

Revisión

Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de salud ambiental Maribet Gamboa^{1*}, Rosa Reyes² & Jazzmin Arrivillaga¹

Los sistemas fluviales han estado sometidos a la fuerte presión humana, debido a la intervención no planificada que ha desencadenado un mal manejo de aguas potencialmente potables para consumo humano y riego. Estos cambios han promovido cambios microclimáticos importantes, afectando el nicho de la fauna acuática, por ser un taxa cuya dinámica es muy susceptible a perturbaciones. En el contexto del desarrollo sustentable con perspectivas hacia el aprovechamiento y conservación de ambientes acuáticos, los bioindicadores juegan un papel importante en el manejo adecuado de los recursos. Un bioindicador puede ser definido como un conjunto de especies que poseen requerimientos particulares con relación a un grupo de variables físicas o químicas, tal que los cambios de estas variables indiquen para las especies involucradas que el sistema se encuentra en los límites de las curvas del óptimo ecológico. Las comunidades de macroinvertebrados son los mejores bioindicadores de contaminación acuática, debido a que son muy abundantes, se encuentran en prácticamente todos los ecosistemas de agua dulce y su recolección es simple y de bajo costo. Los órdenes de insectos utilizados en este estudio para estimar la calidad ambiental son: Ephemeroptera, Trichoptera, Plecoptera, Diptera, Odonata y Coleoptera. En este trabajo se presentan a los macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos, y su utilidad a partir del empleo de los índices bióticos para estimar la tolerancia del bentos a los contaminantes (BMWP, IBMW, BMWQ, IBF, EPT, el porcentaje de raspadores y la abundancia de Chironomidae) así como las respuestas funcionales de estos organismos a los contaminantes. El aumento de estudios de bioindicadores conllevará a la mejor comprensión de cómo y de qué manera es afectado un ecosistema de agua dulce por un contaminante.

Palabras clave: Bioindicador, ambiente acuático, macroinvertebrados, calidad del agua, desarrollo sustentable.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los sistemas fluviales han estado sometidos a una fuerte presión de explotación, y cambio en el uso de la tierra, afectándose la calidad del agua por las principales actividades que se desarrollan asociadas a las cuencas hidrográficas (Branco, 1984). El staff de Georgia Adopt-A-Stream

(2004) definen a la contaminación ambiental como “Alteración ambiental causada por la energía o los materiales de desecho descargados al medio, donde pueden dañar la salud humana y los Ecosistemas” y establecen ciertos indicadores ambientales que permiten predecir el deterioro ambiental; uno de estos indicadores son los ensambles de animales que integran las comunidades acuáticas. Jara (2002) señaló también que las poblaciones de peces y macroinvertebrados encontrados en las aguas de un determinado ecosistema fluvial, desarrollan gran parte de su vida allí, asociándose a características típicas del agua, por lo que se constituyen en potenciales indicadores de calidad de esta.

¹ Departamento de Estudios Ambientales, Laboratorio de Genética de Poblaciones, Ecología Molecular de Insectos.

² Departamento de Biología de Organismos, Universidad Simón Bolívar, Caracas 89000, Venezuela.

*Autor de correspondencia: maribetg@gmail.com

El concepto de bioindicador aplicado a la evaluación de calidad de agua, es definido como: “especie (o ensamble de especies) que poseen requerimientos particulares con relación a uno o a un conjunto de variables físicas o químicas, tal que los cambios de presencia/ausencia, número, morfología o de conducta de esa especie en particular, indiquen que las variables físicas o químicas consideradas, se encuentran cerca de sus límites de tolerancia” (Rosemberg & Resh, 1993). Es decir, que un bioindicador es aquel cuyas respuestas biológicas son observadas frente a una perturbación ecológica y están referidos como organismos o sistemas biológicos que sirven para evaluar variaciones en la calidad ambiental.

Los bioindicadores de contaminación, calibran la calidad del ecosistema a través de información que es recogida en el agua, en la atmósfera o en el suelo, y permiten identificar, dentro de un marco de calidad, el nivel de deterioro ambiental (Arenas, 1993). Para poder evaluar el deterioro ambiental de un ecosistema acuático debido a un contaminante es necesaria la selección de una comunidad bioindicadora de calidad de agua y el conocimiento previo de la biota que caracteriza la zona de estudio. Uno de los grupos de los organismos acuáticos más utilizados para el monitoreo, son los macroinvertebrados de la comunidad bentónica. Entre las ventajas que posee cualquier macroinvertebrado que conforme un taxa bioindicador se pueden mencionar las siguientes (Zúñiga *et al.*, 1993):

- La naturaleza sedentaria de muchas especies facilitan la evaluación espacial de efectos adversos a largo plazo en la comunidad.
- Presentan ciclos de vida relativamente cortos comparados con los peces y reflejan con mayor rapidez las alteraciones del medio ambiente mediante cambios en la estructura de sus poblaciones y comunidades.
- Son de amplia distribución, abundantes y de fácil recolección por su tamaño que los hace visibles a simple vista.
- Viven y se alimentan en o sobre los sedimentos donde tienden a acumularse las toxinas, las cuales se incorporan a la cadena trófica a través de ellos.
- Son sensibles a los factores de perturbación y responden a las sustancias contaminantes presentes tanto en el agua como en los sedimentos.

Entre las desventajas de cualquier macroinvertebrado que conforme un taxón bioindicador (Minshall *et al.*, 1985) se pueden mencionar las siguientes:

- Se trata de una comunidad heterogénea y la taxonomía de algunos grupos no es bien conocida.
- Las variaciones estacionales o de dinámica de la población puede interferir en la interpretación o comparación de resultados.

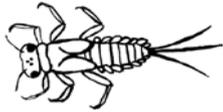
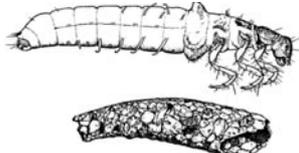
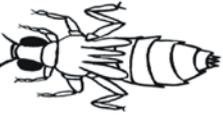
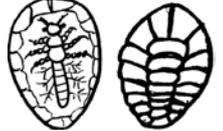
Por lo tanto, la evaluación basada en macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de la contaminación, podría generar información de alguna perturbación que se genere y afecte los ecosistemas acuáticos. En consecuencia, este trabajo trata de recopilar información pertinente a los macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de la contaminación acuática, índices bióticos utilizados para monitoreo ambiental de contaminantes y respuestas funcionales de estos organismos a los contaminantes, con el fin de ilustrar el estudio de la calidad del agua mediante bioindicadores bentónicos.

Los macroinvertebrados bentónicos como indicadores de la calidad ambiental

La mayor parte de los investigadores señalan que dentro de los grupos faunísticos que son considerados como bioindicadores de la calidad ambiental, los macroinvertebrados acuáticos son los mejores bioindicadores de la calidad del agua (Arenas, 1993; Barbour *et al.*, 1995; Figueroa, 1999; Alonso *et al.*, 2002; Fenoglio *et al.*, 2002; Hynea & Maher, 2003; Cain *et al.*, 2004; Leiva, 2004; Alonso & Camargo, 2005). Los macroinvertebrados bentónicos se encuentran en todo tipo de ambiente acuático de agua dulce, como ríos o lagunas, donde son importantes para el monitoreo de ese ecosistema acuático en particular (Cummmig & Klug, 1979).

La Tabla I resume las principales características generales que presentan los macroinvertebrados bentónicos usados como bioindicadores de la buena calidad del agua. Así como también resume rasgos claves para poder realizar una identificación taxonómica rápida en el campo, y evaluarlos como bioindicador según los índices bióticos que serán señalados más adelante.

Tabla I. Los macroinvertebrados acuáticos indicadores de buena calidad del agua (McGavin, 2001; Domínguez & Fernández, 2001).

Orden de insecto	Características	Rasgos clave
<p>PLECOPTERA</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre común: Moscas de las piedras (Familia más común: Perlidae) • Ciclo de vida: hemimetabolos (ninfas acuáticas y adultos voladores) • Fase indicadora: Ninfas. Muy sensibles a la contaminación. • Alimentación: Ninfas Carnívoras en los últimos instares • Hábitat: Ríos de aguas turbulentas, Lechos de grava. 	<p>Abdomen con un par de cercos sencillos o multiarticulados. Uñas tarsales pares.</p> 
<p>EFEMEROPTERA</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre común: Efímeras (Familias más comunes: Baetidae, Leptophlebiidae, Leptoxyphidae, Caenidae) • Ciclo de vida: hemimetabolos (ninfas acuáticas y adultos voladores) • Fase indicadora: ninfas • Alimentación: ninfas herbívoras • Hábitat: ríos y lagunas 	<p>Abdomen generalmente con un par de cercos alargados y un filamento central normalmente visible. Uñas tarsales únicas.</p> 
<p>TRICOPTERA</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre común: Frigáneas (Familias más comunes: Hidropsiphidae, Hidroptilidae, Leptoceridae) • Ciclo de vida: hemimetabolos (ninfas y pupas acuáticas y adultos voladores) • Fase indicadora: ninfas • Alimentación: ninfas depredadoras o herbívoras • Hábitat: ríos, aguas quietas y rápidas. 	<p>Larvas acuáticas construyen un estuche o refugio que varía según la familia.</p> 
<p>ODONATA</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre común: Libélulas, caballitos del diablo (Familias más comunes: Libellulidae, Coenagrionidae) • Ciclo de vida: hemimetabolos (larvas acuáticas y adultos voladores) • Fase indicadora: larvas • Alimentación: ninfas depredadoras • Hábitat: ríos de aguas quietas 	<p>Ojos compuestos prominentes. Branquias plumosas externas en la parte posterior del abdomen.</p> 
<p>COLEOPTERA</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre común: Escarabajos (Familias más comunes: Elmidae, Ptylodactilidae, Pheseniidae, Dytiscidae, Hydrophilidae) • Ciclo de vida: holometabolos (larvas, pupas y adultos) • Fase indicadora: larvas • Alimentación: ninfas herbívoras y depredadoras • Hábitat: Amplio rango indicativo: salinidad, zonas lacustres 	<p>Patatas grandes y caminan por el fondo del agua. Respiran aire con el extremo del abdomen o disponen de apéndices filamentosos (branquias).</p> 
<p>DIPTERA</p>  <p>Blephariceridae</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre común: moscas, mosquitos (Familias más comunes: Simuliidae, Tipulidae, Psychodidae, Dixidae, Athericidae, Blephariceridae). • Ciclo de vida: holometabolos (huevos, larvas acuáticas, pupas y adultos voladores) • Fase indicadora: larvas • Alimentación: larvas filtradoras y raspadoras • Hábitat: ríos de aguas estancadas. 	<p>Larva pequeña con protuberancias a los lados del cuerpo.</p>

Dentro de los macroinvertebrados listados, solo algunas familias pertenecientes al Orden Díptera, fisiológicamente pueden resistir altos grados de contaminación acuática, ya sea en aguas estancadas o de corriente, siendo estos organismos considerados como buenos indicadores de aguas de baja calidad (Tabla II).

Macroinvertebrados y su uso en índices bióticos

Para estimar cambios a niveles morfológicos, fisiológicos o de desarrollo de estos organismos, que puedan indicar que las condiciones físicas y/o químicas están fuera de sus límites del nicho ecológico realizado (biorremediación), es necesario

Tabla II. Los dípteros, macroinvertebrados acuáticos indicadores de aguas estancadas y de baja calidad (McGavin, 2001; Domínguez & Fernández, 2001a; Alonso et al., 2002).

Orden Díptera	Características	Rasgos clave
<p>Familia Culicidae</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre común: mosquitos. • Ciclo de vida: holometabolos (huevos, larvas acuáticas, pupas y adultos voladores) • Fase indicadora: larvas • Alimentación: larvas filtradoras y raspadoras. • Hábitat: aguas estancadas 	<p>Larva ápoda con cabeza reducida. Penachos de pelos en el tubo respirador, por lo que cuelgan de cabeza hacia abajo de la superficie para tomar aire.</p>
<p>Familia Ephydriidae</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre común: moscas, mosquitos. • Ciclo de vida: holometabolos (huevos, larvas acuáticas, pupas y adultos voladores) • Fase indicadora: larvas • Alimentación: larvas filtradoras y raspadoras. • Hábitat: aguas estancadas 	<p>Cuerpo alargado con propatas en la mitad del mismo y un penacho de setas en la parte posterior.</p>
<p>Familia Chironomidae</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre común: moscas, mosquitos • Ciclo de vida: holometabolos (huevos, larvas acuáticas, pupas y adultos voladores) • Fase indicadora: larvas • Alimentación: larvas filtradoras y raspadoras. • Hábitat: aguas estancadas y lólicas 	<p>Cuerpo alargado, con un penacho de setas en la parte posterior.</p>
<p>Familia Psychodidae</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre común: moscas • Ciclo de vida: holometabolos (huevos, larvas acuáticas, pupas y adultos voladores) • Fase indicadora: larvas • Alimentación: larvas filtradoras y raspadoras. • Hábitat: aguas estancadas y lólicas 	<p>Cuerpo alargado con abundantes setas en todo el cuerpo</p>
<p>Familia Sirfidae</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre común: moscas • Ciclo de vida: holometabolos (huevos, larvas acuáticas, pupas y adultos voladores) • Fase indicadora: larvas • Alimentación: larvas filtradoras y raspadoras. • Hábitat: aguas estancadas y lólicas 	<p>Cuerpo robusto con un tubo respiratorio alargado y delgado</p>

implementar índices ecológicos-bióticos de tolerancia (Mason *et al.*, 1999; Niemi *et al.*, 2004; Mohammad *et al.*, 2005).

En un principio se desarrollaron índices bióticos en los cuales era necesario una identificación taxonómica de los macroinvertebrados hasta el nivel de género o especie (Roldán, 2003), o una estimación cuantitativa de sus abundancias (Alonso & Camargo, 2005), pero se ha comprobado que los índices más prácticos (por su facilidad de obtención) son aquellos en los que solo son necesarios datos cualitativos (presencia o ausencia) y una identificación taxonómica hasta el nivel de familia (Leiva, 2004). Igualmente un muestreo exhaustivo puede garantizar la colecta de los taxa presentes en el sitio de estudio (Alba-Tercedor, 1996) y dar mayor confiabilidad al índice empleado.

Estos índices bióticos en general, suelen ser específicos para un tipo de alteración o contaminación y/o región geográfica, y se basan en el concepto de organismo indicador (Tabla III). Permiten la valoración del estado ecológico de un ecosistema acuático afectado por un proceso de contaminación cualquiera. Para ello a los grupos de macroinvertebrados de una muestra se les asigna un valor numérico en función de su tolerancia a un tipo de contaminación dependiendo del índice (Alonso & Camargo, 2005).

Para ilustrar estos índices, a continuación se muestran tres ejemplos de contaminación, los cuales exponen la reducción o aumento del número de los macroinvertebrados acuáticos dependiendo del tipo de contaminación al cual han sido sometidos.

Ejemplo 1: Alonso *et al.* (2002) mostraron la relación existente entre el índice BMWQ y la concentración de oxígeno disuelto y de amonio medidos a lo largo de un gradiente de contaminación orgánica en el río Henares. Observan como la disminución de oxígeno disuelto en el agua y el incremento de amonio reduce el valor de este índice. Esta variación conjunta que mostraron estos dos parámetros con el BMWQ valida la utilidad de este índice como bioindicador de contaminación por materia orgánica.

Ejemplo 2: La eutrofización de los Ecosistemas fluviales, consiste principalmente en un incremento excesivo en las concentraciones de

compuestos inorgánicos de fósforo y nitrógeno, uno de los principales causantes de la degradación ecológica de los Ecosistemas acuáticos. En condiciones naturales los nutrientes son limitantes para los productores primarios, de tal forma que su aumento dentro de ciertos límites genera un incremento en la densidad del grupo de los raspadores, ya que su recurso trófico se ve incrementado (Cain *et al.*, 2004). Alonso & Camargo (2005) mostraron la proporción de raspadores aguas arriba y aguas abajo de pequeños embalses de cabecera en ríos del centro de España. Los puntos situados aguas abajo de los embalses presentaron mayores concentraciones de fosfato, lo que incrementó la producción primaria (medida como concentración de clorofila a) y como consecuencia la proporción de raspadores en la comunidad de macroinvertebrados bentónicos. Debido a los graves efectos que genera la eutrofización en los Ecosistemas fluviales, el incremento en el porcentaje de raspadores que forman la comunidad de macroinvertebrados respecto a las condiciones naturales o de referencia podría ser empleado como un buen indicador de este tipo de contaminación.

Ejemplo 3: Las minas abandonadas de donde se extraían metales a partir de sulfuros polimetálicos son una importante fuente de contaminación para los ríos cercanos, debido a que los sulfuros no extraídos se oxidan al quedar expuestos a la intemperie generando sulfatos y ácido sulfúrico (Cain *et al.*, 2004). Esto hace disminuir el pH de las aguas receptoras y por lo tanto facilita la biodisponibilidad de los metales (cobre, hierro, mercurio, cinc, etc.). Un estudio en España demostró como las actividades mineras producen una reducción del número de taxa de macroinvertebrados pertenecientes a los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera (=riqueza EPT) aguas abajo de una mina abandonada de carbón (García-Criado *et al.*, 1999) de la provincia de León. El índice EPT mostró una alta correlación con dos parámetros físico-químicos indicativos de contaminación minera (conductividad del agua y la concentración de sulfatos). Este mismo estudio mostró que el índice biótico IBMWP también fue sensible a la contaminación minera (García-Criado *et al.*, 1999). Debido a que la contaminación por metales ocasiona la disminución de Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera, los índices de riqueza de taxones EPT y el índice biótico IBMWP son adecuados como índices preliminares para valorar este tipo de perturbación.

Tabla III. Índices bióticos usados para estimar la tolerancia del bentos a los contaminantes (Leiva, 2004).

Índice	Nombre extendido	Fundamento	Utilidad
BMWP	'Biological Monitoring Working Party'	Otorga valores de 1 a 10 a las diferentes familias de macroinvertebrados. Los más tolerantes a la contaminación reciben valores menores y los más sensibles valores mayores. La suma total de valores nos indica la calidad biológica de la comunidad.	Valoración de la contaminación por materia orgánica en las Islas Británicas. Permite: la determinación de invertebrados presentes, la calificación ambiental de la familia taxonómica, la valoración cuantitativa del medio
IBMWP (antes BMWP')	'Iberian Monitoring Working Party'	Adaptación del BMWP a la Península Ibérica	Valoración de la contaminación por materia orgánica en la Península Ibérica.
BMWQ	'Biological Monitoring Water Quality'	Mismo fundamento que el anterior pero con valores de 1 a 15.	Valoración de la contaminación por materia orgánica en la Península Ibérica.
IBF	Índice biótico de familia	$IBF = 1 / N \sum ni ti$ Donde: N = número total de individuos en la muestra (Estación). ni = número de individuos en una Familia ti = puntaje de tolerancia de cada Familia.	- Presenta una alta sensibilidad en la calidad de agua. - Los resultados hacen posible clasificar las estaciones en clases de calidad de agua, las cuales se representan en un mapa de calidad de agua
Riqueza EPT	Riqueza de taxa pertenecientes a los grupos de Efemerópteros, Plecópteros y Tricópteros.	Las especies de estos grupos de insectos son sensibles a las perturbaciones humanas.	Contaminación en general y alteraciones del hábitat.
Porcentaje de Raspadores	Porcentaje de individuos de la comunidad pertenecientes al grupo trófico de los raspadores.	El incremento en nutrientes aumenta la producción primaria lo que favorece a este grupo.	Eutrofización fluvial.
Abundancia de Chironomidae	Abundancia de individuos de la familia Chironomidae	Este grupo es muy tolerante a la contaminación por materia orgánica.	Contaminación por materia orgánica.

Estos índices bióticos se han venido modificando, debido a que se ha empleado un nuevo marco conceptual que orienta los estudios de los cuerpos de agua corriente hacia la comprensión global del ecosistema teniendo como unidad de integración la cuenca hidrográfica. La nueva estrategia de acción es la valoración de la integridad biótica de los ríos (Relvea *et al.*, 2000; Neumann *et al.*, 2003a y b). Para esto fue necesaria la integración de aquellos factores naturales susceptibles de ser modificados por la actividad humana y de cuyo estado depende

la integridad biótica de los cuerpos de agua. Con éste propósito Karr (1991) identificó cinco grupos de variables cuyas modificaciones afectan directamente a la integridad biótica:

- La Calidad del Agua: temperatura, turbidez, oxígeno disuelto, acidez, alcalinidad, sustancias orgánicas o inorgánicas, metales pesados y sustancias tóxicas.
- La Estructura del Hábitat: tipo de sustrato, profundidad del agua, velocidad de la corriente y

- complejidad espacio-temporal del hábitat físico.
- El Régimen del Flujo: volumen de agua y variaciones temporales del caudal.
 - Las Fuentes Energéticas: tamaño, cantidad y tipo de la materia orgánica entrante y los cambios temporales en el patrón de suministros energéticos.
 - Las Interacciones Bióticas: competencia, depredación, enfermedades, parasitismo y mutualismo.

La clasificación anterior deja claro que la integridad biótica de un cuerpo de agua resulta de la interacción de procesos físicos, químicos y biológicos. De modo que el diseño de cualquier herramienta para evaluar la condición de un cuerpo de agua debe estar basado en la valoración de los componentes más representativos de la integridad biótica como aquellos relacionados con la estructura de la comunidad, la composición taxonómica, la condición individual y con los procesos biológicos (Chutter, 1972; Saiz *et al.*, 1996; Hilsenhoff, 1998; Segnini, 2003).

Estudio de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la salud ambiental acuática en Latinoamérica

El esfuerzo de investigación que se ha hecho en Latinoamérica para desarrollar o aplicar métodos biológicos en la evaluación de los sistemas lóticos aún es incipiente. Algunos de los trabajos realizados se pueden mencionar a continuación:

- 1) El efectuado en Venezuela por Lugo & Fernández (1994) evaluaron los efectos de la contaminación orgánica sobre la composición y diversidad de la entomofauna en un río de la región central del país, sin utilizar índices bióticos. Sin embargo, Segnini (2003) revisó los diferentes enfoques en el uso del concepto de los macroinvertebrados como bioindicadores.
- 2) En Argentina, Domínguez & Fernández (1998) generaron un índice biótico para evaluar la condición ecológica de los ríos de una cuenca altoandina. Rodrigues Capítulo (1999) y Rodrigues Capítulo *et al.* (2001) desarrollaron índices bióticos para sistemas lóticos de la llanura pampeana (IBPAMP). Recientemente Fernández *et al.* (2006) presentaron un diagnóstico de la situación ambiental de los ríos del Noroeste Argentino y analizan la posibilidad de un índice integrado.

- 3) En Colombia, Zúñiga *et al.* (1993) y Riss *et al.* (2002), y adaptaron el sistema BMWP para evaluar varias cuencas, mientras Gutierrez *et al.* (2003) implementaron un método basado en redes neuronales para estimar la calidad del agua en la cuenca media y alta del río Bogotá.
- 4) En Brasil, Henriquez (2003) usó un índice integrado para evaluar la cuenca media en lagunas costeras.
- 5) En Nicaragua, Fenoglio *et al.* (2002) compararon varios índices bióticos con datos obtenidos de varios ríos.
- 6) En México, Weigel *et al.* (2002) desarrollaron un índice integrado para evaluar ríos en la zona centro occidental del país.
- 7) En Chile, Arenas (1993) Figueroa (1999), Jara (2002), Figueroa *et al.* (2003), Sheibler (2003), Toro *et al.* (2003) y Leiva (2004), aplicaron diversos Índices Bióticos en varios ríos meridionales.

El índice mayormente empleado en Latinoamérica es el índice BMWP para estudios de monitoreo de la salud ambiental de un ecosistema de agua dulce y aunque el empleo de otros índices han sido utilizados (los mostrados en Tabla III), este sigue siendo el índice que por excelencia se aplica.

A continuación se muestran estudios mas detallados del rol de los macroinvertebrados en la salud ambiental, donde luego de aplicar lo índices arriba mencionados, los autores incluyen la herramienta bioquímica, obteniendo una visión mas amplia del uso de los macroinvertebrados como bioindicadores.

Respuestas funcionales de los macroinvertebrados a los contaminantes: estudios de biomarcadores

Los biomarcadores pueden definirse como las variaciones genéticas, celulares, bioquímicas, fisiológicas o etológicas que pueden ser monitoreadas a nivel tisular, en los fluidos corporales y/o a nivel del individuo completo; brindando evidencia de la exposición a uno o más componentes químicos (Depledge *et al.*, 1995). Investigaciones recientes muestran cambios cuantificables (bioquímicos, fisiológicos o morfológicos) en los macroinvertebrados bentónicos cuando se asocian a la exposición de un tóxico.

Mattingly *et al.* (2001), reseñan el aislamiento de un gen correlacionado con la respuesta fisiológica

a hierro y cadmio en insectos acuáticos. En esta investigación se trabajó con ADNc que codifica para una proteína, designada para el díptero, *Chironomus tentans*, como la alpha tubulina 1 (CTTUB1), la cual presenta similitud al funcionamiento de las alphas tubulinas de los otros invertebrados y vertebrados. La producción de ARN mensajero y de la proteína CTTUB 1, aumenta cuando la larva está expuesta a compuestos de hierro o cadmio. Adicionalmente, el patrón de distribución celular de la proteína CTTUB 1, en las células epiteliales del intestino medio de la larva es afectado por la presencia del cadmio, generándose un mecanismo de regulación de la síntesis de la alpha tubulina mediada por este metal, considerándose esta respuesta bioquímica del insecto inmaduro al cadmio como un biomarcador de la contaminación por metales.

Watts *et al.* (2001) estudiaron el efecto del 17 ethinylestradiol y bisphenol en el desarrollo y reproducción del díptero *Chironomus riparius* en dos generaciones. Sus resultados indicaron que el tiempo de desarrollo y el porcentaje de emergencia de adultos fueron afectados durante la exposición a los contaminantes, lo que les conllevó a sugerir que esta respuesta bio-fisiológica puede ser un indicador para detectar la presencia del 17 ethinylestradiol y bisphenol en ambientes acuáticos.

Hwang *et al.* (2001) correlacionaron positivamente la talla corporal y el tiempo intermuda de la larva de *Chironomus riparius* (Diptera: Chironomidae) con el incremento en las concentraciones de hexachlorobiphenyl (HCBP). Sin embargo, a concentraciones extremas de residuos en el cuerpo de la larva, el porcentaje de sobrevivencia larval disminuye, reflejándose una respuesta bio-fisiológica en el individuo.

Croteau *et al.* (2002) determinaron que el insecto *Chaoborus* posee proteínas tipo metalotioninas que se unen al Cadmio, y que la producción de estas está correlacionada positivamente con la cantidad del metal. Estos autores señalaron que la producción de proteínas tipo metalotioninas pudiera ser usado para monitorear las concentraciones de la sustancia contaminante.

Recientemente Buchwalter & Luoma (2005), exploraron las características fisiológicas y morfológicas implicadas en la variabilidad de

la incorporación de cadmio y zinc disueltos en una variedad de macroinvertebrados bentónicos que mostraron diferencias a la susceptibilidad-tolerancia a la contaminación por metales. Los investigadores concluyeron que el uso de estos insectos, como bioindicadores ecológicos de un metal pesado dentro de un ecosistema contaminado, mejoraría el entendimiento de cómo y por qué dichas especies presentan diferencias en la incorporación de metales esenciales. Igualmente establecieron que la determinación de los mecanismos subyacentes responsables de las diferencias en la sensibilidad específica de una especie a un contaminante podría reducir ambigüedades en la separación de efectos de un metal o contaminante específico y ayudar a definir cual macroinvertebrado bentónico pudiera ser el biomarcador más eficaz en una contaminación real.

Adicionalmente, Barata *et al.* (2005) condujeron un estudio integral donde consideraron análisis químicos de metales seleccionados en el tejido del tricoptero *Hydropsyche exocellata*, con las respuestas de varias enzimas antioxidantes peroxidases, de enzimas fase II y niveles peróxidos lipídicos, y concluyeron que las medidas integradas optimizan el biomonitoreo ambiental.

Finalmente, las recientes investigaciones señalan la necesidad de un enfoque multifactorial, que permita integrar el uso de las respuestas genéticas, químicas, bioquímicas, celulares, biológicas y etológicas en el biomonitoreo de agentes contaminantes dentro de los manuales de procedimientos para detectar perturbaciones o impactos ambientales en sistemas acuáticos, sugiriéndose el uso de los macro invertebrados bentónicos confiable para determinar el biomonitoreo de Ecosistemas de agua dulce (Mandaville, 2002).

Para Venezuela, el aumento de estudios de esta índole podrán generar mejores recursos de saneamiento y monitoreo ambiental, así como establecer índices de contaminación y perspectivas de rehabilitación de ríos, así como nuevas leyes y decretos de protección de los Ecosistemas de agua dulce.

En conclusión, la inclusión de los macroinvertebrados de aguas dulces como parte del monitoreo ambiental de un ecosistema de esta índole, ha tenido un auge a nivel mundial en los

últimos años, la apertura de nuevas ideas y maneras de estudiar el monitoreo ambiental ha conllevado a obtener conocimiento acerca como y con qué tipo de contaminante afectan las aguas dulces mediante el implemento de presencia/ausencia, comportamiento y bioquímica de estos animales. Por tanto, estos bioindicadores presentan una medida alternativa de la salud ambiental.

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Eduardo Domínguez (Laboratorio de limnología, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán-Argentina) y María del Carmen Zuñiga (Instituto de investigación de Entomofauna Acuática, Universidad del Valle, Cali-Colombia) por sus valiosas sugerencias.

Benthic macroinvertebrates as bioindicators of environmental health

SUMMARY

The fluvial system has been under strong human pressure, due to a lack of urban planning, which has triggered a potentially dangerous potable water problem for human consumption and irrigation. These changes in the quality of the fluvial systems have promoted important microclimatic changes, within the niche of special aquatic fauna, macroinvertebrates, that have a susceptible population dynamics to habitat disturbances. For sustainable development it is necessary to consider aquatic atmosphere conservation and to propose an adequate management plan, which includes bioindicators as a potential tool, to evaluate the perturbation grade and monitor the fluvial system within the water conservation plan. A bioindicator is defined as a set of species, with specific requirements in relation to physical or chemical variables, so that the significant changes of these variables indicates for the species that the system is perturbed and the species are close to tolerance limits. The assemblages of macroinvertebrates are the best bioindicators of contaminated water, because they are very abundant, are present in all the fresh water ecosystems, easy to collect and monitoring is low cost. The taxa to consider for environmental quality are: Ephemeroptera, Trichoptera, Plecóptera, Díptera, Odonata and Coleóptera. In this work we suggest the use of these aquatic macroinvertebrates as biological bioindicators, and their utility as biotic

indices to estimate the tolerance of benthos to the polluting agents (BMWP, IBMW, BMWQ, IBF, EPT, the percentage of scrapers and the abundance of Chironomidae) as well as the functional response of these organisms to the polluting agents. Increasing studies of biomarkers leads to a better understanding of how fresh water is affected by a pollutant.

Key words: bioindicators, aquatic environment, macro invertebrates, water quality, sustainable environment.

REFERENCIAS

- Alba-Tercedor J. (1996). Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. *IV Siaga*. **2**: 203-213.
- Alonso A. & Camargo J. A. (2005). Estado actual y perspectivas en el empleo de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos como indicadora del estado ecológico de los Ecosistemas fluviales españoles. *Ecosistemas*. **3**: 1-12.
- Alonso A., De la Puente M. & Camargo J.A. (2002). *Valoración de los efectos de la contaminación orgánica sobre la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en la cabecera del río Henares (Guadalajara, España)*. XI Congreso de la Asociación Española de Limnología y III Congreso Ibérico de Limnología. Madrid 17-21 Junio.
- Arenas J. (1993). *Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de la calidad del agua del río Bío Bío, Chile*. Tesis de Doctorado de la Facultad de Ciencias, Universidad de Concepción. 111pp.
- Barata C., Lekumberri I., Vila-Escalé M., Prat N. & Porte C. (2005). Trace metal concentration, antioxidant enzymes activities and susceptibility to oxidative stress in the trichoptera larvae *Hidropsyche exocellata* from the Llobregat river basin (NE Spain). *Aquat. Toxicol.* **74**: 3-19.
- Barbour M. T., Gerritsen J., Snyder B. D. & Stribling J. B. (1995). Revision to Rapid Bioassessment Protocols for use in stream and rivers: Periphyton, benthic macro invertebrates and fish. EPA 841_D_97-002.

- Branco S. (1984). *Limnología Sanitaria, estudio de la polución de las aguas continentales*. Editorial Secretaría general de la Organización de los Estados Americanos. 120pp.
- Buchwalter D. B. & Luoma S. (2005). Differences in dissolved cadmium and zinc uptake among stream insect: mechanistic explanations. *Environ. Sci. Technol.* **39**: 498-504.
- Cain D., Luoma S. & Wallace W. (2004). Linking metal bioaccumulation of aquatic insect to their distribution patterns in mining-impacted river. *Environ. Toxicol. and Chem.* **23**:1463-1473.
- Chutter F. (1972). An empirical biotic index of the quality of water in South African streams and rivers. *Water Research.* **6**: 19-30.
- Croteau M., Hare L., Campell P. & Coyillard Y. (2002). Metallothionein-like metal binding protein in the biomonitor Chaoborus: occurrence and relationship to ambient metal concentrations in lakes. *Environ. Toxicol. and Chem.* **22**:737-741.
- Cummig K. & Klug J. (1979). Feeding ecology of stream invertebrates. *Annual Review Ecology and Systemic.* **10**: 147-172.
- Depledge M., Aagaard A. & Gyorkos P. (1995). Assessment of trace metal toxicity using molecular, physiological and behavioral biomarkers. *Mar. Pollut. Bull.* **21**: 19-27.
- Domínguez E. & Fernández H. (1998). *Calidad de los ríos de la Cuenca del Salí (Tucumán Argentina) medida por un índice biótico*. Serie Conservación de la Naturaleza. Fundación Miguel Lillo, Tucumán. 38 pp.
- Domínguez E. & Fernández H. (2001). *Guía para la determinación de los artrópodos bentónicos Sudamericanos*. Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Naturales. Instituto M. Lillo. Editorial universitaria de Tucumán. Tucumán, Argentina. 237 pp
- Fenoglio S., Badino G. & Bona F. (2002). Benthic macroinvertebrate communities as indicators of river environment quality: an experience in Nicaragua. *Rev. Biol. Trop.* **50**: 1125-1131.
- Fernández H., Domínguez E., Romero F. & Cuezco M.G. (2006). *Calidad de agua y bioindicación en ríos de montaña*. Serie Conservación de la Naturaleza. N° 16, ISSN 0325-9625. Fundación Miguel Lillo, Tucumán, Argentina.
- Figueroa R. (1999). *Macroinvertebrados bentónicos como indicadores biológicos de calidad de agua, Río Damas, Osorno, X Región de los Lagos, Chile*. Tesis para optar al Magister en Ciencias mención en Zoología. 105 pp.
- Figueroa R., Valdovinos C., Araya E. & Parra O. (2003). Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua de ríos del Sur de Chile. *Rev. Chilena Hist. Nat.* **76**: 275-285.
- García-Criado F., Tomé A., Vega F. & Antolín C. (1999). Performance of some diversity and biotic indices in rivers affected by coal mining in northwestern Spain. *Hydrobiol.* **394**: 209-217.
- Gutierrez J., Riss W. & Ospina R. (2004). Bioindicación de la calidad del agua con macroinvertebrados acuáticos en la sabana de Bogotá, utilizando redes neuronales artificiales. *Caldasia.* **26**: 151-160.
- Henriquez C. (2003). *Utilización de los macroinvertebrados bentónicos asociados a macrofitas Típha domingensis como indicadores de la polución orgánica en lagunas costeras*. VI Congreso de Ecología do Brasil, Fortaleza. 11pp.
- Hilsenhoff W. (1988). Rapid field assesment of organic pollution with a family level biotic index. *J. N. Am. Benthol. Societ.* **7**: 65- 68.
- Hwang H., Fisher S. & Landrum P. (2001). Identifying body residues of HCBP associated with 10-d mortality and partial life cycle effects in the midge, Chironomus riparius. *Aquat. Toxicol.* **52**: 251-267.
- Hynea R. & Maher W. (2003). Invertebrate biomarkers: links to toxicosis that predict population decline. *Ecotoxicol. Environ. Safety.* **54**: 366-374.
- Jara C. (2002). *Evaluación de la existencia de insectos bioindicadores de la calidad del agua en zonas rítrónicas y potámicas de tres ríos de la zona semiárida de Chile*. Memoria de título entregada

- a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, para optar al Título Profesional de Biología mención en Medio Ambiente. 30 pp.
- Karr J. (1991). Biological integrity: a long-neglected aspect of water resource management. *Ecology Applic.* **1**: 66-84.
- Leiva J. (2004). *Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de calidad de agua en la Cuenca del estero Peu Peu Comuna de Lautaro IX Region de la Araucania*. Tesis presentada a la facultad de Ciencias de la Universidad Católica de Temuco para optar al Grado de Licenciado en Recursos Naturales. Temuco, Chile. 120pp.
- Lugo M. & Fernández A. (1994). Cambios en composición y diversidad de la entomofauna del río Guey, Parque Nacional Henri Pittier, Edo. Aragua, Venezuela. *Boletín de Entomol. Venez. N. S.* **9**: 25 - 32
- Mandaville S. (2002). *Benthic Macroinvertebrates in Freshwaters-Taxa Tolerance Values, Metrics, and Protocols*. Soil y Water conservation society of Metro Halifax. Master homepage: <http://chebucto.ca/science/SWCS/SWCS.html>. Revisado en abril del 2005.
- Mason W., Fremling C. & Nebeker A. (1999). *Aquatic insect as indicators of environmental quality*. National Biological Service Southeastern Biological Science Center. Master homepage: <file:///C:/Documents%20and%20Settings/Siragon/Mis%20documentos/Seminario%20I/Aquatic%20Insects%20As%20Indicators%20of%20Environmental%20Quality.htm>. Revisado en abril del 2006.
- Mattingly K., Beaty B., Mackie R., McGraw M., Carlson J. & Rayms-Keller A. (2001). Molecular cloning and characterization of a metal responsive *Chironomus tentans* alpha-tubulin cDNA. *Aquat. Toxicol.* **54**: 249-260.
- McGavin G. (2001). *Entomología Esencial*. Editorial Ariel ciencia. Barcelona, España. 355pp.
- Minshall R., Sedell R. & Cushing E. (1985) Stream ecosystem theory: a global perspective. *J. N. Am. Benthol Society.* **7**: 263 – 288.
- Mohammad B., Garza R., Garza V. & Landeros J. (2005). Los indicadores biológicos en la evaluación de la contaminación por agroquímicos en Ecosistemas acuáticos y asociados. *CUICYT.* **2**: 4-17.
- Neumann M., Baumeister J., Liess M. & Schulz R. (2003a). An expert system to estimate the pesticide contamination of small streams using benthic macroinvertebrates as bioindicators Part 1: The database of LIMPACT. *Ecological Indicators.* **2**: 379-389
- Neumann M., Baumeister J., Liess M. & Schulz R. (2003b). An expert system to estimate the pesticide contamination of small streams using benthic macroinvertebrates as bioindicators. II. The Knowledge base of LIMPACT. *Ecological Indicators.* **2**: 391-401
- Niemi G., Wardrop D., Brooks R., Anderson S., Brady V., Paerl H., Rakocinski C., Brouwer M., Levinson B. & McDonald M. (2004). Rationale for a New Generation of Indicators for Coastal Waters. *Environ Health Perspect.* **112**: 979–986.
- Relvea C., Minshall W. & Danhy R. (2000). *Stream insects as bioindicators of fine sediment*. Water Environment Federation. Watershed Management 2000 Conference. 23pp.
- Riss W., Ospina R. & Gutierrez J. (2002). Establecimiento de valores de bioindicación para macroinvertebrados acuáticos de la sabana de Bogotá. *Caldasia.* **24**: 135-156.
- Rodriguez Capítulo, A. (1999). Los macroinvertebrados como indicadores de calidad de ambientes lóticos en el área pampeana. en Simposios IV Cong. Arg. de Entomología. Mar del Plata. *Rev. Soc. Ent. Argentina.* **58**: 208-217.
- Rodriguez Capítulo, A., Tangorra, M. y Ocón, C., (2001). Use of Benthic macroinvertebrate to assess the biological status of pampean streams in Argentina. Aquatic Ecology. 2001 Kluwer Academic Publishers. Belgium. *Aquatic Ecology, © Kluwer Academic Publishers.* **35**: 109-119
- Roldán G. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia*. Editorial Universidad de Antioquia. Colombia. 170pp.

- Rosemberg D. & Resh V. (1993). Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrate. *Publicación*. **420**: 330-354.
- Saiz S., Frances J. & Imaz X. (1996). Uso de bioindicadores en la evaluación de la contaminación de la ría de Bilbao. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, Bilbao. *Environ. Monitor. Assess.* **56**: 305-330.
- Segnini S. (2003). El uso de los macroinvertebrados bentónicos como indicadores de la condición ecológica de los cuerpos de agua corriente. *Ecotropicos*. **16**: 45-63.
- Sheibler E. (2003). *Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua en el río Mendoza*. Trabajo especial de grado para optar al título de biólogo. Chile. 43pp.
- Staff de Georgia Adopt-A-Stream (2004). *Manual de Monitoreo Biológico y Químico en Arroyos*. Georgia Adopt-A-Stream. Department of Natural Resources. Environmental Protection Division. 64pp.
- Toro J., Schuster J., Kurosawa J., Araya E. & Contreras M. (2003) *Diagnóstico de la calidad del agua en sistemas lóticos utilizando diatomeas y macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores del río Maipú (Santiago: Chile)*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. 11pp.
- Watts M., Pascoe D. & Carroll K. (2001). Chronic exposure to 17 α -ethinylestradiol and bisphenol A-effects on development and reproduction in the freshwater invertebrate *Chironomus riparius* (Diptera:Chironomidae). *Aquat. Toxicol.* **55**: 113-124.
- Weigel B., Henne L. & Martinez L. (2002). Macroinvertebrate-based index biotic integrity for protection of stream in westcentral Mexico. *J. N. Am. Benthol. Society.* **21**: 686-700.
- Zúñiga de Cardoso M., Rojas A. & Caicedo G. (1993). Indicadores ambientales de calidad de agua en la Cuenca del río Cauca. *Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia Medellín, Colombia.* **2**: 17-28.

Recibido el 18/03/2008
Aceptado el 27/06/2008