

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS EN LA DISOLUCIÓN DE CO₂ EN AGUA DE MAR A BAJA PRESIÓN A BORDO DE SUBMARINOS

Pedro Antonio CASAS ALCAIDE
Doctor ingeniero naval por la UPM

Resumen



L contenido de este artículo está basado en una tesis doctoral del autor (Casas: 2012) sobre la eliminación del CO₂ que produce la planta propulsora de un submarino navegando en inmersión, siendo el objetivo aquí exponer parte de los resultados obtenidos en un estudio comparativo sobre las alternativas existentes actualmente en relación con uno de los componentes básicos de cualquier sistema de eliminación de CO₂: el subsistema de disolución en agua de mar.

Introducción

Una planta AIP es cualquier sistema propulsor capaz de posibilitar la navegación de un vehículo submarino bajo la superficie del mar de forma completamente independiente de la atmósfera terrestre.

El uso de plantas AIP a bordo de submarinos, basadas en la reacción química entre un hidrocarburo y oxígeno (ambos almacenados en el interior del submarino), da lugar a la producción en grandes cantidades de agua y CO₂, residuos que necesitan ser eliminados. En concreto, la producción de CO₂ en grandes cantidades (y en estado gaseoso) constituye un auténtico problema en un submarino navegando en inmersión, ya que actualmente no resulta viable almacenarlo a bordo y su eliminación tiene que llevarse a cabo de forma discreta y con un coste energético reducido.

Actualmente, hay varias alternativas para eliminar el CO_2 producido en la propulsión de un submarino navegando en inmersión (Potter: 2000), considerándose una de las más ventajosas la disolución de dicha sustancia en agua de mar y su posterior expulsión al exterior del submarino. Esta alternativa consta básicamente de tres etapas bien definidas:

- *Etapa 1.* Introducir agua de mar a bordo del submarino, haciendo bajar su presión desde la existente en el exterior hasta la presión a la que se quiere realizar el proceso de disolución.
- *Etapa 2.* Llevar a cabo el proceso de disolución a presión constante e independiente de la existente en el exterior del submarino.
- *Etapa 3.* Expulsar fuera del submarino el agua de mar saturada de CO_2 haciendo subir su presión desde la correspondiente al proceso de disolución hasta la existente en el exterior.

Para ejecutar la etapa 2 de forma silenciosa y sin ocupar excesivo volumen, resulta necesaria la instalación de un sistema de disolución de CO_2 en agua de mar a baja presión, el cual puede implementarse mediante el uso de membranas microporosas.

Aunque la tesis también ha incluido un estudio comparativo sobre los sistemas de recuperación de energía necesarios para llevar a cabo las etapas 1 y 3, este artículo se va centrar únicamente en presentar parte de los resultados obtenidos en un estudio comparativo sobre las ventajas/inconvenientes de las diferentes alternativas existentes en relación con los sistemas de disolución basados en membranas microporosas, teniendo en cuenta las singularidades propias de su instalación a bordo de submarinos.

Sistemas de disolución de CO_2 en agua de mar a baja presión

El agua de mar es capaz de admitir en disolución cantidades apreciables de CO_2 (aproximadamente 1,7 kilogramos por cada metro cúbico de agua, a 10^5 Pa y 293 K) y, de hecho, el problema de la disolución de grandes cantidades de CO_2 en soluciones acuosas ha cobrado un auge significativo en los últimos años en relación con problemas de tipo medioambiental (Dortmundt: 1999; Kumar: 2002, y Svendsen: 2001).

El uso de membranas porosas para disolver grandes cantidades de CO_2 a baja presión constituye una alternativa muy interesante de cara a su aplicación a bordo de submarinos, pues los sistemas correspondientes son de bajo volumen, silenciosos y permiten un funcionamiento de la planta AIP independiente del valor de la presión externa.

Cualquier sistema de disolución basado en membranas microporosas admite dos regímenes de funcionamiento intrínsecamente distintos:

- *Difusión*: este principio funcional se basa en la difusión directa del CO_2 en el agua a través de la superficie de contacto que se forma en los poros microscópicos de una membrana hidrofóbica (es decir, una membrana cuyo material no acepta en su seno ni la difusión física ni la reacción química con el agua) sin que se produzca burbujeo alguno, siendo posible la formación de una interfase estable gracias a los fenómenos de tensión superficial que se inducen en la misma
- *Burbujeo*: este principio funcional se apoya en la dispersión física de una serie de burbujas gaseosas como paso previo a su disolución final, siendo posible la formación de las citadas burbujas gracias a la circulación del gas a través de unas membranas porosas que sirven como sistemas de generación de interfase.

El objetivo fundamental es llevar a cabo un análisis comparativo para determinar las ventajas/inconvenientes de cada una de las alternativas consideradas, siendo de interés secundario la obtención de resultados extremadamente exactos. Por tanto, la disposición geométrica de los sistemas a estudiar deberá ser lo más sencilla posible, al objeto de poner de manifiesto claramente las características intrínsecas subyacentes en cada uno de ellos.

En consecuencia, las disposiciones geométricas que se van a considerar son únicamente las dos que aparecen a continuación:

Batería de membranas planas colocadas en paralelo (Tipo MP)

Esta disposición geométrica es completamente análoga a la disposición de los intercambiadores térmicos de placas existentes en el mercado y, en esencia, consiste en crear finas capas alternativas de circulación de agua y CO_2 separadas por membranas planas, lo que permite la difusión/dispersión de esta última sustancia hacia la fase líquida a través de los poros de las membranas.

Para lograr lo anterior se procede a separarlas mediante la colocación de unos bastidores de poco espesor dispuestos al efecto y diseñados especialmente para posibilitar la distribución de fluido por todo el siste-

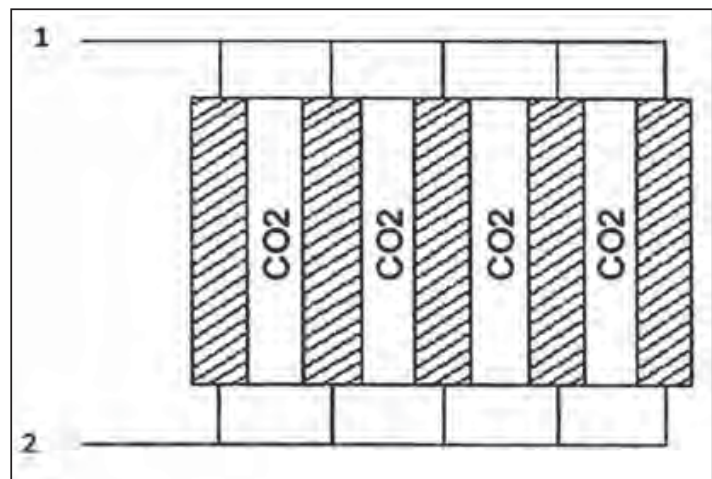


Fig. 1. Batería de membranas planas colocadas en paralelo (1. Entrada de agua de mar, 2. Salida de agua de mar saturada de CO_2).

ma, empernándose finalmente todo el conjunto para dotarlo de la adecuada resistencia estructural.

En la disposición esquemática de la figura 1, el agua de mar circula por las capas entrando por la parte superior y saliendo por la parte inferior, mientras que el CO₂ gaseoso entra en la batería perpendicularmente al plano de la figura.

Columna de líquido con circulación hidrostática (Tipo CL)

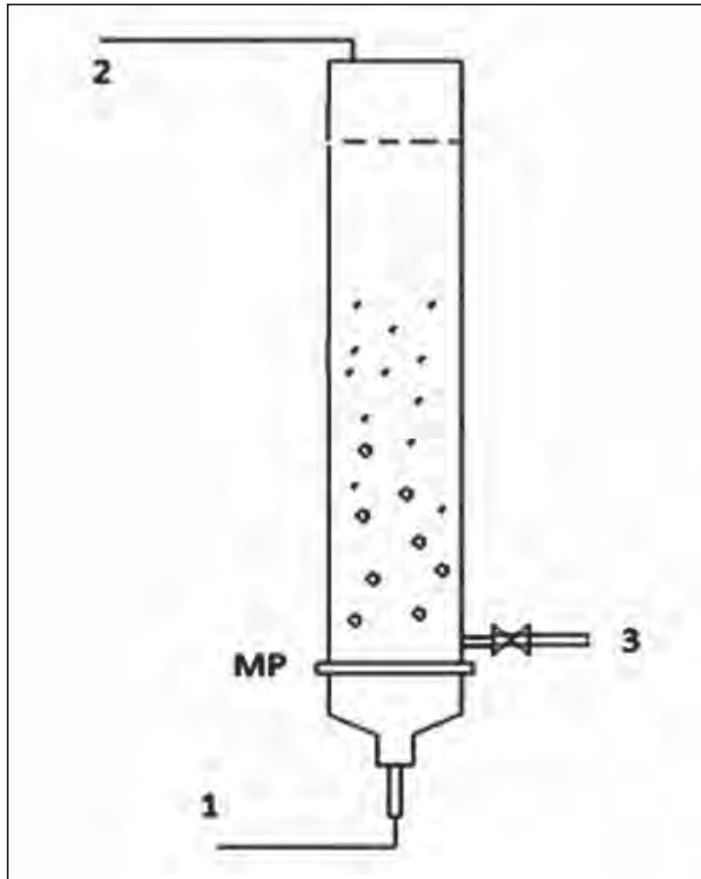


Fig. 2. Columna de líquido (1. Entrada de gas, 2. Salida de recuperación de gas, 3. Entrada/salida de agua, MP. Membrana porosa).

Esta disposición geométrica es extremadamente simple, y consiste en un cilindro vertical lleno de agua en el que se hace burbujear el gas introducido por la parte inferior a través de una membrana porosa colocada al efecto (el tamaño de poro de la membrana tiene una relación directa con el tamaño de las burbujas formadas, las cuales circulan en sentido ascendente impulsadas por su propia flotabilidad). Un esquema de tal disposición puede verse en la figura 2.

Independientemente de la disposición geométrica elegida, tanto la fase líquida como la gaseosa pueden circular por el sistema en dos formas alternativas:

Fase líquida

- *Circulación continua.* El agua circula de forma ininterrumpida por el interior del sistema y en contacto permanente con la fase gaseosa, aumentando gradualmente su nivel de concentración de CO₂ desde que entra hasta que sale del sistema.
- *Circulación por lotes.* El agua es introducida de forma periódica en el sistema, donde permanece en contacto con la fase gaseosa, y sin reno-

vacación alguna, hasta que el nivel de CO_2 disuelto en la misma alcanza el valor establecido. En ese momento, se introduce un lote nuevo de agua de mar pura a la vez que se extrae el lote que se ha ido saturando de CO_2 durante el tiempo de residencia del agua en el interior del sistema, dando lugar al comienzo de un ciclo nuevo.

Fase gaseosa

- *Circulación con recuperación parcial.* La cantidad de gas que entra en el sistema es superior a la cantidad que se disuelve en el agua, existiendo un excedente de gas más o menos grande que sale del sistema de disolución, y que por tanto es recuperado parcialmente (esta forma de circulación de la fase gaseosa es inevitable cuando el CO_2 va mezclado con otros gases que no resultan necesarios eliminar).
- *Circulación sin recuperación.* Todo el gas que entra en el sistema es eliminado mediante su disolución en el agua de mar, sin recuperación alguna.

En el estudio comparativo, mencionado en la introducción, únicamente se han considerado los tres casos que aparecen a continuación:

- *Sistemas tipo I.* Con geometría tipo MP funcionando en régimen de difusión con circulación continua de la fase líquida y sin recuperación de fase gaseosa.
- *Sistemas tipo II.* Con geometría tipo MP funcionando en régimen de burbujeo con circulación continua de la fase líquida y sin recuperación de fase gaseosa.
- *Sistemas tipo III.* Con geometría tipo CL funcionando en régimen de burbujeo con circulación por lotes de la fase líquida y con recuperación parcial de la fase gaseosa.

Observación 1.—Es interesante hacer notar que el transporte de masa por burbujeo necesita un gradiente de presión mínimo (cuyo valor es función directa de la tensión superficial del agua) en el sentido de la circulación del CO_2 a través de la membrana, sin el cual no es posible la formación (y posterior dispersión) de burbujas en el seno del flujo de agua. Por el contrario, el transporte de masa por difusión puede producirse de forma independiente al sentido del gradiente de presión a través de la membrana, ya que la fuerza motriz que impulsa la circulación de gas es la diferencia de potencial químico a ambos lados de la membrana, y no la diferencia de presión.

Modelado matemático

Sin entrar en la descripción detallada de los modelos desarrollados en la tesis, merece la pena presentar una serie de reflexiones en relación con este tema, ya que ha planteado un reto bastante importante.

Los modelos matemáticos encontrados en la bibliografía presentan en general alguno (en ciertos casos ambos) de los dos inconvenientes que aparecen a continuación:

- No se prestan fácilmente a la realización de comparaciones entre sistemas de disolución de CO_2 con disposiciones geométricas muy distintas.
- Están pensados para estudiar en detalle los fenómenos que se producen en el interior de los diferentes sistemas, presentando una complejidad que dificulta en gran medida la ejecución de estudios comparativos sencillos.

En consecuencia, ha sido necesario desarrollar modelos específicos para cada uno de los tres sistemas analizados, manteniendo al mismo tiempo una estructura común que facilite la ejecución de estudios comparativos.

El resultado obtenido constituye un logro notable, siendo compacto, fácil de implementar mediante código SW y dando lugar a tiempos de ejecución en máquina extraordinariamente reducidos.

Resultados obtenidos

Se presenta a continuación un resumen de los resultados más relevantes obtenidos en el estudio comparativo mencionado en la introducción:

- *Resultado 1.* En todos los sistemas de disolución analizados, su rendimiento puede caracterizarse mediante la expresión siguiente:

$$\eta = 1 - \exp\left(-k_l D_c \frac{V}{Q_t}\right)$$

en donde la forma que adopta el parámetro k_l (con dimensiones de m^2) depende del sistema de disolución considerado.

- *Resultado 2.* En los sistemas de disolución tipo II, las capas de circulación de agua deben tener una longitud mínima de unos 128 m aproximadamente. Independientemente de cualquier otra consideración, esta restricción de diseño es tan fuerte que, a efectos prácticos, elimina la posibilidad de usar estos sistemas a bordo de submarinos.

- *Resultado 3.* El parámetro k_f (ver resultado 1) se mantiene en todos los casos considerados por debajo de un valor límite superior, a saber:
- Sistema tipo I: $k_f = 8 \cdot 10^7 \text{ m}^{-2}$
 - Sistema tipo II: $k_f = 3.75 \cdot 10^6 \text{ m}^{-2}$
 - Sistema tipo III: $k_f = 7.5 \cdot 10^6 \text{ m}^{-2}$

A la vista de los valores límite arriba indicados, se llega a una conclusión interesante: tomando el mismo caudal de agua y el mismo rendimiento para todas las alternativas, el funcionamiento en régimen de burbujeo (sistemas tipo II y III) necesita un volumen total para el módulo de disolución al menos de un orden de magnitud superior que el funcionamiento en régimen de difusión (sistemas tipo I).

Observación 2.—Es interesante hacer notar que este resultado contradice lo que indica la intuición, ya que en principio parece lógico esperar que el diámetro de las burbujas obtenidas sea similar al de los poros de las membranas, lo cual permitiría jugar con este parámetro para mejorar el rendimiento de los sistemas tipo II y III. Sin embargo, no ocurre así en la práctica, pues los datos que aparecen en Parthasarathy (1996) demuestran la existencia de un diámetro crítico que no es posible reducir de ninguna manera.

- *Resultado 4.* En relación con los sistemas considerados, se han determinado tres formas básicas de regular el funcionamiento de los mismos para adaptarlo a la cantidad de CO_2 que debe disolverse (variable según la potencia requerida por la planta propulsora del submarino en cada momento):
- Regulación Tipo P: la cantidad de CO_2 disuelto se ajusta mediante la variación de la presión existente en la zona de gas, manteniéndose constantes tanto el caudal de agua de circulación como las condiciones internas de funcionamiento (parámetro k_f mencionado en el resultado 1).
 - Regulación Tipo Q: la cantidad de CO_2 disuelto se ajusta mediante la variación del caudal de agua que circula por el sistema, manteniéndose constantes tanto la presión existente en la zona de gas como el citado parámetro k_f .
 - Regulación Tipo K: la cantidad de CO_2 disuelto se ajusta mediante la variación de las condiciones internas de funcionamiento (es decir, variando el parámetro k_f arriba citado), manteniéndose constantes tanto la presión existente en la zona de gas como el caudal de agua de circulación.

Se hace notar que la regulación tipo P mantiene un valor constante del rendimiento en todo momento, mientras que los dos últimos tipos de regulación (Q y K) hacen que el rendimiento varíe en función de la potencia requerida por la planta propulsora.

Esto último significa que tanto con la regulación tipo Q como con la tipo K el grado de concentración de CO_2 existente en el agua que abandona el submarino va a resultar variable, pero a cambio permite el funcionamiento de la planta AIP bajo presión constante, cosa que es intrínsecamente imposible con la regulación tipo P.

- *Resultado 5.* Con el estado del arte actual en membranas microporosas resulta posible establecer las afirmaciones siguientes:
 - Sistemas tipo I: este tipo de sistemas muestra un comportamiento excelente en todos los aspectos considerados, demostrando que el funcionamiento en régimen de difusión es enormemente superior a cualquiera de las alternativas funcionando en régimen de burbujeo.
 - Sistemas tipo II: este tipo de sistemas ha resultado claramente inadecuado, pudiendo descartarse directamente su utilización en aplicaciones a bordo de submarinos.
 - Sistemas tipo III: estos sistemas muestran un comportamiento superior al tipo II, a pesar de lo cual siguen siendo inferiores al tipo I, sobre todo en relación con el rendimiento y la sensibilidad a los movimientos del submarino.

Conclusiones y comentarios finales

En general, se han establecido dos conclusiones importantes:

- El sistema tipo I ha resultado ser mucho mejor que los otros dos, demostrando la superioridad del funcionamiento en régimen de difusión frente al burbujeo, al menos con el estado actual de la tecnología en el campo de las membranas porosas.
- El sistema tipo II ha resultado ser claramente inadecuado, pudiendo descartarse directamente en aplicaciones a bordo de submarinos.

Puede decirse que el uso de membranas microporosas funcionando en régimen de difusión para disolver CO_2 en agua de mar se ha revelado como una solución enormemente atractiva para su instalación a bordo de submarinos dotados de plantas AIP, existiendo actualmente equipos comerciales totalmente disponibles al efecto.

Finalmente, cabe decir que:

- El desarrollo teórico necesario para la consecución de los resultados presentados es una contribución original (no está disponible en la literatura existente al respecto) que ha servido de base para la elaboración de un artículo que se encuentra actualmente publicado en una revista del JCR (Martínez: 2012) y constituye una aportación fundamental para cualquier organismo involucrado en la adquisición de submarinos dotados con plantas AIP.
- El estudio comparativo mencionado en la introducción ha dado lugar a resultados mucho más amplios que los aquí expuestos, los cuales no han sido incluidos dado el carácter divulgativo de este artículo y la excesiva extensión que hubiera sido necesaria.

Nomenclatura

- D : coeficiente de difusión del CO_2 en agua (m^2/s).
- Q_i^c : caudal de la fase líquida (m^3/s).
- V : volumen total del sistema (m^3).
- η : rendimiento de disolución (-).

BIBLIOGRAFÍA

- POTTER, I. J.; CLAVELLE, E.; READER, G. T.; KADY, J., y CARL, M.: 2000, *Exhaust gas management systems for underwater heat engines*. IEEE 0-7803-6378-7.
- DORTMUNDT, D., y DOSHI, K.: 1999, *Recent developments in CO_2 removal membrane technology*. UOP-Illinois.
- KUMAR, P. S.: 2002, *Development and design of membrane gas absorption processes*. Twente University Press. Tesis doctoral.
- SVENDSEN, H. F.; HOFF, K. A.; POPLSTEINOVA, J., y DA SILVA, E. F.: 2001, *Absorption as a method for CO_2 capture*. Second Nordic Symposium on CO_2 Capture and Storage, Goteborg.
- MARTÍNEZ, I., y CASAS, P. A.: 2012, «Simple model for CO_2 absorption in a bubbling water column». *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 29, núm. 1.
- CASAS, P. A.: 2012, *Eliminación de dióxido de carbono en la propulsión de submarinos*. Universidad Politécnica de Madrid. Tesis doctoral.
- PARTHASARATHY, R., y AHMED, N.: 1996, «Size distribution of bubbles generated by fine-pore spargers». *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 29.

Embarque de minas en un S-70.
(Foto: J. Ruiz Martínez).





LA FAUNA MARINA VISTA DESDE LA COFA

José CURT MARTÍNEZ



ARA empezar el artículo del presente bimestre he elegido la cofa porque, entre baos y crucetas, es la mejor atalaya de que disponemos para poder contemplar la mar en visión panorámica que, refiriéndonos a su fauna, es la que ahora nos interesa. Por ello y, como paso previo a enfundarnos el traje de buceo para indagar en profundidad sobre las intimidades y detalles de los animales de la mar, centrémonos ahora en comprender cómo es y cómo funciona el ecosistema marino, cuáles son las características de su biota con respecto a la de tierra y cómo han podido adaptarse a un medio aparentemente hostil aquellas criaturas que comparten con nosotros vocación marinera.

RUMBO A LA VIDA MARINA

La vida se inició en la mar hace 3.000 millones de años. Todos los seres vivos, pues, procedemos del fecundo útero marino. Y ninguno de ellos, sean vegetales o animales, puede ocultar su raigambre de sal y de oleaje porque todos nosotros llevamos troquelada en el protoplasma (del griego *protos*, primero, y *plasma*, forma) de nuestras células una indeleble marca de origen imposible de borrar. Y sabido es que el protoplasma no solamente es el líquido interno que da forma esférica a las células, sino también el volumen donde se custodian todos los orgánulos celulares que sustentan la totalidad de las funciones vitales, incluida la transmisión de la herencia genética. Y como el ser humano o cualquier otro ser vivo, excepto los unicelulares, es una agrupación de células ordenada de alguna manera en talos y tejidos según su posición taxonómica, es la tesela que compone el mosaico de la vida. Pues bien, resulta que la composición química del protoplasma es la misma o, por lo menos, sorprendentemente parecida a la del agua de mar, y su contenido en sales es común a ambos medios. Tal uniformidad viene a recordarnos que la mar es el tronco común de nuestro árbol genealógico, que desde la simpleza primigenia del ser unicelular que alumbraron las aguas derivaron las demás formas de vida, y que las criaturas marinas más sencillas se fueron complicando evolutivamente, hasta que la invención del pulmón permitió a algunas de ellas desembarcar en tierra firme, a la par de que muchas otras prefirieron continuar viviendo en el seno de las aguas para seguir haciendo lo mismo que



Los peces, los corales, las holoturias y otros componentes del bentos son los animales más antiguos del escalafón de la mar, sus auténticos «propietarios». (Foto del autor).

siempre hicieron: completar allí la totalidad de sus ciclos biológicos, es decir, se quedaron para seguir naciendo, creciendo, reproduciéndose y muriéndose sin abandonar ni un solo instante el medio submarino, ya que incluso respiran el oxígeno que se halla contenido en las aguas por medio de genuinos órganos respiratorios que, como las agallas o las branquias, están especializados en cumplir este cometido con total eficacia y de modo permanente.

En virtud de lo dicho podemos afirmar que peces, anémonas, erizos, ascidias, comátulas, estrellas, corales, medusas, holoturias, pulpos y moluscos son de la misma esencia de la mar porque comparten su mismo historial sin solución de continuidad y, a la par, son los animales más antiguos en el escalafón del agua salada y los que cuentan con más méritos para que su condición marinera pueda ser reconocida por la ciencia en su más precisa literalidad y sin la menor reserva. Luego, bien podríamos afirmar sin temor a equivocarnos que tales animales son los auténticos «propietarios» del hábitat marino.

Dentro de las criaturas que colonizaron lo seco, fueron los reptiles (que conservan en todo su cuerpo las escamas en recuerdo evolutivo del pez) los grandes protagonistas de la diversificación terrestre. Una parte de ellos se perpetuó en los reptiles actuales (los cocodrilos son auténticos fósiles vivientes), y otro tronco de reptiles, con aspecto de dinosaurios, los saurópsidos, evolucionó hasta llegar a lo que hoy son las aves (con escamas en las patas, heredadas de su pasado reptiliano) y, posteriormente, con la aparición de la placenta, otra rama distinta de reptiles daría origen a los mamíferos. Aclaremos que los anfibios son un eslabón intermedio en toda esta cadena, pues ranas y sapos no terminan nunca de ser tierra firme pero tampoco dejan de ser agua más o menos pura y cristalina, porque la metamorfosis necesaria para que alcancen el estado adulto —recordar los renacuajos en la charca— indefectiblemente debe transcurrir en el agua con una secuencia biológica muy parecida a la del pez. ¿El motivo? Pues el motivo es que los huevos de los anfibios son unos arcaicos embriones desnudos, desprotegidos, que carecen del agua imprescindible para su desarrollo y tendrán que conseguirla a base de «remojarlos» en los ríos y lagunas. Este problema desapareció a partir de los reptiles.

Pero llegó un momento en el que muchos animales, en su fatigoso caminar evolutivo sobre la tierra, decidieron regresar a la mar para formar parte de esa fauna que no puede prescindir de la superficie de las aguas porque tarde o temprano necesitan asomarse al exterior para respirar el oxígeno atmosférico por medio de sus pulmones, que es la más clara expresión de su ascendencia terrestre. Y porque estos animales que regresaron a la mar son mucho más modernos que los que desde siempre estuvieron en ella —la antigüedad es un grado—, porque comparten los dos fluidos, aire y agua, y son y no son ni de uno ni de otro, y porque ante el inevitable recuerdo de que cada uno de ellos proviene de un antecesor terrestre, parece lógico que les asignemos una categoría diferente en el escalafón marino.

Pues bien, si antes dijimos que unos eran «propietarios» de la mar por derecho propio, el resto de los animales que pululan por ella no pasarían de ser unos vulgares «okupas» de no ser porque debajo de las olas sobran los recursos y la naturaleza no tuvo necesidad de ponerles fecha de desalojo y terminaron haciéndose «tan de casa» que, con el tiempo, pasaron a ser «inquilinos» de la mar. Unos más que otros, porque dentro de esta tropa de nostálgicos, los hay con peores y mejores hojas de servicios: los cetáceos, ballenas y delfines son los que más trienios acumulan en la mar porque presentan unos historiales que poco tienen que envidiar a los de los peces, ya que como ellos también nacen, crecen, se aparean, se reproducen en la mar y mueren en ella, e incluso sus cuerpos han adoptado el aspecto fusiforme —proverbial en el pez como el paradigma de la perfección hidrodinámica—, llegando a tal extremo que han tenido que renegar de la tierra porque saben que en caso de varamiento su propio peso colapsaría sus pulmones y morirían asfixiados. Está claro: el realojo de los cetáceos en las aguas prometidas consistió en un viaje sin retorno. Vamos, que de no estar obligados a asomar las narices al exterior para respirar del aire serían tan marinos como un arenque o una lubina.

No es el caso de las tortugas, serpientes, aves marinas y focas que, en puridad, serían un poquito menos de la mar porque ni siquiera se reproducen ni nacen en ella como las ballenas y delfines, pues tienen que volver periódica-



Un grupo de focas árticas descansa durante horas en un peñón de Alaska. (Foto del autor).

mente a la tierra firme de sus antepasados para perpetuar su prole en las siguientes generaciones, que es el fin primordial de todas las especies desde que lo vivo empezó su andadura con el primer vagido. Así, las tortugas, las aves marinas y las ponzoñosas serpientes de mar tienen que efectuar la puesta de sus huevos en lo seco. Por su parte, las focas y otáridos (lobos marinos), aparte de que pasan mucho tiempo descansando fuera del agua, se reúnen en multitudinarias parideras que hemos tenido oportunidad de estudiar en los roquedos de península Valdés (Argentina) y ocasionalmente en la Antártida, donde hemos tenido la suerte de contemplar a la multitud de adultos y subadultos no reproductores que veranean en aquellos hielos.

Por tener una enorme repercusión sobre la diversidad de las especies faunísticas, conviene que recordemos que el límite entre la tierra y la mar no es el que habitualmente queda a la vista (playas, acantilados, arrecifes), sino el impuesto por las ciencias geológicas. Los continentes e islas extienden su superficie visible en una suerte de zócalo submarino, de poca pendiente, cuya profundidad media es de unos 200 metros. Se llama plataforma continental y, por estar situada en la zona fótica (donde llega la luz solar), es la de mayor productividad vegetal y por ende faunística. Las placas de deriva continental que se manejan en la teoría propuesta por Alfred Wegener, de la que se deduce, por ejemplo, que América se separa un centímetro al año de Europa, se refieren a este tipo de plataforma. El tramo más próximo de ella a la costa es la llamada plataforma costera o plataforma litoral, y las aguas situadas encima de ella constituyen la región nerítica. Las que, más mar adentro, se superpo-

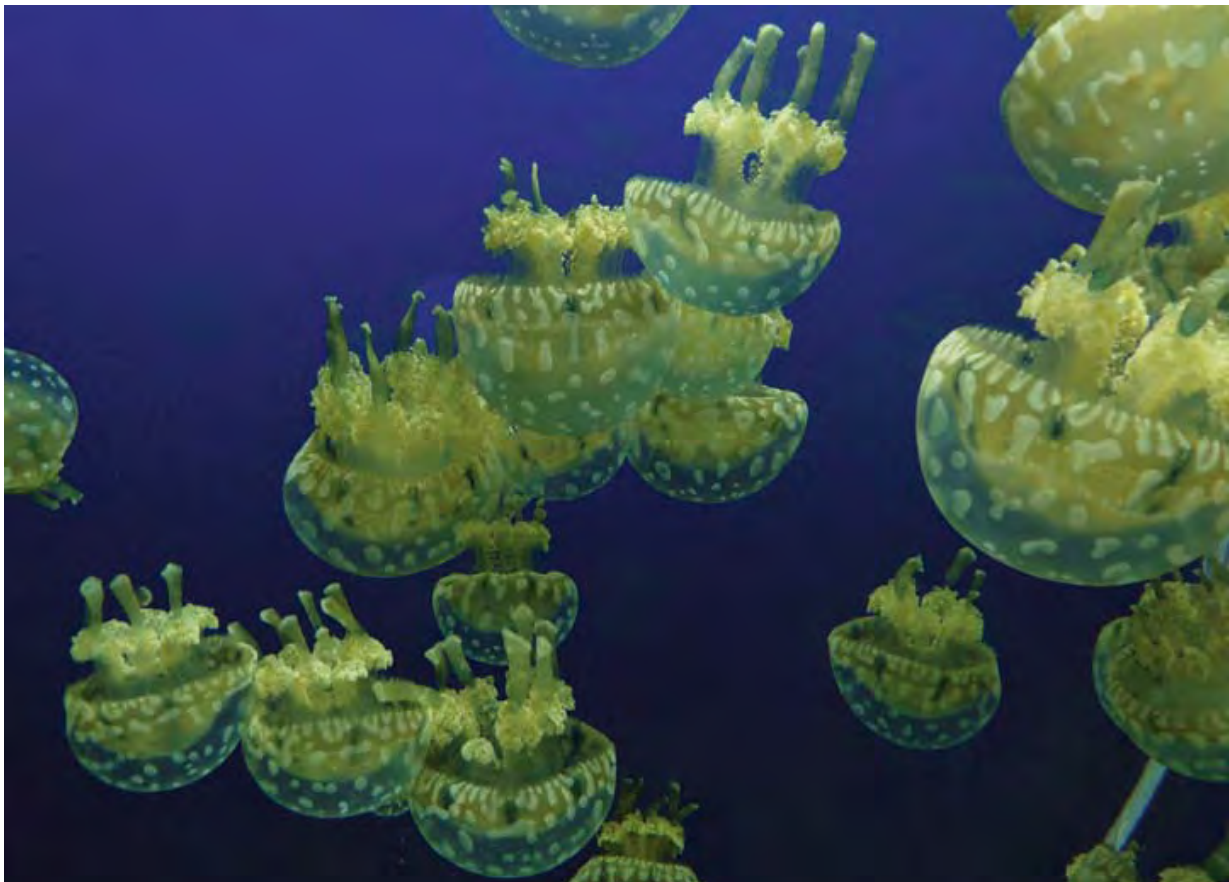


Zonas, regiones y sistemas marinos. Fuente Lozano, F., 1978: *Oceanografía, biología marina y pesca*. Ed. Paraninfo.

nen a las profundidades superiores a los 200 metros forman la región oceánica, cuya parte superior es la región pelágica (del griego *pelagos*, mar abierto), antónimo de la citada región nerítica. Por debajo de ambas se cae ya en la zona abisal o abismal hasta llegar a las asombrosas profundidades de las fosas oceánicas, donde también existe la vida, tan sorprendente que nos parecería un juego de magia, un prodigio recién sacado de la chistera con el sortilegio de los polvos de la madre Celestina.

Lo anteriormente expuesto nos lleva a establecer con la fauna marina, al igual que hicimos con su flora, una serie de distribuciones ecológicas, correspondiendo a cada una de ellas un tipo de fauna genuino, especialmente adaptado a las peculiares condiciones de su correspondiente hábitat. Se llaman bentos, plancton y necton.

La fauna bentónica, dotada o no de la capacidad de moverse es la que vive en íntima dependencia con el fondo marino, lo que no quita para que el bentos costero, que disfruta de luz solar, sea la zona que más biodiversidad ofrece y en la que cada día se describen nuevas especies que permanecían desconocidas para la ciencia. Un tropel de invertebrados, esponjas, celentéreos, crustá-

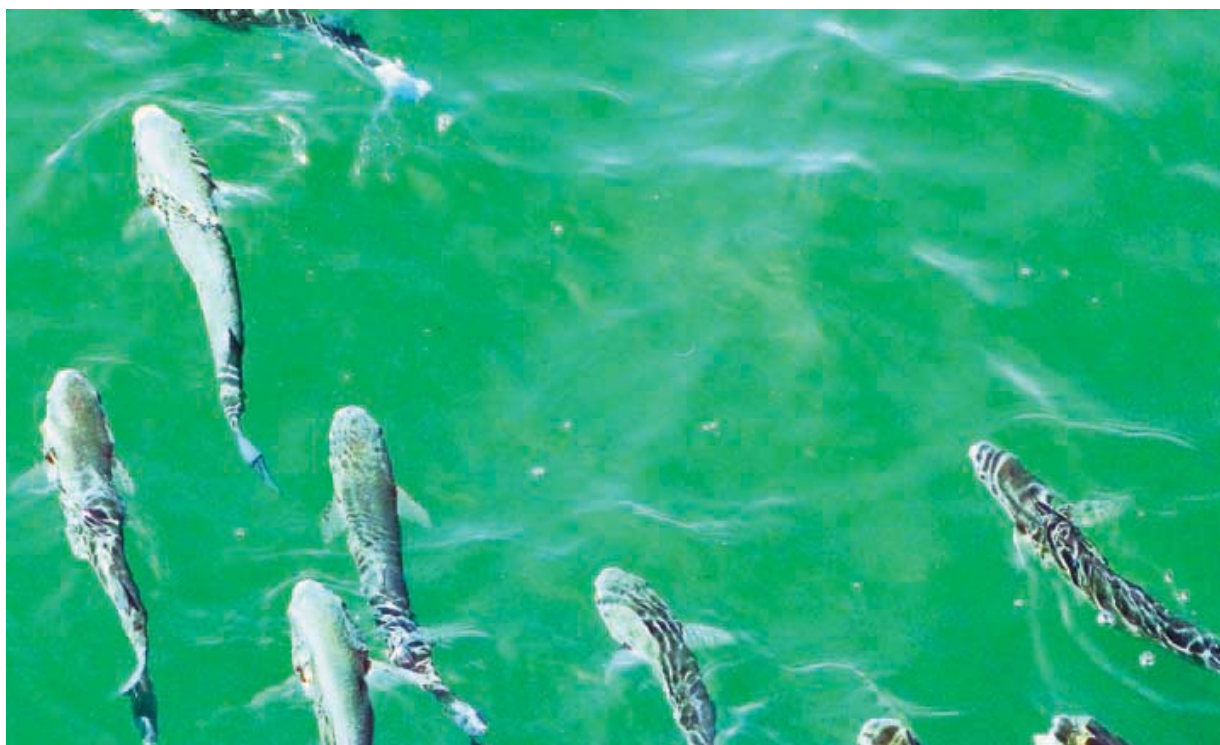


Las grandes y gregarias medusas también son claro ejemplo de fauna planctónica.
(Foto del autor).

ceos, moluscos, corales y gusanos nutre su interminable inventario faunístico. En él también figuran sus depredadores, como son las morenas residiendo en las covachas bentónicas. Y muchos otros.

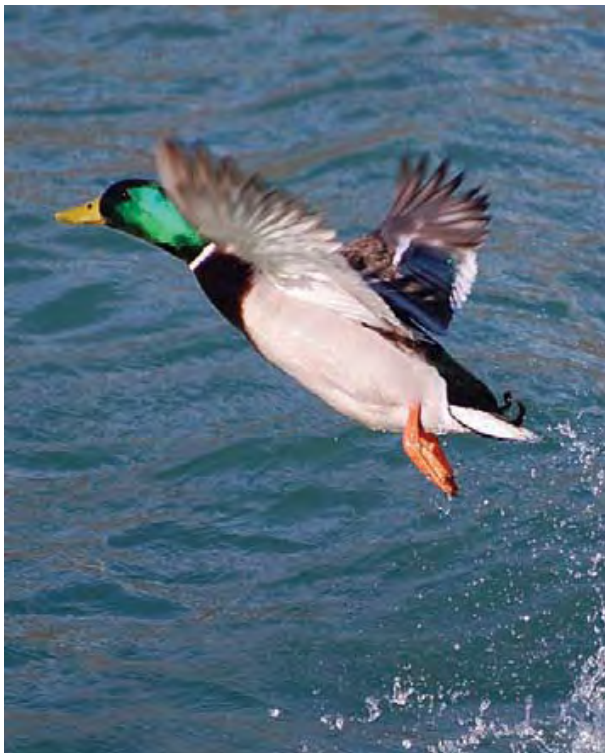
La fauna planctónica, ya dijimos meses atrás, es aquella que se mueve pasivamente flotando en el seno de las aguas, arrastrada por las corrientes marinas, dado que no es capaz de oponer resistencia a su impulso direccional, lo que les impide desplazarse a su conveniencia. No se trata solamente de una fauna microscópica, como ya habíamos apuntado al tratar de las diatomeas y algunos dinoflagelados: las grandes y gregarias medusas que aparecen en verano por las playas españolas causando pavor entre los bañistas; son un claro ejemplo de macrofauna planctónica, al igual que la solitaria fisalia, fragata portuguesa o «carajo a la vela» que, direccionada por los vientos dominantes y por la fuerza de las corrientes superficiales, tantas veces hemos podido ver navegando a «todo trapo» en mar abierta.

Al igual que la planctónica, la fauna nectónica la forman aquellos animales, independientes del fondo, que cuentan con los suficientes recursos mecánicos para desplazarse libremente y a voluntad en las tres dimensiones del mundo submarino y son capaces de hacer eso que vulgarmente se llama «nadar contra corriente». La mayoría de los peces, focas, delfines, tortugas y otros reptiles marinos pertenecen a este tipo de fauna.



Estos mújeles, *Mujil cephalus*, nadan «contracorriente» y por eso se consideran fauna nectónica. Están en la región nerítica de la plataforma costera o litoral, en el muelle de Burela (Lugo). (Foto del autor).

Entre los animales marinos, solo las aves de la mar, herederas de aquellas que en tierra se desplazan en las tres dimensiones, comparten sin problemas los dos fluidos, aire y agua, en un portentoso juego de adaptación fisiológica que parece desafiar todas las leyes de la física. Si el ave clásica tuvo que aligerar evolutivamente su peso para conseguir elevarse y volar, el ave marina tendrá que volver a hacerse pesada para poder sumergirse, pugnando cada vez más por «ser menos ave» y por parecerse más al pez, secuencia que en la realidad aparece como una gradación de modos y maneras que las hace únicas en el mundo animal. La típica estampa del albatros errante, señor de los vientos, volando durante siete años por los confines de la mar, como preparación a su regreso a tierra acompañado de por vida por una pareja estable para nidificar en lejanas y solitarias islas subantárticas; o la del alcatraz —cielo y agua salada— dejándose caer en picado desde la altura de su vuelo para zambullirse en la mar somera y capturar los peces que constituyen su alimento, son tan sugerentes como la imagen del pingüino, que ha hecho del buceo el objetivo primordial de su existencia, hasta el extremo de haber perdido la facultad de volar. Tales peculiaridades se deben a que la mecánica de fluidos es común al aire y al agua, y a que Arquímedes, Gay-Lussac, Pitot, las pérdidas de carga



Se dice que el pingüino (a la derecha, foto del autor) ha perdido la capacidad de volar, pero no es del todo cierto ya que, cuando bucea, emplea los mismos músculos y huesos con los que el pato azulón (a la izquierda, foto gentileza Asís Fernández-Riestra) «vuela en el aire». Por tanto, no es un tópico si afirmamos que el pingüino «vuela en el agua». Densidad aparte, la dinámica de ambos fluidos es muy similar. Otra cosa es que exija a dichas aves las necesarias adaptaciones para desarrollarla adecuadamente.

por rozamientos, Bernuilli describiendo la mecánica de un fluido moviéndose en una corriente de agua, y Venturi con los efectos de los estrechamientos en la velocidad de los fluidos, son igualmente aplicables en ambos medios. El «¡Eureka!» de Arquímedes lo mismo sirvió en la bañera, donde el griego creyó que pesaba menos que en seco, que modernamente aplicado a un globo aerostático o a un submarino o al gigantismo de una ballena, pero a efectos de la fauna de la mar se impone un obligado comentario: es verdad que el pingüino vuela por debajo del agua porque para desplazarse emplea los mismos músculos que un pato azulón usa para volar por el aire; y que uno lo haga con alas transformadas en aletas y el otro batiendo auténticas alas poco importa, porque ambas aves son producto de la adaptación al fluido en el que se mueven. Pero a la misma distancia «volada», el pingüino realiza un esfuerzo muy superior al del pato azulón. Y aquí reside el quid de la cuestión, porque el agua es un fluido 800 veces más denso que el aire y eso es lo que imprime carácter a la fauna marina, cuyas especies son tan diferentes a las de tierra. Este aumento de densidad es el que permite a los peces y asimilados «flotar» en el medio submarino. También les exime de tener extremidades consistentes en las que apoyarse.

Sigamos adujando los cabos sueltos que trenzan la arboladura de la fauna marina. Acabamos de decir que su principal condicionante es la densidad del agua en comparación con la del aire. Y si los océanos ocupan las tres cuartas partes de la superficie terrestre y el 75 por 100 de todas las especies vivas se encuentran en la mar, quiere decir que el ecosistema marino «funciona», aunque «a su manera», claro. La primera diferencia entre la fauna de lo seco y la de la mar podemos establecerla en la configuración de sus propias pirámides tróficas o alimenticias: mientras la terrestre presenta en su base una amplia nómina de productores de energía (árboles, bosques, praderas) repartidos por todo el planeta y capaces de alimentar a un sinfín de herbívoros, desde elefantes a insectos, pasando por jabalíes, antílopes, jirafas, conejos, etc., la mar solo dispone de una sucinta franja litoral donde pueden medrar las macroalgas que alimentan directamente a unos pocos herbívoros, especialmente moluscos (lapas, litorinas, «cañaíllas») y, en el extremo, a la iguana marina de las Galápagos. El grueso de los productores marinos de energía, «nuestros bosques marinos», ya lo dijimos, lo forman las microalgas con un sinfín de especies de diatomeas fotosintetizadoras y unos pocos dinoflagelados que, prácticamente, alimentan a un «único» aunque abundantísimo consumidor primario, como es el llamado genéricamente krill (son varias especies parecidas a las «quisquillas» y «camarones»). De él se alimenta, directamente o indirectamente a través de escalones intermedios (el pez grande se come al chico), el resto de la fauna marina que, primordialmente, es carnívora: algunas ballenas comen krill exclusivamente, al igual que muchas aves marinas, lo mismo que varias focas y algunos reptiles marinos y una considerable cantidad de peces. Después, mucho ojo, que cuando estás

haciendo la plácida digestión viene otro bicho y te come sin contemplaciones.

En la fotosíntesis, con ayuda de la luz solar (ver REVISTA GENERAL DE MARINA del mes de abril del año corriente), se desprende como «subproducto» oxígeno molecular, que se mezcla con el agua y que es, precisamente, el que respiran los animales bentónicos, gran parte de los planctónicos y los peces nectónicos por medio de las agallas y/o las branquias, amén de hacerlo también a través de su tegumento («piel») las criaturas más elementales, como son las esponjas, erizos, estrellas y un complejo etcétera. Pero la mar ofrece otra importante fuente de oxígeno disponible en su superficie batida por el oleaje, ya que cuanto más agitada está la mar, más oxígeno se incorpora al agua. De aquí que en la distribución de los animales marinos influya la profundidad mucho más que la latitud, y sean los 200 primeros metros los más ricos en variedad de especies, ya no solo por su escasa presión o por recibir la luz solar, sino también por estar más oxigenados. Problemilla: la acción de los vientos y del oleaje se deja sentir solo en la zona litoral porque en alta mar afecta poco a la fauna, ya que debajo del agua no se nota su acción. Además, dada la íntima vinculación que existe entre las ondas térmicas y luminosas, las profundidades oceánicas se van haciendo paulatinamente más frías y oscuras, a la par que más densas.

Pero no hay mal que por bien no venga: este fenómeno y la traslocación, recolocación e intercambio superficial de masas de agua frías y templadas explica el proceso ya contemplado por nosotros de las convergencias y divergencias marinas, donde la vida se multiplica con el afloramiento de los organismos fotosintetizadores, el krill y la consecuente concentración de los demás componentes de la cadena trófica en esos determinados lugares, a diferencia de la alta mar, donde se dificultan las mezclas de corrientes tan vivificadoras, y por eso algunos autores las consideran como desiertos marinos, en los que la presencia de la vida animal es meramente circunstancial y, principalmente, constituida por especies migrantes, que en muchos casos ni siquiera se alimentan en sus sorprendentes periplos.

Otra diferencia notable entre las aguas dulces y saladas consiste en su dispar contenido en sales, mayoritariamente el cloruro sódico, predominante en la mar y al que genéricamente llamamos «la sal». Sabemos que las sales son imprescindibles para completar las grandes moléculas grasas y proteicas dentro de unas rutas metabólicas que, en primera instancia, parten de la glucosa sintetizada con la función clorofílica de los vegetales marinos.

La concentración en sales varía espacialmente en la mar y con ella la distribución de los seres marinos. Las aguas superficiales tropicales, sometidas a una rápida evaporación, junto con las de mares interiores, que se quedan al margen del efecto diluyente de las grandes corrientes oceánicas (mar Rojo, Mediterráneo y, dentro de este, el mar Menor, por citar alguna de las más conocidas), acumulan grandes cantidades de sales con una concentración

media entre el 40 y el 50 por 1.000, llegando al extremo de que en algunos de sus enclaves (salinas, por ejemplo) solo es capaz de vivir la *Artemia salina*, un crustáceo braquiópodo de un centímetro de longitud, cuya resistencia a la sal y a las adversidades climáticas es tan grande que sus huevos pueden permanecer en estado de latencia, en completa inactividad, y en ausencia de agua e incluso de oxígeno, durante periodos de tiempo muy dilatados (incluso de 10 años), soportando las más altas temperaturas y también por debajo del punto de congelación, merced a un proceso llamado criptobiosis (de *cripto*, oculto, y *bios*, vida). Por el contrario, cuando las condiciones climatológicas mejoran, la eclosión de los huevos es inmediata y la multiplicación de la artemia se produce de modo exponencial. En el lado opuesto se encuentran los mares (el Báltico es el estereotipo), que reciben abundantes aportes de agua dulce, procedan de ríos o del deshielo (como la franja continental antártica), lo que unido a su situación en altas latitudes favorece la nula o mínima evaporación, manteniéndose su salinidad en una concentración aproximada del 7 por 1.000, que llega a que en el golfo de Botnia las agua sean tan dulces que su catálogo faunístico incluya ranas que, con todo merecimiento, también deberíamos considerar marinas, aunque tal circunstancia sea tan chocante como el que las propias ranas echen pelo. Pues bien, entre el extremismo de la artemia y el bromazo de las ranas bálticas, se desarrolla toda una amplia variedad de animales que en muchos casos necesita de riñones suplementarios para excretar el exceso de sal que sus riñones clásicos no serían capaces de depurar. Es el caso de las glándulas de la sal que las tortugas, serpientes, gaviotas y la mayoría de las aves marinas llevan en unas oquedades situadas encima de los ojos (tal situación no es una errata, que conste) y, en posición muy parecida, las iguanas marinas de las Galápagos.

Es más, la concentración en sales condiciona toda la biología de los seres marinos por incidir de lleno en el funcionamiento no solo de los riñones, sino del resto de los órganos vitales por medio de ese proceso físico que se llama ósmosis y que consiste en que, a través de una membrana semipermeable, como es la envuelta celular, permite el paso del agua al mismo tiempo que impide el de las sales disueltas tanto en el medio acuático como en la intimidad del protoplasma. El proceso osmótico puede resumirse diciendo que trata de igualar las concentraciones de sales en dos medios dependientes, interior y exterior, la mar y el animal marino, extravasando solo el agua en el sentido de entrada o salida que corresponda. Valga como aclaración el proceso de salazón de pescados: en un medio hipersalino (salmuera) se pone a macerar un pez cuya concentración en sales es muy inferior a la de aquel; el agua intracelular del pez pugnaría por salir al exterior a través de la membrana celular (semipermeable) para equilibrar ambos medios en contacto osmótico, salmuera y protoplasma, llegándose hasta un punto de sequedad en este último que impide cualquier género de vida (incluida la bacteriana, causante de la descomposición), garantizando así su prolongada conservación.



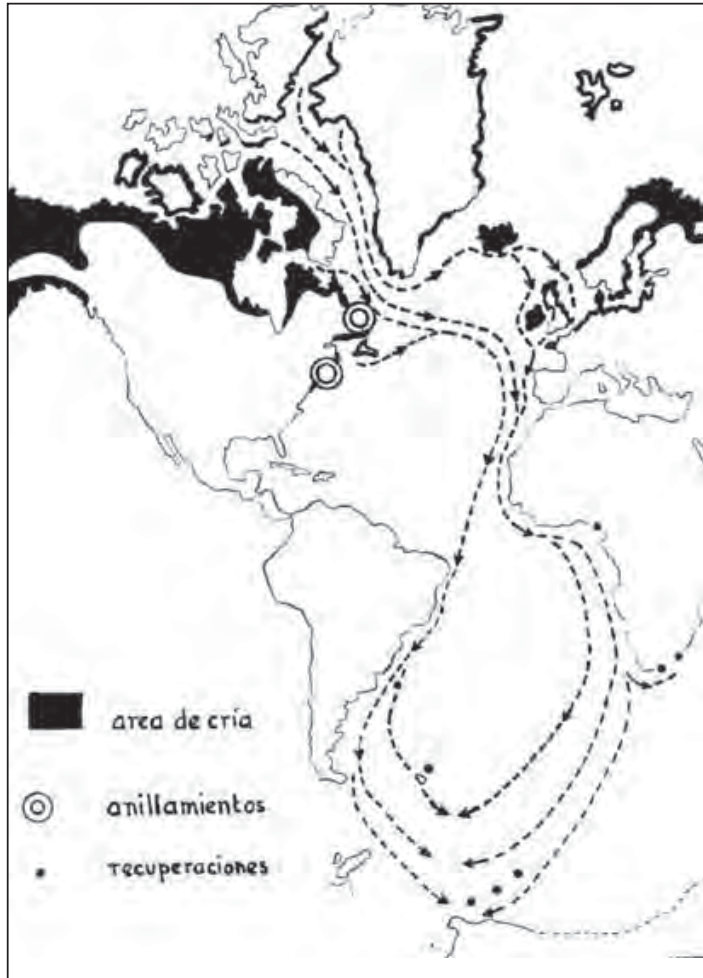
Un proceso de ósmosis permite la conservación de pescado salado. En la foto del autor, secadero familiar en la costa del mar de Barents, Noruega.

Y ya que estamos metidos en la ósmosis, diré que no hay nada más distinto que un pez de agua dulce y otro de agua salada. Los peces de agua dulce poseen células más concentradas en sales que el medio que les rodea, por lo que el agua ambiental, al contrario de lo que ocurre en los peces marinos, se introducirá durante el proceso osmótico en sus protoplasmas, produciéndose así una querencia —llamémosla así— al exceso de agua intracelular. Dicho de otra manera, es imposible que podamos mirar «cómo beben los peces en el río por ver a Dios nacido», por la sencilla razón de que ningún pez de agua dulce bebe, mientras que todos los peces de agua salada lo hacen con fruición para luchar contra su potencial deshidratación. Pero cuanta más agua de mar beben los peces más sales ingieren y, ante ello, se impone eliminar el exceso de sal ingerida, si puede ser ahorrando en lo posible el agua corporal que ya hemos dicho que en cierta medida es deficitaria en el pez marino. Ello se consigue en muchos animales marinos gracias a que sus riñones suplementarios están concebidos para excretar la sal muy concentrada, es decir, disuelta en el mínimo de agua necesaria para su funcionamiento. Y en este momento y aunque

Alfred Hitchcock, el genio del «suspense» fílmico, con señoras acuchilladas en la ducha, me pueda reñir por anticipar pistas innecesarias, propondría al lector avisado el siguiente acertijo: bien, ¿y cómo se las arreglan esos peces que como el salmón, el sábalo, la trucha marisca, la anguila o la arcaica lamprea no terminan de ser del agua dulce ni de la salada porque nacen en un río, pasan en las aguas dulces los primeros años de su vida y luego desaparecen en la mar por un largo periodo de tiempo para regresar en sus postrimerías a su río de nación, para desovar en esas agua ya conocidas y, a continuación, misión cumplida y a morir? Previendo la callada por respuesta, como se dice en las novelas por entregas: «continuará».

Pero no queda ahí la cosa. Debido a su elevada densidad, por cada diez metros que se profundice en las aguas, la presión se incrementan en una atmósfera. Pensemos en el problema que se le plantea al cachalote, que se alimenta de calamares gigantes, bajando a buscarlos a unas profundidades que oscilan entre los 1.000 y 5.000 m, según autores, en las que el calamar para defenderse se aferra al cuerpo del cachalote y este, en una brusca «caída hacia arriba», lo arrastra hacia la superficie hasta hacerlo reventar por el tremendo cambio de presión para el que la presa no está preparada, y el cachalote, excepcionalmente, sí, como veremos en próximos capítulos de *Rumbo a la vida marina*.

Dentro de la fauna marina que regresó de la tierra, los cetáceos, focas y aves marinas, pueden añadir a sus currículos que son de «sangre caliente», es decir, que llevan consigo, incorporado a su cuerpo, su propio clima. Este asunto de llevar la calefacción auestas nos ayuda a comprender que en estos grupos se encuentren los animales más viajeros (ballenas y aves) del mundo y también los más tolerantes con climas extremos, como los de la Ártica y los de la Antártida. Independientes pues del voluble meteo, los animales endotérmicos pueden dedicarse a buscar alimentos estén donde estén, y por eso los cetáceos y las aves marinas se reúnen multitudinarias en las zonas de convergencia-divergencia marinas en las épocas que coinciden con los afloramientos del krill. Una vez agotadas estas reservas alimenticias, a veces estacionales, estos animales se dedican a viajar para buscar nuevas fuentes de alimentación. El caso más llamativo es el del charrán ártico, *Sterna paradisaea*, que nidifica en las altas latitudes europeas y americanas (hasta los 70° de latitud Norte), una vez acabado el periodo reproductivo emprende un viaje en zigzag en demanda del sur, aprovechando los alimentos que encuentra al paso, que le llevará hasta la Antártida, hasta las costas de los 70° de latitud Sur, donde ahora es al charrán antártico, *Sterna vittata*, al que le toca criar. Cuando al año siguiente haya regresado a la primavera zigzag para criar, el charrán ártico habrá recorrido más de 50.000 kilómetros, de nuevo con unos vuelos que podrían parecer erráticos, pero que en realidad solo pretenden aprovechar los vientos más ventajosos, visitando entre otros muchos lugares, y aunque pueda parecer un poco a desmano, la costa española.



Esquema migratorio del charrán ártico, *Sterna paradisica*. Su área de cría llega hasta los 80° de latitud Norte. Fuente Bernis, F. 1966: *Migración en aves*. Cátedra de Vertebrados, Madrid.

Para terminar, espero que haya quedado suficientemente claro que la distribución de los animales marinos está condicionada estrechamente por todos y cada uno de los factores que hemos estudiado hasta aquí: vientos, presión, profundidad, situación ecológica, temperatura del agua... A cada uno, los suyos. Pero tampoco hay que fiarse mucho de las apariencias. Asociamos los pingüinos a las bajas temperaturas, y no nos equivocamos del todo, a pesar de que sabemos que uno de sus representantes vive en latitudes ecuatoriales de Sudamérica y, por tanto, en zona cálida. Pero, para ser más precisos, tendríamos que matizar que los pingüinos, más que de los hielos, a los que el tópico asocia sin remedio, son las aves de las aguas frías, y así queda explicado el aparente contrasentido que supone para nosotros el «extraño» hábitat

del pingüino de las Galápagos (*Spheniscus mendiculus*), islas que están bajo el influjo de la fértil y gélida Corriente de Humboldt, que para muchos autores empieza en la Antártida y se cierra, precisamente, en el mítico archipiélago ecuatoriano. Ya veis que este pingüino, aunque no lo parezca, también cumple las ordenanzas.

