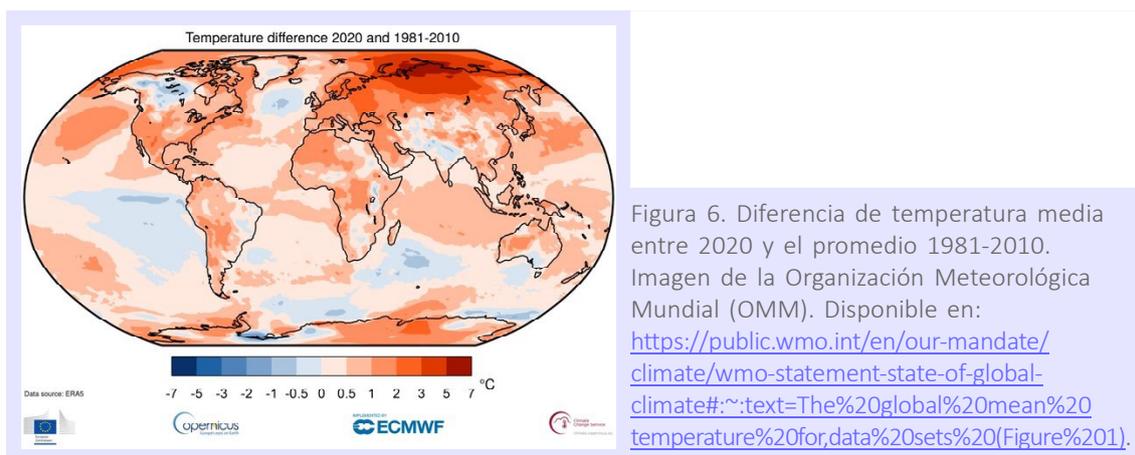


Figura 5. Mapas anuales del porcentaje de saturación del oxígeno a profundidades de 500, 1000, 2000 y 3000 m. Las zonas grises oceánicas muestran lugares donde no hay datos disponibles.

Fuente: [Atlas oceánico de la NOAA](#).

En el atlas oceánico de la NOAA, se pueden ver los mapas globales del porcentaje de saturación del oxígeno en el mundo para distintas profundidades. En la figura 5, se muestra el porcentaje de saturación del oxígeno para profundidades de 500, 1000, 2000 y 3000 m, donde influye la circulación termohalina (en el enlace podéis ver otras profundidades). Se observa como el Atlántico norte registra los porcentajes de saturación más altos (tonos más rojizos). Además los tonos de esta zona apenas se modifican al aumentar la profundidad. Esto permite ver que la fuente de formación de aguas profundas está en el Atlántico norte (NADW, North Atlantic Deep Waters). La fuente de agua es esta zona porque que el agua en estas latitudes es más fría y, por tanto, más

densa, con lo que se hunde más fácilmente. En el Atlántico tropical la saturación del oxígeno es pequeña porque hay una fuerte capa estable que impide la mezcla del agua, de ahí los tonos más azulados de los mapas a menor profundidad. A continuación, el agua continúa su recorrido por el hemisferio sur, hasta llegar al océano Glacial Antártico. En esta zona se forman también aguas profundas, ya que las aguas de esta zona tienen una baja temperatura, aunque el mecanismo de formación de aguas profundas es diferente porque aquí las corrientes son diferentes. Observad que los tonos rojizos y anaranjados son algo diferentes a los del Atlántico norte si se comparan profundidades. Después, estas aguas se desplazan al océano Índico y al Pacífico, donde afloran. Las aguas más antiguas se encuentran en profundidades **intermedias** en el Pacífico norte. En esta zona no se forman aguas profundas, como se puede observar en la figura 5, de ahí que el porcentaje de saturación del oxígeno disminuya tanto a partir de los 500 m. Las masas de agua continúan por el Índico, hasta unirse con las de esta zona y ser transportadas al Atlántico norte, volviéndose a repetir el ciclo. Una vuelta al circuito completo lleva unos 1000 años, de ahí que los cambios que se den en la circulación termohalina tarden en notarse. Esto repercute en la absorción de CO<sub>2</sub>, ya que el océano es uno de los principales sumideros de este gas, por lo que la liberación de este gas por parte de las actividades humanas tendrá un impacto más duradero en los océanos.



Este debilitamiento de la circulación termohalina puede tener consecuencias importantes. La corriente del Golfo y la corriente noruega ejercen una importante influencia en el clima de latitudes medias en el hemisferio norte, ya que traen aguas cálidas, evitando así que el clima europeo sea más frío y más seco.

Alteraciones de la circulación termohalina se han dado en el pasado. Cuando se producía una desglaciación, el hielo ártico se derretía, por lo que disminuía la circulación termohalina. Durante la última era glacial se desprendieron grandes cantidades de hielo, los llamados eventos Heinrich, que enfriaban el Ártico, y alteraban el clima a nivel mundial, por ejemplo calentando de forma rápida la Antártida o el régimen de precipitaciones en varias partes del mundo. Cuando estos desprendimientos cesaban (eventos interstadiales) y el Ártico volvía a enfriarse, aumentaba de nuevo la cantidad de hielo y la circulación termohalina volvía a aumentar su fuerza. En la figura 7 se muestra la fuerza de la corriente del Golfo (AMOC) y la formación de aguas profundas durante esos

eventos. El freno de la circulación termohalina por la fusión del hielo es una de las principales hipótesis que intentan explicar el periodo frío que se dio hace 12 000 años, el Reciente Dryas.

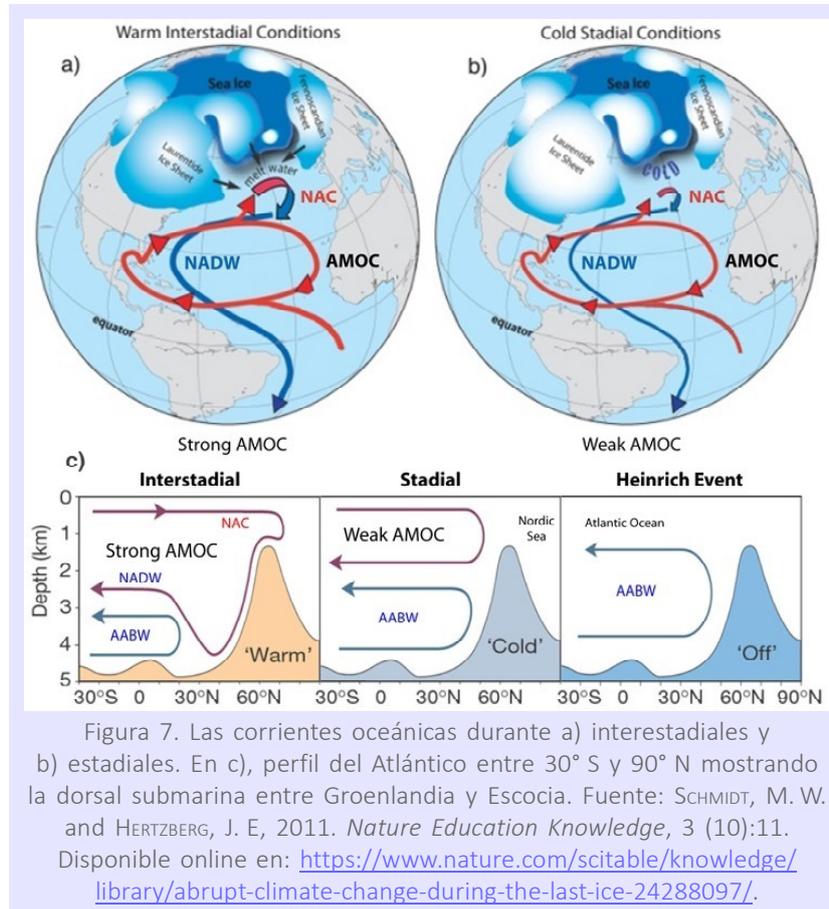


Figura 7. Las corrientes oceánicas durante a) interstadales y b) estadales. En c), perfil del Atlántico entre 30° S y 90° N mostrando la dorsal submarina entre Groenlandia y Escocia. Fuente: SCHMIDT, M. W. and HERTZBERG, J. E., 2011. *Nature Education Knowledge*, 3 (10):11. Disponible online en: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/abrupt-climate-change-during-the-last-ice-24288097/>.

## Bibliografía

CRONIN, T. M., 2010. *Paleoclimates: Understanding Climate Change Past and Present*. Columbia University Press.

CAESAR, L., MCCARTHY, G. D., THORNALLEY, D. J. R. *et al.*, 2021. Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nat. Geosci.*, 14, 118-120. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>.

HARTMANN, D., 2015. *Global Physical Climatology*. Capítulo 7. Elsevier Science. De este libro recomendamos especialmente la figura 16, que muestra la variación vertical de saturación de oxígeno con la latitud en el Atlántico y el Pacífico, y disponible online, para que los profesores hagan presentaciones académicas, en: [https://www.atmos.washington.edu/~dennis/GPC16\\_Figures/](https://www.atmos.washington.edu/~dennis/GPC16_Figures/).

SALBY, M. L., 2012. *Physics of the Atmosphere and Climate*. Capítulo 17. Cambridge University Press.

BARRY, R. G. y CHORLEY, R. J., 2009. *Atmosphere, Weather and Climate*. Capítulo 7. Routledge.