

El agua de mar y las corrientes marinas

Podríamos decir que el agua de mar se asemeja más a una sopa que al agua pura. Se asemeja a una sopa en el sentido que contiene muchas moléculas disueltas y también muchas partículas que permanecen suspendidas en el agua. Los gases disueltos dentro del agua de mar más importantes son el nitrógeno (N_2), el oxígeno (O_2) y el dióxido de carbono (CO_2); los dos últimos varían según la actividad biológica, sobre todo.

Composición elemental del agua de mar

Los elementos y moléculas más abundantes determinan la llamada *composición elemental* del agua de mar, que es la siguiente:

Oxígeno	85,8 %
Hidrógeno	10,8 %
Cloro	1,9 %
Sodio	1 %
Magnesio	0,13 %
Azufre	0,09 %
Calcio	0,04 %
Potasio	0,04 %
Bromo	0,007 %
Carbono	0,003 %

La salinidad

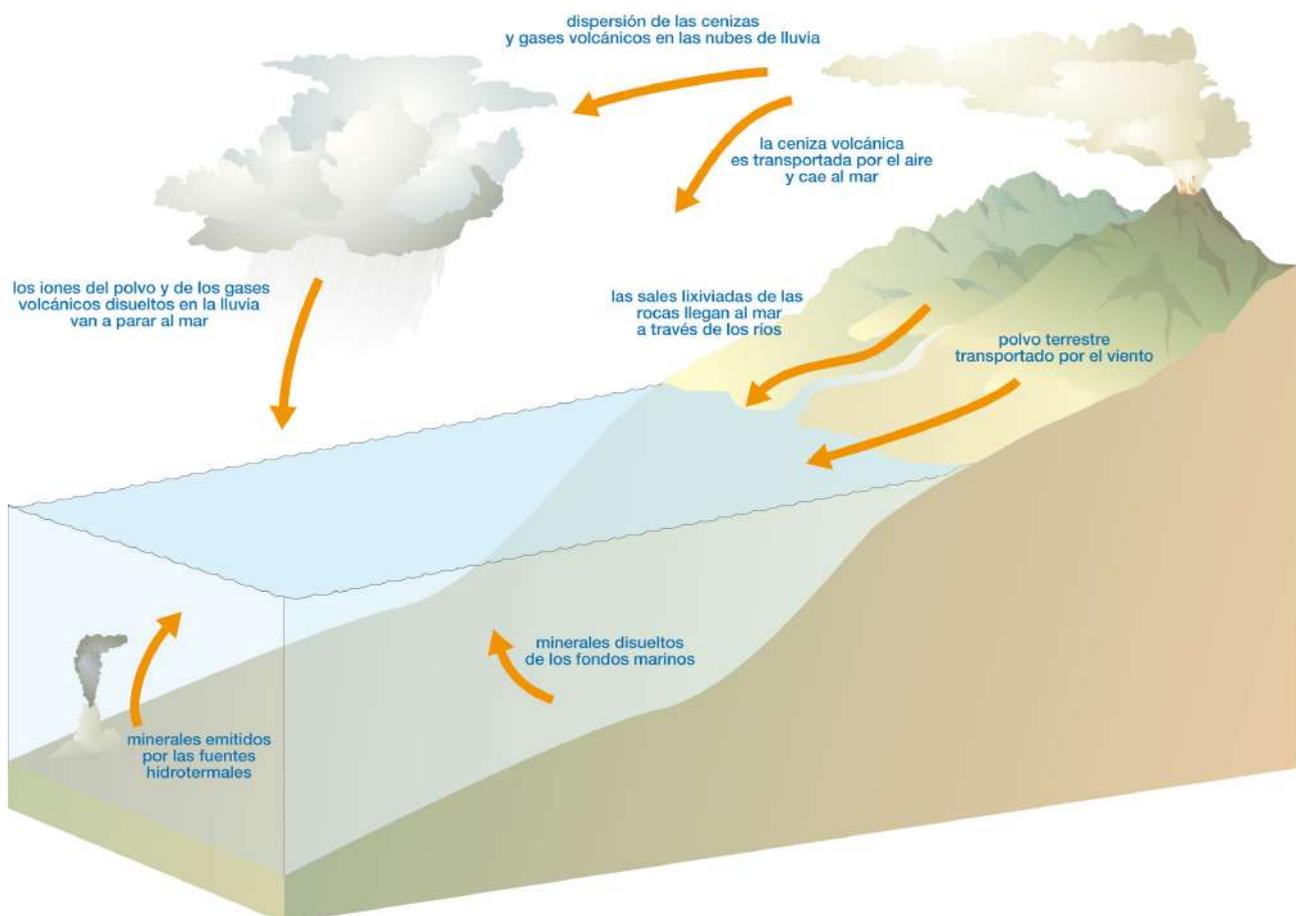
Muchas de las sustancias que hay dentro del agua son tan pequeñas que no se ven a simple vista. Entre las sustancias que hay disueltas en el agua, encontramos numerosas sales, las cuales le confieren al agua más salinidad de la que tienen las aguas continentales. El agua de mar tiene una salinidad media de unas 35 psu.¹ Esto quiere decir que cada litro de agua de mar contiene aproximadamente unos 35 g de sales disueltas, entre las cuales predomina el cloruro de sodio (NaCl), conocido comúnmente como sal. Estas sales contribuyen a dar al agua de mar más densidad que las aguas continentales, y también hacen que el punto de congelación del agua de mar sea menor, unos $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1 psu: unidad práctica de salinidad.

La densidad —cantidad de masa por unidad de volumen que hay en una solución— del agua es afectada por su salinidad y temperatura, a pesar de que ambas tienen efectos contrarios sobre la densidad: a mayor salinidad, más densidad y, en cambio, a menor temperatura, más densidad.

Pero la salinidad del agua de mar puede variar bastante entre diferentes mares. Por ejemplo, en el mar Muerto, que está bastante aislado y en el cual hay mucha evaporación, la salinidad puede ser muy elevada —más de un 280 ‰ aproximadamente, es decir, unas once veces más salado que el océano en promedio—; en cambio, en la Antártida encontramos habitualmente salinidades de 33 o 34 psu, debido en parte a efectos de dilución de los icebergs y las masas de hielo continental.

Pero ¿de dónde vienen las sales del mar? Los iones que forman la sal de los océanos llegan al agua por varios mecanismos: el transporte a través de los ríos —tras ser disueltos de las rocas terrestres en un proceso que se denomina lixiviación—, las surgencias hidrotermales del fondo del mar, el polvo que el viento transporta desde tierra, y las cenizas volcánicas.



Jordi Corbera

Fig. 1. Esquema de las mayores fuentes de las sales que encontramos en el mar.

A veces, se pueden observar grandes aporres de polvo de tierra adentro, transportados por los vientos, sobre el océano; las tormentas de arena provenientes del desierto del Sáhara fotografiadas desde un satélite son un ejemplo.

La salinidad del mar suele variar en función de la estación del año y de las condiciones ambientales. La evaporación tiene un efecto concentrador de la salinidad; en cambio, las avenidas de agua de los ríos y de la lluvia contribuyen a disminuir la salinidad del mar. A veces, si la evaporación es muy intensa, en las lagunas litorales puede llegar a desaparecer el agua y se forman precipitados de sal. Esto ocurre en las salinas.



Fig. 2. La arena de los desiertos puede ser transportada mar adentro por los vientos, como se ve en esta imagen de satélite de la costa atlántica de África.



Fig. 3. ← Las salinas se crean en lugares donde la evaporación es muy intensa. → Cristal de sal visto al microscopio.

En general, el agua de mar tiene más sales disueltas que las aguas continentales. Pero las proporciones de los diferentes solutos pueden ser muy diferentes. Por ejemplo, a pesar de que el agua de mar tenga casi tres veces más bicarbonato (en concentración) que las aguas de los ríos, el porcentaje de este bicarbonato respecto al resto de las otras sales disueltas es menor en el agua de mar: el bicarbonato disuelto representa un 48 % de las sales de los ríos, pero solo un 0,14 % de los iones del agua de mar.

Estas diferencias se deben a los distintos tiempos de residencia en el agua que tienen los diferentes solutos. El *tiempo de residencia* es el tiempo promedio que permanece una molécula o una sustancia en el agua de mar. Así, por ejemplo, el sodio y el cloro tienen tiempos de residencia muy largos; mientras que el calcio tiende a precipitar muy rápidamente. Por lo general, encontramos

la sal del océano en forma de iones —partículas cargadas, algunas con carga negativa y otras con carga positiva—. Las concentraciones aproximadas (en porcentaje) de iones en el agua de mar, presentes en estas proporciones en todos los océanos, son:

Cl ⁻	55,3 %
Na ⁺	30,6%
SO ₄ ²⁻	7,7 %
Mg ²⁺	3,7 %
Ca ²⁺	1,2 %
K ⁺	1,1 %
Bicarbonato	0,4 %

Muchas de estas sustancias, y otras que se encuentran en el mar en menores cantidades, son de vital importancia para los organismos marinos. Por ejemplo, numerosos organismos construyen las partes más duras de su cuerpo con carbonato de calcio, y el fitoplancton necesita hierro para desarrollarse. Algunas moléculas que están disueltas en el agua son esenciales para numerosos organismos, como los fosfatos, los nitratos, el amonio y los silicatos; otras, como el hierro, también son necesarias para muchos organismos, pero en menores cantidades.



Laura Arín (ICM-CSIC)

Esther Garcés (ICM-CSIC)

Fig. 4. ← Los organismos del fitoplancton necesitan numerosos nutrientes para vivir: algunos en mayores cantidades y otros en menores. → Las diatomeas necesitan silicio para construir sus frústulas.

Las corrientes marinas

Los océanos, a pesar de parecer muy homogéneos desde fuera, están recorridos por corrientes marinas muy distintas entre sí: algunas son más frías, otras más calientes, otras más saladas. Podríamos decir que las corrientes se asemejarían a ríos dentro del mar. Su dinámica es vital no solo para los organismos marinos, sino también porque contribuyen a distribuir el calor por el planeta, lo que, a su vez, da lugar a la distribución de los grandes climas. Además ayudan a suavizar el clima litoral en las zonas de climas extremos; esto es posible gracias al elevado calor latente del agua, que es la energía que necesita el agua para cambiar de fase o estado. Hay corrientes marinas superficiales, y otras profundas.

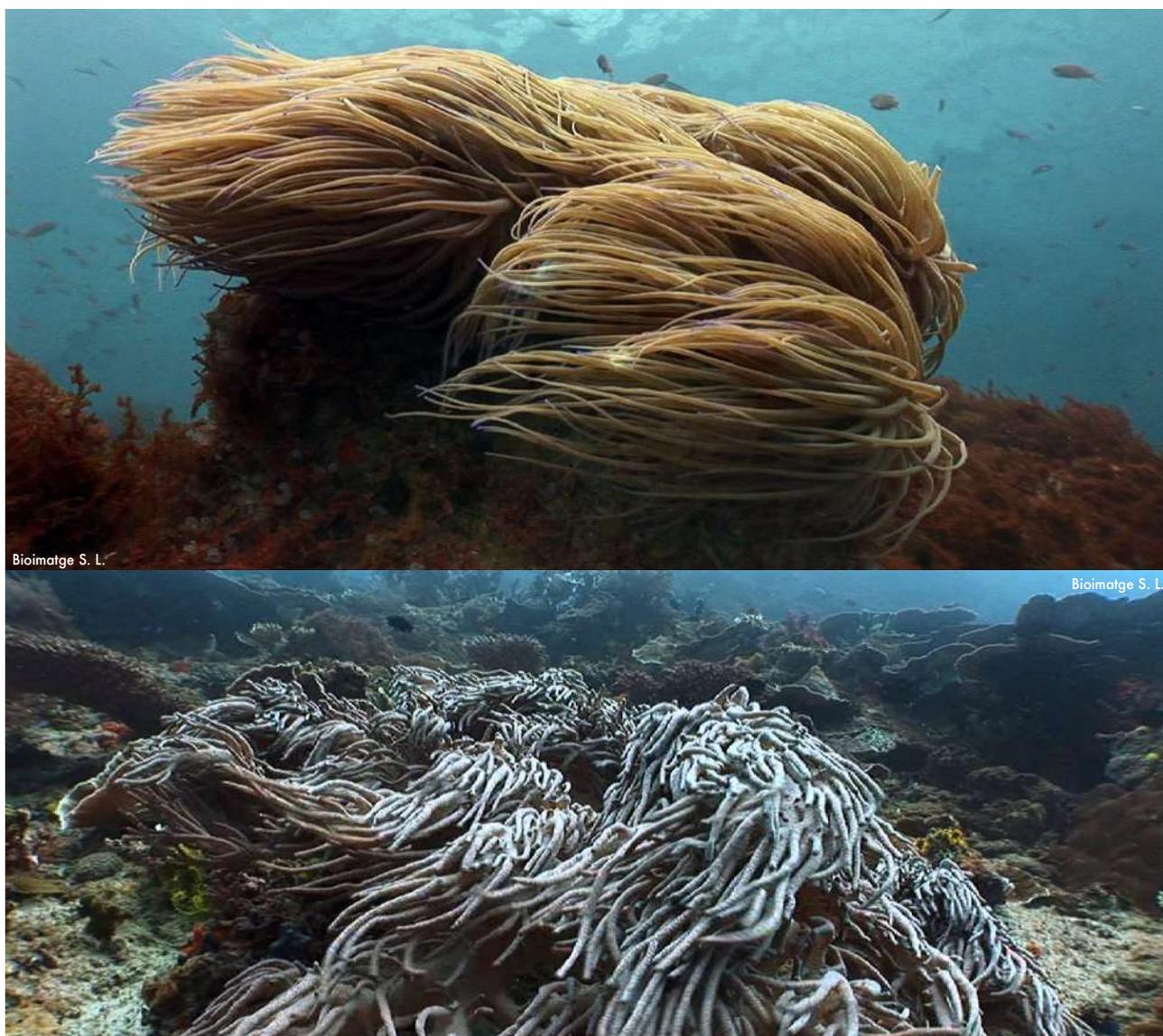


Fig. 6. Las corrientes marinas son vitales para los organismos que viven en el mar.

Las corrientes marinas son importantes para los organismos que viven en el mar. Por ejemplo, muchos organismos sésiles filtradores dependen de las corrientes marinas que les transportan el alimento necesario para vivir. Por eso, muchos de estos organismos se sitúan de manera que sus estructuras filtradoras aprovechen mejor la corriente predominante y capturen el mayor número de partículas.

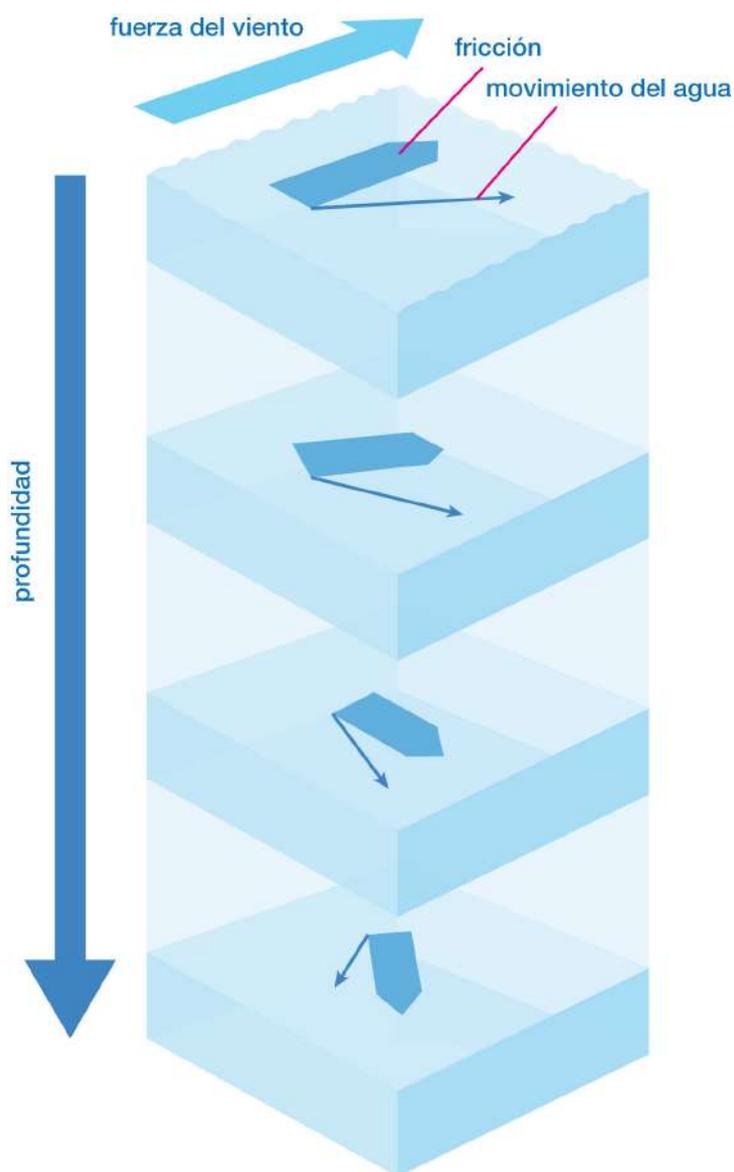


Fig. 7. ↑ Los organismos filtradores sésiles orientan sus cuerpos para aprovechar las corrientes. ↓ Las gorgonias extienden sus pólipos de modo que forman una especie de red para atrapar el alimento.

Corrientes marinas superficiales

Las corrientes superficiales suelen estar impulsadas por los vientos: cuando el viento sopla sobre una masa de agua, impulsa las aguas más superficiales creando una corriente, que fluirá no en la dirección del viento, sino con cierto ángulo, hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. El modelo que explica el efecto del viento sobre el agua se denomi-

na *espiral de Ekman*; esta, sumada al *efecto de Coriolis* de los vientos —un efecto de la rotación de la Tierra sobre los vientos que van en dirección norte-sur—, genera el llamado *transporte de Ekman*, que predice que, en general, el agua se moverá en la dirección perpendicular a la del viento.



Jordi Corbera

Fig. 8. Esquema de la espiral de Ekman.

Si se combina el efecto del viento dominante y del transporte de Ekman, la resultante es un sistema de circulación circular a gran escala. Estas grandes corrientes circulares, formadas a su vez por varias corrientes, se denominan *giros oceánicos*, y hay cinco en todo el mundo.

Las zonas donde se encuentran físicamente diferentes corrientes marinas suelen ser bastante productivas en términos biológicos.

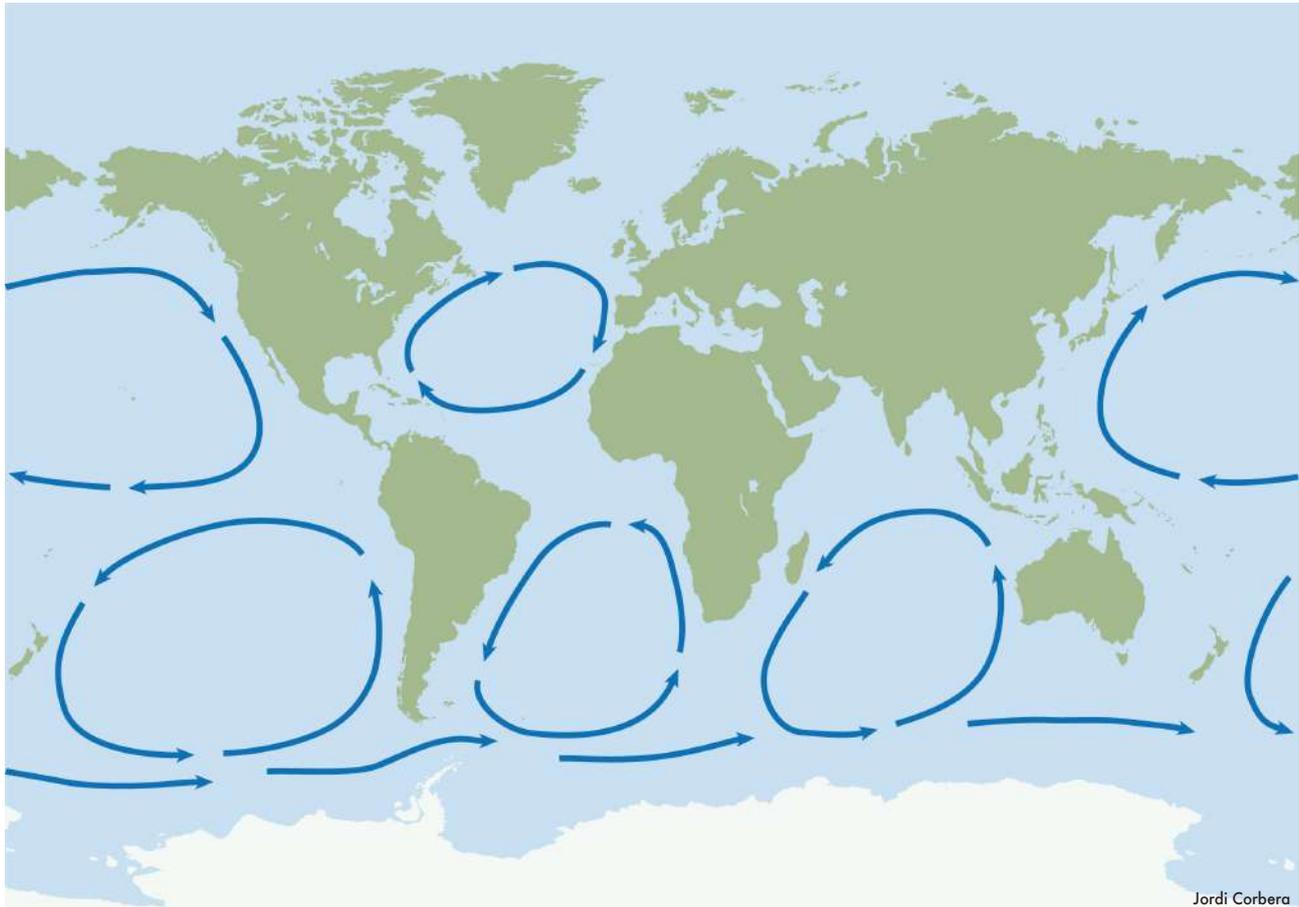


Fig. 9. Los cinco grandes giros oceánicos en el mundo.

La circulación profunda: circulación termohalina, afloramiento y hundimiento

Tanto la salinidad como la temperatura, al afectar a la densidad del agua, juegan un papel importante en la circulación oceánica, o *circulación termohalina*, causada por diferencias de densidad entre las diferentes masas de agua, el calor que reciben las aguas superficiales, los vientos y las avenidas de aguas continentales. El agua más densa se hunde y deja que su lugar en la superficie lo ocupen masas de agua menos densas. Hay dos puntos de formación de aguas profundas en el océano global: uno cerca de Groenlandia y otro en el mar de Weddell, en la Antártida. Las aguas profundas se crean gracias al incremento de densidad de las aguas polares muy frías y ricas en sales provenientes de la formación de hielo marino, en parte. Las aguas frías y saladas que se han hundido en las latitudes altas del Ártico se dirigen por el fondo del mar hacia la Antártida, donde se bifurcan hasta que vuelven a aflorar en el océano Índico y en el océano Pacífico. Los vientos

provocan corrientes superficiales que transportarán el agua menos densa y más cálida hacia el Atlántico Norte, donde se hundirá de nuevo al enfriarse y ganar salinidad. Este patrón de circulación a escala global, impulsado por las dos principales zonas de formación de aguas profundas, tarda unos mil años en completarse.

Durante su recorrido por el planeta, las grandes masas de agua transportan tanto energía en forma de calor como materia en forma de sólidos, gases y sustancias disueltas. Esto hace que, como decíamos, esta circulación sea en buena parte responsable de la distribución de los grandes climas de nuestro planeta. Si, en un escenario de cambio global, este patrón global de circulación cambiara, las consecuencias podrían ser muy notorias para la vida terrestre, porque probablemente cambiarían los patrones climáticos actuales.

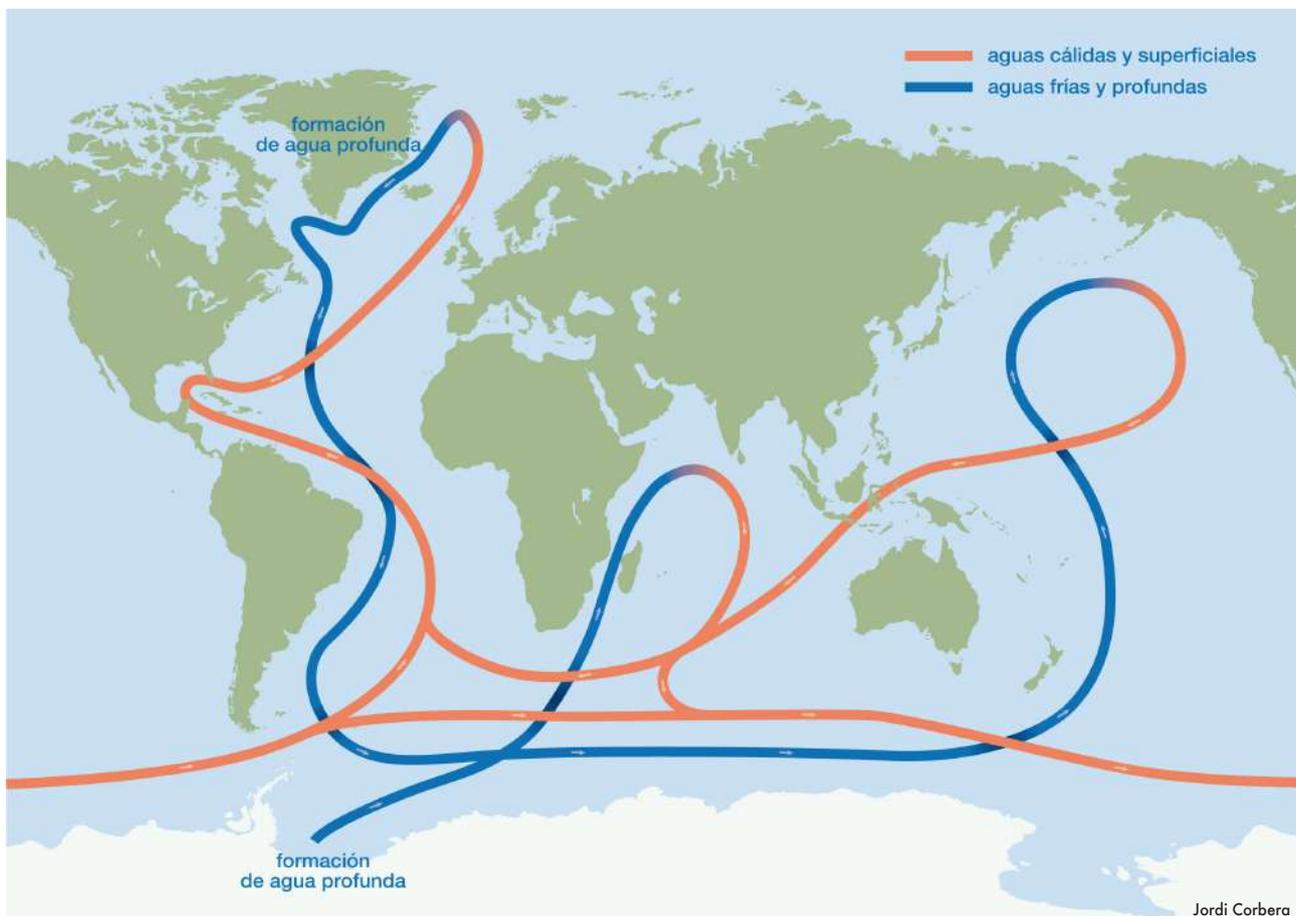


Fig. 10. El cinturón de circulación oceánica muestra los patrones globales de circulación del agua de mar por el planeta; se observan los puntos de formación de aguas profundas en las regiones polares.

Hay lugares donde las aguas profundas, frías y ricas en nutrientes son transportadas hacia la superficie. Estas corrientes, denominadas de *afloramiento*, favorecen la proliferación de plancton y permiten que haya mucha producción biológica. Hay varios tipos de corrientes de afloramiento. Las corrientes de afloramiento son compensadas por *corrientes de hundimiento*, que son las que transportan agua más densa sobre el fondo.

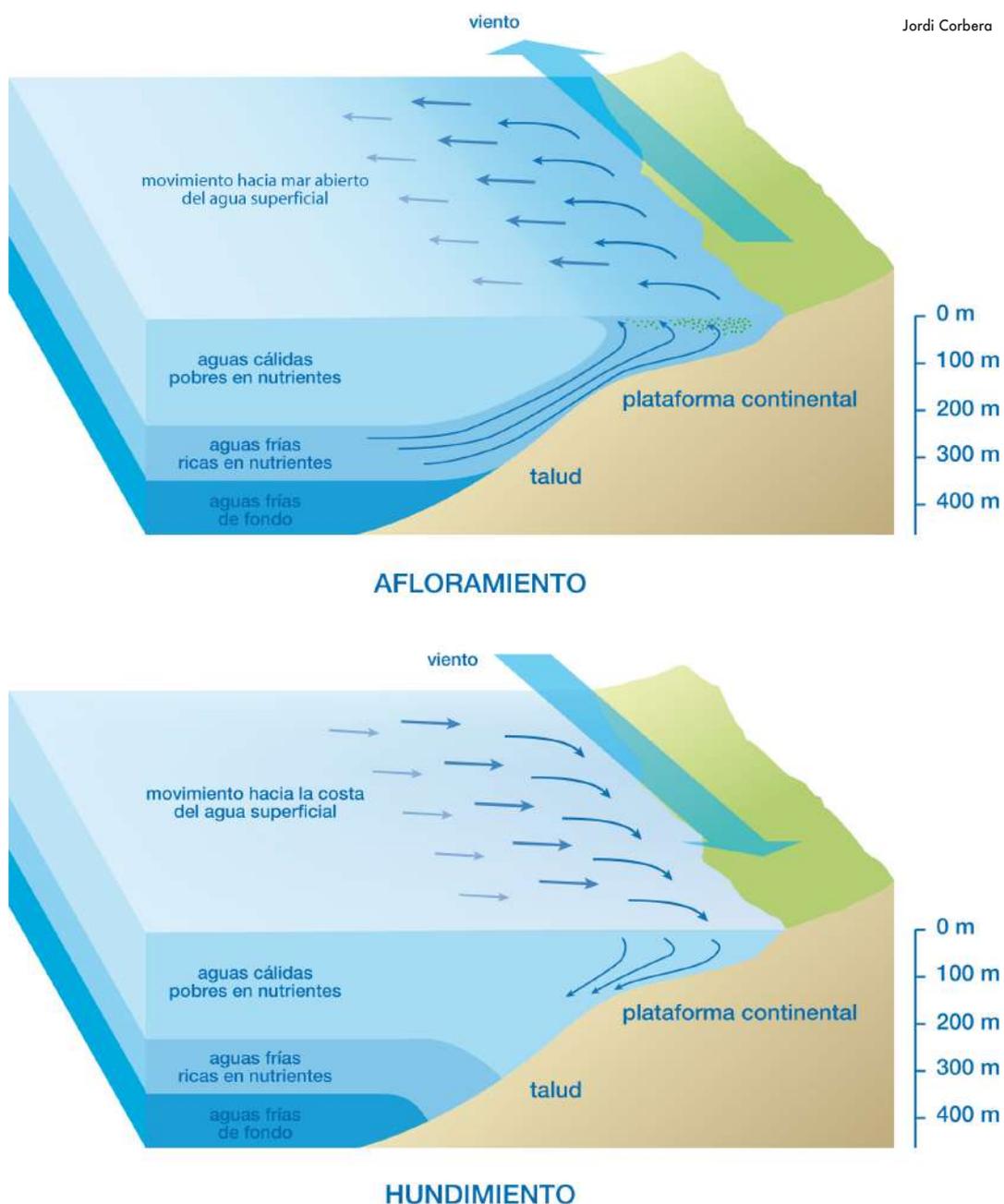


Fig. 11. Representación gráfica de los mecanismos costeros de afloramiento y de hundimiento.

La termoclina y la temperatura del agua

Los mecanismos explicados anteriormente son posibles gracias a que las aguas de diferente densidad no suelen mezclarse si no es gracias a la ayuda de importantes fuentes de energía externas, como podrían ser grandes tormentas. De hecho, este fenómeno lo podemos observar también en masas de agua menores. Por ejemplo, puede ser que alguna vez, al bañarnos cerca de la costa, hayamos experimentado que tenemos la parte superior del cuerpo dentro de una masa de agua caliente, pero en cambio tenemos los pies en agua más fría. Esto suele pasar porque, cuando el sol calienta, el agua superficial va creando una capa de agua más caliente, y si se calienta bastante rápidamente, se crean unas diferencias de temperatura considerables respecto a las aguas más profundas. Esta zona de máximo gradiente de temperatura, que separa la masa de agua más fría de la más caliente, se denomina *termoclina*. Cuando el viento sopla fuertemente o cuando hay un temporal, las aguas se remueven, la termoclina se rompe y las aguas vuelven a mezclarse. La termoclina también es una frontera para numerosos organismos microscópicos, que no pueden atravesarla.

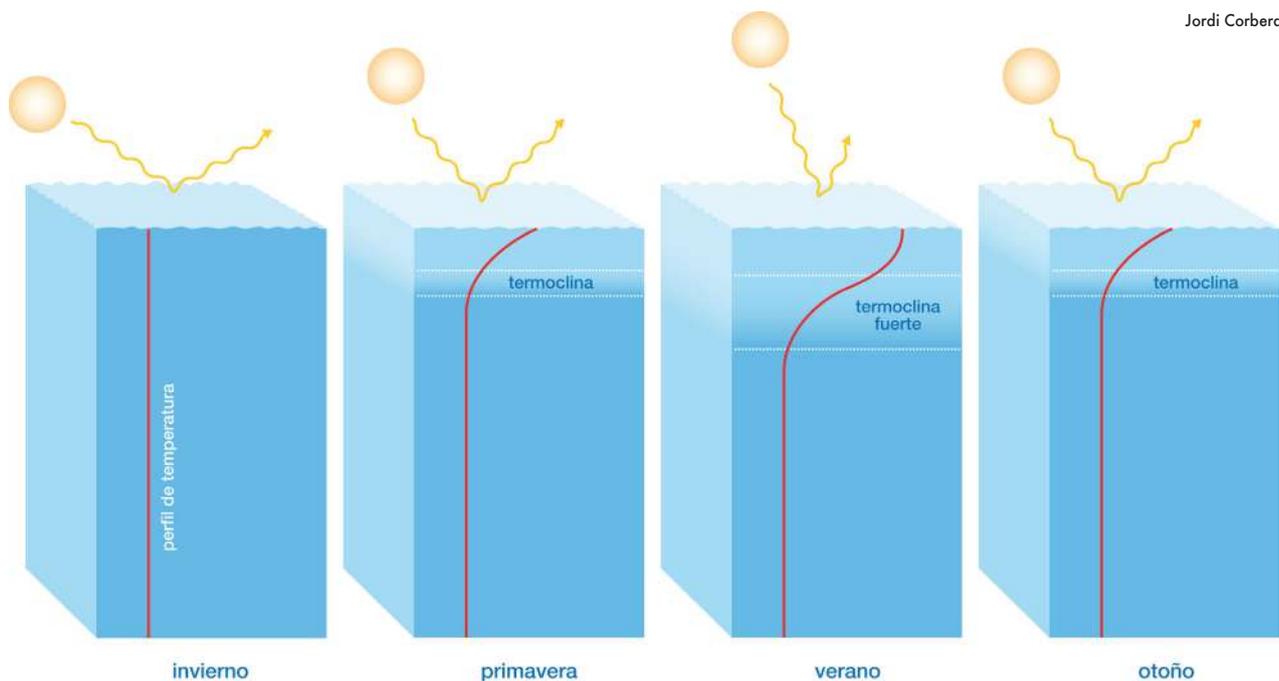


Fig. 12. Esquema de la estacionalidad de la termoclina en un mar templado.

En general, la temperatura del agua de mar varía bastante, sobre todo, en las capas superficiales. Podemos encontrar aguas a una temperatura que oscila desde $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente. Pero en general, la temperatura tiende a disminuir con la profundidad, y por debajo de los 1500 m suele estar entre 2 y $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en todas partes. En las regiones templadas, los cambios

de temperatura del agua superficial son más acusados; en cambio, en las latitudes altas, el agua siempre está muy fría. Hay organismos adaptados a vivir a todas estas temperaturas. Algunos de ellos pueden sobrevivir en un rango bastante amplio de temperatura, y los denominamos *euritermos*; otros sobreviven solo en ambientes con temperaturas bastante concretas, y los denominamos *estenotermos*.



Fig. 13. La temperatura del agua de mar puede presentar grandes diferencias entre los mares cálidos, como ↑ el del Caribe, y los fríos, como ↓ el mar de Weddell, en la Antártida.

El pH del agua de mar

El pH del agua de mar tiene un papel muy importante sobre la química misma del agua y, por lo tanto, también sobre la actividad biológica de los organismos que viven en ella. Por ejemplo, debido a las crecientes emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, cada vez hay más CO₂ disuelto en el agua, lo que hace que el pH del agua de mar disminuya.

Este incremento de la acidez tiene implicaciones sobre el mismo ciclo del carbono, puesto que, por ejemplo, favorece la disolución de las estructuras biológicas hechas de carbonato de calcio, como serían las cubiertas externas de los corales, de organismos microscópicos –cocolitoforales, por ejemplo– o, incluso, de los esqueletos de los erizos de mar.

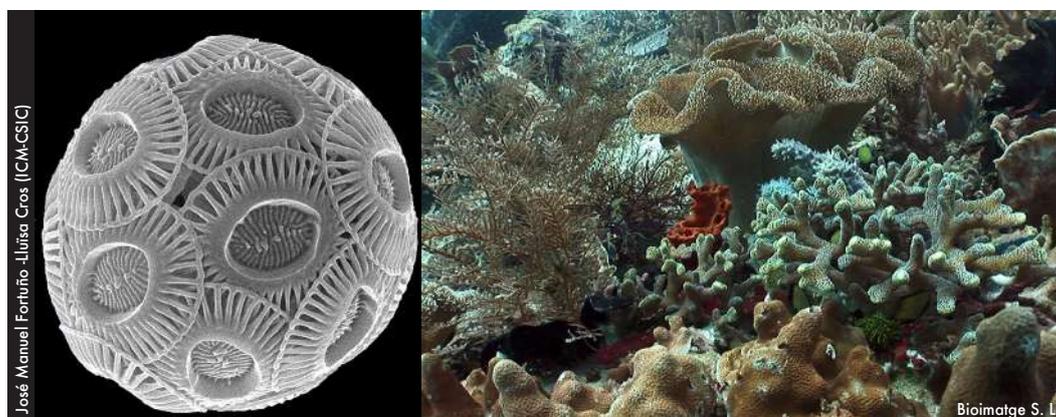


Fig. 14. Tanto algunas estructuras de organismos microscópicos, como ← las cocolitoforales, o de organismos macroscópicos, como → los corales, están hechas de carbonato de calcio.

Intercambio de gases entre la atmósfera y el océano

El agua de mar, además de interactuar con la litosfera, también interactúa con la atmósfera. En la superficie del mar existe un intercambio constante de gases entre el aire y el agua, que tiende al equilibrio. Algunos de los gases que se intercambian son de vital importancia para el ecosistema global. Por ejemplo, para realizar la fotosíntesis oxigénica, los fotótrofos marinos, entre ellos el fitoplancton, consumen dióxido de carbono disuelto en el agua de mar. Este consumo es compensado por la entrada de dióxido de carbono atmosférico en el mar. En cambio, el fitoplancton desprende oxígeno como resultado de la fotosíntesis, y buena parte de este oxígeno pasará a la atmósfera.

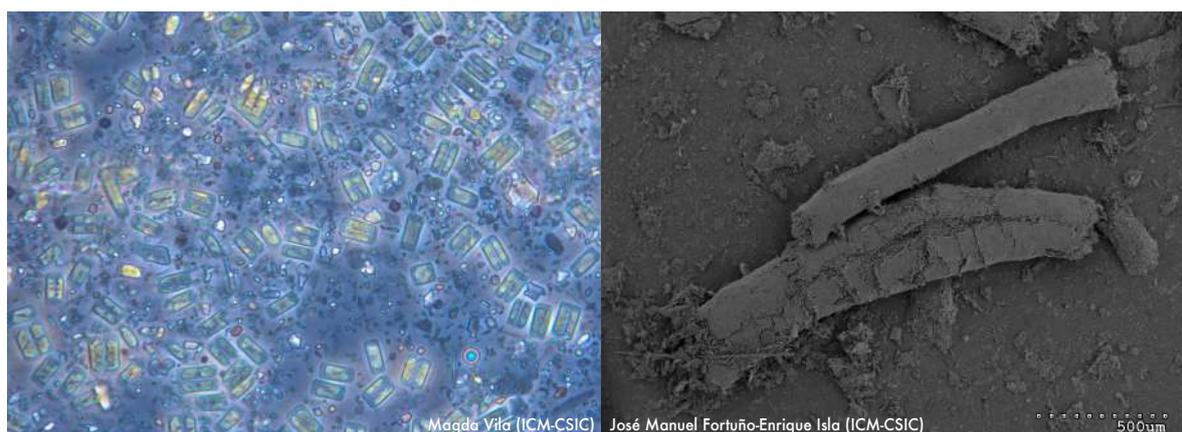


Fig. 15. ← El fitoplancton actúa como secuestrador de parte del carbono atmosférico, así como → los paquetes fecales —imagen obtenida con un microscopio electrónico— de organismos zooplanctónicos.

Se calcula que aproximadamente un 50 % del oxígeno atmosférico ha sido producido por el fitoplancton de los océanos. Este proceso de intercambio de gases resulta de vital importancia porque

ayuda a sacar dióxido de carbono de la atmósfera; el fitoplancton actúa como secuestrador del carbono atmosférico y permite que este sea incorporado a otros organismos a través de la cadena trófica, y que buena parte de él acabe integrado, con el tiempo, en los sedimentos del fondo del mar. Este proceso se ha denominado *bomba biológica*.

Otras sustancias que pasan a la atmósfera incluyen compuestos de azufre que actúan como núcleos de condensación de nubes. Esto quiere decir que favorecen la formación de nubes y, por lo tanto, ayudan también a enfriar el planeta, porque estas nubes reflejan la luz del sol de nuevo hacia fuera.

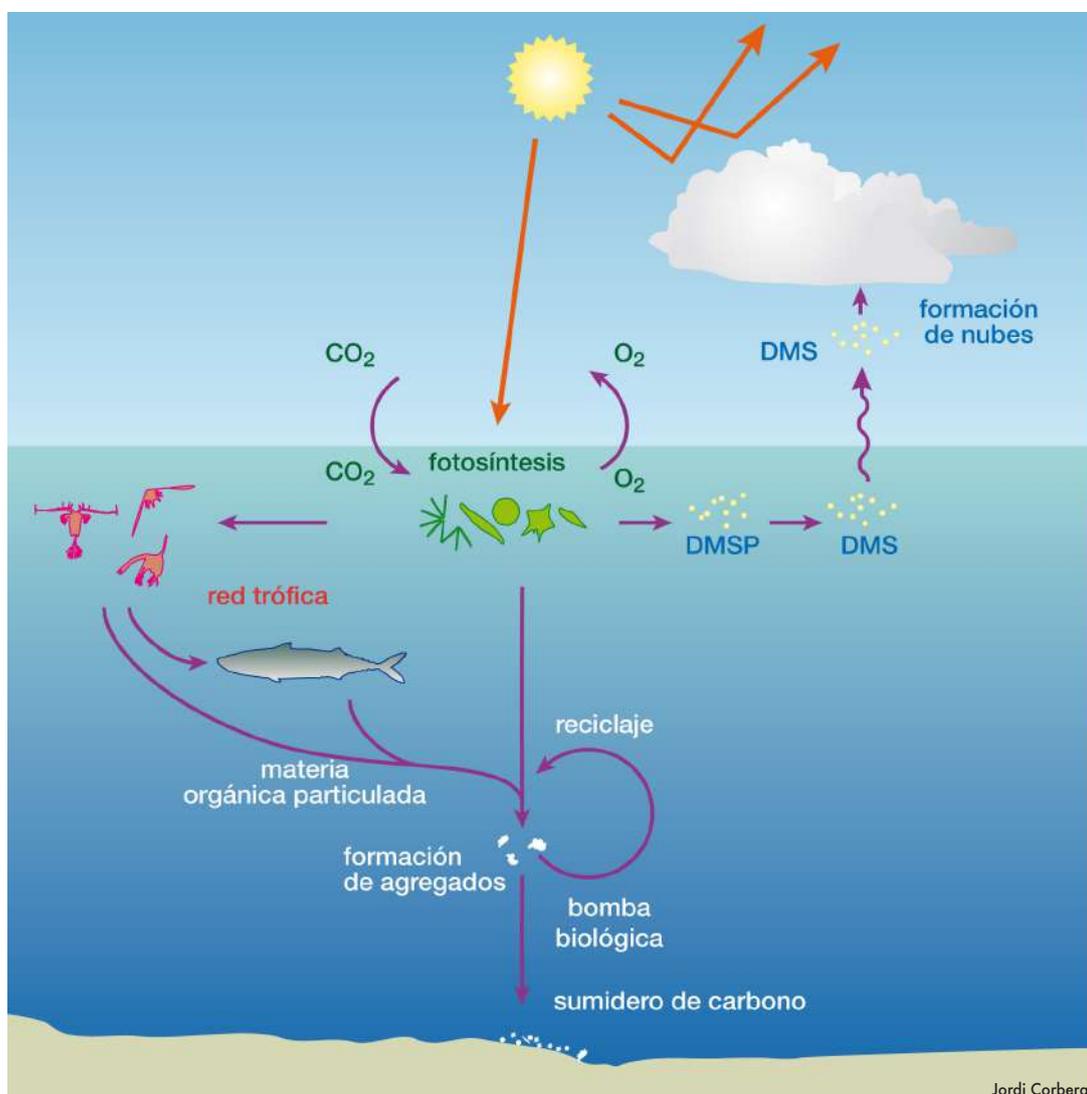


Fig. 16. Esquema del papel del fitoplancton en procesos ecológicos que ponen de manifiesto las relaciones entre la atmósfera y la hidrosfera: la producción de oxígeno, la bomba biológica y la formación de nubes.

Las olas

La acción del viento sobre la superficie del agua suele originar olas. Las olas pueden tener alturas muy variables y ser más o menos frecuentes, según la velocidad, duración y superficie sobre la cual actúe el viento. Las olas transportan energía de un lugar al otro. Cuando llegan a la costa, su dinámica interactúa con el fondo del mar, lo que las va frenando y va haciendo que sus crestas se levanten hasta que finalmente rompen. Su acción sobre la costa es continua: van erosionando las rocas y, por lo tanto, remodelan constantemente el litoral. Seguramente, si escuchamos a la gente de mar, a menudo oiremos que hablan de diferentes tipos de olas y que dan al mar nombres específicos como *mar rizada*, *marejada*, *mar gruesa*, *mar de fondo*.

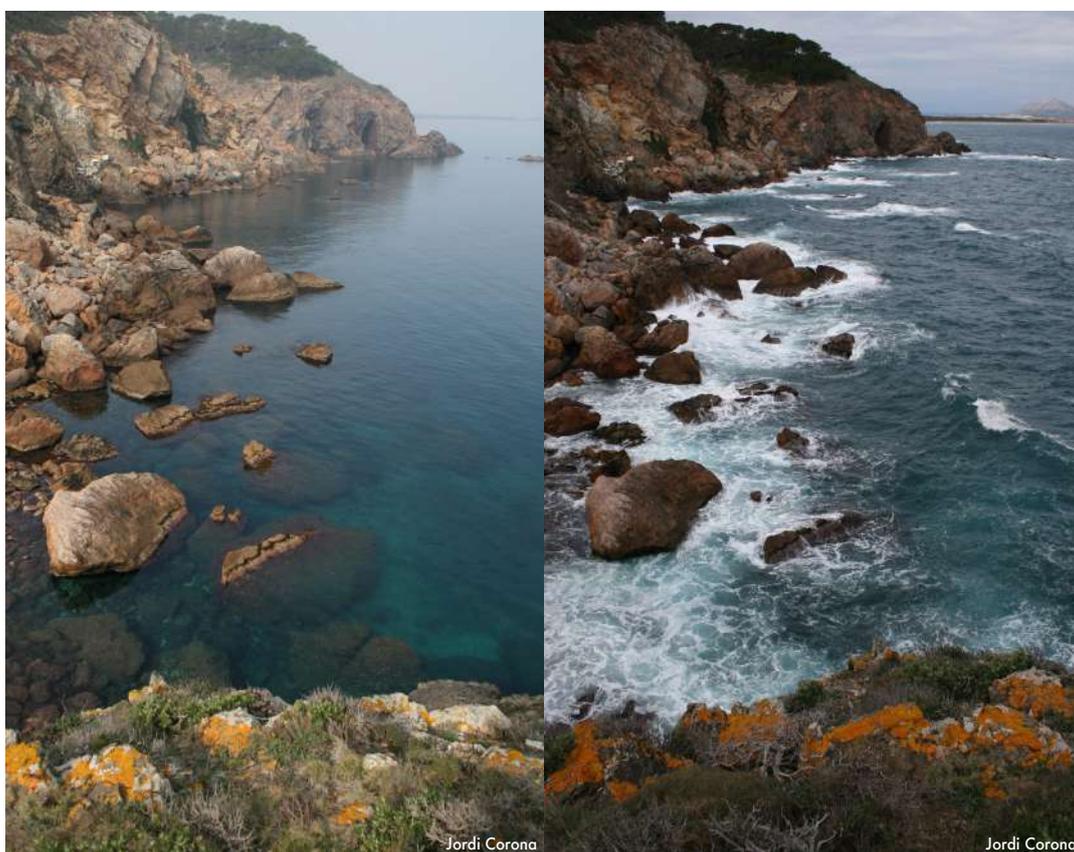
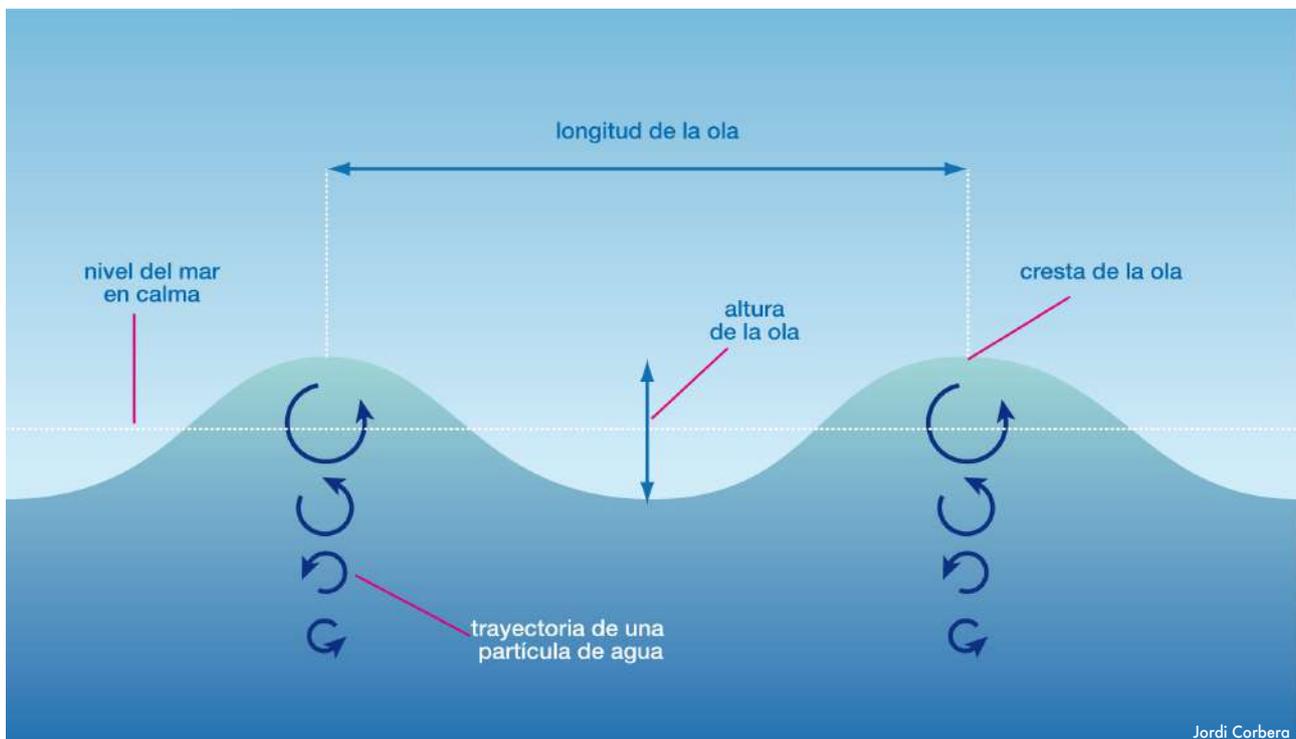


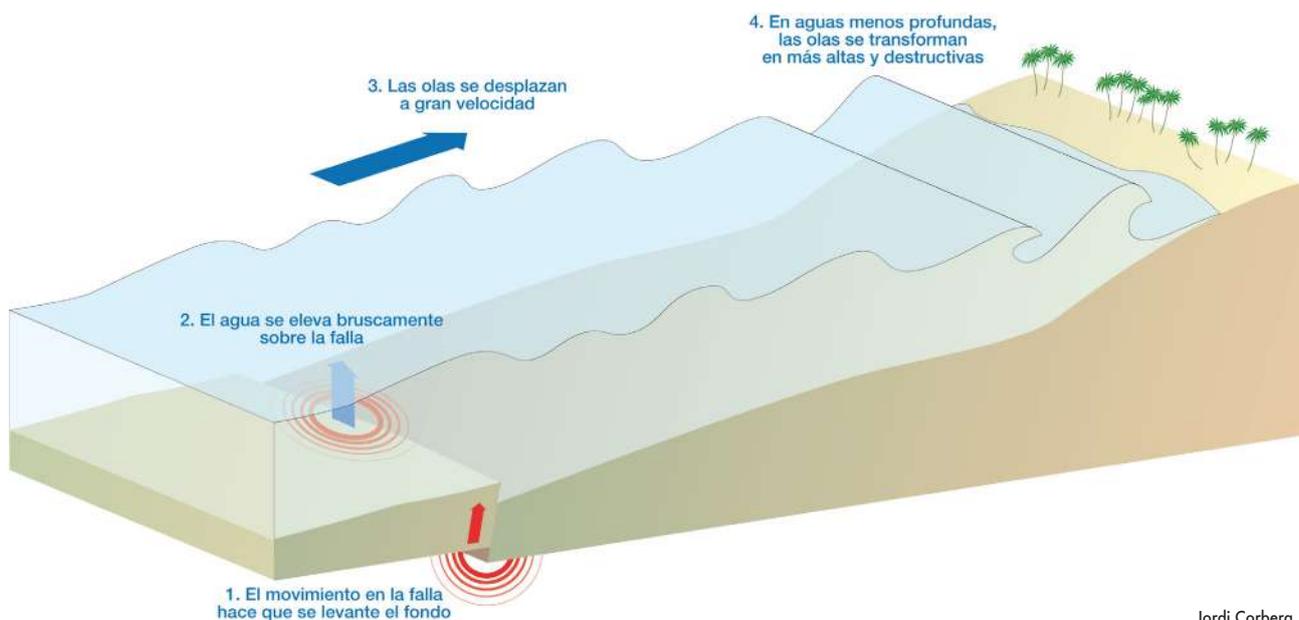
Fig. 17. El mismo paisaje con ← mar llana y → mar rizada.

También se pueden formar olas a causa de los movimientos de la corteza terrestre asociados a la tectónica de placas. Por ello, cuando hay terremotos o surgen volcanes en el fondo del mar, por ejemplo, se crean olas en la superficie. Estas olas, que pueden transportar mucha energía dado que mueven una gran cantidad de agua, se denominan *tsunamis*, y tienen un gran poder devastador. También hay olas, llamadas *internas*, que viajan bajo la superficie del mar.

Para estudiar las olas, determinamos ciertas características de las mismas, como son la amplitud –altura– y el periodo –tiempo que transcurre entre dos crestas de ola sucesivas–. Así, las podemos clasificar.



Jordi Corbera



Jordi Corbera

Fig. 18. ↑ Partes de una ola. ↓ Esquema de la formación de un tsunami.

Las mareas

Las mareas se originan gracias a las fuerzas de atracción de las masas de la Luna y del Sol sobre la Tierra. La parte líquida de nuestro planeta responde a estas fuerzas con oscilaciones del nivel del mar. Las oscilaciones que se repiten dos veces en períodos de poco más de 24 horas se deben a la influencia de la Luna sobre la Tierra. Las variaciones que se observan mensualmente en las mareas responden a la influencia del Sol y la Luna. Las mareas se producen por todas partes, a pesar de que se notan más en las zonas costeras. Las mareas crean corrientes específicas denominadas *corrientes de marea*, las cuales, según la topografía de la costa y del fondo marino, pueden ser muy potentes y peligrosas. Estas variaciones del nivel del mar pueden ser poco o muy notables; las más notables dejan parte del litoral emergido durante muchas horas —marea baja—, inundándolo después —marea alta—, y así cíclicamente. Por lo tanto, las especies que viven en estas zonas, llamadas *intermareales*, tienen que estar adaptadas a periodos de desecación seguidos de periodos de inmersión.



Carlos Domínguez (ICM-CSIC)

Fig. 19. La zona intermareal es la más afectada por las mareas: las oscilaciones del nivel del mar hacen que parte del litoral quede emergido durante horas —marea baja— e inundado horas después —marea alta—, de manera cíclica.