

ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES DE MERCURIO Y OTROS METALES PESADOS EN PECES DULCEACUÍCOLAS DE COLOMBIA

Current State of Knowledge of the Concentration of Mercury and Other Heavy Metals in Fresh Water Fish in Colombia

NÉSTOR JAVIER MANCERA-RODRÍGUEZ¹, RICARDO ÁLVAREZ-LEÓN²

¹Departamento de Producción Animal. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

²Fundación GeoSur. Bogotá, Colombia.

Presentado agosto 22 de 2005, aceptado octubre 24 de 2005, correcciones enero 27 de 2006.

RESUMEN

Una de las problemáticas ambientales más importantes en el país se refiere al uso indiscriminado de precursores químicos en actividades ilícitas, el uso de metales pesados como mercurio en actividades mineras, el vertimiento de aguas servidas y otro tipo de compuestos relacionados con actividades industriales y prácticas agrícolas inadecuadas. Lo anterior, ha llevado a que la contaminación química en especial por metales pesados, constituya una de las más peligrosas para los ecosistemas acuáticos y las especies presentes en ellos. Los peces tienen la capacidad de almacenar en su organismo una concentración mayor de estos compuestos en comparación con la presente en el medio, por lo que son un indicador importante de la contaminación, pero también esto implica que su consumo se puede convertir en un problema de salud para las poblaciones que se alimentan de este recurso. La concentración de metales pesados en peces de agua dulce es conocida de mejor manera en la cuenca del río Magdalena, especialmente en la región de la Mojana y en las ciénagas del sur del departamento de Bolívar donde se han estudiado los niveles de contaminación por mercurio y otros metales producida por el desarrollo de múltiples actividades industriales, entre las cuales sobresalen la minería de oro y la petroquímica. Sin embargo, es escaso el conocimiento que se tiene en el país de la problemática generada por la disposición en los cuerpos de agua de metales pesados y su impacto sobre el recurso íctico, el deterioro de ecosistemas y la salud humana. Con base en las normas vigentes se han realizado bioensayos como criterio para comprobar los efectos de la contaminación acuática con organismos dulceacuícolas y la evaluación de por lo menos tres parámetros (metales pesados, temperatura, efluentes), utilizando ocho especies de peces dulceacuícolas: *Carassius auratus*, *Oreochromis* spp., *Piractus brachypomus*, *Prochilodus magdalenae*, *Astyanax fasciatus*, *Colossoma bidens*, *Gambusia affinis* y *Grundulus bogotensis*.

Palabras clave: metales pesados, bioacumulación, contaminación, bioensayos, peces dulceacuícolas, Colombia

ABSTRACT

One of the most important environmental problems in the country refers to the indiscriminate use of chemical precursors in illicit activities, the use of heavy metals as mercury in mining activities, the spill of served waters and another type of compound related with the industrial activities of raw and the inadequate agricultural practices. This has led to chemical contamination especially by heavy metals, considered one of the most dangerous for the aquatic ecosystems and the present species in them. Fish have the capacity to store these compounds in their organism in a concentration higher than that in the surrounding environment (water), therefore, their concentration are important indicators of the contamination level, but also this implies that their consumption can become a serious health problem for the populations that feeds from them. The concentration of heavy metals in fish of fresh water is better known in the basin of the Magdalena river, especially in the region of the Mojana and in the marshes of the south of the Department of Bolívar where the levels of contamination by mercury and other metals has been studied due to the development of multiple industrial activities, including gold mining and petrochemical industries. However, little is known in the country about the problem generated by the disposal heavy metals in rivers and lakes and their impact on the fish resource, deterioration of ecosystems and human health. Based in the current norms bio-assays have been used to check the effects of the aquatic contamination on fresh waters fish and the evaluation of at least three parameters (heavy metals, temperature, effluents) in eight species of fresh waters fish: *Carassius auratus*, *Oreochromis spp.*, *Piractus brachypomus*, *Prochilodus magdalenae*, *Astyanax fasciatus*, *Colossoma bidens*, *Gambusia affinis* and *Grundulus bogotensis*.

Key words: havy metals, bioaccumulation, contamination, bioassays, fresh waters, Colombia.

INTRODUCCIÓN

Este documento pretende brindar una visión general del estado de conocimiento de las concentraciones de metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia, realizando un énfasis especial en las concentraciones de mercurio detectadas, debido a que la mayor parte de estudios que se han realizado en el país sobre metales pesados en peces, están dirigidos a evaluar la concentración de este metal. Sin embargo, aunque la mayor parte de datos reportados son para mercurio, se presentan los datos puntuales de concentraciones de cadmio, cobre, plomo y zinc que han sido reportadas para peces.

CONTENIDO DE METALES PESADOS

Los metales pesados agrupan sustancias como cadmio y mercurio, principales contaminantes dentro de este grupo de sustancias, además de otras como cromo, cobalto, cobre, molibdeno, níquel, plomo, estaño, titanio, vanadio, zinc o plata. Éstos constituyen un riesgo serio para el medio ambiente, ya que son sustancias con una gran estabilidad química ante los procesos de biodegradación, por lo que los seres vivos son incapaces

de metabolizarlos, generándose una contaminación por bioacumulación y un efecto multiplicador en la concentración del contaminante en la cadena trófica. Alcanzan niveles altos de toxicidad y se absorben muy eficientemente a través de las membranas biológicas por su elevada afinidad química por el grupo sulfhidrilo de las proteínas.

La presencia en los recursos hídricos de metales pesados y sustancias orgánicas complejas, entre otras, han sido responsables de innumerables situaciones de impacto sobre el ecosistema acuático y la salud pública en general (Thomann, 1982). Se han presentado casos críticos en Japón, como la contaminación por cadmio (Friberg *et al.*, 1971) en el río Jintsu y por metilmercurio en la bahía de Minamata (Berglund, 1971). En los dos casos muestran daños a la salud de las poblaciones afectadas y registraron estos ejemplos cómo la presencia de sustancias tóxicas en el medio ambiente acuático puede afectar la salud pública. Metales como cadmio, plomo y zinc, junto al mercurio, están considerados dentro de los mayores agentes tóxicos asociados a contaminación ambiental e industrial. El cadmio se obtiene como subproducto del tratamiento metalúrgico del zinc y del plomo, a partir de sulfuro de cadmio y con formación de óxido de cadmio, compuesto altamente tóxico. La acumulación de cadmio en el riñón e hígado depende de la intensidad, del tiempo de exposición y del estado óptimo de la función de excreción renal (Ramírez, 2002). Se ha descrito también que las concentraciones renales de zinc se incrementan al aumentar las de cadmio y que la capacidad de almacenamiento es limitada a 300 mg/g (Oleru, 1976). Ciertos metales pesados, como cadmio, plomo y cromo, se acumulan en tejidos humanos, especialmente como riñón y pulmón, alterando sus funciones básicas y provocando efectos tóxicos como neumonía, disfunción renal y enfisemas. En intoxicaciones crónicas son habituales las osteopatías que parecen estar relacionadas con alteraciones del metabolismo del calcio. Algunos tipos de cáncer relacionados con el aparato reproductor masculino (Bernard y Lauwerys 1984).

En las células, el cadmio se une a la metalotioneína, proteína que contiene 26 grupos sulfhidrilos libres por molécula, debido a la gran proporción de residuos de cisteína. La función principal de esta microproteína es la protección del sistema enzimático celular, aunque se le ha descrito la función de unirse específicamente cadmio y a otros metales pesados. Su síntesis en el hígado, riñón e intestinos es inducida por cadmio y se conoce por estudios experimentales que el complejo cadmio-metalotioneína es más tóxico para los túbulos renales que el mismo cadmio (Ramírez, 2002). Se ha demostrado también escasa capacidad del riñón para sintetizar la metalotioneína, lo que lo hace insuficiente para fijar cadmio y da lugar a la aparición de las manifestaciones tóxicas (Kido *et al.*, 1991). Sin embargo, la contaminación por mercurio y otros metales pesados es muy difícil de detectar a través del monitoreo medio ambiental, ya que las técnicas específicas de análisis son difíciles y costosas y solo pueden ser manejadas por laboratorios especializados y experimentados. Adicionalmente, las concentraciones en el medio suelen ser más bajas que las encontradas en los sedimentos, o en las especies de fauna y flora presentes en los cuerpos de agua, por esto en ocasiones un nivel bajo de contaminación en la columna de agua no necesariamente indica contaminación baja. Los peces por representar varios niveles de la cadena ali-

menticia acuática, son excelentes indicadores de contaminación por metales pesados, ya que pueden bioacumular y biomagnificar a través de ella altas concentraciones de estos elementos. Ejemplo claro de ésto es el mercurio el cual es bioamplificado casi en su totalidad por los peces en forma de metilmercurio, sustancia altamente tóxica y de fácil fijación en los tejidos musculares y adiposos, convirtiéndola en elemento clave en el transporte de este metal en las cadenas alimentarias acuáticas que culminan en el consumo humano (OPS, 1978). El mercurio se acumula en sedimentos en la base de los cuerpos de agua, donde los microorganismos como bacterias que viven allí pueden convertirlo a la forma orgánica del metilmercurio, que es sacado por los gusanos y otros animales pequeños que viven en los sedimentos. Este compuesto se acumula en los peces que comen estos animales y en los peces más grandes que comen a los peces más pequeños. De esta manera, el metilmercurio que es mucho más tóxico que otras formas de mercurio y que por su alta solubilidad en lípidos y su facilidad para atravesar membranas se distribuye a través de todo el organismo, finalmente, se acumula en los peces a concentraciones mucho más elevadas que las presentes en el agua.

El mercurio se ha constituido en uno de los elementos de contaminación más importantes con efectos sobre la salud pública, ya que se estableció que las personas o poblaciones expuestas a niveles bajos pueden desarrollar alteraciones en las funciones del sistema nervioso (Lebel *et al.*, 1996) el cuál es especialmente sensible al metilmercurio, con consecuencias neuro-fisiológicas particularmente en el desarrollo de los fetos y en los niños pequeños. Ramos *et al.* (2000) encontraron que el 40% del mercurio contenido en peces se bioacumula en forma de metilmercurio quedando disponible hasta llegar al hombre por medio de la cadena trófica. Con respecto a las normas ambientales internacionales la región de la Mojana sobrepasa todo estándar máximo permisible para mercurio y metilmercurio haciendo necesaria la toma inmediata de medidas ambientales.

En Colombia se han realizado varios estudios desde la década de los 70. Se inició con una tendencia en conocer el estado de las concentraciones de metales pesados en aguas y sedimentos, posteriormente en peces y más recientemente en vegetación acuática y en mineros que aprovechan el oro de aluvión y de veta, así como en pescadores que aprovechan el recurso pesquero en las aguas de los diferentes ríos. Estudios pioneros fueron realizados por investigadores del desaparecido Instituto de Investigaciones Tecnológicas IIT, con el auspicio de Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas COLCIENCIAS y el apoyo de la industria nacional. Vale la pena citar los aportes de las investigaciones: Evaluación de la contaminación industrial (Cardeñoso *et al.*, 1973), Investigación sobre el contenido de mercurio (Galiano-Sedano, 1976, 1977), Estudios sobre la contaminación de residuos industriales (Galiano-Sedano, 1979), en aguas de los ríos colombianos.

Entre 1986 y 1999 evaluaciones del Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras HIMAT y el Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS, encontraron en las aguas del río Magdalena (Tramo 1: Tarquí, Puente

Balsero, Puente Santander, Purificación, Nariño; Tramo 2: Puerto Salgar, Puerto Berrio, Peñas Blancas, Maldonado, San Pablo, Regidor; Tramo 3: Magangué, Calamar, Colpuertos), que metales como Pb (0,2-5,4 ppb), Hg (0,06-0,12 ppb), Cd (0,07-16ppb), Fe (30-133 ppb) y Zn (9-23 ppb) se hallan en algunas áreas con concentraciones muy altas con respecto a los valores en aguas naturales y los permisibles internacionalmente, y que deben ser mucho mayores en sedimentos y organismos como los peces, donde se han detectado niveles de 0,5 ppm/gr (Pulido, 1985; Universidad de Antioquia, 1988), especialmente si se tiene en cuenta que los aportes de la minería de Cauca (Antioquia) hizo aportes de mercurio metálico de 270 kg/día y 9.553 ton/día de sedimentos (Universidad de Antioquia, 1988). Así mismo, análisis del contenido de mercurio en peces, realizados en abril de 1997 en el río Cauca, permitió detectar concentraciones que variaron entre 104-125 ppb en músculos y 103-248 ppb en hígados (E. Velasco-Abad, comunicación personal).

El proyecto CORPOICA/ICA/UDLA "Grado de contaminación de los recursos hídricos e ictiológicos en la región de la Mojana", se desarrolló entre 1995 y 1996. Además del mercurio se analizaron Cr, Pb, Cd, Ni, Cu, Zn en aguas, plantas y sedimentos, de los ríos Caribona, Nechí, San Jorge, Cauca y Magdalena. Las concentraciones de mercurio fueron particularmente altas y tanto en la época de lluvias como en la época seca las muestras de peces presentaron una concentración similar, lo cual indica presencia de bioacumulación del mismo orden. También se encontró que un 8% de las muestras en época seca (peces en diferente estado de madurez), no tenían concentraciones detectables (Toro-Suárez *et al.*, 1996; Díaz Granados, 1998). De igual manera se realizaron modelamientos matemáticos para el estudio del ciclo del mercurio en las aguas y sedimentos de la región de la Mojana (Garzón-García, 1998; Herrera-Piñeros, 1998; Giraldo *et al.*, 1999). En resumen, se destaca el efecto de la minería aurífera del norte de Antioquia y el sur de Bolívar, así como las concentraciones excesivamente altas (1.359 ppb) de mercurio en la parte baja del río San Jorge (Giraldo *et al.*, 1996, 1999).

La contaminación de peces por metales pesados en Colombia fue estudiada sobre todo en la cuenca del río Magdalena y sus afluentes, especialmente en la región de la Mojana, en las ciénagas del sur del departamento de Bolívar y en áreas del Magdalena medio, donde se han determinado los niveles de contaminación por mercurio. Respecto al contenido de otros metales pesados en peces, los estudios son mínimos, como el realizado por Ruiz *et al.* (1996), en el cual se evaluó el riesgo de la contaminación por cadmio, cobre, plomo y zinc en la zona cercana al puerto de Honda en el río Magdalena para la población humana que consume las especies *Pimelodus clarias* (nicuro) y *Prochilodus magdalenae* (bocachico). La alta contaminación del río Magdalena es producto del desarrollo a lo largo y ancho de toda su cuenca de múltiples actividades industriales, entre las cuales sobresalen la minería aurífera y la petroquímica. La región de la Mojana, se ha visto sometida a un proceso de contaminación por mercurio desde tiempos atrás, altamente relacionado con la minería de oro ubicada en las proximidades de sus tres principales afluentes los ríos Cauca, San Jorge y Magdalena. El mayor aporte de contaminantes se da por procesos mineros, par-

ticularmente por extracción de oro en la zona nororiental del departamento de Antioquia; estos procesos requieren el uso de mercurio metálico que es incorporado al ecosistema hídrico por deposición atmosférica, luego de la combustión con amalgama oro-mercurio y por la descarga directa de los desechos de la explotación artesanal de oro. El río Magdalena es utilizado para el abastecimiento de agua de un gran número de ciudades y además, recibe las aguas del río Bogotá cuyas concentraciones de metales pesados están por encima de los niveles máximos permitidos y de afluentes de un parque industrial diversificado, que comprende industrias de equipos eléctricos, curtiembres, metalúrgicas, manufactureras, petroquímicas, entre otras. Adicionalmente, este río tiene problemas por la aplicación excesiva de plaguicidas y fertilizantes (CEPIS, 2001) que llegan por arrastre hasta sus aguas. Cala (2001), registra la problemática por presencia de mercurio en peces de los ríos Magdalena y Meta, y Cala y Södergren (1995), presentan un resumen sobre la contaminación por metales pesados, enfatizando especialmente los efectos nocivos del mercurio.

El crecimiento de la minería aurífera en la región de la Orinoquía colombiana en los últimos 15 años, ha generado además un problema de salud pública debido a varios factores como el uso del mercurio durante el proceso de amalgamación del oro, la contaminación del ecosistema y la exposición de la población de la región. Los resultados indican un ambiente laboral precario y falta de conocimiento del riesgo ecológico; los valores de mercurio en sangre en los mineros fluctuó entre 6,9-168 $\mu\text{g/L}$ y entre los individuos indirectamente expuestos 17,7-100,8 $\mu\text{g/L}$, mientras que en el cabello de los mineros fluctuó entre 3-89,2 $\mu\text{g/L}$ y entre los expuestos indirectamente 2,8-48,7 $\mu\text{g/L}$. Situaciones similares se presentan en otras regiones de Colombia, tales como Chocó, Bolívar, Santander y Caldas (Idrovo *et al.*, 2001)

En otras zonas del país como la Amazonía, no se han realizado estudios tendientes a determinar la concentración de metales pesados, sin embargo, existen zonas puntuales que deben presentar serios problemas de contaminación por mercurio debido a que existe una importante actividad de minería de oro de carácter artesanal en varios de sus ríos, ejerciéndose una presión importante sobre los cuerpos de agua y los recursos hidrobiológicos presentes. Una correcta evaluación de las presiones ecológicas que el hombre impone sobre los ecosistemas naturales requiere un mejor entendimiento sobre la interacción de los distintos contaminantes y los componentes de dichos ecosistemas. El conocimiento del proceso cíclico de los metales pesados en los ecosistemas naturales consiste en identificar los reservorios de estos elementos y determinar los mecanismos y vías de transformación, así como, establecer las tasas de renovación entre los distintos reservorios (Mandelli, 1976).

En Colombia no se ha levantado sistemáticamente información sobre los efectos y el impacto ocasionado por la minería aurífera. Sin embargo, es conocido que cada aprovechamiento ejerce efectos muy particulares sobre el medio, los cuales dependen del tipo de depósito, su mineralogía, los métodos específicos y los procedimientos empleados. A pesar de la falta de datos, algunas instituciones han realizado bases de datos sobre los efectos de la minería del oro a cielo abierto (aluvial) y subterránea

(filoniana), sobre su inventario (GTZ *et al.*, 1992; Ministerio del Medio Ambiente *et al.*, 1999; INGEOMINAS, 1999), así como sus aspectos geoquímicos y ambientales (Prieto, 1997). La minería artesanal del oro no solo produce impacto por la liberación de mercurio a los ecosistemas y su posible acumulación en los seres vivos, sino también por la disposición directa de cianuro que causa un ataque letal inmediato a la biota, reduciendo en forma considerable la diversidad biológica (Tarras-Wahlberg *et al.*, 2001). Éste origina una toxicidad asfixiante que previene la utilización de oxígeno por los tejidos inhibiendo enzimas que participan en la respiración celular, causando la muerte. Por esta razón la Declaración de Berlín sobre minería del oro de 2000, estableció que “los procesos de extracción de oro con cianuro no deben ser aceptados dados sus daños irreversibles a los ecosistemas”. Sin embargo, no existen datos de la concentración de esta sustancia en los ríos del país ni en los organismos presentes en ellos, y sí por el contrario, el cianuro continúa siendo usado de manera indiscriminada en la extracción de oro.

Respecto a la normatividad ambiental en Colombia, el Decreto 1594 de 1984 fija los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para consumo humano, doméstico, recreativo y para la preservación de flora y fauna en aguas dulces, estableciendo los valores máximos permisibles para los diferentes metales pesados. En cuanto a la contaminación por mercurio, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC a través de la Norma 1443 regula las características para consumo humano de pescado fresco, refrigerado, congelado y supercongelado establece como máximo valor permisible 0,5 $\mu\text{g/g}$ de mercurio. Por su parte, para metilmercurio la normatividad en el país es nula e internacionalmente existen dos entidades que se han encargado de investigar sobre las concentraciones nocivas para el ser humano. Éstas son la *Environmental Protection Agency* EPA que define la dosis o nivel de exposición que no causa efectos adversos en la salud, y la *Food and Drug Administration* FDA, que define el nivel de ingestión diaria aceptable.

BIOENSAYOS CON PECES DULCEACUÍCOLAS

Durante la última década, los bioensayos en Colombia se han constituido en una herramienta valiosa de las evaluaciones ambientales de los recursos hídricos, por esta razón se sintetizan dichos esfuerzos, discutiendo sus logros y principales limitantes. Uno de los criterios más usados actualmente para comprobar los efectos de la contaminación acuática, son los bioensayos. Es obvio que entre los aspectos a conocer para regular las descargas de aguas residuales potencialmente tóxicas, los organismos acuáticos son de gran ayuda, pues a través de los ensayos se puede evaluar y estimar el efecto tóxico en las aguas receptoras y la respuesta de los organismos que habitan en ellas (Reish y Oshida, 1987). El hecho de que las especies tropicales se hallen muy próximas a sus niveles de tolerancia a la temperatura, hace que las variaciones, así sean pequeñas, les resulten perjudiciales (Johanes y Betzer, 1975). Como el incremento en la temperatura aumenta, la toxicidad de los químicos al igual que la rata de respiración y la disolución de oxígeno decrece; los contaminantes además de tener efecto tóxico, generan una alta demanda bioquímica de oxígeno y se vuelven extremadamente peligrosos. Por lo tanto, es prioritario hacer bioensayos sobre especies

tropicales, ya que su resistencia es significativamente menor a la de las especies de zonas templadas, las cuales han sido tomadas como base de la legislación para los niveles de tolerancia a los diferentes tóxicos, bajo el supuesto erróneo de que estas cifras puedan perfectamente hacerse extensibles a lo largo y ancho de la biósfera (Ramírez-González, 1988).

En Colombia las experiencias se iniciaron en la década del 70 con trabajos sobre los peces ornamentales y de consumo del centro del país (Altiplano Cundiboyacense y Llanos Orientales), con ensayos estáticos y evaluando las concentraciones que ocasionan detrimento en las especies. En cuanto a capacitación, entre 1987-1989, se llevaron a cabo tres cursos internacionales en relación directa con los bioensayos, estos son una valiosa experiencia y un impulso definitivo por la formación de recursos humanos, la adquisición de la infraestructura y las investigaciones que se generaron. Los citados eventos fueron:

- Curso regional CPPS/PNUMA/COI/FAO/AIEA sobre Técnicas analíticas para la determinación de metales pesados y pesticidas en organismos y sedimentos marinos en el Pacífico sudeste. Cartagena (Bolívar), agosto 9-22 de 1987.
- Curso regional CPPS/PNUMA/COI sobre bioensayos y pruebas de toxicidad para la evaluación del efecto de los contaminantes sobre organismos marinos en el Pacífico sudeste. Cartagena (Bolívar), abril 11-21 de 1988.
- Curso regional INDERENA/PAC/PNUMA/FAO/COI de entrenamiento sobre ensayos biológicos y pruebas de toxicidad como bases técnicas para formular un criterio de calidad de agua en el gran Caribe. Cartagena (Bolívar), junio 11-25 de 1989.

Con el respaldo de las normas vigentes (Ley 23 de 1973, Decreto 2811 de 1974, Decreto 1594 de 1984) y teniendo en cuenta que los bioensayos son el criterio más utilizado para comprobar los efectos de la contaminación acuática, cada vez es más frecuente la práctica de ensayos con organismos dulceacuícolas, específicamente aquellos relacionados con la alteración de los ecosistemas de las aguas continentales de Bogotá (Universidad Nacional de Colombia/Universidad Católica La Salle/Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca), Cali (Universidad del Valle, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca) y Medellín (Universidad de Antioquia).

RESULTADOS

CONTENIDO DE METALES PESADOS

El contenido de mercurio en las diferentes especies de peces depende de su posición en la cadena trófica y de sus hábitos alimentarios. El análisis de mercurio en secciones del músculo de peces realizado por Olivero y Solano (1998) muestra que en especies iliófagas como *Prochilodus magdalenae* las concentraciones de mercurio son bajas, comparadas con las de especies carnívoras como *Hoplias malabaricus*, e incluso detritívoras como *Triporthus magdalenae* que presentan una acumulación considerable del metal en particular durante la época seca del año. De igual manera, este estudio estableció que existe una homogenización de la acumulación de mercurio entre las especies en la época de lluvias, con respecto a la época seca y encontró una correlación

directa entre la concentración de mercurio en el músculo de *Curimata magdalenae* y el contenido en los sedimentos, sugiriendo a esta especie como indicadora de la contaminación de mercurio.

Olivero *et al.* (1997), encontraron resultados similares al comparar la acumulación de mercurio en *Prochilodus magdalenae*, *Triportheus magdalenae*, *Rhamdia sebae* y *Pseudoplatystoma fasciatum*, capturados en el Canal del Dique, observando que la mayor concentración de mercurio total la presenta la arenca *T. magdalenae* especie con hábitos detritívoros-zooplancónicos, por lo que la alta concentración puede deberse al transporte de este metal en los sedimentos que llegan al Canal del Dique y que constituyen su alimento. Sin embargo, aunque la arenca presenta la concentración de mercurio más alta, ésta no alcanza los niveles límite internacionalmente aceptados para considerar a los peces como no aptas para el consumo humano. A pesar de ésto, Olivero *et al.* (1997) consideran que sí existe un problema real para los pescadores y sus familias en el Canal del Dique, especialmente en María la Baja, ya que la fuente de proteína en su dieta se basa en el alto consumo de arenca.

Olivero *et al.* (1998), encontraron que en la Ciénaga Grande de Achí (río Cauca) las especies de los eslabones más altos de la cadena trófica (consumidores terciarios) como *Ageneiosus caucanus* (doncella), *Caquetaia kraussii* (mojarra amarilla) y *Hoplias malabaricus* (moncholo) presentan las concentraciones de mercurio más altas, siendo éstas superiores a los límites aceptados internacionalmente de 0,5 µg/g de mercurio para consumo de peces (WHO, 1991), llegando a 1,236 µg/g de mercurio en la doncella (Tabla 1). Para todas las muestras, las especies pertenecientes a los diferentes niveles tróficos presentan diferencias estadísticas significativas, a la vez que también se detectaron diferencias significativas entre especies carnívoras capturadas en diferentes períodos de tiempo, siendo mayores durante los más secos. Se determinó que el consumo de pescado de esta ciénaga representa un alto riesgo de contaminación por mercurio para los pescadores y sus familias, que dependen únicamente de este ecosistema para obtener su fuente de proteína. En la Ciénaga de Simití, Olivero *et al.* (1998), encontraron concentraciones más bajas que las observadas en la ciénaga Grande de Achí, en el río Cauca, con valores menores medios menores a 0,25 µg/g, pero a pesar de ésto se determinó que sí existe una diferencia evidente en la acumulación de mercurio entre las especies carnívoras y las fitoplanctónicas, lo cual sugiere que en ambas ciénagas el mercurio está siendo biomagnificado en la cadena trófica (Olivero y Johnson 2002b).

Por su parte, en la Ciénaga de Capote en el municipio de Soplaviento (Bolívar, Colombia), se encontraron las concentraciones más bajas de los tres sitios estudiados, lo cual coincide con ser el sitio de referencia o estación blanco por estar ubicada aproximadamente a 290 km de las minas de oro, lo cual explica que la distribución espacial de la concentración de metales en peces está directamente relacionada a la unión entre estos cuerpos de agua y las minas de oro, evidenciando que los procesos de biomagnificación tienen lugar a lo largo de la cadena trófica. Se observó que *Prochilodus magdalenae*, especie de mayor importancia económica, presenta niveles

bajos de acumulación, por lo que su consumo representa un riesgo bajo. Olivero y Johnson (2002b), destacan que se detectaron en el sur de Bolívar concentraciones bajas de mercurio en los peces fitoplanctónicos en un rango de 0,015-0,110 $\mu\text{g/g}$ de mercurio (promedio de 0,045 $\mu\text{g Hg/g}$), seguido por los peces detritívoros en un rango de 0,013-0,550 $\mu\text{g/g}$ de mercurio (promedio de 0,12 $\mu\text{g Hg/g}$). Las concentraciones más altas fueron observadas en peces carnívoros en un rango de 0,030-1,060 $\mu\text{g/g}$ de mercurio (promedio de 0,24 $\mu\text{g Hg/g}$).

El estudio realizado por Ramírez-González (1993) determinó que las mayores concentraciones de mercurio se midieron en peces capturados en zonas con influencia directa de vertimientos de aguas de minería aurífera como el río Ité (Remedios, Antioquia, Colombia), La Poza Don Alonso (recibe aguas del río Nechí), el río Pocuné (Remedios, Antioquia), ciénaga de Bija (recibe aguas del río Cimitarra), quebrada Las Mercedes (vía Puerto Berrío-Remedios), sector de Cuatro Bocas (confluencia del río Cimitarra al Magdalena) y río Tiguí (Bagre, Antioquia), en estas zonas casi todas las muestras presentaron valores superiores a la norma de 0,5 $\mu\text{g/g}$ de mercurio (Tabla 1). Según el estudio de Ramírez-González (1993), las especies con mayores concentraciones fueron las asociadas al fondo de la columna de agua y las pertenecientes a niveles tróficos superiores como los bagres, que tienen una marcada tendencia bentónica y de hábitos carnívoros, la dorada que es un excelente depredador y el comelón que es omnívoro. Lo anterior, relaciona los altos niveles de mercurio en estas especies con el fenómeno de bioacumulación y posterior biomagnificación de las concentraciones de mercurio a medida que se asciende en la cadena trófica. La región minera antioqueña presenta valores altos de concentración de mercurio en los tejidos de los peces analizados, los cuales sobrepasan ampliamente el máximo permisible para el consumo humano, lo que está relacionado con la amplia utilización del mercurio en la explotación aurífera (Ramírez-González, 1993).

Mosquera-Lozano *et al.* (2005), detectaron concentraciones de mercurio en tejidos musculares de *Brycon meeki*, *Rhamdia wagneri*, *Pomadasys bayanus* y *Hoplias malabaricus* procedentes del río Condoto, siendo esta última especie la que presentó mayor cantidad de mercurio en sus tejidos con valores máximos de 0,731 mg Hg/Kg (Tabla 1). Cala (2001), utilizando tejido muscular de hembras sexualmente maduras y de ocho especies diferentes, procedentes del bajo y medio río Magdalena y alto río Meta, evaluó el contenido de mercurio, cuyo valor varió entre 0,02 y 0,43 mg/kg de peso húmedo, lo cual demuestra la contaminación de todas las especies evaluadas. Este estudio estableció que la especie con mayor concentración de mercurio en sus tejidos fue *Pseudoplatystoma fasciatum* con valores de 0,22 mg/kg de Hg en la zona de Barranca-bermeja en el río Magdalena y de 0,43 mg/kg de Hg en la zona de Puerto López en el río Meta.

Peces	Cuenca	Mercurio	Otros Metales	Fuentes
<i>Prochilodus magdalenae</i>	Río Caribona-Río Cauca	<0,23 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (2001)
	Barrancabermeja	0,02 mg/Kg	-	Cala (2001)
	Mina Santa Cruz (Bolívar)	11-129 µg/Kg	-	Olivero y Solano (1998)
	Canal del Dique	nd-29 µg/Kg	-	Olivero <i>et al.</i> (1997)
	Honda	0,02-2,6 mg/Kg	Cd: nd-0,256 mg/Kg Cu: nd-6,512 mg/Kg Pb: nd-4,76 mg/Kg Zn: 9,14-41,89 mg/Kg	Ruiz <i>et al.</i> (1996)
	Cuatro Bocas	0,9-2,5 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
	Ciénaga de Lónica	>0,3-0,7 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
	Honda	0,12 ppm	-	Gómez y Martínez (1993), Gómez <i>et al.</i> (1995)
	Girardot	0,12 ppm	-	Gómez y Martínez (1993), Gómez <i>et al.</i> (1995)
	Neiva	0,09 ppm	-	Gómez y Martínez (1993), Gómez <i>et al.</i> (1995)
	Ciénagas del bajo Magdalena	< 0,2 µg/g	-	Olivero y Johnson (2002a)
	Ciénaga Grande de Achí	> 0,2 µg/g	-	Olivero y Johnson (2002a)
	Río San Jorge (Caimito, Sucre)	< 0,10 µg/g	-	Paz, 2000
	Río San Jorge (Caimito, Sucre)	0,076 µg/g	-	Olivero y Johnson (2002b)
	Ciénaga Grande (río Cauca)	0,019-0,226 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
	Ciénaga de Simití (río Magdalena)	nd-0,194 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
	Ciénaga de Capote (río Magdalena)	nd-0,045 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
<i>Hoplias malabaricus</i>	Río Caribona-Río Cauca	>0,50 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (2001)
	Mina Santa Cruz (Bolívar)	322 µg/Kg	-	Olivero y Solano (1998)
	Ciénaga de San Marcos	<0,3-2,1 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
	Ciénaga de Ayapel	<0,3-1,3 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
	Ciénaga Grande de Achí	0,740-1,122 µg/g	-	Olivero y Johnson (2002a, 2002b) Olivero <i>et al.</i> (1998)
	Ciénagas del bajo Magdalena	hasta 1,0 µg/g	-	Olivero y Johnson (2002a)
	Río San Jorge (Caimito, Sucre)	0,297 µg/g	-	Olivero y Johnson (2002b)
	Ciénaga de Simití (río Magdalena)	0,081-0,391 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
	Ciénaga de Capote (río Magdalena)	0,052-0,119 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
	Río Condoto (Chocó)	0,024-0,731 mg/Kg	-	Mosquera-Lozano <i>et al.</i> (2005)
<i>Leporinus muyscorum</i>	Río Ité	2,7-3,9 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
<i>Ageneiosus caucanus</i>	Río Caribona-Río Cauca	>0,50 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (2001)
	Poza Don Alonso	1,4-3,7 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
	Ciénaga Grande de Achí	0,231-1,236 µg/g	-	Olivero y Johnson (2002a, 2002b)
				Olivero <i>et al.</i> (1998)

Peces	Cuenca	Mercurio	Otros Metales	Fuentes
<i>Ageneiosus caucanus</i>	Río San Jorge (Caimito, Sucre)	0,381 µg/g	-	Olivero y Johnson (2002b)
	Ciénaga de Capote (río Magdalena)	0,045-0,107 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
<i>Curimata magdalenae</i>	Mina Santa Cruz (Bolívar)	nd-221 µg/Kg	-	Olivero y Solano (1998)
	Río Caribona-Río Cauca	0,23 a 0,50 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (2001)
	Río San Jorge	0,4-0,9 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
	Ciénaga Grande (río Cauca)	0,082-0,240 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
<i>Curimata mivartii</i>	Mina Santa Cruz (Bolívar)	31-38 µg/Kg	-	Olivero y Solano (1998)
	Ciénaga Grande (río Cauca)	0,017-0,195 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
<i>Triportheus magdalenae</i>	Río Caribona-Río Cauca	0,23 a 0,50 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (2001)
	Mina Santa Cruz (Bolívar)	37-180 µg/Kg	-	Olivero y Solano (1998)
	Canal del Dique	26-219 µg/Kg	-	Olivero <i>et al.</i> (1997)
	Ciénaga Grande (río Cauca)	0,044-0,766 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
	Ciénaga de Capote (río Magdalena)	0,030-0,135 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
<i>Pseudoplatystoma fasciatum</i>	Canal del Dique	17-129 µg/Kg	-	Olivero <i>et al.</i> (1997)
	Barrancabermeja	0,22 mg/Kg	-	Cala (2001)
	Puerto López	0,43 mg/Kg	-	Cala (2001)
	Ciénagas del bajo Magdalena	hasta 1,0 µg/g	-	Olivero y Johnson (2002a)
	Ciénaga de Simití (río Magdalena)	0,065-0,180 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
	Ciénaga de Capote (río Magdalena)	0,060-0,110 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
<i>Rhamdia sebae</i>	Canal del Dique	9-102 µg/Kg	-	Olivero <i>et al.</i> (1997)
<i>Rhamdia wagneri</i>	Río Condoto (Chocó)	0,0003-0,230 mg/kg	-	Mosquera-Lozano <i>et al.</i> (2005)
<i>Aequides pulcher</i>	Mina Santa Cruz (Bolívar)	29-50 µg/kg	-	Olivero y Solano (1998)
	Quebrada Cuturú	0,4-1,3 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
<i>Caquetaia kraussii</i>	Ciénagas del bajo Magdalena	hasta 1,0 µg/g	-	Olivero y Johnson (2002a)
	Río San Jorge (Caimito, Sucre)	0,315 µg/g	-	Olivero y Johnson (2002b)
	Río Caribona-Río Cauca	>0,50 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (2001)
	Mina Santa Cruz	40-230 µg/g	-	Olivero y Solano (1998)
	Ciénaga Grande de Achí	0,359-1,057 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998), Olivero y Johnson (2002b)
	Ciénaga de Simití (río Magdalena)	0,065-0,180 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
	Ciénaga de Capote (río Magdalena)	0,060-0,110 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
	Quebrada Malena	0,4-0,5 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
<i>Plagioscion magdalenae</i>	Mina Santa Cruz	195 µg/kg	-	Olivero y Solano (1998)
	Ciénaga de Capote (río Magdalena)	0,037-0,187 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
	Río San Jorge (Caimito, Sucre)	0,311 µg/g	-	Olivero y Johnson (2002b)
<i>Sorubim cuspicaudus</i>	Barrancabermeja	0,16 mg/kg	-	Cala (2001)
	Ciénaga de Bijá	<0,3-2,8 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
	Quebrada Las Mercedes	0,7-2,7 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
	Ciénaga de Simití (río Magdalena)	0,118-0,292 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
	Ciénaga de Capote (río Magdalena)	0,059-0,112 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)

Peces	Cuenca	Mercurio	Otros Metales	Fuentes
	Río San Jorge (Caimito, Sucre)	0,363 µg/g	-	Olivero y Johnson (2002b)
<i>Hypostomus tenuicauda</i>	Barrancabermeja	0,05 mg/kg	-	Cala (2001)
<i>Chaetostoma</i> sp.	Río Tiguí	0,3-2,5 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
<i>Pimelodus grosskopfii</i>	Embalse de Betania	0,07 mg/kg	-	Cala (2001)
	Honda	0,14 ppm	-	Gómez y Martínez (1993), Gómez <i>et al.</i> (1995)
	Girardot	0,12 ppm	-	Gómez y Martínez (1993), Gómez <i>et al.</i> (1995)
	Neiva	0,17 ppm	-	Gómez y Martínez (1993), Gómez <i>et al.</i> (1995)
<i>Oreochromis niloticus</i>	Embalse de Betania	0,03 mg/kg	-	Cala (2001)
<i>Oreochromis rendalli</i>	Embalse de Betania	0,03 mg/kg	-	Cala (2001)
<i>Paulicea lutkeni</i>	Puerto López	0,17 mg/kg	-	Cala (2001)
<i>Pimelodus clarias</i>	Honda	0,03-3,53 mg/kg	Cd: nd-0,104 mg/kg Cu: nd-0,447 mg/kg Pb: nd Zn: 10,81-23,95 mg/kg	Ruiz <i>et al.</i> 1996
	Río Nechí	<0,3-0,7 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
	Honda	0,13 ppm	-	Ruiz <i>et al.</i> 1996
	Girardot	0,07 ppm	-	Ruiz <i>et al.</i> 1996
	Neiva	0,05 ppm	-	Ruiz <i>et al.</i> 1996
	Ciénaga Grande (río Cauca)	0,046-0,241 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
	Ciénaga de Simití (río Magdalena)	0,027-0,097 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
	Ciénaga de Capote (río Magdalena)	0,017-0,121 µg/g	-	Olivero <i>et al.</i> (1998)
<i>Astyanax</i> sp.	Quebrada Juan Vara	0,6-0,9 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
<i>Brycon moorei moorei</i>	Río Pocuné	0,3-3,4 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
<i>Brycon meeki</i>	Río Condoto (Chocó)	0,008-0,158mg/kg		Mosquera-Lozano <i>et al.</i> (2005)
<i>Ctenolucius hujeta</i>	Quebrada Cuturú	0,4-1,3 µg/g	-	Ramírez-González (1993)
<i>Astyanax fasciatus</i>	Honda	0 ppm	-	Gómez y Martínez (1993), Gómez <i>et al.</i> (1995)
	Girardot	0 ppm	-	Gómez y Martínez (1993), Gómez <i>et al.</i> (1995)
	Neiva	0,36 ppm	-	Gómez y Martínez (1993), Gómez <i>et al.</i> (1995)
<i>Loricaria gymnogaster</i>	Honda	0,05 ppm	-	Gómez y Martínez (1993), Gómez <i>et al.</i> (1995)
	Girardot	0,07 ppm	-	Gómez y Martínez (1993), Gómez <i>et al.</i> (1995)
	Neiva	0,08 ppm	-	Gómez y Martínez (1993), Gómez <i>et al.</i> (1995)
<i>Pomadasys bayanus</i>	Río Condoto (Chocó)	0,026 mg/kg		Mosquera-Lozano <i>et al.</i> (2005)

Tabla 1. Contenido de mercurio (Hg) y otros metales pesados (Cd, Cu, Pb, Zn), registrados en peces dulceacuícolas de Colombia. LD = límite de detección (µg/g): Cd: 0,025; Cu: 0,020; Pb: 0,017; Zn: 0,005; nd = no detectable. Las unidades de medición se han mantenido según la cita original.

Ruiz *et al.* (1996), encontraron que la contaminación por metales pesados (Cd, Cu, Hg, Pb, Zn), es peligrosa en el caso del mercurio y del cadmio que exhiben niveles que pueden presentar un peligro para la salud de los pescadores y sus familias en la localidad de Honda, sobre el río Magdalena, que consumen nicuro y bocachico, especies en las que las concentraciones de mercurio encontradas llegaron a valores máximos de 2,6 y 3,53 mg/kg de Hg, y las de cadmio a valores de 104 y 256 mg/kg de Cd, respectivamente (Tabla 1). El estudio realizado por Ruiz *et al.* (1996), no detectó niveles de contaminación por plomo en *Pimelodus clarias* (nicuro) y en *Prochilodus magdalenae* (bocachico) este metal solo fue detectado en tres individuos de 39 analizados que exhibieron un máximo de 4,76 µg/g. El bocachico presentó en el tejido muscular niveles superiores de cadmio, cobre y zinc que el nicuro, el cual presentó niveles más altos de mercurio. Gómez y Martínez (1993) y Gómez *et al.* (1995), establecieron la concentración de mercurio en muestras de cinco especies de peces obtenidas en aguas del río Magdalena a la altura de los municipios de Honda, Girardot y Neiva (Colombia). Las concentraciones detectadas no sobrepasaron las 0,17 ppm a excepción de *Astyanax fasciatus* que presentó un valor de 0,36 ppm en la zona de Neiva (Tabla 1).

BIOENSAYOS CON PECES DULCEACUÍCOLAS

En la tabla 2 puede observarse la síntesis de los trabajos realizados como bioensayos que involucran evaluaciones ambientales de tres parámetros (metales pesados, temperatura y efluentes). Los trabajos incluyen ocho especies de peces dulceacuícolas, de los cuales *Carassius auratus*, *Oreochromis* spp., *Piaractus brachipomus* y *Prochilodus magdalenae* han sido utilizados en dos estudios diferentes para evaluación de metales pesados (Álvarez-León, 1998). La periodicidad y continuación de las evaluaciones no ha seguido un programa nacional o regional a corto y mediano plazo, sino que se han formulado para evaluar problemas accidentales o persistentes en áreas hasta el momento bastante localizadas en Bogotá, Cali, Medellín (debido en parte a la presencia de laboratorios idóneos en dichas ciudades) y los Llanos Orientales. En general, se utilizan los métodos sugeridos por APHA, EPA, FAO, IMCO, PAC, PNUMA, los cuales permiten una estandarización y especificidad suficientes para garantizar las bases científicas y poder determinar las normas de calidad de las aguas.

Especies	a	b	c	Fuentes
1. <i>Astyanax fasciatus</i>	X			1
2. <i>Carassius auratus</i>	X			3, 5
3. <i>Colossoma bidens</i>	X			7
4. <i>Gambusia affinis</i>			X	4
5. <i>Grundulus bogotensis</i>		X		2
6. <i>Oreochromis</i> spp.	X			8, 9
7. <i>Piaractus brachipomus</i>	X			8,
8. <i>Prochilodus magdalenae</i>	X			6, 7

Tabla 2. Síntesis de los estudios realizados en los bioensayos realizados en Colombia con peces dulceacuícolas (a=metales pesados, b=temperatura, c=efluentes) según Álvarez-León (1998). Fuentes: (1) Zúñiga (1986), (2) Pedraza (1988), (3) Agudelo (1991), (4) Chacón y Villamarín (1991), (5) Ramírez y Zuluaga (1991), (6) Rodríguez y Salazar (1992), (7) Álvarez-Barrero (1993), (8) Ramírez-Forero y Vargas-Bernal (1996), (9) Vargas-Bernal y Ramírez-Forero (1996).

DISCUSIÓN

A partir de la década de 1970 tomaron fuerza consensos a nivel mundial para proponer y acordar mecanismos para controlar impactos ambientales serios, como el aumento sensible de la contaminación de los cuerpos de agua. No obstante, en Colombia aunque se ha incorporado en la legislación una visión integral de la gestión del Estado que contempla acciones específicas en materia de control de la contaminación que ha permitido iniciar planes de ordenamiento ambiental con las industrias, las empresas públicas y las alcaldías municipales, los compromisos institucionales se orientaron hacia la solución de deficiencias en la potabilización de aguas y la ampliación de la cobertura de servicios de acueducto y saneamiento básico, con pleno descuido del saneamiento ambiental. El país muestra deficiencias significativas en materia de manejo de los residuos y sus impactos ambientales, lo cual no permite disminuir los daños resultantes del manejo inadecuado de vertimientos y la disposición de residuos a los cuerpos de agua. A pesar de que la ley estipula claramente que se debe realizar un manejo integral de los residuos sólidos y peligrosos y deja abierta la posibilidad de implementar instrumentos económicos, como los tributos o tasas ambientales para propender por un uso racional de los recursos naturales, el tratamiento y la disposición final son los componentes menos desarrollados y en los que menos recursos se invierten, y a su vez, los instrumentos económicos tendientes a regular las emisiones de contaminantes provenientes de la actividad industrial que indudablemente es la principal causa de contaminación de las aguas del país, no han sido implementados.

Los aportes continentales fruto de la erosión y lixiviación de suelos por la tala indiscriminada de bosques en las cuencas de los ríos Magdalena-Cauca, Sinú-San Jorge, Atrato y Orinoco, la minería del oro, la explotación petrolera, las actividades agropecuarias y la creciente actividad industrial de las ciudades capitales así como de las portuarias, ha comenzado a generar problemas ambientales muy diversos. Se calcula que en 20 años la colonización solo en la cuenca del río Magdalena a destruido 3,5 millones de hectáreas de bosques, el transporte de sedimento alcanza las 133.000 ton/año y en varias estaciones del río, la concentración de metales pesados (cadmio, hierro, mercurio, plomo, zinc) superan los niveles permitidos en aguas naturales (Departamento Nacional de Planeación, 1995).

La contaminación de peces por metales pesados en Colombia ha sido estudiada principalmente en la cuenca del río Magdalena y sus afluentes, especialmente en la región de la Mojana, en las ciénagas del sur del departamento de Bolívar y en áreas del Magdalena medio donde se han estudiado los niveles de contaminación por mercurio. Respecto al contenido de otros metales pesados en peces, los estudios son mínimos. Los estudios realizados para determinar las concentraciones de mercurio muestran que existe una relación directa entre las altas concentraciones en peces con la cercanía a las zonas con influencia directa de vertimientos de aguas de minería aurífera, encontrándose valores críticos en la región de la Mojana y zona del nordeste antioqueño, zonas donde casi todas las muestras presentaron valores superiores a la norma de 0,5 µg/g de mercurio. De acuerdo con Hakanson (1984), concentraciones

de mercurio superiores a 0,075 µg/g en especies acuáticas pueden ser atribuidos a actividades de tipo antropogénico. Las concentraciones de mercurio más altas se encontraron en las especies carnívoras como *Hoplias malabaricus*, *Ageneiosus caucanus* y *Caquetaia kaussi* que se encuentran en la parte alta de la cadena alimenticia. Sin embargo, también se encontraron niveles altos en especies detritívoras como *Triporthus magdalenae* que presentan una acumulación considerable del metal debido a la manera en que estas especies obtienen su alimento de los sedimentos, los cuales presentan niveles altos de mercurio ya que éste tiende a precipitarse en el fondo donde las concentraciones son a veces superiores a los encontrados en la columna de agua. Por su parte, en especies iliófagas como *Prochilodus magdalenae* las concentraciones de mercurio son bajas. Esta misma situación se presenta con otros metales pesados y los residuos organoclorados, en los cuales también se evidencian los mayores niveles de estas sustancias en los peces de hábitos predadores y detritívoros (Mancera-Rodríguez y Álvarez-León, 2003, 2005). Los valores más altos de mercurio detectados en peces fue en la Ciénaga Grande de Achí, cerca de la población de Montecristo. En esta zona la explotación de oro es intensiva, en particular en la cuenca del río Caribona. Allí la minería del oro es predominante de aluvión y es realizada con maquinaria pesada aportando en forma directa cantidades considerables de mercurio a los ecosistemas circundantes (Olivero y Johnson, 2002b). Las concentraciones de mercurio detectadas por Mosquera-Lozano *et al.* (2005) en todas las muestras de las cuatro especies de peces analizadas, están relacionadas con la minería de oro desarrollada en el río Condoto, actividad que es el eje de la economía local y que vierte mercurio al río que paulatinamente se acumula en los diferentes organismos acuáticos pasando de un nivel trófico a otro por medio de la cadena alimenticia. Los valores de cadmio encontrados por Ruiz *et al.* (1996), de 104 y 256 mg/kg de Cd para *Pimelodus clarias* y *Prochilodus magdalenae* en la localidad de Honda sobre el río Magdalena son bastante altos y pueden representar un peligro para la salud de los pescadores y sus familias, ya que son muy cercanos al límite fijado por la FAO/OMS en el año 1972, entre 400-500 mg/kg de Cd para consumo semanal, que puede ser ingerido por un adulto.

Es necesario revisar la legislación y reglamentación existente a nivel nacional en el tema que permita tener una mejor regulación de las sustancias químicas utilizadas en la explotación de oro y otros metales pesados en el país. Se debe estudiar la posibilidad de crear impuestos y sanciones económicas por concepto de emisiones descontroladas de estas sustancias, buscando incentivar el uso de tecnologías “limpias” que permitan la introducción de mejoras técnicas en el proceso de producción en la explotación minera, la exploración y explotación de hidrocarburos y en la producción agrícola. El tratamiento de la contaminación industrial debe comenzarse desde el mismo inicio del proceso productivo, tratando de incorporar los residuos generado al proceso mismo de producción, buscando tener una máxima rentabilidad con un mínimo impacto. Es urgente llevar a cabo investigaciones para identificar las fuentes de contaminación hídrica del país y tomar medidas apropiadas que permitan controlar la emisión de aguas de origen industrial y regular la utilización de mercurio y cianuro en la extracción de oro. La responsabilidad para el uso y control de metales pesados es hoy compartida entre diferentes estancias regionales, por lo que se requiere del esta-

blecimiento de una autoridad de nivel gubernamental con alto carácter técnico que inicie el monitoreo y coordine acciones para aliviar la situación presente. Es necesario establecer los riesgos que existen por la persistencia en los ecosistemas de estas sustancias durante años, por lo que es necesario continuar obteniendo información acerca de la distribución en el medio ambiente y sus concentraciones en aguas, sedimentos y peces. También es necesario incluir dentro de los muestreos un mayor número de especies de hábitos bentónicos y estudios de sedimentos que permitan tener un mayor conocimiento de la dinámica de estas sustancias en los cuerpos de agua y realizar estudios que determinen como afecta los procesos reproductivos la exposición a estas sustancias, ya que puede generarse una disminución en el número de puestas y de huevos por puesta de muchas especies. Por último, varios organismos son adecuados para los bioensayos, permitiendo una amplia y heterogénea gama de respuestas dentro de la estructura y dinámica de los ecosistemas, no obstante, deberá tenerse especial cuidado en reducir el número de variables, a fin de que las condiciones de la experiencia sean lo más cercanas a la realidad y no existan errores apreciables a la hora de realizar las interpretaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUDELO A. Comparación de las respuestas bioeléctricas de grupos de dos y cuatro ejemplares de *Carassius auratus*, sometidos a tres concentraciones subletales de mercurio. [Trabajo de grado] Medellín: Facultad de Ciencias, Universidad de Antioquia; 1991.
- ÁLVAREZ-BARRERO J. Pruebas de toxicidad crónica y aguda con las sustancias de interés sanitario: mercurio y amonio. Inderena/Ramón Andrade & Cía. Ltda. Cartagena (Bolívar). Informe Técnico; 1993.
- ÁLVAREZ-LEÓN R. Los bioensayos con organismos acuáticos y la protección ambiental en Colombia. Rev AINSA. 1998;31:10-15.
- BERGLUND F. Methylmercury in Fish, a Toxicologic-Epidemiologic Evaluation of Risks. Nord. Hyg. Tidskr. Supplement 4. Stockholm, Sweden; 1971.
- BERNARD A, LAUWERYS R. Cadmium in Human Population. Experientia. 1984;(40):143-152.
- CALA P. Occurrence of Mercury in Some Commercial Fish Species From the Magdalena and Meta Rivers in Colombia. Dahlia. Rev Aso Col Ictiol. 2001;4:15-19.
- CALA P, SODERGREN A. Datos preliminares sobre contaminantes persistentes lipofílicos en peces de agua dulce de Colombia. En: Programas y Resúmenes II Encuentro Científico, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; 1995.
- CARDENOSA J, KANASEWICH D, MENDOZA R, RODRÍGUEZ LE, ROJAS V, GALIANO F, DE CRISTANCHO LP. Evaluación de la contaminación actual en la hoya hidrográfica del río Magdalena. Proy. IIT/Colciencias 30026-1-01-70. Vol. 1 y 2. Bogotá. Informe Final; 1973.
- CHACÓN MF, VILLAMARÍN S. Bioensayos y pruebas de toxicidad aguda CI (I) 50 a 24,48,72 y 96 horas a partir de efluentes industriales en camarones (*Penaeus vannamei*, *P. schmitti*) y peces (*Gambusia affinis*) de las costas colombianas. [Tra-

- bajo de grado] Bogotá: Facultad de Biología Marina, Universidad Jorge Tadeo Lozano; 1991.
- CEPIS (CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE). Manual de evaluación y manejo de sustancias tóxicas en aguas superficiales. Sección 1. Perspectiva. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. OPS/CEPIS/PUB/01.65; 2001.
- DÍAZ-GRANADOS M. Grado de contaminación de los recursos hídricos e ictiológicos en la región de la Mojana. [Trabajo de grado] Bogotá: Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), Universidad de Los Andes; 1998.
- DNP (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN). CONPES-2764. Bogotá. Informe Técnico; 1995.
- FRIBERG L, PISCATOR M, NORDBERG G. Cadmium in the Environment. CRC Press, Cleveland (USA); 1971.
- GALIANO-SEDANO F. Investigación sobre el contenido de mercurio en aguas de ríos colombianos. Proy. IIT/Colgate Palmolive/COLCIENCIAS. Bogotá (Colombia). Informe Técnico; 1976.
- _____. Mercurio total en aguas de los ríos colombianos. Rev IIT Tecnol. 1977;105:9-18.
- _____. Estudios sobre la contaminación de residuos industriales en aguas de ríos colombianos. Rev IIT Tecnol. 1979;11740-47.
- GARZÓN-GARCÍA A. Modelación del mercurio en ciénagas. [Trabajo de grado] Bogotá: Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), Universidad de Los Andes; 1998.
- GIRALDO E, GÓMEZ O, LOZANO G, RODRÍGUEZ A. Grado de contaminación de los recursos hídricos e ictiológicos en la región de la Mojana. Convenio CORPOICA /ICA/UDLA. Bogotá. Informe Final; 1996.
- GIRALDO E, RAMOS C, HERRERA L, ESTÉVES S. Modelo matemático para el estudio del ciclo del mercurio en la región de la Mojana. Convenio CORPOICA /CORPOMOJANA/UDLA. Bogotá. Informe final; 1999.
- GÓMEZ QC, MARTÍNEZ RE. Contenido de mercurio en varias especies de peces de agua dulce y harinas comerciales de pescado. [Trabajo de grado] Bogotá: Departamento de Farmacia, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; 1993.
- GÓMEZ Q, MARTÍNEZ RE, PODLESKY E. III. Contenido de mercurio en varias especies de peces del río Magdalena y en harinas comerciales de pescado, 1993, En: Informe técnico mercurio: un contaminante ambiental ubicuo y peligroso para la salud humana. Biomédica. 1995;15(3)183.
- GTZ/CORPONARIÑO/P-Consult. Mitigación de emisiones de mercurio en la pequeña minería aurífera de Nariño. Bogotá (Colombia); 1992.
- HAKANSON L. Metals in Fish and Sediment From the River Kolbocsoan Water System, Sweden. Arch Hidrobiol. 1984;101:373-400.
- HERRERA-PIÑEROS ME. Modelación matemática del mercurio en aguas y sedimentos en la región de la Mojana. [Trabajo de grado] Bogotá: Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), Universidad de Los Andes; 1998.

- IDROVO AJ, MANOTAS LE, VILLAMIL DE GARCÍA G, ORTÍZ JE, SILVA E, ROMERO SA, AZCÁRATE CE. Niveles de mercurio y percepción del riesgo en una población minera aurífera del Guainía (Orinoquía colombiana). *Biomédica*. 2001;21:134-141.
- INGEOMINAS. Inventario minero ambiental de Colombia por departamentos. Ministerio de Minas y Energía, Instituto de Investigaciones Geológicas y Mineras. Bogotá (Colombia); 1999.
- JOHANNES RE, BETZER SS. Introduction to Marine Communities Respond Differently to Pollution in the Tropics Than Higer Latitudes. En: Ferguson EJ, Johannes RE (Eds.). Elsevier Scientific Publishing, Amsterdam (Holanda); 1975.
- KIDO T, SHAIKH ZA, KITO H, HONDA R, NOGAWA K. Dose-Response Relationship Between Urinary Cadmium and Metallothionein in a Japanese Population Environmentally Exposed to Cadmium. *Toxicology*. 1991;65:325-332.
- LEBEL J, MERGLER D, LUCOTTE M. Evidence of Early Nervous Systems Dysfunction in Amazonian Populations Exposed to Low-Levels of Methylmercury. *Neurotoxicology*. 1996;(17):157-168.
- MANCERA-RODRÍGUEZ NJ, ÁLVAREZ-LEÓN R. Estado del conocimiento de las concentraciones de metales pesados en los peces dulceacuícolas de Colombia. En: *Memorias VIII Simposio Colombiano de Ictiología*. ACICTIOS/UDC. Montería (Córdoba) Colombia; 2003.
- _____. Estado del conocimiento de las concentraciones de hidrocarburos y residuos organoclorados en peces dulceacuícolas de Colombia. *Rev Aso Col Ictiólogos-Dahlia*. En prensa 2005.
- MANDELLI EF. Investigación y vigilancia de la contaminación por los metales pesados. Reunión Internacional de Trabajo COI/OAA/PNUMA sobre contaminación marina en el Caribe y regiones adyacentes. Puerto España (Trinidad), (SC-76/WS/116: IOC/FAO/UNEP/PNUMA, París (Francia); 1976.
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Guía ambiental para la pequeña y mediana minería del oro. Ministerio del Medio Ambiente. -MMA/CENSAT/AGUA VIVA. Bogotá (Colombia); 1999.
- MOSQUERA-LOZANO Y, TORRES-IBARGUEN A, LOZANO-LARGACHA Y, PEREAMENA B. Incidencia del mercurio por la explotación minera en algunas especies de peces en el río Condoto, Chocó-Colombia. En: *Memorias del VIII Simposio Colombiano de Ictiología*. ACICTIOS/UTCH. Quibdó (Chocó) Colombia; 2005.
- OLERU UG. Kidney, Liver, Hair and Lungs as Indicators of Cd Absorption. *Am Ind Hyg Assoc J*. 1976;37:617-630.
- OLIVERO J, JOHNSON B. Contaminación con mercurio y salud pública en la costa Atlántica colombiana. *Biomédica*. 2002a;22(S1):52-53.
- _____, JOHNSON B. El lado gris de la minería del oro: la contaminación con mercurio en el norte de Colombia. Universidad de Cartagena. Editora Alpha. Cartagena, Colombia; 2002b.
- OLIVERO J, SOLANO B. Mercury in Environmental Samples From a Waterbody Contaminated by Gold Mining in Colombia, South America. *The Science of the Total Environment*. 1998;217:83-89.
- _____, SOLANO B, ACOSTA I. Total Mercury in Muscle of Fish From Two Marshes in Goldfields, Colombia. *Bull Environ Contam Toxicol*. 1998;61:182-187.

- _____, JOHNSON B, MENDOZA B, OLIVERO R. Mercury Pollution in Colombia. CS-3 In: Abstracts 6th Internal. Conference on Mercury as a Global Pollutant. Minamata (Japón); 2001.
- OLIVERO J, NAVAS V, PÉREZ A, SOLANO B, ACOSTA I, ARGÜELLO E, SALAS R. Mercury Levels in Muscle of Some Fish Species From the Dique Channel. Bull. Environ Contam Toxicol. 1997;58:865-870.
- ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD-OPS. Criterios de salud ambiental No. 1. Mercurio. Organización Panamericana de la Salud Publicación Científica 362. Washington D.C. (USA); 1978.
- PAZ R. Evaluación de la contaminación con mercurio en peces, sedimentos superficiales y macrófitas en ciénagas del bajo San Jorge, Caimito (Sucre). [Trabajo de grado] Cartagena: Facultad de Química y Farmacia, Universidad de Cartagena; 2000.
- PEDRAZA GS. Evaluación del acondicionamiento y adaptación de la guapucha *Grundulus bogotensis* en condiciones de laboratorio. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Bogotá. Informe Contrato 733/88; 1988.
- PRIETO G. Mobilidade geoquímica de metais pesados e impacto ambiental em area de mineracao aurífera sulfetada (Marmato, Caldas, Colombia). [Tesis de Doctorado] Belém: Universidad Belém du Pará; 1997.
- PULIDO A. Estudio de algunos parámetros ambientales de la explotación aurífera de Mineros de Antioquia en la cuenca del río Nechí: Impacto ambiental preliminar. Universidad de Antioquia; 1985.
- RAMÍREZ A. Toxicología del cadmio: conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. Anales de la Facultad de Medicina, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú; 2002;63(1).
- RAMÍREZ-FORERO M, VARGAS-BERNAL J. Pruebas de toxicidad aguda CL50-96 con vanadio y níquel, en *Piaractus brachipomus* Cuvier 1818 (*Pisces: Cypriniformes*) y *Oreochromis* sp. Trewavas, 1981 (*Pisces: Perciformes*) especies ícticas de importancia comercial de los Llanos Orientales. [Trabajo de grado] Bogotá: Facultad de Biología Marina, Universidad Jorge Tadeo Lozano; 1996.
- RAMÍREZ-GONZÁLEZ A. Lineamientos y estadísticas para estudios biológicos de impacto ambiental. INDERENA/INFOTEC Ltda. Bogotá; 1988.
- _____. Oleoducto Vasconia-Coveñas: Estudio de línea base, componentes biológicos y fisicoquímicos de los ecosistemas acuáticos. ECOPETROL/ICP/Oleoducto de Colombia S.A./Biología Aplicada/Ecology Ltda. Bogotá (Colombia). Informe final; 1993.
- RAMÍREZ LA, ZULUAGA MP. Comportamiento eléctrico de *Carassius auratus* frente a la exposición de mercurio durante períodos prolongados. [Trabajo de grado]. Facultad de Ciencias, Universidad de Antioquia; 1991.
- RAMOS CX, ESTÉVEZ SL, GIRALDO E. Nivel de contaminación por metilmercurio en la región de la Mojana. http://www.hruschka.com/hg-net/members/claudia/metilmercurio_en_la_mojana.doc. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), Universidad de Los Andes; 2000.
- REISH DL, OSHIDA PS. Manual of Methods in Aquatic Environment Research. Part. 10 ShortTerm Static Bioassays. FAO Fish Tech Pap. 1987;(247):1-62.

- RODRÍGUEZ K, SALAZAR S. Bioensayos y pruebas de toxicidad acuática con cromo hexavalente sobre tres niveles tróficos: *Tetraselmis chuii* (Butcher, 1959), *Penaeus schmitti* (Burkenroad, 1936) y *Prochilodus reticulatus* (Steindachner, 1878). [Trabajo de grado] Bogotá: Facultad de Biología Marina, Universidad Jorge Tadeo Lozano; 1992.
- RUIZ J, FANDIÑO C, ROMERO GE, GUEVARA M. Contaminación de peces por metales pesados en el río Magdalena. Licania arborea. 1996;1(1):18-22.
- TARRAS-WAHLBERG NH, FLACHIER A, LANE SN, SANGFORS O. Environmental Impacts and Metal Exposure of Aquatic Ecosystems in Rivers Contaminated by Small Scale Gold Mining: The Puyango River Basin, Southern Ecuador. Sci Total Environ. 2001;278(1-3):239-261.
- THOMANN RV. Physico-Chemical and Ecological Modeling of the Fate of Toxic Substances in Natural Water Systems. Prepared for the Conference on Modelling the Fate and Effect of Toxic Substances in the Environment. Copenhagen (Denmark); 1982.
- TORO-SUÁREZ I, TORRADO A, GIRALDO E. Grado de contaminación de los recursos hídricos e ictiológicos en la región de la Mojana. En: Roveda G, León J, Díaz-Granados M, Terán C, López A, Aguilera E, Toro-Suárez I, Torrado A, Giraldo E, Correcha HM, Herrera LF, Romero J, Sánchez C. Investigación sobre la adaptabilidad de la producción agropecuaria sostenible en los ecosistemas de la región de La Mojana. Convenio CORPOICA/INAT 262/94. Bogotá. Resumen Ejecutivo 1996.
- UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. Estudio del impacto ambiental por minería en el bajo Cauca y nordeste antioqueño. Centro de Investigaciones, Universidad de Antioquia; 1988;4:29-39.
- VARGAS-BERNAL J, RAMÍREZ-FORERO M. Pruebas de toxicidad aguda CL50-96 con vanadio y níquel, en *Piaractus brachipomus* Cuvier 1818 (*Pisces: Cypriniformes*) y *Oreochromis* sp. Trewavas, 1981 (*Pisces: Perciformes*) especies ícticas de importancia comercial de los Llanos Orientales. Bol Cientif INPA. 1996;4:183-203.
- WHO. Environmental Health Criteria 101 (IPCS). Methylmercury. World Health Organization. Geneva (Italy); 1991.
- ZÚÑIGA M DEL C. Evaluación de toxicidad aguda de metales pesados con *Astyanax fasciatus* y *Daphnia magna*. Departamento de Procesos Químicos y Biológicos, Universidad del Valle; 1986.