



# EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS MARES

*Javier Martín Vide*

Catedrático de Geografía Física de la Universidad de Barcelona

## Resumen

Los océanos ocupan el 71 % de la superficie y contienen el 97 % del agua planetaria. Constituyen una importante componente del sistema climático, como fuente de vapor de agua y de calor latente, enorme reservorio de calor y sumidero de CO<sub>2</sub>. Poseen una dinámica, como la circulación termohalina y el fenómeno de El Niño, que condiciona los climas del planeta. El cambio climático, inequívoco, tiene su máxima expresión en el calentamiento global, que ha causado la elevación del nivel del mar y la acidificación de sus aguas. En la cuenca del Mediterráneo el aumento de temperatura es aún algo más visible que en el conjunto del planeta.

## Abstract

*The oceans occupy 71 % of the Earth's surface and contain 97 % of the water on the planet. They are an important component of the climate system, as a source of water vapour and latent heat, a huge heat reservoir and a CO<sub>2</sub> sink. They have their own dynamics, such as thermohaline circulation and the El Niño phenomenon, which affect the planet's climates. Climate change, now beyond dispute, is most apparent in global warming, which has caused a rise in sea levels and acidification of ocean waters. In the Mediterranean basin, the rise in temperature is even more noticeable than on the planet as a whole.*

## 1. Introducción

### 1.1. El agua y el sistema climático

Cuando se está buscando agua en los planetas y satélites del sistema solar, como indicio de posible existencia de vida o porque sin agua es impensable la vida, si algún día los humanos nos viéramos obligados a emigrar de la Tierra, en nuestro planeta la presencia del preciado elemento es evidente desde el espacio exterior, con el blanco de las nubes y, sobre todo, con el azul de los océanos. En efecto, la Tierra es un planeta abundantísimo en agua, que se estima en  $1,4 \cdot 10^{21}$  kg (es decir, 1.400 millones de km<sup>3</sup>). Los mares y océanos contienen el 97 % del total de agua y ocupan el 71 % de la superficie del planeta, condicionando sus climas. En la Tabla 1 se presentan los datos básicos de los cinco océanos del planeta.

Tabla 1. Datos físicos de los océanos

Océano	Superficie (millones de km <sup>2</sup> )	Profundidad media (m)	Profundidad máxima (m)
Pacífico	155.557	2.970	10.924
Atlántico	76.762	3.646	8.605
Índico	68.556	3.741	7.258
Ártico	14.056	1.205	5.607
Del Sur (aguas marinas al sur del paralelo 60° S)	20.327	3.270	7.235

Fuente: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/oo.html>.

Si en el pasado hablar de clima era referirse casi exclusivamente al comportamiento estructural de la atmósfera, desde hace unas décadas se prefiere hablar de sistema climático. Este es un complejo sistema compuesto por cinco componentes o subsistemas naturales relacionados entre sí por cuantiosos flujos de energía y materia. La atmósfera es solo una de las componentes del sistema climático, siendo las otras: la hidrosfera, fundamentalmente el océano; la superficie sólida emergida, a veces denominada litosfera; la biosfera, principalmente la vegetación; y la criosfera, constituida por las capas de hielo y nieve, sobre todo, la Antártida y Groenlandia. De hecho, el sistema climático es el mismo sistema natural o sistema Tierra. Las componentes marina, litosférica, biosférica y criosférica tienen una importante influencia en el comportamiento de la atmósfera, por tanto, en el tiempo atmosférico y el clima.

El océano es decisivo en los procesos atmosféricos. Por ocupar el citado 71 % de la superficie de la Tierra podría decirse, con un juego de palabras, que el planeta que habitamos no es el planeta Tierra, sino el planeta *Agua*. Lo más importante, sin embargo, son los flujos de vapor de agua y de calor entre las aguas oceánicas y la atmósfera. Los océanos tropicales son, por ejemplo, la principal fuente de vapor de agua de la atmósfera. Del mismo modo, hay una cuantiosa transferencia energética, en forma de calor latente, desde la superficie marina al aire que descansa sobre ella cuando el agua se evapora. Como la evaporación del agua marina depende de la temperatura de la superficie del mar, así como esta, si es elevada, inestabiliza la columna de aire al calentarla por su base, o, si es fría, la estabiliza al enfriarla, la citada variable térmica es decisiva para explicar el comportamiento de la atmósfera a escalas espaciales variadas. De esta manera, cuando las aguas marinas presentan en superficie una anomalía térmica positiva, es decir, se muestran más cálidas de lo que es normal para el área y la época del año, como ocurre en la cuenca del Mediterráneo en otoño, tras un largo y soleado verano, la llegada de una colada de aire frío puede causar precipitaciones torrenciales. El caso es que ese mar cálido aporta mucho vapor de agua y el consiguiente calor latente, al tiempo que también calienta de forma sensible por su base el aire que llega, lo que le permite elevarse de forma enérgica. Por el contrario, en los mares fríos, afectados por corrientes marinas de carácter frío o por afloramientos de agua fría profunda, o *upwelling*, suele haber nieblas, pero pocas veces llueve, dado que el aire frío en contacto con esas aguas frías es denso y no experimenta ascensos y nubosidad de gran desarrollo vertical, capaz de producir precipitaciones importantes. Los

citados afloramientos de agua fría profunda se producen en áreas costeras batidas por vientos terrales, es decir, de tierra hacia mar. Esos vientos arrastran agua del litoral mar adentro, que debe ser sustituida por agua que aflore de las profundidades, más fría por tanto. Estos fenómenos son muy llamativos en las costas pacíficas de Sudamérica, en Chile, Perú y parte de Ecuador, recorridas por la corriente de Humboldt, aproximadamente paralela a la costa, de sur a norte, que comporta aguas realmente frías procedentes de latitudes altas australes, junto con el *upwelling* que producen los vientos alisios que arrastran agua desde las citadas costas hacia las latitudes ecuatoriales de la margen opuesta del Pacífico, al nordeste de Australia, Nueva Guinea e Indonesia. Por ello, el norte de Chile, parte de Perú y otra de Ecuador al sur de Guayaquil son áreas desérticas, localizándose en el primer país el desierto de Atacama, que abarca los lugares del mundo donde menos llueve en promedio.

## 1.2. Algunas propiedades del agua

El agua tiene algunas propiedades fisicoquímicas que refuerzan la influencia de los océanos en el clima terrestre. Una de las más destacadas es el alto calor específico del agua (1 cal/g·K). Dicho de otro modo, a una determinada porción de agua, sea en masa o en volumen, hay que aportarle mucho calor para que eleve su temperatura en una determinada cuantía, en relación con otras sustancias naturales. Un gramo de agua requiere una caloría para aumentar su temperatura en 1 °C. Del mismo modo, al agua le cuesta enfriarse. Es por ello, por esa inercia térmica, que las masas de agua producen un efecto termorregulador sobre los espacios litorales e insulares, donde la temperatura varía relativamente poco entre el día y la noche y entre el invierno y el verano, en comparación con los ámbitos interiores, continentales, en los que los contrastes térmicos son mucho más acusados. Esa inercia térmica es la que hace que a principios de junio el agua de las costas españolas aún se sienta fría, mientras que entrados en el otoño todavía el baño pueda ser agradable.

Otra propiedad del agua con notables implicaciones en el clima de la Tierra es el hecho de que su máxima densidad se produce a unos 4 °C. Por encima de este valor, el agua es menos densa y por debajo, también. Así, el hielo, con temperatura negativa, flota sobre el agua líquida fría. La repercusión de esto es que nunca los fondos oceánicos se congelan, nunca los mares se hielan en todo su espesor, porque el agua más densa, la que ocupa las capas profundas y los fondos marinos es la que tiene unos 4-5 °C, por tanto líquida. Por este motivo, solo una capa superficial del mar se hiela en las latitudes altas, especialmente en invierno, quedando el resto de la columna oceánica en estado líquido. ¡Qué diferente sería el clima del planeta si los océanos se congelaran en todo su espesor!

Vinculado con todo lo anterior, las aguas marinas presentan una fuerte estratificación, con el agua más cálida, y más liviana, cerca de la superficie y el agua líquida más fría en profundidad. Existe una frontera, o, con más propiedad, zona de transición, entre ambas, denominada termoclina, que se sitúa a unos 80-150 metros de profundidad. Esta estratificación impide

la mezcla de las aguas profundas ricas en nutrientes y pobres en oxígeno con las superficiales mucho más movidas y oxigenadas. Solo avanzado el invierno, cuando la temperatura del aire ha sido baja, las capas marinas superficiales ya enfriadas pueden romper la termoclina y mezclarse con las inferiores.

### *1.3. Los océanos en los Objetivos del Desarrollo Sostenible*

En 2015 Naciones Unidas propone los llamados Objetivos del Desarrollo Sostenible, u ODS, diecisiete, que deberán ser alcanzados en 2030. Se trata de logros y metas para resolver los problemas más graves de la humanidad, entre ellos, por ejemplo, erradicar el hambre en el mundo o universalizar el acceso al agua potable. Uno de los ODS, el 14, ‘Conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible’, se enfoca hacia la conservación del océano y sus recursos. El caso es que los océanos no son solo una componente de primer orden del sistema climático, sino además fuente de vida y de alimento para un porcentaje muy estimable de la humanidad. Algunos hechos que hablan por sí solos de la importancia de los océanos se resumen en la Tabla 2.

Las metas de este ODS se centran en prevenir y reducir la contaminación marina, gestionar y proteger los ecosistemas costeros y marinos, afrontar la acidificación del océano, recuperar las poblaciones de peces y otros animales marinos, prohibir los incentivos a ciertas formas de pesca insostenibles y, en cambio, favorecer otras de tipo artesanal, proteger específicamente algunas áreas marinas y costeras, incrementar el conocimiento y la tecnología marinas y, en conjunto, aumentar los beneficios que suministra el océano con un uso sostenible del mismo.

Tabla 2. Datos destacados sobre la importancia de los océanos desde el punto de vista del desarrollo sostenible

- Los océanos cubren cerca de las tres cuartas partes de la superficie de la Tierra, contienen el 97 % del agua del planeta y representan el 99 % del espacio habitable del planeta en volumen.
- Más de 3.000 millones de personas dependen de la biodiversidad marina y costera para su sustento. Los océanos sirven como la mayor fuente de proteínas del mundo.
- A nivel mundial, el valor de mercado de los recursos marinos y costeros, y su industria, se estima en 3 billones de dólares por año o alrededor del 5 % del PIB mundial.
- Los océanos contienen casi 200.000 especies identificadas, pero las cifras reales pueden ser de millones.
- Los océanos absorben alrededor del 30 % del dióxido de carbono producido por los humanos, amortiguando los impactos del calentamiento global.
- La pesca marina emplea directa o indirectamente a más de 200 millones de personas.
- Los subsidios a la pesca están contribuyendo al rápido agotamiento de muchas especies y están impidiendo los esfuerzos para salvar y restaurar la pesca mundial y los empleos asociados a esta, causando que la pesca oceánica genere 50.000 millones de dólares menos por año de lo que podría.
- En mar abierto los niveles actuales de acidez de las aguas suponen un aumento de un 26 % respecto al comienzo de la revolución industrial.
- Las aguas costeras se están deteriorando debido a la contaminación y la eutrofización. Sin esfuerzos coordinados, se espera que la eutrofización costera aumente en un 20 % en los grandes ecosistemas marinos para el año 2050.

Fuente: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/>.

## 2. El cambio climático actual por causa del reforzamiento antrópico del efecto invernadero

La Tierra tiene una circunferencia ecuatorial de poco más de 40.000 km, distancia que llevamos en el cuentakilómetros de nuestros automóviles poco años después de su compra. El planeta se nos ha hecho pequeño, tal es nuestra capacidad de movilidad y de impacto sobre el medio. Y, además, lo habitamos ya 7.500 millones de humanos, cada día consumiendo una enorme cantidad de recursos y generando un ingente volumen de residuos. No es raro pensar que comenzamos a alterar las componentes del sistema climático no solo a una escala local,

lo que hicimos siempre para obtener recursos de nuestro entorno, sino a una escala global. La primera manifestación y la más visible de la alteración antrópica en el sistema Tierra es el calentamiento global. Desde finales de los años 70 del siglo XX la temperatura media global del aire en superficie ha experimentado un claro aumento, de modo que los años más cálidos desde que existen registros instrumentales son los más recientes. Otros indicadores naturales son consistentes también con el calentamiento que delatan las series climáticas convencionales, tales como el aumento del nivel del mar y el retroceso casi generalizado de los glaciares. Desde 1880 a 2012 la temperatura media global del aire en superficie se ha elevado en 0,85 °C (IPCC, 2014), lo que a resolución planetaria es un cambio sustancial. Regionalmente es la cuenca del Ártico la que está experimentando un aumento térmico más acusado, debido a una mayor absorción de radiación solar cuando el hielo marino se funde. El hielo y la nieve tienen un alto albedo, es decir, una elevada capacidad de reflexión de la radiación solar, que disminuye drásticamente cuando pasa a estado líquido. También la cuenca del Mediterráneo es un *hot spot*, con un aumento de la temperatura superior a la global, por sus especiales condiciones geográficas, de mar casi cerrado y rodeado por relieves notables.

El cambio climático no es una novedad. El planeta que habitamos ha pasado ya por numerosos cambios climáticos, algunos de mucha mayor magnitud que el actual. Sus causas han sido externas o endógenas. Entre las primera está, sin duda, el Sol. De él recibimos una cantidad de energía en forma de radiación electromagnética, principalmente de onda corta, sobre todo la luz, que denominamos constante solar y que supone casi 2 calorías por centímetro cuadrado en un minuto en el límite superior de la atmósfera, perpendicularmente a los rayos solares. Este valor no es exactamente constante, sino que varía algo en función de la actividad del Sol como estrella. Puede darse un mayor o menor número de manchas solares, en correspondencia con más o menos actividad del astro rey, respectivamente; hay de vez en cuando mínimos solares, durante los cuales disminuye un poco la constante solar, etc. Todo ello ocasiona variabilidad y cambios climáticos en el planeta. Igualmente, los llamados ciclos orbitales de la Tierra, con unas variaciones periódicas en la inclinación del eje polar, en la excentricidad de la órbita del planeta alrededor del Sol, etc. han dado lugar a cambios climáticos, como las glaciaciones cuaternarias. Estos factores vinculados al Sol seguirán también en el futuro siendo causa de cambio climático.

Las causas endógenas son de tipo geológico, como la actividad volcánica y la dinámica de placas. Después de las grandes erupciones volcánicas, sobre todo de volcanes localizados en latitudes tropicales, la ceniza y, en general, el material volcánico inyectado en la estratosfera, y repartido por gran parte del planeta, reduce la transparencia atmosférica, de modo que desciende algo la temperatura. Así ocurrió tras la enorme erupción del Pinatubo, en las islas Filipinas, en 1991.

El reparto de las tierras y mares no ha sido siempre el mismo. Los polos norte y sur, aun cuando con una cierta simplificación infantil, a partir del globo terráqueo escolar, parecen iguales, 'blancos' y fríos, son muy diferentes. El polo norte se sitúa en una cuenca marina, la del Ártico, con una corteza de hielo relativamente frágil y en franca regresión desde hace unas

décadas. No es aventurado decir que hacia mediados del presente siglo, si no antes, quedará libre de hielo una ruta marítima a través del Ártico avanzado el verano boreal. El polo sur, por el contrario, se localiza en el corazón de un gran continente, la Antártida, con una elevada altitud media, y con un espesor de hielo continental de unos 3.000 metros. La idea de simetría en el caso de los polos del planeta Tierra es, por tanto, engañosa. Es una casualidad que tengamos en este momento de la historia geológica del planeta dos polos helados. El sur, sin duda, lo está y estará por la localización en un continente; el norte tiene hielo, aunque en clara reducción, porque la cuenca del Ártico está relativamente cerrada a las corrientes marinas cálidas procedentes de latitudes bajas y medias, por lo que su efecto calentador es relativamente reducido. El agua del océano Pacífico apenas puede entrar en el Ártico dado que Asia y América están casi unidas por el estrecho de Bering. Las aguas atlánticas tienen más posibilidades de penetrar en el Ártico, aunque tampoco existe una gran abertura entre Islandia, el nordeste de Canadá, Groenlandia, etc. En todo caso el clima del planeta sería muy diferente si las altas latitudes australes no estuvieran ocupadas por un gran continente, como se ha dado en el pasado.

Las causas naturales descritas han producido cambios climáticos y los seguirán ocasionando en el futuro. Pero ahora hay una nueva causa capaz de cambiar el clima del planeta: el ser humano con sus actividades perturbadoras del medio, en especial con las emisiones de gases de efecto invernadero que produce. La certidumbre de que los humanos estamos detrás del calentamiento actual se ha ido reforzando a la luz de las nuevas investigaciones (Tabla 3). No solo hay que admitir que vivimos en un planeta y en un país más cálidos que tres o cuatro décadas atrás, sino que tal cambio es fruto de nuestro impacto desmesurado en el sistema climático.

Tabla 3. Aumento de la certidumbre de la causa antrópica en el calentamiento global

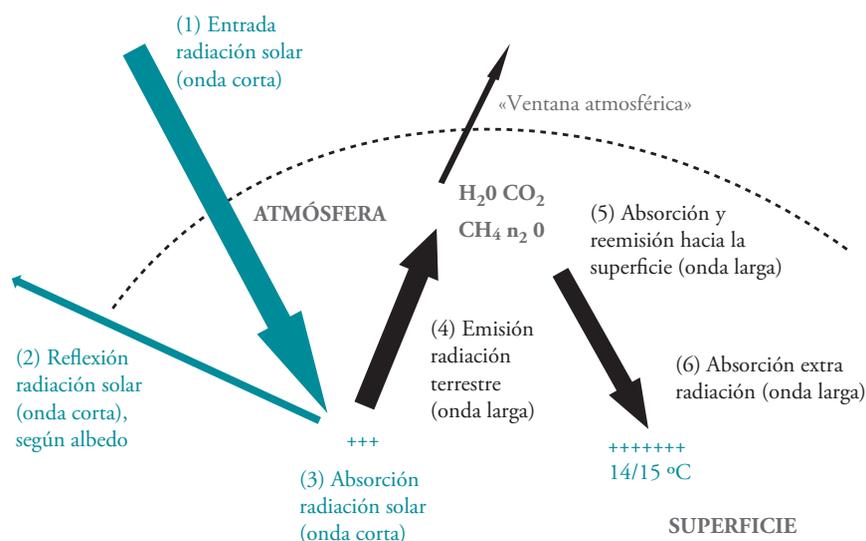
IPCC		Nivel de confianza
Tercero (2001)	«Es probable que la mayor parte del calentamiento observado durante los últimos 50 años se deba al incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero».	66 %
Cuarto (2007)	«Es muy probable que la mayor parte del aumento observado en las temperaturas medias globales desde mediados del siglo XX se deba al incremento observado en las concentraciones de los gases de efecto invernadero antropogénicos».	90 %
Quinto (2014)	«Es sumamente probable que la influencia humana haya sido la causa dominante del calentamiento observado desde mediados del siglo XX».	95 %

Fuente: IPCC tercero (2001), cuarto (2007) y quinto (2014).

El efecto invernadero, asociado al cambio climático es, en realidad, un efecto natural en el planeta Tierra. Entre los gases de la troposfera hay algunos que producen el citado efecto cuya presencia es del todo natural, como el CO<sub>2</sub> o el vapor de agua. El efecto invernadero se esquematiza en la Figura 1. Los gases de efecto invernadero son transparentes a la radiación solar, que es de onda corta, dejándola pasar. Al alcanzar la superficie del planeta una parte es absorbida por ella, mientras que otra es reflejada. La absorción de radiación por la superficie conlleva su calentamiento. De acuerdo a él, la superficie emite radiación hacia la atmósfera, que es de onda larga, por tratarse de un cuerpo relativamente frío (los cuerpos con una tem-

peratura superficial muy alta, como el Sol, emiten una gran cantidad de energía y de onda corta, mientras que los relativamente fríos, como la superficie terrestre, emiten mucha menos cantidad y de onda larga). Los gases de efecto invernadero, como los citados o el metano y el óxido nitroso, tiene capacidad para absorber una parte importante de la emisión de onda larga terrestre, reemitiéndola de nuevo hacia la superficie, por lo que esta experimenta un calentamiento adicional. Este es el efecto invernadero, que da al aire de la superficie de la Tierra una temperatura media de entre 14 y 15 °C, agradable para la vida humana. Sin el efecto invernadero, es fácil calcular que la temperatura cerca del suelo sería de -19 °C. Por tanto, el efecto invernadero hace nuestro planeta 'confortable' en superficie. Sin embargo, desde el inicio de la revolución industrial estamos inyectando en la atmósfera un plus de CO<sub>2</sub>, el que se desprende de la combustión de los combustibles fósiles, carbón, petróleo y gas natural, así como de otros gases con un efecto similar. De esta manera, el efecto invernadero se refuerza, aumentando, como resultado, la temperatura de la superficie del planeta. He aquí el calentamiento global.

Figura 1. Esquema del efecto invernadero

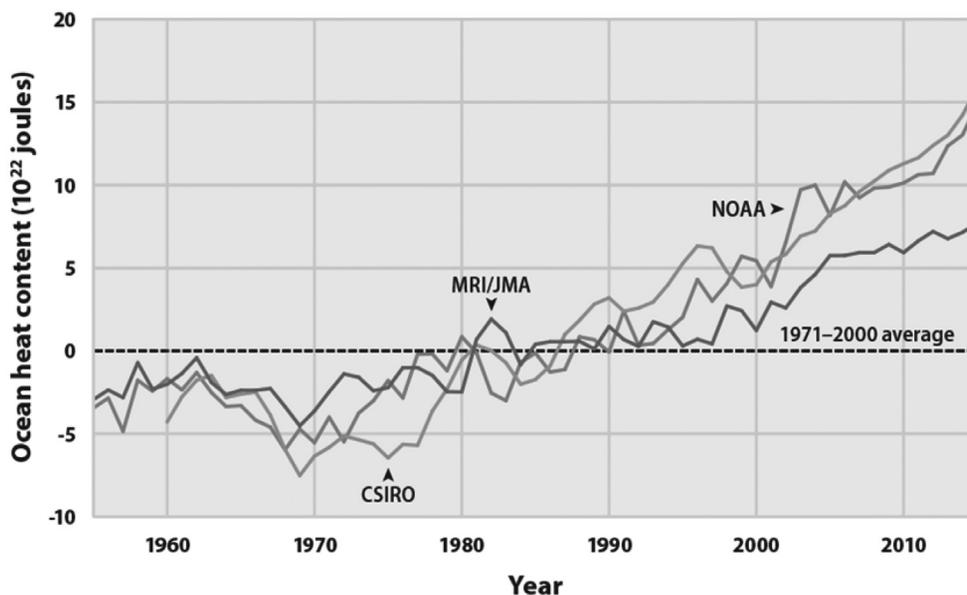


### 3. El reservorio de calor del océano y su calentamiento

Como se ha dicho anteriormente, el agua tiene una elevada capacidad calorífica, de ahí que los océanos almacenen una cantidad de calor inmensa, y así es. El océano actúa como un extraordinario acumulador de calor. Contiene unos 10<sup>23</sup> julios (J), (1 J = 0,24 calorías). En el Gráfico 1 se muestran los cambios en el contenido de calor del océano entre 1955 y 2015, con referencia al promedio del período 1971-2000 (que es el nivel cero), según tres centros de investigación (la NOAA estadounidense, la CSIRO de Australia y el MRI / JMA japonés). Un aumento de 1 unidad en el gráfico (1 x 10<sup>22</sup> julios) es aproximadamente 18 veces la cantidad

total de energía utilizada por todos los humanos del planeta en un año. Como se aprecia, las tres estimaciones coinciden en mostrar una evolución creciente desde la segunda mitad de los años 70 del siglo pasado.

Gráfico 1. Evolución del contenido de calor de los océanos (1955-2015)



<https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-ocean-heat>

<https://www.epa.gov/sites/production/files/styles/large/public/2016-07/ocean-heat-download1-2016.png>

Fuente: CSIRO (2016); MRI/JMA (2016); NOAA (2016).

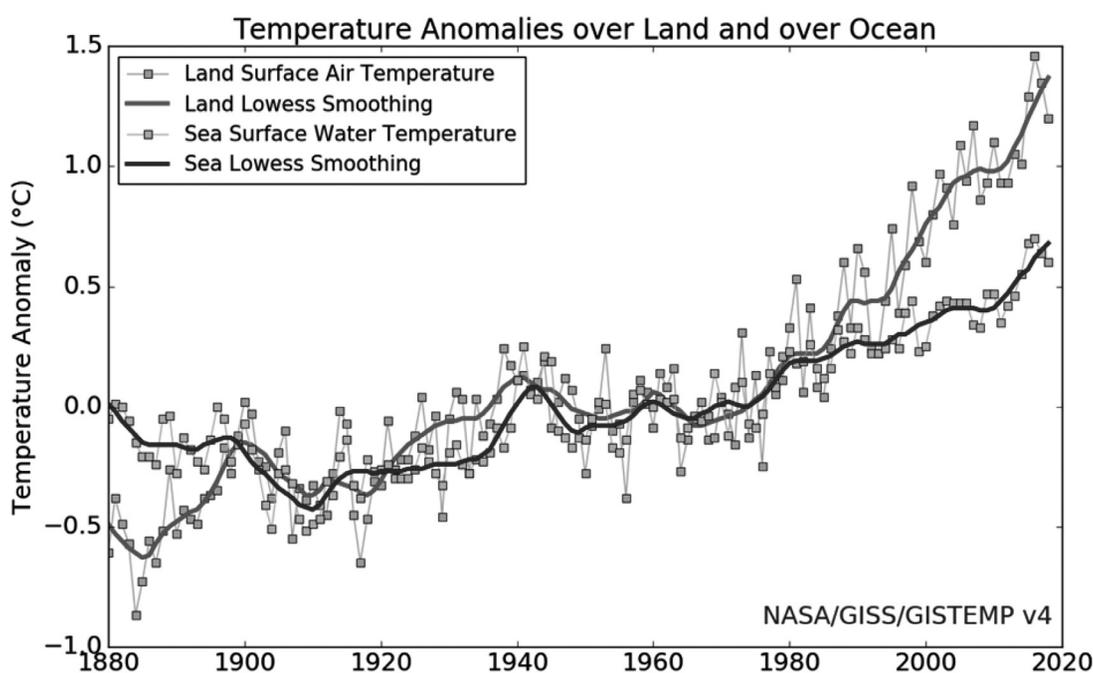
El aumento del contenido de calor en el océano ha producido un claro incremento de la temperatura del agua superficial. En el Gráfico 2 se representan las anomalías anuales de la temperatura del aire de la superficie emergida y de la de las aguas oceánicas superficiales no heladas. Como se aprecia, la temperatura del aire sobre los continentes ha experimentado un mayor aumento que la del océano superficial, como es normal, por la mayor capacidad calorífica del agua.

Uno de los efectos más visibles del calentamiento de las aguas oceánicas es la drástica reducción de la superficie helada del océano Glacial Ártico hacia finales del verano boreal, lo que augura una ruta libre de hielo a través del Polo Norte en pocas décadas, apta para el comercio marítimo. De unos 14 millones de km<sup>2</sup> en los años 70 del siglo pasado en la citada época del

año se ha pasado a la mitad en la actualidad. Por este motivo la cuenca del Ártico es la región planetaria donde la temperatura ha experimentado un mayor aumento.

El calentamiento de las aguas marinas incide en la vida en el océano, dependiendo de los umbrales térmicos de cada especie viva. La proliferación de especies exóticas de mares cálidos en latitudes extratropicales es, por ejemplo, uno de los efectos del calentamiento de los océanos.

Gráfico 2. Evolución de las anomalías de temperatura del aire sobre la superficie emergida y de las aguas oceánicas superficiales, respecto al período 1951-1980, desde 1880 a 2018



Fuente: [https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/graph\\_data/Temperature\\_Anomalies\\_over\\_Land\\_and\\_over\\_Ocean/graph.png](https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/graph_data/Temperature_Anomalies_over_Land_and_over_Ocean/graph.png)

#### 4. El aumento del nivel del mar

La fusión de los hielos continentales –no del hielo marino, que, al fundirse, no produce la elevación del nivel del mar, como ejemplifica un cubito de hielo flotando en el agua líquida rebosante en un vaso– contribuye al aumento de nivel marino. Pero este hecho, ya constatado, tiene otra causa, tan importante o más que la fusión del hielo continental: el aumento de volumen del agua líquida cuando su temperatura se eleva, es decir, la pérdida de densidad, lo que se traduce en la expansión térmica del agua.

En la actualidad el aumento medio global del nivel del mar está entre 3 y 4 mm por año. No parece mucho, pero supondría, de persistir, entre 3 y 4 cm en una década y entre uno y medio y dos palmos en un siglo. Probablemente la elevación se acelerará con la fusión de grandes volúmenes del hielo de Groenlandia y de otros ámbitos fríos. Aunque la elevación sea decimétrica, el impacto en las costas es considerable, por la erosión y pérdida de arena de las playas, la salinización, por intrusión salina, de los acuíferos litorales, el mayor impacto de los temporales marinos, etc.

## 5. La acidificación del océano

El océano es un gran sumidero de  $\text{CO}_2$ . Gracias a él la concentración de este gas en la atmósfera y el aumento consiguiente de la temperatura del aire, aun siendo considerables, alcanzan valores apreciablemente inferiores a los de una Tierra sin océanos. Más de una cuarta parte del  $\text{CO}_2$  emitido a la atmósfera es disuelto en las aguas oceánicas, estimándose que desde el inicio de la revolución industrial han absorbido unas 525 mil millones de toneladas, hoy unos 22 millones de toneladas por día (Smithsonian Institution, <https://ocean.si.edu/ocean-life/invertebrates/ocean-acidification>). Como consecuencia de ello, las aguas marinas se tornan más ácidas, o, dicho de otro modo, disminuye su pH, que es la medida del grado de acidez o basicidad de una disolución: cuanto más bajo, más ácida. El proceso químico es relativamente simple, el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{O}$  se combinan dando lugar a ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), que, aun siendo un ácido débil, aumenta la acidez de las aguas oceánicas. Hay que precisar que el agua oceánica no es ácida (su pH está por encima de 7, que es el umbral por debajo del cual se habla de ácido), pero su pH está disminuyendo de forma rápida.

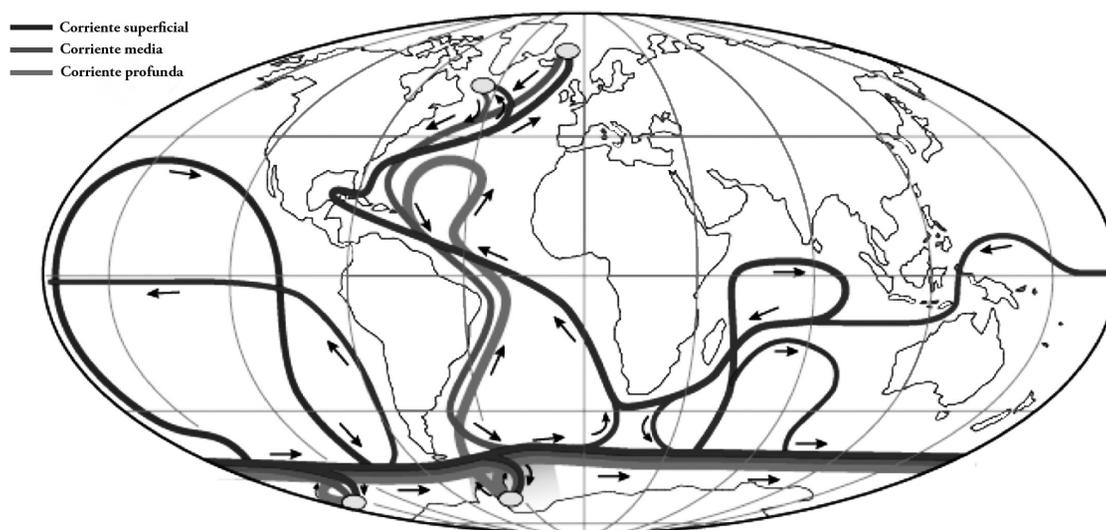
Las consecuencias de esto para la vida marina pueden ser graves, en especial para los animales con estructuras calcáreas, como los corales, y conchas. La composición química de estas es carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), fácilmente atacable por el ácido carbónico. El cambio climático, pues, afecta a la vida marina.

## 6. La circulación termohalina

Las corrientes marinas tienen dos orígenes posibles: la tracción del viento sobre la superficie acuática y la circulación termohalina. La segunda se debe a las diferencias de densidad del agua del mar, que dependen de la temperatura y la salinidad. Así, el agua líquida fría es, como se ha dicho, más densa que la cálida y el agua más salina tiene también más densidad que el agua dulce o menos salina. Por tanto, las aguas más densas son las frías y salinas. La circulación termohalina es compleja y supone el desplazamiento de enormes volúmenes de agua alrededor de los océanos del mundo.

En la Figura 2 se presenta uno de los esquemas de la circulación termohalina más conocidos. Las áreas de formación de agua fría profunda se localizan en las altas latitudes boreales, como en las proximidades de la península del Labrador, en Canadá, y en sectores del Ártico, y en otras junto a la Antártida, porque al congelarse el agua precipitan las sales, que elevan su concentración en el agua líquida fría que queda. Ello inicia una especie de gran cinturón de aguas profundas, que, dependiendo de condicionantes físicos y climáticos, emerge, de manera que hay tramos y ramales superficiales cálidos y otros fríos profundos o muy profundos. La corriente del Golfo, que dulcifica el clima de Europa occidental, al aportar aguas cálidas del golfo de México a las costas atlánticas europeas, forma parte de la circulación termohalina, aunque tiene también origen en la circulación atmosférica, apoyada en los vientos dominantes del suroeste alrededor del gran anticiclón de las Azores.

Figura 2. Esquema de la circulación termohalina global



<https://serc.carleton.edu/details/images/87077.html>

Fuente: Rahmstorf (2002).

El deshielo del Ártico aporta agua con menos concentración de sales, por tanto, menos densa, con lo que la formación del agua fría profunda de las latitudes altas boreales puede disminuir y, con ello, debilitarse el gran cinturón de la circulación termohalina. Ello tendría consecuencias en los climas de algunas regiones del mundo.

Las corrientes marinas, sean cálidas o frías, y, en general, la temperatura de las aguas del mar, condicionan decisivamente los climas de los ámbitos litorales y prelitorales, y de las islas. En el caso citado de la corriente del Golfo produce una acusada disimetría entre la temperatura de las costas occidentales de Europa y las orientales de América, para una misma latitud, como ejemplifican las temperaturas medias anuales del aire de Oporto y Nueva York, a una latitud parecida, de dos grados centígrados inferior la segunda, y con un invierno crudo, con nieve y heladas, casi desconocidas en la ciudad portuguesa. Un debilitamiento de la corriente del Golfo daría lugar a inviernos bastante más rigurosos en Europa occidental. Un cambio rápido de este tipo se denomina cambio climático abrupto, no siendo global ni muy duradero.

En general, las costas occidentales de los continentes en latitudes medias y medias-altas son más cálidas que las opuestas. En un mismo continente encontramos otro ejemplo muy ilustrativo con las temperaturas medias anuales de Vancouver (en el Pacífico canadiense), con 10 °C, y Gander (en Terranova), al este de Norteamérica, en el mismo paralelo, con solo 4 °C. Lo contrario ocurre en las latitudes bajas, donde las costas occidentales de los continentes son apreciablemente más frescas que las orientales, como ejemplifican Río de Janeiro (Brasil), costa oriental de América del Sur, en el trópico de Capricornio, con 24 °C, y Antofagasta (Chile), en la costa occidental y el mismo paralelo, con solo 17 °C.

## 7. El Niño

Uno de los temas de vanguardia en la Climatología actual es el de las teleconexiones o, técnicamente, patrones de variabilidad de baja frecuencia. Etimológicamente, teleconexión es conexión a distancia. Una teleconexión es una conexión entre los comportamientos de las componentes del sistema climático o de las variables de una de ellas a miles de kilómetros de distancia. En la atmósfera una teleconexión se establece a partir de un dipolo de presión, es decir, de un anticiclón y una depresión o borrasca, distantes entre sí, pero cuyo comportamiento está relacionado. Por ejemplo, cuando el anticiclón es potente, a menudo la borrasca es profunda; o cuando se debilita el primero, se rellena la segunda; o hasta cuando uno cambia de signo, es decir, el anticiclón se convierte en una depresión, lo contrario ocurre con esta. Lo mismo acontece entre componentes, de manera que lo que ocurre en el océano en una determinada área tiene que ver con el comportamiento de la atmósfera en otra región, a veces lejana. Estas relaciones visualizan que en el medio natural todo está vinculado de alguna manera.

A nivel planetario la teleconexión más importante por su escala de afección, que es el conjunto del planeta, es El Niño o, por su acrónimo, el ENSO (*El Niño Southern Oscillation*). Cuando se produce este fenómeno prácticamente en todo el planeta, con una cierta dilación temporal, aumenta la variabilidad climática o se dan anomalías y fenómenos atmosféricos extremos. El Niño es el ejemplo más claro de la dependencia existente entre la atmósfera y el océano, hablándose de un fenómeno acoplado entre ambas componentes del sistema natural.

Aunque excede con mucho las dimensiones de este capítulo, una descripción somera del fenómeno ha de considerar la atmósfera y el océano, separadamente y en conjunto. Por una parte, el dipolo de presión del fenómeno lo conforman el gran anticiclón del Pacífico tropical-subtropical, a unos 30° S, a menudo muy próximo a las costas del norte de Chile, Perú y el sur de Ecuador, y, a miles de kilómetros de distancia, el área depresionaria ecuatorial del norte de Australia, Nueva Guinea e Indonesia. Como es sabido, el viento sopla desde los anticiclones a las depresiones, de manera que lleva aire desde las costas pacíficas de América del Sur hacia las citadas regiones ecuatoriales. Son los vientos alisios del Pacífico austral, que arrastran agua en dirección oeste. El dipolo da lugar a un clima desértico, por efecto del anticiclón, en las áreas sudamericanas citadas, con algunos de los desiertos más extremos del mundo en cuanto a la carencia de lluvias, como el de Atacama, en el norte de Chile, y en el extremo opuesto, a regiones muy lluviosas. Esta es la situación normal o neutra, la habitual, que se corresponde con aguas muy frías en las costas pacíficas de Sudamérica, por la ya citada corriente de Humboldt y el afloramiento de aguas frías profundas. Este sustrato marino frío estabiliza el aire, impidiendo su elevación y, por tanto, la precipitación, lo que refuerza el efecto también neutralizador de la lluvia del anticiclón, por el movimiento subsidente o descendente del aire en su seno. Sin embargo, recurrentemente, pero sin periodicidad fija, el dipolo atmosférico se debilita, así como los alisios, lo que coincide con la llegada de una corriente de agua cálida ecuatorial procedente del norte a las citadas costas sudamericanas. La retirada del anticiclón y la llegada de las aguas cálidas inestabiliza la atmósfera de manera que se producen precipitaciones, a veces torrenciales, en lugares donde casi nunca llueve. Hablamos entonces de El Niño, término que procede del lenguaje popular de los pescadores peruanos para referirse a la corriente marina cálida, que sustituye a la de Humboldt, y que suele acontecer en fechas próximas a las de la Navidad (cuando nace el Niño Jesús). Las aguas cálidas producen también un impacto notable en la biosfera marina, con la desaparición de las especies de aguas frías que se pescan habitualmente en la región. En Indonesia, en cambio, y en países próximos El Niño trae un período de sequía, incluso con incendios forestales. Para completar este patrón de variabilidad, a veces se observa el anticiclón más potente de lo normal, con aguas también aún más frías de lo habitual frente a Chile y Perú, reforzándose la estabilidad en el este del Pacífico y las condiciones de inestabilidad en el oeste del océano, hablándose de La Niña. Hoy se considera que el fenómeno del ENSO en su conjunto lo compone un ciclo El Niño (fase cálida) / La Niña (fase fría), pasando por una fase neutra.

Los modelos meteorológicos son ya capaces de establecer predicciones estacionales, a unos meses vista, sobre la evolución del fenómeno, lo que permite adelantarse a sus efectos. Esto puede ser vital en algunos países, porque cuando se da un Niño o una Niña intensos, en algunas regiones del planeta llueve más o menos de lo normal, dando lugar a condiciones favorables para la reproducción de ciertos vectores transmisores de algunas enfermedades endémicas del trópico, como la malaria. Disponiendo de las previsiones, los servicios médicos y de protección civil pueden estar preparados para afrontar el brote de la enfermedad, y así salvar vidas.

Finalmente, un Niño intenso supone un calentamiento tan marcado del Pacífico ecuatorial que deja huella en la temperatura media del planeta en el año en que ocurre, apareciendo como un año relativamente cálido.

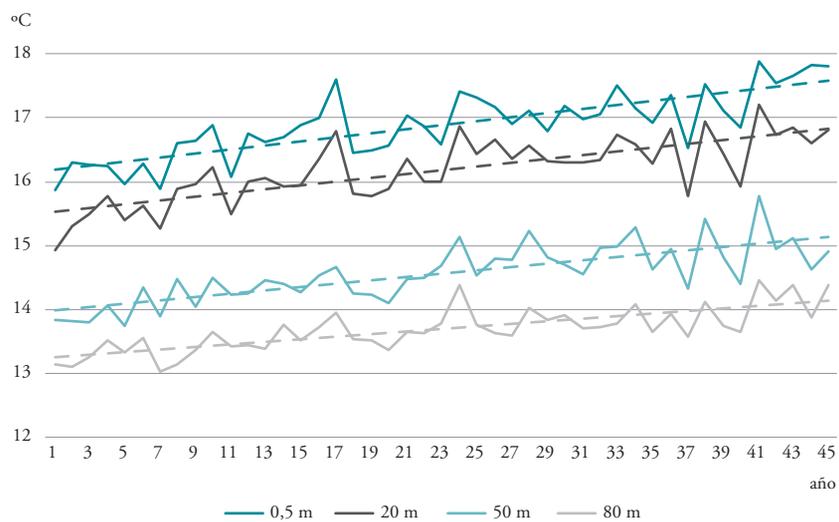
## 8. La cuenca del Mediterráneo y el cambio climático

La cuenca del Mediterráneo, incluyendo las aguas del mar homónimo, sus islas y las tierras ribereñas, constituye una de las regiones del planeta con una personalidad geográfica y climática más singular. Por una parte, es un ámbito situado en una franja latitudinal entre los paralelos 33 y 42° N, aproximadamente, y localizada al oeste de Eurasia. Por esas dos condiciones participa esencialmente de un clima mediterráneo, a caballo entre el marítimo de latitudes medias de las costas occidentales, al norte, y el de los desiertos tropicales, al sur. Esto ocurre en otros ámbitos del planeta, como la California estadounidense, la región Central de Chile y los extremos meridionales de África y Australia, en el caso de las regiones australes con los climas limítrofes opuestos. Sin embargo, la cuenca del Mediterráneo supone una profunda entrada del mar entre los continentes europeo y africano hasta llegar a Asia, sin paragón en los otros ámbitos de clima mediterráneo. Además, la cuenca del Mediterráneo está rodeada por notables relieves que la aíslan del exterior, dando lugar a que sus aguas, notablemente cálidas en verano y otoño, generen una masa de aire característica, la que descansa sobre las aguas del mar, cálida y húmeda. De nuevo, el mar y la atmósfera íntimamente relacionados.

El calentamiento actual está dando lugar a un aumento nítido de la temperatura de las aguas del Mediterráneo, como revelan las excelentes series del Observatorio de l'Estartit, en la Costa Brava (Gráfico 3). Incluso a 80 metros de profundidad la tendencia al alza es estadísticamente significativa. Del mismo modo, la temperatura del aire en la cuenca del Mediterráneo muestra una evolución paralela a la planetaria, pero con una tasa de aumento algo superior. Es decir, aunque en general el aumento de la temperatura del aire sobre el océano ha sido menor que sobre los continentes, en el caso de la cuenca mediterránea el incremento térmico sobrepasa el global.

Un estudio muy reciente sobre la región que nos concierne estima en 1,4 °C el aumento de temperatura del aire en el conjunto de la cuenca del Mediterráneo en el período 1880-2015 (Cramer *et al.*, 2018), lo que ilustra la respuesta más acusada al calentamiento de la región.

Gráfico 3. Evolución de la temperatura del agua a las profundidades de 0,5, 20, 50 y 80 m en l'Estartit (Costa Brava) desde 1974 a 2018. En °C



Fuente: Josep Pascual. Elaboración propia.