



universidad  
de león



**FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES**

**PERCEPCIÓN ACÚSTICA Y EFECTOS DEL  
RUIDO EN ANIMALES MARINOS.**

**ACOUSTIC PERCEPTION AND NOISE EFFECTS ON  
MARINE ANIMALS.**

Autora: Núria Bujosa Riera

Tutor: Antonio José Laborda Navia

**GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**Julio, 2022**



## Índice

1. INTRODUCCIÓN .....	3
2. OBJETIVOS .....	6
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	6
4. RESULTADOS.....	7
4.1. La recepción del sonido.....	7
4.2. Los receptores del sonido .....	7
4.2.1. Cnidaria.....	9
4.2.2. Mollusca.....	11
4.2.3. Crustacea.....	15
4.2.4. Peces .....	17
4.3. Efectos .....	20
4.3.1. Cnidaria.....	20
4.3.2. Mollusca.....	21
4.3.3. Crustacea.....	21
4.3.4. Peces .....	22
5. CONCLUSIONES .....	23
6. BIBLIOGRAFÍA .....	24



**Resumen:**

Actualmente, existe relativamente poca información sobre como los organismos marinos procesan y analizan el sonido, por ello, evaluar las distintas fuentes de ruido antropogénico que pueden afectarlos se dificulta. El ruido, al considerarse desde hace unas décadas como contaminante y variable ambiental más pernicioso ha empezado a adquirir prioridad a la hora de ampliar el conocimiento tanto de los receptores como de las fuentes de emisión. En este trabajo se presentan los órganos receptores del sonido o posibles candidatos y efectos del ruido para distintos organismos marinos, principalmente invertebrados. Los resultados sugieren la existencia de estos receptores en todos los organismos estudiados, aun siendo insuficiente la información. Por lo que, con esto, se pretende remarcar la importancia y necesidad de llevar a cabo más investigaciones, además de la posible implementación de una normativa al respecto.

**Palabras clave:** animales marinos, contaminación, receptores, ruido.

**Abstract:**

Currently, there isn't enough information about how marine organisms process and analyse sound, making it difficult to assess the different sources of anthropogenic noise that may affect them. Noise, as it has been considered for some decades as the most harmful pollutant and environmental variable, has begun to acquire priority when it comes to increasing our knowledge of both the receptors and the sources of emissions. In this paper, the sound receptor organs or possible candidates and effects of noise for different marine organisms, mainly invertebrates, are presented. The results suggest the existence of these receptors in all the organisms studied, although the information is insufficient. Therefore, the aim is to highlight the importance and need for further research, as well as the possible implementation of regulations in this regard.

**Key words:** marine animals, noise, pollution, receptors.



## 1. INTRODUCCIÓN

El sonido se puede definir como una onda que se propaga a través de la materia. Dicha onda, acústica, es una sucesión de alternativas compresiones (alta presión) y refracciones (baja presión) de moléculas dentro de un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso) que un receptor es capaz de percibir como cambios de presión. Estas variaciones de presión se conocen como presión acústica o presión sonora, que hace referencia a las diferencias en un instante dado entre la presión instantánea y la atmosférica.

Por tanto, es la sensación producida en una célula/estructura/órgano, capacitado para percibirla, por la vibración de las partículas que se desplazan a través de un medio elástico que las propaga, y para que exista es necesario:

- Una fuente de vibración mecánica.
- Un medio elástico de propagación.

La velocidad del sonido en el medio marino se encuentra comprendido entre 1450 y 1540 m/s a diferencia de la del aire que es de 340 m/s. Estas velocidades pueden ir variando dependiendo de la presión, temperatura y salinidad, además de ser una variable que presenta una estratificación horizontal y que varía solo en sentido vertical (Redondo y Ruiz Mateo, 2017). Por lo que la facilidad que tiene el sonido de propagarse en el agua puede ser una ventaja para unos o una desventaja para otros.

En la (Figura 1) los perfiles verticales nos representan en el eje de las x (la velocidad del sonido) y en el eje de las y (la profundidad). Se puede observar la variabilidad de propagación de capas más superficiales a capas con mayor profundidad, en las que se ve que esta variabilidad que tenemos en los primeros 400 m es atenuada a medida que bajamos. Ya que en capas más profundas las condiciones son más estables y el gradiente de variación es más constante (Redondo y Ruiz Mateo, 2017).

La temperatura al descender en la profundidad, provoca que la velocidad también disminuya. La termoclina se encuentra en los océanos entre 200-1000 metros de profundidad, por debajo de esta, cuando la temperatura ya no baja más, la velocidad aumenta, ya que le influye el factor de la presión.

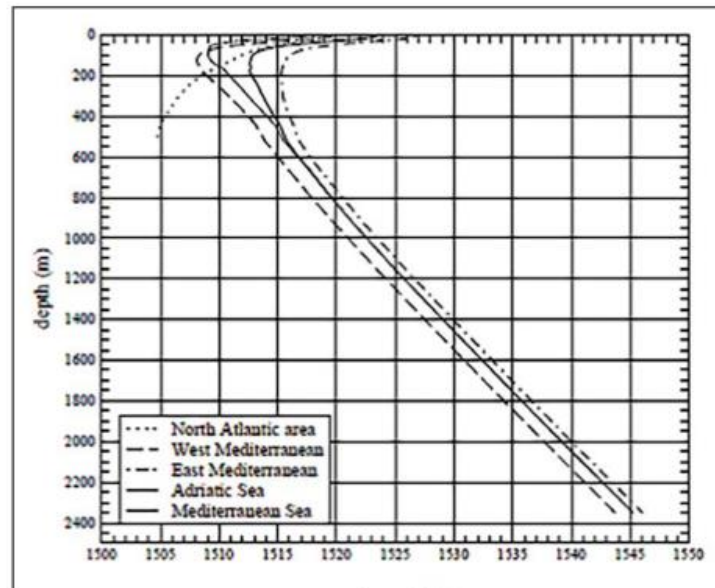


Figura 1. Perfiles verticales de las velocidades del sonido para diversas zonas del Mediterráneo y del Golfo de Cádiz. Fuente: (Salon *et al.*, 2003).

El reino submarino ha sido considerado un “mundo silencioso” como dice el título del libro de (Cousteau y Dumas, 1987), aunque desde la Revolución Industrial este mundo ha dejado de estar callado, debido al ruido antropogénico, que ha ido creciendo a medida que nos acercamos al mundo actual. Nos encontramos con que el desarrollo de infraestructuras ha sido consecuencia del aumento considerable de los sonidos generados por el ser humano, de la misma manera que se han disminuido los sonidos de origen biológico, los cuales se han visto en declive. Hay evidencias claras de que la repercusión de las actividades de origen humano, afectan directa e indirectamente a la fauna marina, incluyendo su comportamiento, fisiología e incluso su supervivencia (Duarte *et al.*, 2021).

En el medio marino, la existencia de sonidos es constante. El oleaje, las erupciones volcánicas, los terremotos, etc.; así como las emisiones de origen animal son algunas de las fuentes naturales que los generan. Pero, actualmente, hay una gran variedad de sonidos producidos por las actividades del hombre, que provienen de los motores de embarcaciones, sonares, aerogeneradores, prospecciones en busca de recursos, como el petróleo o diferentes minerales, etc.

Estos sonidos antropogénicos constituyen en la actualidad un factor de riesgo para los animales marinos, en forma de contaminación acústica, lo que constituye una de las mayores



amenazas a corto plazo y a escala mundial, para el equilibrio y supervivencia de sus poblaciones.

Aunque referido al ser humano, la Conferencia para el Medio Ambiente de Estocolmo, en 1972, definió al ruido como contaminante y lo consideró como la variable ambiental más pernicioso desde el punto de vista psicológico y una de las más importantes desde el punto de vista fisiológico para las personas.

Pero ¿cómo afecta al resto de los animales esta variable que hemos introducido en el medio ambiente?

La comunicación entre los animales puede definirse como el intercambio de información entre los miembros de una misma especie, entre los de diferentes especies o entre los organismos y su medio. Gracias a la comunicación las sociedades de animales se mantienen unidas y organizan su conducta social, mediante señales visuales, táctiles, químicas y auditivas, que transmiten a través de un medio, para lo cual han desarrollado unos mecanismos (estructuras anatómicas) que originan la señal y la reciben.

En lo que se refiere a las señales auditivas y centrándonos en el medio marino, es conocida la capacidad de los cetáceos de comunicarse entre sí (conversar) y de algunos de ellos de conocer su medio ambiente (detectar su alimento y navegar), usando un sistema de sonar biológico.

Así, la evolución de este grupo de animales, desde hace 65 millones de años, permitió desarrollar el sistema auditivo como sentido principal para comunicarse, para orientarse y para comprender el mundo a su alrededor; sobre todo, en el caso de los cetáceos odontocetos (delfines, cachalotes, zifios, calderones, etc.) que desarrollaron una nueva forma de comunicación y de relación con el medio, única en el reino animal, denominada ecolocalización. Aunque no todas las especies de cetáceos realizan el proceso de ecolocalización, para todos ellos el sonido es fundamental para detectar y capturar las presas, para orientarse, detectar los depredadores y comunicarse con otros miembros de su grupo familiar o con otros grupos.

Desde mediados del siglo XX, la investigación acústica sobre los cetáceos ha sido abundante, por lo que se dispone de muchos datos científicos sobre su sistema acústico y su dependencia de las señales acústicas como fuente de información y sistema de comunicación en medio marino. Dicha dependencia les hace especialmente vulnerables a las fuentes de ruido artificial



y cada vez es más preocupante para su supervivencia el hecho de que se está constatando que la contaminación acústica está provocando impactos negativos en muchas especies.

En respuesta a ello, se han descrito alteraciones de comportamiento que, en algunos casos, llevan a mortandades masivas en diferentes partes del mundo, al desplazamiento de poblaciones que evitan la fuente de ruido o a lesiones de distinta gravedad en el sistema auditivo, que pueden provocar sordera permanente e incluso la muerte inmediata del animal.

Parece claro que las fuentes de ruido, los diferentes niveles de intensidad, pueden afectar de forma negativa a las poblaciones de cetáceos. Sin embargo, a pesar de ser el grupo de organismos marinos mejor estudiado en este sentido, los conocimientos sobre los efectos del ruido en la fisiología y psicología de los mamíferos marinos son aún escasos e insuficientes para entender la relación entre frecuencias, intensidades y duración de las exposiciones que pueden llevar consecuencias negativas.

El conocimiento que se tiene hasta el momento sobre lo que ocurre o cómo se ven afectados otros organismos marinos es mucho menor y darlo a conocer es el objetivo principal de este trabajo.

## **2. OBJETIVOS**

Aunque de manera insuficiente, como se ha comentado, los estudios sobre la percepción de los sonidos, así como los efectos que la contaminación acústica tiene sobre ellos, se han centrado en los cetáceos.

El objetivo principal de este trabajo bibliográfico ha sido acceder y recopilar la información posible sobre las formas de “audición” que se conocen sobre organismos marinos menos estudiados y los efectos negativos que el ruido, como elemento contaminante en el medio, puede provocar en ellos.

## **3. MATERIAL Y MÉTODOS**

La revisión bibliográfica de este trabajo se ha llevado a cabo mediante la búsqueda de las publicaciones científicas a las que ha sido posible acceder, relacionadas principalmente con



los efectos de la contaminación acústica sobre invertebrados marinos y peces; así como, sobre la descripción y función de las células, estructuras y órganos con capacidad de percibir el sonido en ellos.

Para dicha búsqueda se han utilizado las bases de datos: Science Direct, Google Scholar, Research Gate y Springer Link, introduciendo en sus buscadores, principalmente: “effects of noise pollution on marine animals”, “sound receiving organs of marine invertebrates”, además de realizar una búsqueda libre en internet.

## **4. RESULTADOS**

### **4.1. La recepción del sonido**

Según se ha definido, el sonido es energía acústica transferida a través de la materia, pudiendo sentirse dicha transferencia como variaciones de presión o como el movimiento de partículas. Las partículas oscilan en su posición mientras transfieren energía acústica; por tanto, si un animal que posee un mecanismo “auditivo” entra en contacto adecuado con un medio vibrando a una frecuencia e intensidad dentro de su rango de sensibilidad “auditiva”, puede escuchar el sonido. Para los animales terrestres, el medio de vibración habitual es el aire, pero para los peces y otros animales acuáticos es el agua.

El aire es comprimible y menos denso que el agua, así que los animales en tierra perciben más los sonidos a través de variaciones en la presión del aire que por medio del movimiento del aire. Por el contrario, el agua no es comprimible y es mucho más densa que el aire, así que el sonido en el agua es percibido tanto por cambios de presión como por movimientos de partículas. Asimismo, puesto que el agua no es comprimible, el sonido se mueve de forma muy eficiente y la energía sonora no se disipa tan rápido en el agua, así que se puede escuchar fácilmente a largas distancias.

### **4.2. Los receptores del sonido**

En el curso de la evolución, los animales han desarrollado una extensa variedad de órganos de los sentidos que responden a estímulos mecánicos, de manera que hay diferentes mecanorreceptores en vertebrados y en invertebrados; sin embargo, no todas estas estructuras





responden al sonido, ya que entre ellas se encuentran las terminaciones táctiles simples de la piel y los receptores de movimiento que sirven para controlar el equilibrio corporal. Si bien las diferentes formas de registrar cambios mecánicos en el medio o dentro del cuerpo representan diversas especializaciones estructurales, no es factible identificar ninguna de ellas simplemente en términos de su estructura; muchos mecanismos, células u órganos pueden realizar funciones similares.

Aunque no existe un registro fósil que nos explique el origen y desarrollo de las estructuras auditivas, en los animales con “oídos”, como los mamíferos marinos, el proceso evolutivo parece deberse a una transformación de estructuras que primitivamente tenían una forma más simple de recepción mecánica a cumplir una función auditiva. De hecho, cualquier mecanorreceptor, aunque esté mejor adaptado para responder a alguna otra forma de estimulación mecánica, responderá a las vibraciones dentro de alguna región del rango de frecuencia del sonido si las vibraciones tienen un nivel de intensidad suficientemente alto.

En principio, los animales no necesitan de estructuras especializadas para emitir sonidos, dado que el simple roce o golpeteo de una parte de su cuerpo contra otra o contra el sustrato produce un sonido que puede ser utilizado como código de comunicación entre ellos. Así mismo, la recepción de las vibraciones producidas de esta manera tampoco requiere un órgano especializado: los mecanorreceptores situados en la epidermis de muchos animales pueden detectarlas, constituyendo así un sistema de comunicación acústica muy elemental, la cual ha surgido de manera independiente y abundante en el reino animal.

A partir de una forma básica de emisión acústica, las modificaciones de los órganos implicados que supongan una mejor o más elaborada emisión, se verán favorecidos adaptativamente. De esta forma, a partir del roce de dos estructuras o el silbido producido por la expulsión de aire a presión, se han desarrollado órganos progresivamente más especializados que han permitido a su vez una mayor complejidad de la señal y, por lo tanto, de la información transmitida. Paralelamente, la estructura de los órganos receptores ha sufrido una evolución hacia formas cada vez más complejas, para discernir los matices que los órganos de producción de sonido especializados son capaces de generar.

Veamos algunos ejemplos en organismos marinos no mamíferos:

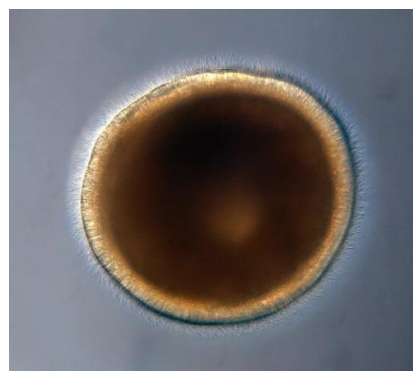
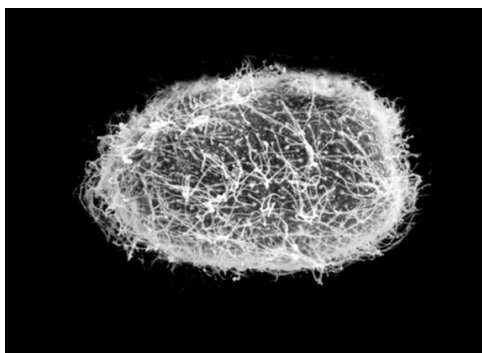


### 4.2.1. Cnidaria

Para este filo, los estudios encontrados son escasos y se reducen, casi exclusivamente, a los realizados sobre larvas (plánula) de determinados corales (Hexacorallia, Madreporaria), aunque dada la presencia generalizada de esta larva en los ciclos vitales de Cnidaria, podríamos extrapolar los resultados al resto de las clases de este filo (Hidrozoa, Sciphozoa y Cubozoa).

Así, en el estudio de Vermeij *et al.* (2010), se indica que es la primera descripción de una respuesta auditiva en el filo de los Cnidarios, y se centra en la hipótesis sobre la capacidad para percibir las ondas sonoras por parte de las larvas de coral. Dicha hipótesis se basa en que algunos invertebrados terrestres perciben, mediante los cilios de células de su epidermis, información y generan una respuesta a las ondas sonoras.

Se supone que las larvas plánulas, densamente ciliadas (Figuras 2 y 3), tienen capacidades similares a los invertebrados terrestres; concretándose, en este caso, que no se trata de detección de la presión acústica, sino del movimiento de las partículas que generan las señales acústicas.



Figuras 2 y 3. (izquierda) Larva de *Lophelia pertusa*. Fuente: <https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/17sedci/logs/aug18/aug18.html>. (derecha) Larva de *Orbicella faveolata*. Fuente: <https://naturalhistory.si.edu/research/smithsonian-marine-station/news/sharing-corals-science>



Los cilios se definen, básicamente, como pequeñas proyecciones citoplasmáticas piliformes, que se localizan en la superficie de algunas células eucariotas (Figura 4 y 5). Son estructuras con la capacidad de realizar movimientos generados por las vibraciones, de tal manera que cada uno de los cilios está sutilmente fuera de ritmo en relación con su vecino, y esto produce un flujo constante de líquido sobre la superficie celular.

Cada cilio está compuesto por nueve pares de microtúbulos que conforman un anillo exterior y dos microtúbulos centrales (Figura 5) (Gelambi, 2019).

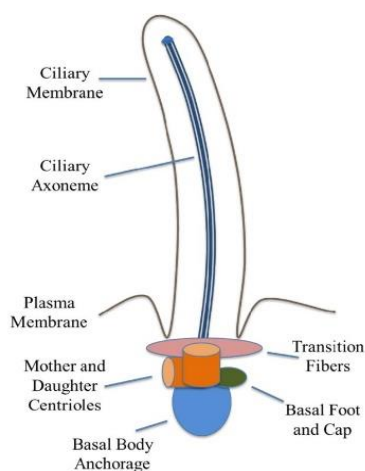


Figura 4. Principales estructuras de los cilios primarios. Fuente: (Aboualawi y Saternos, 2015).

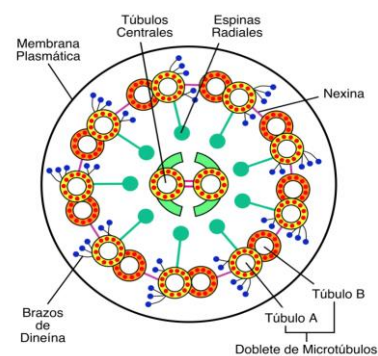


Figura 5. Composición de los cilios. Fuente: <http://elmodernoprometeo.blogspot.com/2021/04/cilios-y-flagelos-morfologia-basica.html>.

El movimiento de los cilios se produce gracias a la flexión del axonema (Figura 4), complejo paquete de microtúbulos (varillas huecas) constituidos por una proteína, la tubulina, que realiza un movimiento de látigo, impulsados por la actividad motriz de la dineína (proteína motora) axonémica (Figura 4).

Las proteínas hidolizan el ATP para la obtención de energía, por lo que a medida que se activan, presentan cambios conformacionales que posibilitan movimientos complejos. La dineína se arrastra por todos los microtúbulos, de manera que los dobletes vecinos se tensan hacia arriba y luego vuelven a unirse más hacia abajo. Ya que los dobletes se unen entre ellos a partir de la proteína de reticulación, sólo son capaces de deslizarse a una corta distancia entre sí, generando un movimiento de flexión en el cilio (Gelambi, 2019).



## 4.2.2. Mollusca

### 4.2.2.1. Bivalvia

En este filo, concretamente en la clase Bivalvia, se encuentra el órgano sensorial abdominal (ASO), el cual se ha revelado como altamente sensible ante las vibraciones que se transmiten por el agua, dentro del rango de 20-1500 Hz, y se considera, entre los mecanorreceptores, uno de los órganos más grandes conocidos, ya que puede llegar hasta los 5 mm de longitud y 1,5 mm de diámetro (Zhadan *et al.*, 2005). Se trata de una estructura par, que se localiza en la región postero-ventral del músculo aductor posterior, sobre la parte externa del extremo de la base de fijación de las branquias (Figura 6). Tiene una apariencia similar a una cresta o aspecto reniforme, es de color pardo y presenta un espesor en su zona central de unos 70  $\mu\text{m}$ , aunque su tamaño puede variar según el animal.

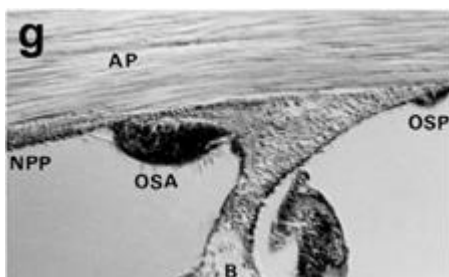


Figura 6. Órgano sensorial abdominal (OSA) y órgano sensorial paleal (OSP). Fuente: (Zaixso, 2003).

Está formado por células que, aparentemente, constituyen una única capa, las cuales tienen núcleos de forma oval y presentan gránulos de color pardo amarillento cerca de su extremo distal, además de una cutícula estriada desde la que se proyectan cilios (Zaixso, 2003).

La longitud de los cilios, en el caso de la especie de vieira *Mizuchopecten yessoensis*, se encuentra entre 120  $\mu\text{m}$  y 250  $\mu\text{m}$ , aparentemente de un color azul plateado en la parte proximal de los cilios y de color marrón rojizo en la parte distal.

En un corte transversal (Figura 7 A y B) se puede distinguir claramente la transición entre los epitelios sensorial y paleal, ya que, por una parte, el epitelio sensorial tiene una altura de 110-120  $\mu\text{m}$  y en cambio el paleal solo alcanza las 20-30  $\mu\text{m}$ . También, en la superficie celular apical, se encuentran microvellosidades de unos 2-2,5  $\mu\text{m}$  de altura.

En un corte longitudinal (Figura 8), se observan en el epitelio varias zonas: la inferior (densa y fina), compuesta por estructuras que forman el soporte de los cilios; la luminosa, constituida por las partes distales de las células sensoriales, además de los cuerpos celulares secretores; y



la ópticamente densa, que se sitúa junto a las anteriores y en la que se localizan la mayor proporción de núcleos de las células sensoriales.

Las partes basales de las células sensoriales se encuentran en contacto con la capa de colágeno, la cual mide unos 10  $\mu\text{m}$  de ancho y se localiza debajo de la membrana basal (3-4  $\mu\text{m}$ ).

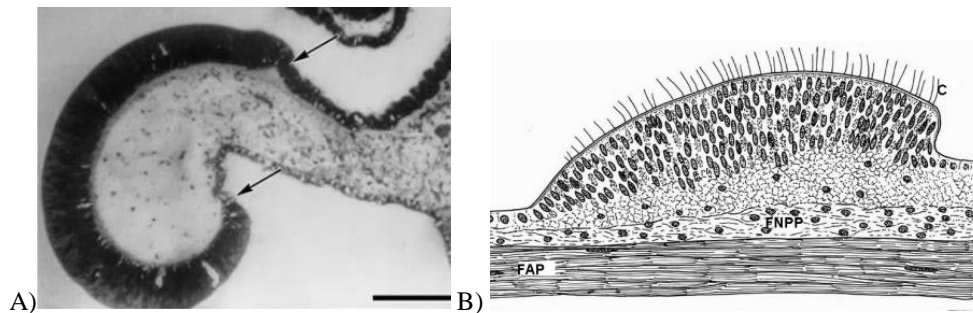
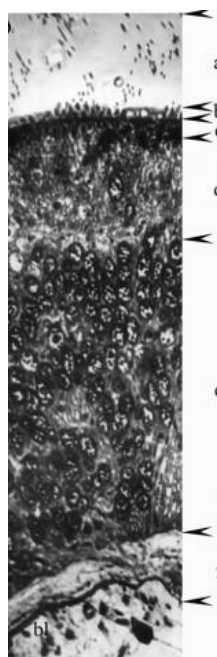


Figura 7. A) Bordes del epitelio sensorial. Fuente: (Zhadan *et al.*, 2005). B) Corte transversal del órgano sensorial abdominal, donde C: cilios, FNPP: filete del nervio paleal posterior y FAP: fibras del músculo aductor posterior. Fuente: (Zaixso, 2003).

En algunos estudios se menciona el desconocimiento de la función de este órgano (Zaixso, 2003), aun así, sí que se hace referencia a las funciones que pueden tener los cilios que forman parte del mismo y se destaca que la sensibilidad del órgano sensorial abdominal depende de la longitud del cilio.

Cuando se habla de su función se remarca la gran importancia que tienen para la recepción de



estímulos mecánicos. Los cilios permiten detectar los desplazamientos mecánicos y transmitirlos a la región proximal, en parte rígida, a causa del doblete exterior y a los materiales asociados a la membrana. Es posible que la región proximal tenga movimiento sin doblarse y de esta manera estire los enlaces y junto con la gran flexibilidad de la porción distal proporcionen las condiciones idóneas para la interacción lateral

Figura 8. Corte longitudinal del ASO. a) cilios, b) microvellosidades, c) estructuras basales de los cilios, d) porciones distales de células sensoriales y secretoras, e) concentración de núcleos de células sensoriales, f) capa de colágeno. Fuente: (Zhadan *et al.*, 2005).

entre las membranas de los cilios adyacentes.

Concretamente, se estudió la sensibilidad direccional en la vieira japonesa



(*Mizuchopecten yessonensis*), observándose que, al tocar cerca de la superficie del manto en la zona del órgano sensorial abdominal, la banda de tejido se contraía. El ASO se encuentra inervado por dos ramas del nervio del manto posterior que llegan desde el musculo aductor, además el nervio principal se origina en el ganglio visceral. En el experimento realizado, se pudo observar que la emisión de estímulos débiles provocaba en las vieiras una ligera contracción del borde del manto y, a medida que se aumentaba la intensidad, tanto los tentáculos largos como los cortos también se contraían y, seguidamente, las vieiras se cerraban.

Por otro lado, en las fases larvarias de los moluscos (veliger) comienzan a formarse los estatocistos, cuya función principal es la regulación del equilibrio, tanto en la larva como posteriormente en los adultos.

Básicamente se trata de sacos de paredes delgadas conectados a través de un canal cilíndrico con la cavidad del manto (Figura 9); por tanto, en contacto directo con al agua que rodea la larva. La pared está formada por una única capa de células (repliegue de la epidermis) mayoritariamente de carácter sensorial y ciliadas.

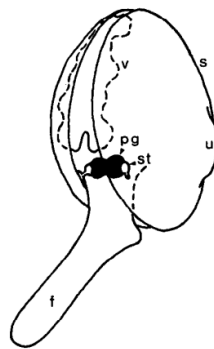


Figura 9. Estatocisto de *Pecten maximus*, donde f) pie, pg) ganglio pedal, s) concha, st) estatocisto, u) velo retraído. (Cragg y Nott, 1977).

Como se ha comentado, los estatocistos en los moluscos son, principalmente, sensores de gravedad, gracias a la presencia de células sensoriales que proyectan sus cilios hacia la luz de la bolsa, llena de líquido, donde se encuentran pequeños corpúsculos de carbonato cálcico, los estatolitos. El estímulo producido por la pérdida de equilibrio y provocado por la presión de los estatolitos sobre los cilios de las células sensoriales se trasmite, vía sistema nervioso, y se





traduce en una respuesta muscular que devuelve al animal a su posición de equilibrio (Wiederhold *et al.*, 1989).

#### 4.2.2.2. Cephalopoda

En el caso de los moluscos cefalópodos, tampoco se hace referencia a la detección de una onda de presión sonora, sino que, como en los moluscos anteriores mencionados, se constata una recepción de estímulos sonoros a partir de la percepción del movimiento de las partículas. Según Hu *et al.* (2009), se demuestra la capacidad de recepción de las especies *Sepiotheutis lessoniana* y *Octopus vulgaris* de sonidos por encima de los 400 Hz, siendo de los pocos estudios en los que se registra una respuesta por encima de estas frecuencias. Plantean que la recepción de las mismas pueda residir en líneas epidérmicas de la cabeza y de los brazos, además de en los estatocistos, apostando por estos últimos como principales candidatos.

Los estatocistos de los cefalópodos son más sofisticados que en el resto de moluscos y, normalmente, se encuentran en la región del cartílago cefálico, encargándose, como ya se ha comentado, de determinar la posición y mantener el equilibrio (André *et al.*, 2011).

Tienen forma globosa y contienen en su interior endolinfa y estatolitos, además de células sensoriales ciliadas que se sitúan en la pared interior agrupadas en dos zonas: la mácula y crista (Figura 10) (Solé *et al.*, 2013). Estas dos zonas representan dos sistemas receptores: por una parte, el sistema mácula-estatolito, el cual indica los cambios de posición en relación a la gravedad y, por otra parte, el sistema crista-cúpula, encargado de determinar la aceleración angular (André *et al.*, 2011).

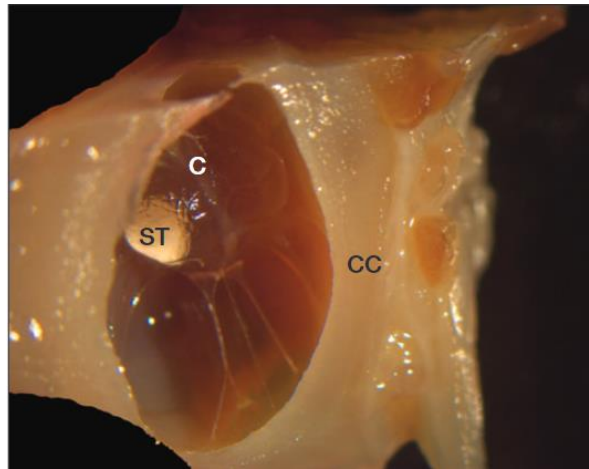


Figura 10. Visión lateral del interior del estatocisto de *Octopus vulgaris*. Saco interior esférico suspendido en la cavidad del cartílago cefálico (CC) por hilos fibrosos. El estatolito (ST) está unido a la mácula y a la crista (C), ambas situadas en la pared interior de la estructura. Fuente: (André *et al.*, 2011).

En varios estudios se sugiere que los cefalópodos, por medio de los estatocistos, son capaces de detectar el sonido de la misma manera que lo hacen los peces con los otolitos, que se consideran como un oscilador armónico simple. Debido a las similitudes entre los estatocistos y las estructuras otolíticas de los peces, se podría suponer una idéntica función (Kaifu *et al.*, 2008; Hu *et al.*, 2009).

#### 4.2.3. Crustacea

En los crustáceos, al no tener cavidades llenas de aire, se plantea la recepción de sonido a partir de la percepción del movimiento de las partículas en el medio, siendo los mecanismos similares a los anteriormente mencionados, en el caso de los estatocistos que también presentan.

Además de los citados estatocistos, los crustáceos decápodos presentan otros mecanorreceptores que pueden relacionarse con dicha percepción, como son las setas en la superficie del cuerpo y los órganos cordotonales asociados con las articulaciones de las antenas, patas locomotoras u otros apéndices (Popper *et al.*, 2001).

Los estatocistos se comparan con los otolitos de los peces (Breithaupt y Tautz, 1988; Breithaupt y Tautz, 1990; Montgomery *et al.*, 2006), ya que los materiales que los forman





tienen densidades similares al agua, por lo que la onda mecánica que se transmite a través de ella les afectará de igual manera que al medio circundante.

Esto se ha comprobado al estudiar la percepción acústica de *Palaemon serratus*, la cual se asemeja al rango de audición de los peces generalistas, capaces de detectar y responder a sonidos dentro de frecuencias entre 30 Hz a 2000 Hz (Lovell *et al.*, 2005).

La estructura de los estatocistos en los crustáceos es variada (Figura 11), pero se corresponde al esquema general de una cámara llena de líquido, con células sensoriales ciliadas y estatolitos, que se encargan de la regulación del equilibrio respondiendo a cambios de orientación espacial. Generalmente, en los crustáceos decápodos se encuentran en el segmento basal de cada antena y los estatolitos son granos de arena que están unidos por la secreción de unas glándulas situadas en el fondo de las cámaras (Cate y Roye, 1997).

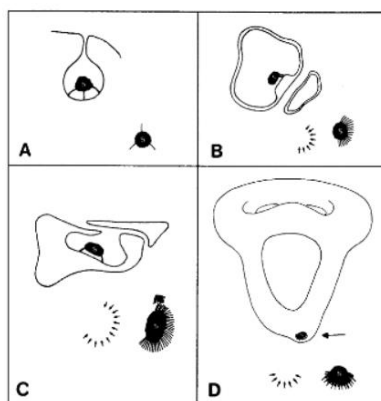


Figura 11. A: Estatocistos del telson de *Cyathura polita*; B: Estatocisto derecho de *Pranus exuosus*; C: Estatocisto del segmento basal de la anténula derecha del cangrejo de río y la langosta; D: Órgano estatolítico en el canal vertical del estatocisto del cangrejo. Todo de Budelmann (1998), como se imprimió en Budelman (1992). Fuente: (Popper *et al.*, 2001).

El funcionamiento de los estatocistos en crustáceos se ha investigado mediante el análisis de las respuestas de comportamiento y la respuesta eléctrica de las fibras sensoriales a diversos estímulos mecánicos (Sugawara, 1965). Se ha visto que participan, principalmente, en el mantenimiento del equilibrio desencadenando movimientos de enderezamiento. Así mismo, dentro de las respuestas que se le atribuyen, se incluyen los movimientos oculares compensatorios que permiten al animal seguir el horizonte u objetos cercanos, además del control de las propias anténulas. Por ejemplo, las células de los estatocistos de los cangrejos presentan distintos tipos de cilios; por un parte los que responden al movimiento de los



fluidos, y por otra los que lo hacen al desplazamiento o aceleración del estatolito o a su vibración (Popper *et al.*, 2001).

#### 4.2.4. Peces

En los grupos zoológicos hasta ahora estudiados la recepción del impulso sonoro se basaba en la percepción del movimiento de las partículas en el medio, pero, en el caso de los peces, tenemos que incluir la recepción a partir de la presión directa del campo sonoro, aunque dentro de este mismo grupo, sea limitado.

Los principales mecanismos de detección por presión en los peces se deben a la existencia de una cavidad llena de gas, como es la vejiga natatoria (Figura 12), la cual les permite detectar tanto la presión como recabar información sobre la fuente de sonido (Montgomery *et al.*, 2006).

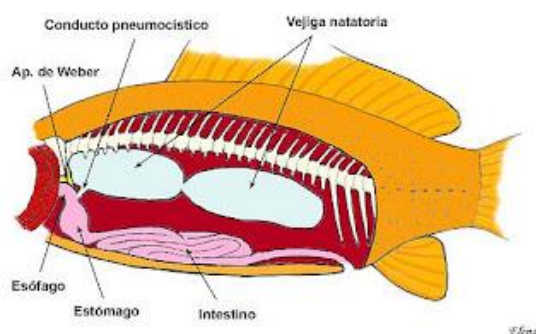


Figura 12. Vejiga natatoria. Fuente: <https://cmcmedioambiente.blogspot.com/2010/05/vejiga-natatoria.html>

La vejiga natatoria es un órgano que se encuentra presente en la mayor parte de los comúnmente conocidos como peces óseos (Actinopterygii). Tiene forma ovalada y se sitúa por encima del tracto digestivo, justo por debajo de la columna vertebral (Figura 12). Puede encontrarse llena de aire u oxígeno y tiene un papel importante en la flotabilidad neutra, así como en la reducción de los costes energéticos a la hora de permanecer a una cierta profundidad (Sado *et al.*, 2020; Hall, 1924).

Por otro lado, como se ha mencionado con anterioridad, también es posible que los peces detecten el sonido con los órganos otolíticos del oído interno (Figura 13).

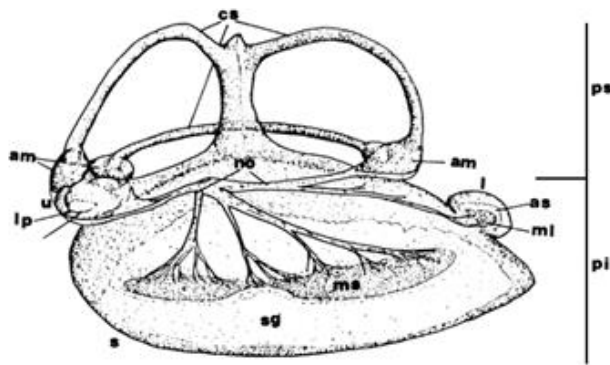


Figura 13. Laberinto auditivo. am: ampulla, as: asteriscus, cs: canales semicirculares, l: lagena, lp: lapillus, ml: mácula lagenar, ms: mácula sacular, mu: mácula utricular, no: nervio octavo, pi: pars inferior, ps: pars superior, s: sáculo, sg: sagitta, u: utriculus. Fuente: <https://www.fao.org/3/T0529S/T0529S03.htm>

Aunque su morfología es variable, generalmente el oído interno está formado por tres canales semicirculares y su epitelio sensorial asociado, además de tres órganos otolíticos: el sáculo, la lagena y el utrículo; cada uno de los cuales tiene un epitelio sensorial, llamado mácula, formado por células ciliadas mecanosensoras, células de soporte y un otolito calcáreo.

Las células ciliadas presentan un haz ciliar apical, que consiste en un único kinocilio y estereocilios alrededor del mismo, y son transductores mecanoelectrónicos sensibles. El estímulo que genera una excitación puede ser tanto un estiramiento como una distorsión de la membrana de la célula sensorial, causados por una modificación mecánica dentro del agua. Al generarse esta, las células son sensibles al desplazamiento mecánico, tanto en dirección como en magnitud. Según la dirección en la que se flexionen los estereocilios, variará la velocidad de liberación del transmisor, por lo que la frecuencia de descarga de la fibra aferente llevará la información al sistema nervioso central, que se encuentra conectado a la parte basal de la célula sensorial (Figura 14).

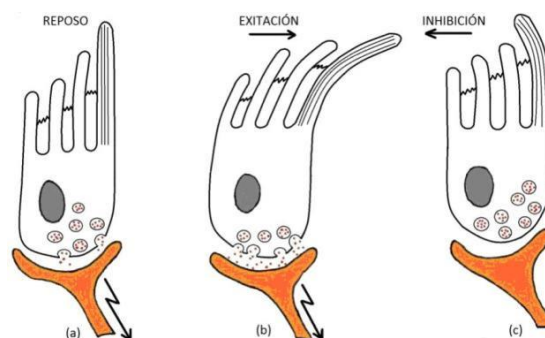


Figura 14. Desplazamiento de los cilios a diferentes estímulos. Fuente: <https://desarrollo-pezcibra.blogspot.com/2012/11/sistemas-sensoriales-de-los-peces.html>

En conjunto se trata de una estructura compleja, en la que se ha sugerido que tanto el sáculo como la lagena son los principales receptores acústicos y el utrículo el receptor de la



gravedad. Se ha comprobado que el oído interno de los peces suele escuchar mejor los sonidos con un rango de frecuencia entre 30 y 1000 Hz, mientras que aquellos que tienen adaptaciones especiales pueden percibir sonidos entre los 3000 y 5000 Hz, o más.

Cuando la vejiga natatoria y el oído interno están muy cerca hay una mejor percepción acústica, que también se da cuando existe un dispositivo de acoplamiento entre ambos, como los huesecillos de Weber o aparato de Weber en peces del superorden Ostariophysii (Figura 15). Estos huesecillos que conectan la vejiga con el oído no están presentes en todos los peces y transmiten las señales auditivas desde la vejiga hasta las estructuras laberínticas de oído interno, actuando la vejiga natatoria como cámara de resonancia, por lo que se amplifican las ondas sonoras («Aparato Weberiano», 2020).

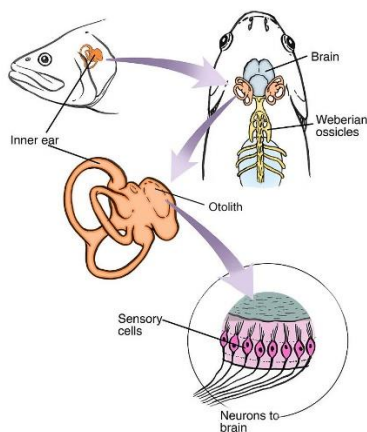


Figura 15. Aparato Weberiano de las especies de peces especialistas en la audición. Fuente: <https://www.offthescaleangling.ie/the-science-bit/fish-hearing/>

Por otro lado, los peces también poseen un sistema sensorial denominado línea lateral, el cual está especializado para detectar vibraciones y movimientos. Las líneas laterales suelen ser visibles como líneas, de distinto color al resto del cuerpo, que se extienden a ambos lados del mismo y, en ocasiones, como una tenue red de puntos a ambos lados de la cabeza. A diferencia del oído interno, la línea lateral detecta el sonido de baja frecuencia, es decir, aquellos menores a 100 Hz, considerándose entonces como un detector del movimiento del agua en relación con el cuerpo del pez, generalmente a corta distancia.

La línea lateral está compuesta por receptores especiales, denominados neuromastos, cubiertos por una cúpula gelatinosa que encierra los cilios de las células ciliadas mecanosensibles subyacentes. Dichos receptores, se extienden por el lateral del cuerpo de los



peces y están interconectados por un sofisticado sistema de canales continuos subepidérmicos (Figura 16) que terminan en un poro y la percepción de sonido, como se ha indicado, se debe al movimiento de las partículas (Stocker, sin fecha).

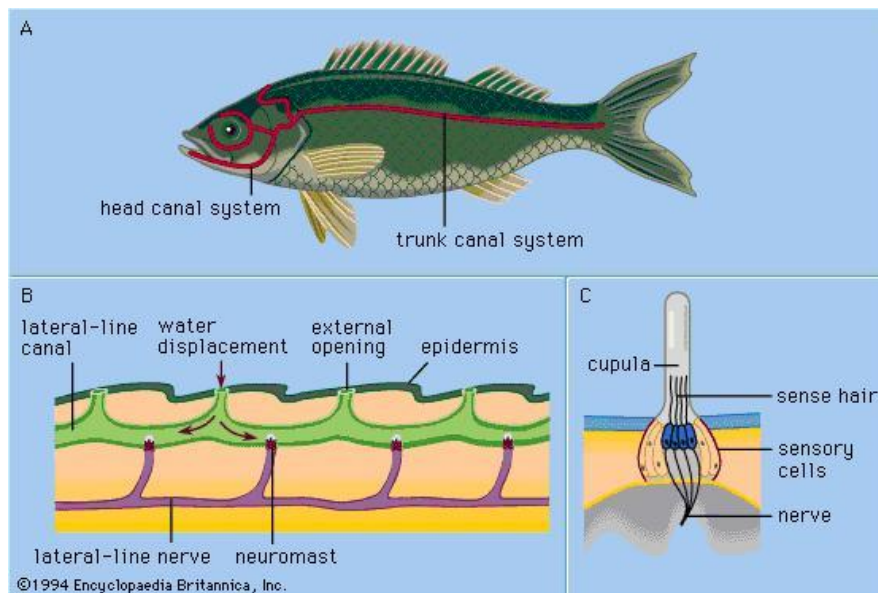


Figura 16. Sistema de la línea lateral de un pez. (A) localización de la línea lateral; (B) corte longitudinal a través de un canal de la línea lateral ubicado en el tronco del pez para mostrar la distribución y la inervación de los neuromastos, (en rosa) y la localización de los poros que conectan el canal con el medio circundante, (en verde). (C) neuromasto superficial. Fuente: Encyclopaedia Britannica.

## 4.3. Efectos

### 4.3.1. Cnidaria

Los estudios donde se detallan los efectos que tiene el sonido en los cnidarios son escasos. Solé *et al.* (2016), en un trabajo realizado sobre dos medusas del Mediterráneo, *Cotylorhiza tuberculata* y *Rhizostoma pulmo*, describen la ultraestructura del epitelio sensorial del estatocisto de ambas especies tras su exposición al ruido. En él se concluye que el daño acústico afectó a ambas especies y todos los individuos presentaron lesiones en el epitelio sensorial del estatocisto: células ciliadas dañadas, extruidas (deformadas) o ausentes; además de observarse, en algunos casos, curvaturas flácidas o directamente falta de kinocilios y estereocilios. El número de células sensoriales dañadas fue en aumento con el tiempo, después de la exposición al sonido.



### 4.3.2. Mollusca

Las respuestas conductuales de los individuos pueden verse afectadas por la disponibilidad de energía, el tamaño, las necesidades respiratorias, las interacciones con los congéneres, etc. (Roberts *et al.*, 2015).

#### 4.3.2.1. Bivalvia

La exposición acústica conlleva cambios tanto de comportamiento como fisiológicos, según los resultados obtenidos por Vazzana *et al.* (2016). Confirmaron que se produjeron cambios de tipo bioquímico en la especie *Mytilus galloprovincialis*, de manera que la exposición a bajas frecuencias aumenta las proteínas plásmicas y el número de inmunocitos circulantes, además de verse afectada la osmolaridad. Así también, observaron cambios en los niveles de estrés.

Además, se ha detectado una clara respuesta de comportamiento, por el movimiento de las valvas en los mejillones *Mytilus edulis*, causado por señales tonales a frecuencias bajas dentro del rango de 5 a 450 Hz (Roberts *et al.*, 2015).

#### 4.3.2.2. Cephalopoda

André *et al.* (2011) expusieron a frecuencias bajas, de 50 a 400 Hz, a cuatro especies de cefalópodos (*Logio vulgaris*, *Sepia officinalis*, *Octopus vulgaris* e *Illex coindetii*). Todas ellas, después de la exposición, presentaron las mismas lesiones que se incrementaron con el tiempo de exposición, en la mácula y en los epitelios sensoriales de la crista. Así mismo, los kinocilios de las células ciliadas faltaban, estaban doblados o flácidos. Estos signos confirmaron que, efectivamente, el impacto del ruido fue agudo y que el daño provocado en las células fue casi inmediato (André *et al.* (2011); Solé *et al.* (2013)).

### 4.3.3. Crustacea

Como se ha mencionado anteriormente, los crustáceos son capaces de detectar el movimiento de las partículas del campo sonoro a través de los estatocistos. En especies como *Nephrops norvegicus* (cigala) y otros crustáceos comerciales relacionados filogenéticamente, se ha revelado que las etapas juveniles y la de adulto son sensibles a los sonidos de baja frecuencia.





En algunas especies se manifiesta un retraso del desarrollo de los huevos, un aumento de las tasas metabólicas y daños en los órganos internos, tras la exposición a sonidos antropogénicos de alta amplitud (Edmonds *et al.*, 2016). Por su parte, Goodall *et al.* (1990), remarcan que dado a la baja sensibilidad de los cangrejos de río, es poco probable que un estímulo natural pueda provocar una respuesta de comportamiento si la señal se encuentra a una distancia razonable del individuo.

#### 4.3.4. Peces

Los estudios realizados sobre peces permiten clasificar los efectos en agudos o crónicos. Un efecto agudo provoca daños (a veces pueden ser severos) de corta duración sobre el animal, cuya recuperación puede ser relativamente rápida y que afectan, generalmente, a la velocidad y profundidad de la natación, sobresaltos, a la tasa de ventilación, a la captación de oxígeno, al aumento del cortisol, etc. Por el contrario, un efecto crónico puede provocar daños graves de recuperación mucho más lenta o nula, como: cambios en la conducta de respuesta frente a depredadores, en el apareamiento, en la natación, en el cuidado del nido; así como fisiológicos: cambios en los umbrales de audición, niveles de lactato, hematocrito y glucosa, frecuencia respiratoria, etc.

En el estudio de Nedelec *et al.* (2013) se demuestra que en algunas especies de peces hay una respuesta direccional positiva frente al ruido generado por embarcaciones, que conlleva cambios significativos de su conducta. El experimento se llevó a cabo sobre las larvas de *Apogon doryssa*, un pez de arrecife de la Polinesia Francesa, y se pudo observar como una mayor proporción permanecía más alejada del foco emisor (un altavoz simulador del ruido de embarcaciones), cuando se reprodujeron conjuntamente el sonido de arrecife y el de las embarcaciones que cuando solo se reproducía el del arrecife. Esto podría desembocar en que las larvas permanecieran más tiempo a la deriva y, por tanto, tuvieran un gasto energético mayor que perjudicaría a su desarrollo.

Sin embargo, hay que remarcar que esto, posiblemente, no afecte de la misma manera a todas las especies, ya que, entre ellas, seguramente existen diferencias en relación con la audacia, la capacidad de enfrentarse a factores de estrés, la capacidad de audición y las experiencias previas que hubieran podido tener con los ruidos de las embarcaciones, lo que les



condicionaría ante ese estímulo por no haber representado anteriormente una amenaza que requiera una respuesta conductual.

No obstante, este efecto podría ser muy perjudicial, ya que tanto la proximidad como la exposición a niveles mayores de intensidad de sonido, sí está demostrado que contribuyen a aumentar la liberación de la hormona del estrés (cortisol), el ritmo cardíaco y los cambios temporales del umbral auditivo pueden darse con mayor facilidad (Kight y Swaddle, 2011). Por otra parte, si las larvas se ven afectadas por el ruido del tráfico de embarcaciones, puede provocar alteraciones en el reclutamiento de las poblaciones adultas lo que incide negativamente en la dinámica de las poblaciones de peces de los arrecifes.

Sin duda, en los efectos influirán el tipo de embarcaciones, su número y su tamaño, el tipo de motores y su potencia, las características de las hélices, la velocidad, etc., y tendrán consecuencia directa en la supervivencia y distribución de las distintas especies de peces, de acuerdo con sus pautas de comportamiento en relación con las embarcaciones.

## 5. CONCLUSIONES

- En general, los animales marinos, debido a que el sonido se transmite mejor en el agua que en el aire, no requieren de los mecanismos de conducción y transformación del mismo, oído externo y medio, que aparecieron con la evolución de los animales terrestres a partir de sus antepasados pisciformes.
- De ellos, si excluimos a los mamíferos, solamente los peces han desarrollado un oído interno, que junto con la vejiga natatoria (en el caso de que la presenten) y la línea lateral, les permiten percibir los sonidos. El resto, los invertebrados, se valen de estructuras más o menos sencillas: células sensoriales de la epidermis, estatocistos, etc., capaces de percibir estímulos mecánicos y que por las características mecánicas de los sonidos son también capaces de percibirlos.
- La capacidad de percepción de los sonidos les hace vulnerables ante la contaminación acústica que generan las diferentes actividades humanas en el medio marino, las cuales provocan en ellos alteraciones tanto fisiológicas como de comportamiento.





- Aunque dichas alteraciones se han constatado en algunos estudios, se considera escasa la información que se tiene al respecto de cómo y en qué medida afecta el ruido a peces e invertebrados marinos.
- Por ello, es necesario llevar a cabo más investigaciones en este sentido, con el fin de conocer en profundidad los efectos que la contaminación acústica provoca en ellos y, así, poder plantear y adoptar las medidas necesarias para atenuarlos o eliminarlos, si es posible, en beneficio del desarrollo individual o poblacional de los peces e invertebrados marinos, muchos de ellos de interés comercial, y por añadidura de los ecosistemas que habitan.
- Obtenidos esos conocimientos, se debería diseñar una metodología de investigación acústica, aplicable como herramienta de monitorización habitual de cara a la conservación de la biodiversidad marina y establecer normativas nacionales e internacionales sobre contaminación acústica marina.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Aboualaiwi, W., y Saternos, H. (2015). *Implications of Dysfunction of Mechanosensory Cilia in Polycystic Kidney Disease*. <https://doi.org/10.15586/codon.pkd.2015.ch16>
- André, M., Solé, M., Lenoir, M., Durfort, M., Quero, C., Mas, A., Lombarte, A., Schaar, M., Lopez-Bejar, M., Morell, M., Zaugg, S., y Houegnigan, L. (2011). Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. *Front. Ecol. Environ.*, 9, 489-493. <https://doi.org/10.2307/23034465>
- Aparato Weberiano. (2020). En *Wikipedia*. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Aparato\\_weberiano](https://es.wikipedia.org/wiki/Aparato_weberiano) (Accedido: 18 de mayo de 2022).
- Breithaupt, T., y Tautz, J. (1988). Vibration sensitivity of the crayfish statocyst. *Naturwissenschaften* 75:310-312. *Naturwissenschaften*, 75, 310-312. <https://doi.org/10.1007/BF00367325>
- Breithaupt, T., y Tautz, J. (1990). *The Sensitivity of Crayfish Mechanoreceptors to Hydrodynamic and Acoustic Stimuli* (p. 114-120). [https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5689-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5689-8_12)
- Cate, H. S., y Roye, D. B. (1997). Ultrastructure and Physiology of the Outer Row Statolith



- Sensilla of the Blue Crab *Callinectes Sapidus*. *Journal of Crustacean Biology*, 17(3), 398-411. <https://doi.org/10.2307/1549434>
- Cragg, S. M., y Nott, J. A. (1977). The ultrastructure of the statocysts in the pediveliger larvae of *Pecten maximus* (L.) (Bivalvia). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 27(1), 23-36. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-0981\(77\)90051-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-0981(77)90051-X)
- Duarte, C., Chapuis, L., Collin, S., Costa, D., Devassy, R., Eguíluz, V., Erbe, C., Lamont, T., Halpern, B., Harding, H., Havlik, M., Meekan, M., Merchant, N., Miksis-Olds, J., Parsons, M., Predragovic, M., Radford, A., Radford, C., Simpson, S., y Juanes, F. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. *Science*, 371, eaba4658. <https://doi.org/10.1126/science.aba4658>
- Edmonds, N. J., Firmin, C. J., Goldsmith, D., Faulkner, R. C., y Wood, D. T. (2016). A review of crustacean sensitivity to high amplitude underwater noise: Data needs for effective risk assessment in relation to UK commercial species. *Marine Pollution Bulletin*, 108(1), 5-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.006>
- Gelambi, M. (2019). Cilios: características, estructura, funciones y ejemplos. *Lifeder*. <https://www.lifeder.com/cilios/>
- Goodall, C., Chapman, C., y Neil, D. (1990). *The Acoustic Response Threshold of the Norway Lobster, Nephrops Norvegicus (L.) in a Free Sound Field BT - Frontiers in Crustacean Neurobiology* (K. Wiese, W.-D. Krenz, J. Tautz, H. Reichert, & B. Mulloney (Ed.); p. 106-113). Birkhäuser Basel. [https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5689-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5689-8_11)
- Hall, F. G. (1924). The Functions of the Swimbladder of Fishes. *Biological Bulletin*, 47(2), 79-127. <https://doi.org/10.2307/1536532>
- Hu, M., Yan, H., Chung, W.-S., Shiao, J.-C., y Hwang, P.-P. (2009). Acoustically evoked potentials in two cephalopods inferred using the auditory brainstem response (ABR) approach. *Comparative Biochemistry and Physiology - Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 153, 278-283. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2009.02.040>
- Kaifu, K., Akamatsu, T., y Segawa, S. (2008). Underwater sound detection by cephalopod statocyst. *Fisheries Science*, 74, 781-786. <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2008.01589.x>
- Kight, C., y Swaddle, J. (2011). How and why environmental noise impacts animals: An integrative, mechanistic review. *Ecology letters*, 14, 1052-1061.



<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01664.x>

- Lovell, J. M., Findlay, M. M., Moate, R. M., y Yan, H. Y. (2005). The hearing abilities of the prawn *Palaemon serratus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 140(1), 89-100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2004.11.003>
- Montgomery, J., Jeffs, A., Simpson, S., Meekan, M., y Tindle, C. (2006). Sound as an Orientation Cue for the Pelagic Larvae of Reef Fishes and Decapod Crustaceans. *Advances in marine biology*, 51, 143-196. [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(06\)51003-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(06)51003-X)
- Nedelec, S., Simpson, S., Radford, A., Berten, L., y Lecchini, D. (2013). Boat noise disrupts orientation behaviour n a coral reef fish. *Marine Ecology Progress Series*, 485, 295-300. <https://doi.org/10.3354/meps10346>
- Popper, A., Salmon, M., y Horch, K. (2001). Acoustic detection and communication by decapod crustaceans. *Journal of comparative physiology. A, Sensory, neural, and behavioral physiology*, 187, 83-89. <https://doi.org/10.1007/s003590100184>
- Redondo, L., y Ruiz Mateo, A. (s.d.). *Ruido subacuático: fundamentos, fuentes, cálculo y umbrales de contaminación ambiental Underwater Noise: Fundamentals, Sources, Assessments and Acoustic Contamination Thresholds*.
- Roberts, L., Cheesman, S., Breithaupt, T., y Elliott, M. (2015). Sensitivity of the mussel *Mytilus edulis* to substrate-borne vibration in relation to anthropogenically-generated noise. *Marine Ecology Progress Series*, 538. <https://doi.org/10.3354/meps11468>
- Sado, R. Y., de Souza, F. C., Behr, E. R., Mocha, P. R. E., y Baldisserotto, B. (2020). *Chapter 2 - Anatomy of Teleosts and elasmobranchs* (B. Baldisserotto, E. C. Urbinati, & J. E. P. B. T.-B. and P. of F. N. F. Cyrino (Ed.); p. 21-47). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815872-2.00002-6>
- Salon, S., Crise, A., Picco, P., De Marinis, E., y Gasparini, O. (2003). Sound speed in the Mediterranean Sea: An analysis from a climatological data set. *Annales Geophysicae*, 21. <https://doi.org/10.5194/angeo-21-833-2003>
- Solé, M., Lenoir, M., Durfort, M., López-Bejar, M., Lombarte, A., van der Schaar, M., y André, M. (2013). Does exposure to noise from human activities compromise sensory information from cephalopod statocysts? *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in*



- Oceanography*, 95, 160-181. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.10.006](https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.10.006)
- Solé, M., Lenoir, M., Fortuño, J. M., Durfort, M., van der Schaar, M., y André, M. (2016). Evidence of Cnidarians sensitivity to sound after exposure to low frequency underwater sources. *Scientific Reports*, 6, 37979. <https://doi.org/10.1038/srep37979>
- Stocker, M. (sin fecha). *How do fish hear?* Ocean Conservation Research. Disponible en: <https://ocr.org/learn/how-fish-hear/> (Accedido: 1 de junio de 2022).
- Sugawara, K. (1965). Impulse Transmission of the Statocyst Response to Vibration through the Supra-oesophageal Ganglion of the Crayfish (With 6 Text-Figures and 1 Table). *北海道大學理學部紀要*, 15(4), 555-567. <http://hdl.handle.net/2115/27400>
- Vazzana, M., Celi, M., Maricchiolo, G., Genovese, L., Corrias, V., Quinci, E. M., de Vincenzi, G., Maccarrone, V., Cammilleri, G., Mazzola, S., Buscaino, G., y Filiciotto, F. (2016). Are mussels able to distinguish underwater sounds? Assessment of the reactions of *Mytilus galloprovincialis* after exposure to lab-generated acoustic signals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 201, 61-70. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2016.06.029](https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2016.06.029)
- Vermeij, M., Marhaver, K., Huijbers, C., Nagelkerken, I., y Simpson, S. (2010). Coral Larvae Move toward Reef Sounds. *PloS ONE*, 5, e10660. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010660>
- Wiederhold, M. L., Sheridan, C. E., y Smith, N. K. R. (1989). *Function of Molluscan Statocysts BT - Origin, Evolution, and Modern Aspects of Biomineralization in Plants and Animals* (R. E. Crick (Ed.); p. 393-408). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6114-6\\_31](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6114-6_31)
- Zaixso, H. (2003). Sistema nervioso y receptores en la cholga, *Aulacomya atra atra* (Bivalvia: Mytilidae). *Revista de biología marina y oceanografía*, ISSN 0717-3326, Vol. 38, Nº. 2, 2003, pags. 43-56, 38. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572003000200001>
- Zhadan, P., Sizov, A., y Dautov, S. (2005). Ultrastructure of the abdominal sense organ of the scallop *Mizuchopecten yessoensis* (Jay). *Cell and tissue research*, 318, 617-629. <https://doi.org/10.1007/s00441-004-0926-2>