

3. Fundamentos sobre la respuesta, bioacumulación y transferencia trófica de metales

Páez-Osuna^a, F., Frias-Espicueta^b, M.G., Ruelas-Inzunza^c, J.R.,
Soto-Jiménez^a, M.F.

^aUnidad Académica Mazatlán, Instituto de Ciencias del Mar y
Limnología, UNAM

^bLaboratorio de Estudios Ambientales, Facultad de Ciencias del Mar,
Universidad Autónoma de Sinaloa

^cInstituto Tecnológico de Mazatlán. S.E.P.

Entender y ser capaces de predecir la acumulación de los contaminantes en la biota acuática adquiere gran importancia debido a que los efectos son una consecuencia de las concentraciones en los órganos o tejidos receptores. Además, la exposición humana frecuentemente ocurre a través del consumo de alimentos contaminados, por tanto la predicción de la acumulación en estos vectores de exposición es clave para evitar intoxicaciones en el hombre (Sinderman, 2006). Con objeto de interpretar mejor la información presentada en los siguientes capítulos, se resumen aquí los conceptos y principales procesos involucrados en la bioacumulación de los metales y se discute de manera general la respuesta de la biota a la contaminación.

3.1. Respuesta de los organismos acuáticos a la contaminación

Las respuestas de los animales acuáticos a un ambiente alterado por la contaminación pueden tener lugar en un número de formas altamente variable (Bryan, 1976), y es que los organismos acuáticos están constituidos con una amplia variedad de mecanismos fisiológicos y bioquímicos que les permiten preservar su *status quo* y sobrevivir en presencia de los contaminantes. Los individuos pueden

tolerar o al menos sobrevivir a la exposición continua de niveles de contaminantes dentro de ciertos límites fisiológicos, y su tolerancia puede incrementarse con la exposición continua a dosis subletales del contaminante; aunque en algunos casos tal tolerancia puede disminuir. Considerando que las adaptaciones para sobrevivir en hábitats degradados son críticas, y dado que los animales acuáticos están estructurados con una serie de respuestas bioquímicas con las cuales son capaces de confrontar a los contaminantes químicos cuando están dentro de sus límites fisiológicos, entonces ellos pueden (Sinderman, 2006):

1. Exhibir pre-adaptaciones metabólicas, que han sido desarrolladas en la especie en respuesta a encuentros tempranos con los contaminantes.
2. Adaptarse a nuevos factores químicos ambientales a través de modificaciones fisiológicas o de conducta.
3. Funcionar temporalmente con un déficit de energía en caso de que los sistemas enzimáticos sean afectados.
4. Reducir sus actividades reproductivas y su crecimiento en la presencia de contaminación crónica.
5. Transferir contaminantes secuestrados fuera de zonas de riesgo.
6. Escapar de las zonas de elevada contaminación.
7. Modificar sus rutas de migración para evitar zonas de elevada contaminación.
8. Secuestrar o metabolizar contaminantes para reducir sus efectos.

Es importante señalar en este contexto, que de alguna manera los organismos marinos pudieran no haber tenido experiencia previa

alguna con nuevas formulaciones de compuestos químicos sintéticos, pero ellos están equipados con respuestas bioquímicas tales que les capacitan para efectuar transformaciones enzimáticas y/o secuestrar tales compuestos externos (Forbes y Forbes, 1994). Los factores ambientales que afectan a los organismos marinos y sus principales elementos aparecen enlistados en la **Fig. 3.1**. Tal diagrama incluye la mayoría de las principales fuentes de estrés para los organismos acuáticos y también ilustra la extensión del problema. Algunos factores son de tipo biológico, mientras que otros son de tipo físico o químico; en un momento dado, alguno de estos factores puede dominar, ocasionalmente pueden llegar a ser letales, otros simplemente pueden debilitar, o provocar alteraciones fisiológicas que vuelven a los individuos más vulnerables a los efectos de otros factores (Sinderman, 2006).

Es obvio que los contaminantes, incluidos los metales, y otros cambios provocados por el hombre, constituyen solamente una parte del total de factores que actúan sobre las poblaciones. Los contaminantes y los demás factores ambientales actúan como generadores de estrés, los cuales, en caso extremo o suficientemente prolongado, pueden afectar la sobrevivencia. El **estrés** puede ser definido generalmente como la suma de los cambios morfológicos, fisiológicos, bioquímicos, y de conducta de los individuos que resultan de las acciones de los distintos factores generadores de estrés. Las clásicas respuestas fisiológicas/bioquímicas de los vertebrados que exhiben stress incluye (Mazeaud *et al.* 1977; Sinderman, 2006): una **fase primaria, inicial o de alarma**, en que se incrementan la producción de algunas sustancias químicas regulatorias; una **fase secundaria**, cuando se presentan una multitud de perturbaciones metabólicas y osmoregulatorias (entre las más importantes esta la inmuno-

supresión y disminución de linfocitos en peces), se le conoce también como estadio de resistencia o adaptación; y la **fase terciaria**, que es cuando se presenta una reducción en la resistencia a las enfermedades y un incremento en las disfunciones fisiológicas o anomalías, provocando daños a la reproducción y el crecimiento y en casos extremos la muerte, este se reconoce como el estadio del colapso de los mecanismos de resistencia.



Fig. 3.1. Un resumen sobre las principales factores que provocan *estrés* en los organismos acuáticos.

Temporalmente, estas fases ocurren en diferentes periodos de tiempo; mientras que algunas se dan inmediatamente, otras pueden darse en semanas o meses. Por ejemplo, de manera inmediata, se han detectado cambios en la conducta, y efectos en los sistemas endocrino sobre las membranas del epitelio; en periodos de minutos

o días se han observado alteraciones en el metabolismo, los fluidos del cuerpo y las enzimas; en horas o semanas ocurren respuestas más de tipo fisiológico como cambios en el consumo de oxígeno, el balance osmótico y las tasas de alimentación; en días o meses, se ven afectados el crecimiento y la reproducción; en cosa de meses o años se ven afectadas las poblaciones, la estructura y la dinámica de las comunidades y finalmente, en periodos de años a décadas la estructura y funciones de los ecosistemas (Sastry y Miller, 1981).

Las respuestas a los diferentes agentes de estrés van a depender de la intensidad y duración del cambio ambiental. Cada especie tiene una serie de zonas fisiológicas de vida con respecto a las variaciones de cualquier agente de estrés. Los animales usualmente funcionan en una zona de ajuste normal y poseen un límite de compensación a los cambios en cualquier factor ambiental, como se muestra en la **Fig. 3.2**. Si los cambios ambientales no son severos o prolongados algunas disfunciones son reversibles, pero algunas son irreversibles y hasta fatales, este diagrama comprende el intervalo completo de los efectos de la contaminación al nivel de individuos.

Respecto a la contaminación por metales, Forbes y Forbes (1994) señalan que la mayoría de las especies que ocupan hábitats contaminados por metales muestran una mayor resistencia a los metales que resulta de alguna combinación de la aclimatación fisiológica, cambios en la composición de la especie, y adaptación genética; es importante destacar que los términos tolerancia y resistencia a los metales pueden ser utilizados de manera intercambiable por algunos autores. No obstante que la mayoría de los estudios sobre las consecuencias fisiológicas de estrés se han desarrollado en vertebrados, y particularmente en humanos, hay indicios de que un fenómeno en paralelo existe en los animales inferiores también (Bayne *et al.*, 1985). En los moluscos bivalvos, los

signos de stress se manifiestan por una recesión del manto, una glándula digestiva pálida, una regresión del túbulo digestivo, infiltración de los hemocitos de los tejidos, edema, retroceso o freno de la gametogénesis, anomalías de la concha, y la presencia de ceroides o cuerpecillos café. En los crustáceos en general también

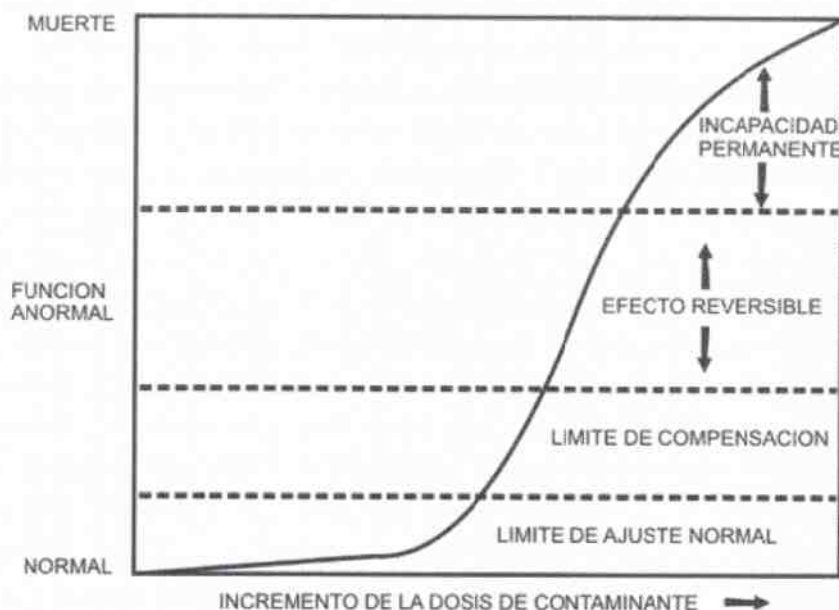


Fig. 3.2. Zonas de vida en general en la presencia de un factor ambiental variable como puede ser la exposición a un contaminante (modificado de Wilson, 1980 y Newman y Unger, 2003).

han generalizado las respuestas derivadas de la exposición a los metales (**Fig. 3.3**): estas, se han clasificado en respuestas a nivel de comportamiento, como la locomoción y la tasa de alimentación, a nivel celular como el disparo de ciertos sistemas enzimáticos y la

generación de las metaloproteínas, además del nivel fisiológico, como es la alteración de la regulación iónica y la respiración (Páez-Osuna y Frías-Espericueta, 2001). En el caso particular de los grandes crustáceos, como el camarón blanco y tigre, los signos de stress que se han identificado incluyen branquias negras u oscuras, opacidad abdominal en el músculo, retraso en la muda, sobrecrecimiento del exoesqueleto con bacterias filamentosas y protozoarios epibiontes, frecuente incidencia de enfermedades en la cabeza, conducta inapropiada, presencia en los tejidos de bacterias gram-positivas, y coágulos en la hemolínfa (**Fig. 3.4**).

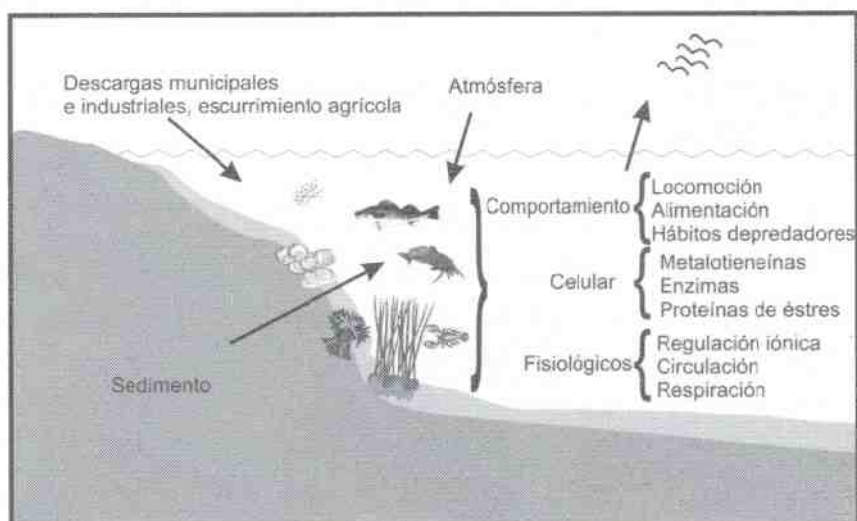


Fig. 3.3. Respuesta de los crustáceos en general cuando son expuestos a metales pesados (tomado de Páez-Osuna y Frías-Espericueta, 2001).

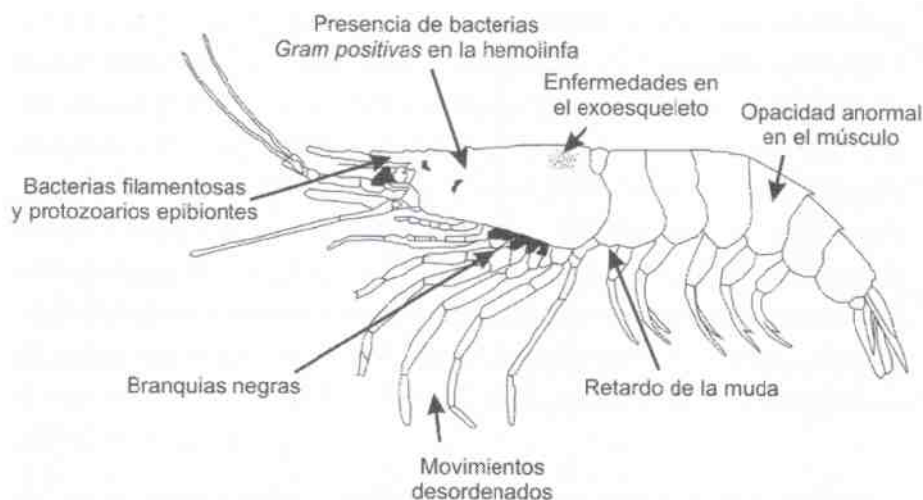


Fig. 3.4. Indicadores de *stress* en crustáceos (modificado de Sinderman, 2006).

3.2. Bioacumulación, bioconcentración y captura

Los metales y metaloides a diferencia de la mayoría de los demás contaminantes existen en el medio natural, sin embargo, en los últimos 50 años el hombre ha acelerado su movilización y también ha alterado su forma química, modificando con ello su disponibilidad biológica. Los metales se movilizan o transfieren de una manera más o menos efectiva en los cuerpos de agua, una fracción de estos elementos se mantiene disuelta y suspendida en la columna de agua, otra fracción se mantiene depositada en los sedimentos del fondo y otra fracción es capturada y excretada eventualmente por la biota (**Fig. 3.5**). En una trama trófica donde se hallan presentes diferentes tipos de organismos que además poseen distintas características bioquímicas, fisiológicas, hábitos alimenticios, ciclos de vida y reproductivos, los metales van a ser acumulados por cada

tipo de organismo de manera diferente. En el caso particular de los crustáceos van a operar principalmente dos rutas de entrada, a través de la alimentación y de las branquias, y una de salida, que es la excreción, y en el caso de elementos como el Cd, este es eliminado a través de la muda.

La bioacumulación es frecuentemente un buen indicador integral de las exposiciones químicas de los organismos en ecosistemas contaminados (Phillips y Rainbow, 1994). La bioacumulación de metales es compleja y esta influenciada por múltiples rutas de exposición (dieta y solución) y efectos geoquímicos sobre la disponibilidad. Variables patrones de acumulación ocurren entre las especies, que incluyen a la regulación de las concentraciones de algunos metales por determinadas especies y en gran medida, diferentes concentraciones entre especies y ambientes. El enlace entre bioacumulación y toxicidad es también complejo (Vijver *et al.*, 2004). La toxicidad esta determinada por la captura del metal internamente y la partición específica que cada especie tiene sobre el metal acumulado y las formas destoxificadas y metabólicamente activas (Lucma y Rainbow, 2005); por tanto, la manera de cómo diferentes especies secuestran las concentraciones de metales acumulados internamente constituye uno de los retos mayores de la ecotoxicología acuática.

La **bioacumulación** es el proceso por el cual una concentración química es incrementada en un organismo acuático comparada a la del agua y debido a la captura por todas las rutas incluyendo la absorción a través de la dieta, transporte a través de las superficies respiratorias y por la vía dérmica (Mackay y Fraser, 2000). Newman y Unger (2003) definen a la bioacumulación en un contexto más general, como la acumulación neta de un contaminante en un

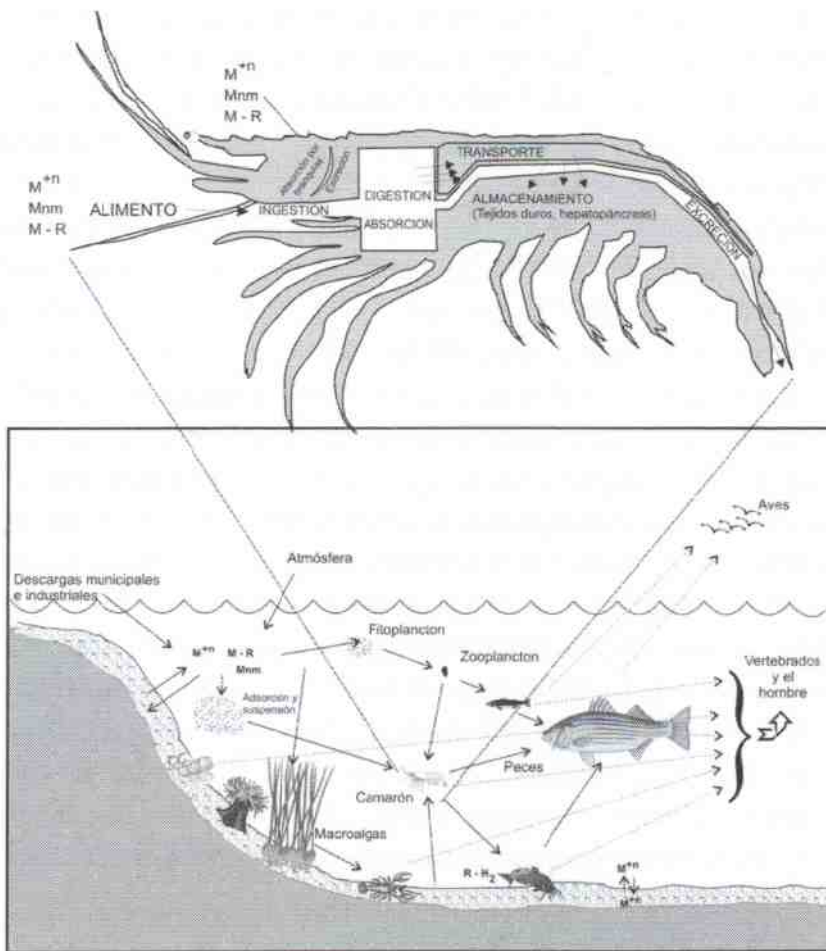


Fig. 3.5. Rutas y bioacumulación de los metales en el ambiente acuático (M^{+n} se refiere al ión libre de un metal; Mnm es un par iónico que involucra a un metal; y $M-R$ es un complejo metálico) (modificado de Páez-Osuna y Frías-Espericueta, 2001).

organismo que procede del agua, aire y las fases sólidas en el medioambiente. Las fases sólidas incluyen al alimento, suelo,

sedimentos, y partículas suspendidas en el aire y agua. En la bioacumulación se incluyen todas las rutas de exposición. Por su parte, la **bioconcentración**, se refiere al promedio de la acumulación neta de un contaminante en un organismo pero que procede solamente desde el agua; ocurre vía la superficie respiratoria, piel u otros tejidos externos, y resulta generalmente en un incremento en la concentración del contaminante en cuestión, siendo mayor en el organismo que en el agua (Mackay y Fraser, 2000; Páez-Osuna y Frías-Espicqueta, 2001).

La **Fig. 3.6a** ilustra la descripción de la bioacumulación por medio de un modelo matemático simple; un camarón es expuesto a un contaminante a través del agua que pasa sobre sus branquias y el alimento que pasa a través de su tracto digestivo. La exposición dérmica puede llegar a ser importante, dependiendo de las características del contaminante y la relación superficie-volumen del pez. Una parte del contaminante es eliminada o sale del pez a través de la orina y las heces, después de pasar a través del tracto digestivo. El contaminante puede haber sido o no transformado y redistribuido a través de los distintos compartimentos y tejidos dentro del pez. En este ejemplo solamente se incluye un coeficiente de eliminación, sin embargo, es obvio que muchos otros procesos son involucrados y a veces matemáticamente representados en un único coeficiente, o simplemente se asume que tales procesos no son significativos. También se asume en este caso que se ilustra que no hay biotransformación. La cinética y los coeficientes de velocidad se asume que permanecen constantes durante el tiempo de la acumulación del contaminante. Estos detalles pueden ser representados en un modelo simple de una caja (**Fig. 3.6b**). La expresión matemática de este modelo simple predice a lo largo del tiempo cuando se va dando la bioacumulación (**Fig. 3.6c**); esta

curva de un incremento gradual hasta alcanzar una concentración máxima resulta de los cambios de las influencias relativas de los procesos de captura (C) y eliminación (E) sobre el cambio en la concentración interna durante la exposición. En el inicio de la exposición, poco contaminante está contenido en el camarón y disponible para ser eliminado: la captura domina en relación a la eliminación en la dinámica inicial, y por ende las concentraciones se incrementan, pero, cuanto más contaminante se acumula en el camarón, más contaminante se vuelve disponible para su eliminación. La eliminación se vuelve importante, y la tasa de incremento en la concentración interna del organismo comienza a declinar. Eventualmente, resulta un balance o equilibrio entre la captura y la eliminación, lo que se define como una concentración en estado-estable en el camarón que se va a mantener tanto como las condiciones permanezcan.

En la literatura existen dos maneras de describir la cinética y transferencia de los contaminantes, una, donde como en el presente caso se expresa en términos de la concentración del contaminante (e.g., μg de Hg por g de músculo en el pez), o bien, considerando el organismo completo, o sea la masa o cantidad del contaminante en los individuos (e.g., μg de Hg por individuo) (Sinderman, 2006).

La **captura** se refiere al movimiento o transporte de un contaminante hacia dentro, y en algunas veces desde dentro mismo del organismo, que puede ocurrir por diversos mecanismos y puede involucrar la dermis, branquias, superficie pulmonar o su equivalente, o el tracto digestivo. En todos los casos, el proceso comienza con las interacciones de las células de los tejidos. Simkiss (1996) divide la captura en 3 rutas generales: (1) la ruta de los lípidos, (2) la acuosa y (3) la endocítica. La ruta lipídica comprende

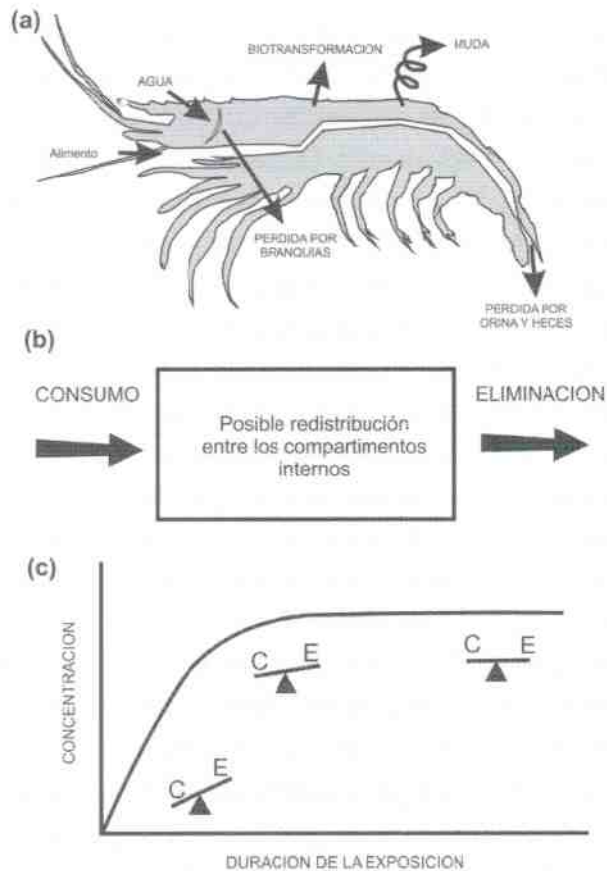


Fig. 3.6. Una visión simplificada sobre la bioacumulación. El camarón toma los contaminantes a partir de los alimentos y el agua y pierde a los contaminantes vía las branquias, orina y las heces (a); Una redistribución interna o transformación del contaminante puede ocurrir, tal proceso se ilustra en un diagrama o modelo de una caja simple (b); el modelo matemático más común permite describir un aumento gradual del contaminante en el pez hasta que es obtenida una concentración constante en un estado-estable (c). C se refiere a la captura y E a la eliminación (modificado de Newman y Unger, 2003).

