



CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS

Artículo original de investigación

Procedimiento para el monitoreo y gestión de la contaminación por metales pesados en sistemas fluviales de Cuba

María Aurora Mesa Pérez ^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-2598-8396>

Oscar Díaz Rizo ² <https://orcid.org/0000-0002-5705-163X>

José M. Sánchez-Pérez ³ <https://orcid.org/0000-0002-5650-4879>

Humberto García Acosta ⁴ <https://orcid.org/0000-0001-6822-523>

Onelia Adriana Alarcón Santos ¹ <https://orcid.org/0000-0003-1682-5317>

David Baqué ³ <https://orcid.org/0000-0002-7700-8030>

Marie J. Tavella ³ <https://orcid.org/0000-0002-7935-0147>

Rayner Hernández Pérez ² <https://orcid.org/0000-0002-7637-7467>

Daylen Hernández Rodríguez ¹ <https://orcid.org/0000-0003-1366-0975>

Lilisbet Guerrero Domínguez ¹ <https://orcid.org/0000-0003-4620-6197>

Carlos Miguel Díaz Almeida ¹ <https://orcid.org/0000-0003-1617-2782>

¹ Universidad Agraria de La Habana. Mayabeque, Cuba

² Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas de la Universidad de La Habana. La Habana, Cuba

³ Laboratorio de Ecología Práctica y Medioambiental. Universidad de Toulouse. Toulouse, Francia

⁴ Empresa Provincial de Aprovechamiento Hidráulico. Mayabeque, Cuba

*Autor para la correspondencia: mariaa@unah.edu.cu; odrizo@instec.cu

RESUMEN

Introducción: Los factores que permiten el manejo de sistemas fluviales en riesgo de contaminación metálica, deben estar identificados con claridad para lograr disminuir el grado de contaminación y la mitigación de sus efectos. El trabajo tuvo como objetivo desarrollar e implementar un procedimiento que permita el manejo sostenible de sistemas fluviales en riesgo de contaminación metálica, como herramienta para facilitar la toma de decisiones a nivel territorial. **Métodos:** Mediante el método de consulta a expertos, se establecieron las dimensiones, categorías e indicadores que integran el modelo conceptual y el procedimiento de monitoreo y gestión de sistemas fluviales en riesgo de contaminación metálica. Durante la implementación en el sistema fluvial Pedroso-Mampostón, se utilizaron técnicas de Espectrometría de masas por plasma inducido y acoplado y fluorescencia de rayos X, oxidación catalítica, cromatografía en fase gaseosa, potenciometría y difracción de rayos X. Se utilizaron entrevistas semiestructuradas y trabajo grupal para obtener información y comunicar resultados. **Resultados:** El modelo conceptual consta de 2 subsistemas que permiten, mediante la evaluación de 6 indicadores abióticos y 8 bióticos, caracterizar la contaminación y categorizar los ecosistemas. El procedimiento que guía la implementación del modelo se definió en 4 etapas y se aplicó en el sistema fluvial Pedroso-Mampostón, lo que permitió categorizar sus unidades hidrológicas: presa Mampostón-Categoría I; ríos Ganuza y Mampostón y derivadora Pedroso; categoría IV. La contaminación se caracteriza como diseminada-restringida, frecuente y muy peligrosa. Existen evidencias de toxicidad en peces (CPEt moderado-alto:

Revisores

Ricardo Martínez Sánchez
Instituto de Ciencia y Tecnología de los
Materiales. La Habana, Cuba

Luis Alberto Montero Cabrera
Facultad de Química, Universidad
de La Habana. La Habana, Cuba

Editor

Lisset González Navarro
Academia de Ciencias de Cuba. La
Habana, Cuba

Traductor

Darwin A. Arduengo García
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

concentraciones de Cd no recomendables para el consumo en el 37,5 % el 44,0 %; contenido de Pb elevado en el 14 % al 20 %) y plantas (PDF en macrófitas: 16 % al 32 % Cd y Pb). En el hombre, existe peligro crónico para un consumo de 81 g/día⁻¹ y riesgo carcinogénico (real-restringido). Como conclusiones, el procedimiento aplicado puede ser generalizable a otros ecosistemas en riesgo.

Palabras clave: manejo; sistemas fluviales; riesgo de contaminación; metales pesados

Procedure for monitoring and managing of heavy metal contamination in river systems of Cuba

ABSTRACT

Introduction: The factors that allow the management of river systems at metallic contamination risk, must be clearly identified in order to reduce the degree of contamination and mitigate its effects. The objective of the work was to develop and implement a procedure for the sustainable management of river systems at risk of metal contamination, which serve as a tool to facilitate decision making at the territorial level. **Methods:** It was established the conceptual model (dimensions, categories and indicators) and the implementation procedure by expert consultations. During the implementation in the Pedroso-Mampostón river system, they were used ICPMS and RX- fluorescence techniques, catalytic oxidation, gaseous phase chromatography, potentiometry and X-ray diffraction. They were used semi-structured interviews and team work to obtain information and communicate results. **Results:** The conceptual model consists in two subsystems (Monitoring and Response), that characterize pollution and categorize ecosystems by evaluating six abiotic and eight biotic indicators. It was defined the procedure that guides the implementation of the model in four stages and it was applied in the Pedroso-Mampostón river system, which allowed its hydrological units to be categorized: Mampostón Dam-Category I; Ganuza River, Mampostón River and Pedroso Dam-Category IV. Contamination is characterized as widespread-restricted, frequent and very dangerous. There is evidence of toxicity in fish (moderate-high CPET: concentrations of Cd not recommended for consumption in 37.5%-44.0%; high Pb content in 14%-20%) and plants (PDF in macrophytes: 16%-32% Cd and Pb). In humans, there is a chronic non-carcinogenic danger from a consumption of 81 g.day⁻¹ and a real-restricted carcinogenic risk. **Conclusions:** The procedure can be useful to other ecosystems at metallic contamination risk.

Keywords: management; fluvial systems; contamination risk; heavy metal

INTRODUCCIÓN

Los metales pesados (MP) son los contaminantes ambientales más comunes y su presencia en las cuencas hidrográficas y en la biota, indican la presencia de fuentes naturales o antropogénicas que inducen el enriquecimiento de las matrices abióticas. ⁽¹⁾ La existencia de elevadas concentraciones de metales pesados en un embalse es un problema ambiental serio, producto de su toxicidad, bioacumulación, larga persistencia y biomagnificación en la cadena alimenticia. ⁽²⁻⁵⁾ Todo ello dificulta el manejo de los sistemas fluviales contaminados haciendo que se requiera de un procedimiento, claramente establecido, para lograr la caracterización de la contaminación en cuanto a fuentes, vías de exposición y

receptores; evaluar el riesgo que ésta supone, y establecer las medidas pertinentes para su control con vistas a disminuir el grado de contaminación y mitigar o restaurar los efectos causados. ⁽⁶⁾

Cuba reconoce la contaminación como el tercero de los problemas medioambientales del país. ⁽⁷⁾ Se cuenta con normas, que regulan las concentraciones permisibles para el vertimiento de residuales a los cuerpos receptores; ⁽⁸⁾ los límites permisibles en aire, ⁽⁹⁾ agua potable, ⁽¹⁰⁾ para la acuicultura ⁽¹¹⁾ y a la recreación ⁽¹²⁾ y los límites permisibles en alimentos. ⁽¹³⁾ Sin embargo, debe aclararse que la legislación no en todos los casos es suficientemente explícita, se carece de una regulación para límites permisibles en sedimentos y suelos y no

existen valores de referencia para riesgo a la salud humana, agua de riego o leyes que prohíban la pesca y comercialización de productos provenientes de áreas en las que se han detectado altas concentraciones de MP.

La ausencia de un modelo conceptual que indique cuáles son los elementos imprescindibles para la correcta gestión de los hidrosistemas contaminados y un procedimiento para su implementación, permite establecer como objetivo: desarrollar e implementar un procedimiento que permita el manejo sostenible de sistemas fluviales en riesgo de contaminación metálica, como herramienta para facilitar la toma de decisiones a nivel territorial.

MÉTODOS

Diseño y validación del modelo conceptual

Dimensiones, categorías e indicadores. La valoración se realizó a partir del análisis de los criterios emitidos por un grupo de 17 expertos, aplicando el método Delphi, ^(14,15) para indicar la pertinencia, relevancia y coherencia de las dimensiones y categorías que componen el modelo conceptual, así como la adecuación de los indicadores y sus niveles de referencia para el cálculo del índice de influencia (VI). La selección de la clase Delphi se realizó a partir de la propuesta de López, ⁽¹⁶⁾ mediante la utilización del programa informático Consulta a expertos versión 1.0. ⁽¹⁷⁾

El grupo de expertos consultado fue seleccionado a partir de cumplir con el requisito de poseer un alto coeficiente de competencia ($0,8 \leq K \leq 1$), calculado a partir del nivel de relación y de conocimiento de cada experto con el tema abordado. La validación de la consulta a expertos se realizó mediante el cálculo del grado de concordancia de los expertos para el conjunto de la encuesta aplicada (coeficiente de concordancia de Kendall con una probabilidad $p < 0,05$), utilizando el programa estadístico SPSS versión 5.0. ⁽¹⁸⁾

Selección de las estrategias de manejo más adecuadas para cada categoría. Se realizó mediante la determinación del intervalo de confianza para una proporción, estableciendo un nivel de significación de 0,1. Para ello se utilizó la expresión: donde: p, proporción de respuestas positivas = 0,75; q, proporción de respuestas negativas = 0,25; n, número de expertos que participaron en la encuesta y 2,57, percentil para un nivel de confianza del 90 % en una curva de distribución normal.

$$\text{Intervalo } \sqrt{\frac{p \cdot q}{n}} \cdot 2,57 = \sqrt{\frac{0,75 \cdot 0,25}{17}} \cdot 2,57 = 0,26 \quad (1)$$

El intervalo calculado expresa que, con un porcentaje de respuestas coincidentes del 75 %, se satisface la condición prevista y, por tanto, puede realizarse la asignación de la estrategia Y a la categoría X.

Procedimiento

A partir de los resultados obtenidos en la validación del modelo conceptual, se estableció un procedimiento para su implementación basado en los principios de participación, integración, carácter cíclico y orden lógico con que toda actividad debe ser concebida y ejecutada (figura 1).

Etapa I: contexto de trabajo (3 meses). Permite crear, asignar responsabilidades y preparar un equipo multidisciplinario, dirigido por el Consejo Territorial de Cuencas Hidrográficas (CTCH) e integrado por representantes del Ministerio de Ciencia Tecnología y Medioambiente (CITMA territorial), Centro de Prevención de Riesgos y Desastres (CPRD), Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), Ministerio de la Industria Alimenticia (MINAL), actores sociales interesados en la temática y representantes de universidades o centros de investigación que fungirán como asesores. Durante la etapa se contratarán las entidades que va a realizar las evaluaciones analíticas.

Etapa II: diagnóstico (2 años). Consta de las siguientes fases:

Caracterización medioambiental: En ella se establece el probable modelo de exposición sitio-específico (posible contaminante, fuente, ruta de exposición y receptores) mediante la recopilación y elaboración de un resumen de la información preexistente: descripción físico-geográfica, caracterización hidrológica e hidrográfica, posibles focos contaminantes y el resumen de investigaciones anteriores en el área sobre contaminación por MP. Las rutas que no se justifique su monitoreo, fueron descartadas del análisis.

Preparación y planificación: El equipo de asesores diseña e imparten un programa de capacitación al personal designado para la toma de muestras de las matrices agua, aire, suelo y sedimentos. El muestreo se planifica utilizando el criterio de "peor escenario" ⁽¹⁹⁾ para cada matriz, indicando número de muestras, réplicas, métodos de recolección, tratamiento de las muestras y equipo de lectura en cada caso. La evaluación se hará semestralmente.

Evaluación analítica de las matrices abióticas: Genera la base de datos físico-química (MP y análisis complementarios) que permite interpretar adecuadamente, mediante la comprobación de su variabilidad espacial, si existe o no contaminación y su severidad, acorde con los indicadores seleccionados por el grupo de expertos y los análisis complementarios (pH, conductividad eléctrica, potencial de oxidación-reducción, materia orgánica, aniones y cationes mayoritarios, granulometría, sólidos totales en suspensión).

Interpretación de datos y categorización: Se realiza para cada unidad hidrológica señalando si los indicadores cumplen o no los niveles de referencia. Para el caso particular de



Fig. 1. Desarrollo del procedimiento de monitoreo y gestión de la contaminación por metales pesados en sistemas fluviales de Cuba.

los lantánidos (REE), las variaciones en el comportamiento en “hoja de serrucho”, serán atribuidas a contribuciones antrópicas. ⁽²⁰⁾

Se categoriza cada unidad hidrológica de acuerdo a los criterios establecidos para cada indicador: si se asigna la categoría I, el ecosistema puede ser explotado sin riesgo ecológico ni humano y el procedimiento se detiene; si no, se clasifica la contaminación de acuerdo a los criterios establecidos por el grupo de expertos y se pasa a la etapa siguiente del procedimiento.

Comunicación de los resultados y toma de decisiones: La entidad contratada prepara un informe de los resultados obtenidos. Se diseña el sistema de respuesta temprana (SRT) a partir de la metodología de análisis comparativo de riesgos ⁽²¹⁾ determinando la jerarquía de los problemas y vinculándolos con las estrategias que pueden darles solución.

Etapa III: alcance de la contaminación (2 años). La etapa se diseñó de forma que se preparara, planificara, evaluara y caracterizara el impacto de la contaminación sobre la salud del ecosistema y, sobre la base de esos resultados, se decidiera preparar, planificar, evaluar y caracterizar el impacto de la contaminación sobre la salud humana.

Preparación y planificación: Se diseña e imparte una capacitación al personal que tomará las muestras biológicas (centro contratado) y al personal que aplicará el cuestionario para la recopilación de los datos individuales de las poblaciones aledañas (centro asesor).

Se comprueba la presencia de los siguientes biomonitores: *T. dominguensis*; *E. crassipes*; *O. sativa*; *Lactuca sativa*, L.; *Oreochromis* spp., *T. tinca* y *C. gariepinus*. Deben planificarse los detalles del muestreo: número de muestras representativas, método de recolección y conservación y transportación. La evaluación se realizará semestralmente.

La fase de planificación para la evaluación del impacto sobre la salud humana tiene varias tareas:

- Ajustar el modelo conceptual sitio-específico según los resultados analíticos recogidos hasta el momento (incluidos los biomonitores).
- Recopilar la información para determinar el área de influencia de la contaminación.
- Recopilar datos individuales (mediante encuestas semiestructuradas) relacionados con la exposición a metales pesados a partir de la ingesta de peces y plantas (peso de la persona, edad, unidades consumidas mensualmente, frecuencia de consumo). El peso de la ración se obtiene a partir de los datos registrados por el Instituto de Higiene y Epidemiología ⁽²²⁾ o a partir de la determinación directa (masado). El tamaño de la muestra se calcula a partir del procedimiento de Cochran. ⁽²³⁾

Evaluación del impacto: Crea la base de datos químicos-físicos y biológicos, que permite determinar el impacto de la contaminación sobre la biota del ecosistema, a través de la evaluación de los indicadores, definidos por el grupo de expertos, y los análisis complementarios anteriormente referidos. Además, permite determinar si existe riesgo (potencial o real) para la salud humana por la contaminación del sitio, incluyendo solo las vías de exposición significativas que se hayan caracterizado completamente y los metales que indiquen contaminación en cada vía. El cálculo se realizará para cada persona encuestada (datos individuales), estableciendo una base de datos asequible para la discusión y toma de decisiones.

Interpretación de los datos y categorización: Se caracterizan los impactos de acuerdo a los criterios de referencia establecidos para cada indicador.

Comunicación de los resultados: Las entidades responsables preparan un informe que se discute con el grupo multidisciplinario de trabajo.

Etapa IV: respuesta (2 años y medio). Permite, a partir del trabajo grupal, evaluar los resultados de la implementación del SRT, actualizar el listado de problemas medioambientales, establecer las estrategias que se implementarán en el territorio y estructurar e implementar un plan de acción que permita dar solución a los problemas priorizados. Esta etapa reevalúa los indicadores establecidos (variabilidad temporal) y chequea la evolución del ecosistema a partir del cálculo del índice de influencia (VI), de la siguiente forma:

- Se seleccionan los indicadores utilizados y se le otorga valor 1 a las variables asociadas (tabla 1).
- Se cuenta la cantidad de puntos posibles totales para cada dimensión.
- Se establece una escala en percentiles (10, 30 y 70) y se le asigna la siguiente clasificación:

- $VI \leq 10$ - El sistema responde negativamente. Cambie el plan de manejo.
- $11 \leq VI \leq 30$ - Revisar los elementos del plan que inciden sobre las variaciones negativas. Continuar a partir del ajuste realizado.
- $31 \leq VI < 70$ - Continuar el plan, puede ser que el sistema necesite un tiempo mayor de recuperación.
- $VI \geq 70$ - El sistema responde favorablemente. Continuar con el plan.

- Se determina la evolución de cada variable otorgando la siguiente puntuación: favorable (1); sin cambios (0) y desfavorable (-1).
- Se suman algebraicamente las puntuaciones relativas a las variables de las matrices abióticas. Se realiza la misma operación con las variables de salud del ecosistema y salud humana.
- $VI = \sum \frac{\text{puntuación de cada variable}}{\text{puntuación máxima para cada dimensión}} * 100$ (2)
- Se clasifica el éxito del manejo a partir de la escala de colores establecida, obteniéndose tres valores del índice de influencia: VI_{ma} (matrices abióticas); VI_e (salud del ecosistema y VI_h (salud humana). Los resultados de VI van a condicionar un nuevo ciclo de manejo.

RESULTADOS

Diseño y validación del modelo conceptual. El coeficiente de Kendall fue de 0,62 para la fase preliminar y 0,83 para la fase confirmatoria para un 95 % de confianza, por lo que, los resultados que se muestran a continuación, se consideran válidos según Rueda-Jaimes. ⁽²⁴⁾

Dimensiones, categorías e indicadores

El modelo conceptual (figura 2) se compone de 2 subsistemas (monitoreo y respuesta) que explican cómo se logra la

reducción del grado de contaminación y la mitigación de los efectos causados por las presiones contaminantes, a partir del monitoreo adecuado de indicadores que integran las diferentes dimensiones de la contaminación (presencia, severidad e impacto) y el diseño e implementación de un plan de acción.

De acuerdo a la consulta realizada, el 100 % de los expertos consideró que las dimensiones propuestas (presencia, severidad, impacto y tendencia) tienen un alto grado de pertinencia (82,4 %), relevancia (76,6 %) y coherencia (82,4 %). El sistema de categorías fue catalogado como muy pertinente (82,4 %), muy relevante (71,6 %) y muy coherente (71,6 %). Este está integrado por 4 categorías que definen la magnitud de la contaminación:

- Categoría I: no contaminado.
- Categoría II: contaminado en las matrices abióticas, sin afectaciones a la biota.
- Categoría III: contaminado en las matrices abióticas, con afectaciones a la salud del ecosistema, pero sin riesgo para las poblaciones humanas.
- Categoría IV: contaminado en las matrices abióticas, con afectaciones a la salud del ecosistema y riesgo para las poblaciones humanas.

Se seleccionaron 14 indicadores para formar parte del subsistema monitoreo, que se encuentran resumidos en las tablas 1, 2 y 3. Fueron clasificados 13 como muy adecuados y 1 bastante adecuado (PLH). El sistema de indicadores propuesto permite realizar la caracterización de la contaminación a partir de sus niveles de referencia, que fueron catalogados por los expertos como muy adecuados (76,4 %) y bastante adecuado (24,6 %).

Selección de las estrategias más adecuadas por cada categoría

El análisis de la correspondencia en las respuestas del grupo de expertos (superior al 75 %) indica que existen estrategias transversales, cuya aplicación no depende de las categorías propuestas, ya que refuerzan las características de integración y participación del modelo conceptual que rige el procedimiento y, por tanto, son aplicables en cualquiera de ellas. Estas son: la aplicación de instrumentos de prevención, regulación y control; la divulgación de la información científica; la implementación de programas de educación ambiental y la creación de espacios de participación ciudadana.

La implementación de programas de lucha contra las ilegalidades y de reducción de fuentes contaminantes (puntuables y difusas), se recomiendan a partir de la asignación de la categoría II y en el SRT. Constituyen la respuesta inmediata

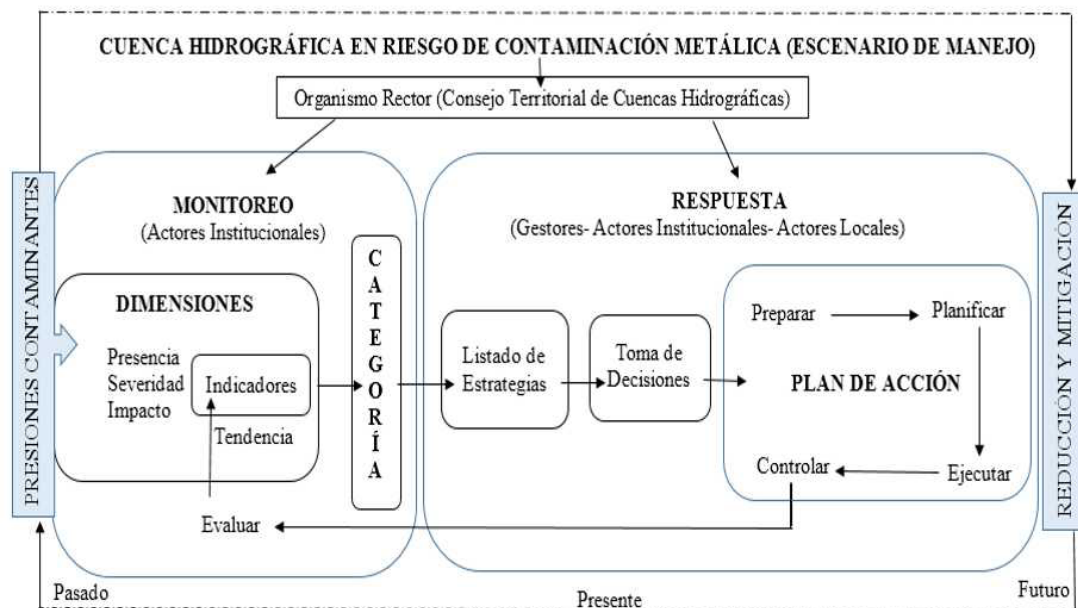


Fig. 2. Elementos que conforman el modelo teórico para el manejo de sistemas fluviales en riesgo de contaminación por metales.

ante la certeza de contaminación y forman parte del Programa Nacional de Disminución de la Carga Contaminante. ⁽²⁵⁾

La aplicación de las estrategias relacionadas con la elaboración de guías de calidad de suelos y sedimentos, la determinación de valores de referencia sobre riesgo ecológico y humano y su monitoreo, brindan un marco legal imprescindible para la gestión. Su puesta en práctica permitirá, además, adecuar los niveles de referencia utilizados para el cálculo de los indicadores.

Uno de los problemas más comunes es cuándo se debe intervenir un ecosistema contaminado y cómo hacerlo. Para ello los expertos recomiendan:

- Monitorear la atenuación natural en ecosistemas en categoría II, donde los indicadores de severidad establezcan enriquecimiento y riesgo ecológico moderado, y los análisis complementarios indiquen baja capacidad de movilización de MP.
- Establecer un programa de contención *in situ* para ecosistemas en categoría II, donde los indicadores de severidad se clasifiquen como fuerte o severamente enriquecidos, el riesgo ecológico sea moderado o alto y los análisis complementarios indiquen baja capacidad de movilización de MP.
- Establecer un programa de remediación *in situ* para todos los ecosistemas en categoría III y IV y para los ecosistemas en categoría II, donde los indicadores de severidad se clasifiquen como fuertemente o severamente enriquecidos, el riesgo ecológico sea alto y los análisis complementarios indiquen alta capacidad de movilización de MP.

Implementación del procedimiento

Etapa I: contexto de trabajo. El equipo de trabajo multidisciplinario fue constituido por 10 personas provenientes de 6 instituciones del territorio (CTCH, CITMA, INRH, UNAH, Acuabana y CPRD) y 2 actores locales (pescadores de la derivadora Pedroso). La capacitación se realizó por parte de especialistas del grupo FITOPLANT de la Universidad Agraria de La Habana (UNAH), que a la vez fungió como entidad contratada para la evaluación analítica.

Etapa II: diagnóstico (periodo 2013-2014).

Caracterización medioambiental: Se observa que existen 4 unidades hidrológicas, 2 de carácter lótico (ríos Ganuza y Mampostón) y 2 léntico (derivadora Pedroso y presa Mampostón). Se reconocen un total de 16 focos contaminantes puntuales. ⁽⁴³⁾ Salvo la ronera San José, el resto de las instituciones no tienen caracterizados sus residuales. Los sistemas de tratamiento de las empresas que vierten directamente a los cuerpos de agua no existen, están mal diseñados o funcionan inadecuadamente, ⁽⁴⁴⁾ por lo que la ruta principal de exposición es: agua-sedimentos-peces-hombre. Las emisiones atmosféricas producidas por la fábrica de asfalto, no son objeto de preocupación, pues la fábrica consta con tecnología ecológica y un funcionamiento inferior a los 15 años. ⁽⁴⁴⁾ Aunque la subcuenca se explota agrícola, ⁽⁴⁵⁾ estudios anteriores indican que los suelos se encuentran ligeramente enriquecidos, ⁽⁴⁶⁾ por lo que se consideró necesario realizar el muestreo de plantas de arroz (*O. sativa*), con vistas a comprobar el peligro de exposición del hombre. ^(47,48)

Tabla 1. Conjunto de indicadores para la evaluación de las diferentes dimensiones de la contaminación por metales pesados: Dimensión presencia

Indicador	Porcentaje de respuestas (%)			Clase Delphi	Interpretación y caracterización
	A	BA	MA		
Contenido de MP en agua ^(8,10,11) (MPagua)	5,8	58,8	35,4	MA	Las concentraciones totales de MP en aire, agua, suelo y sedimento superan los criterios del instrumento de comparación. El ecosistema se encuentra contaminado. Se clasifica la extensión de la contaminación: ⁽²⁸⁾ a) Puntual: si aparece en una sola unidad hidrológica. -Restringida: si el área afectada es inferior a 1 km. -Extensa: si el área afectada es superior a 1km. b) Diseminada: si aparece en varias unidades hidrológicas y en varias matrices, ya sea de forma restringida o extensa.
Contenido de MP en aire ⁽¹²⁾ (MPaire)	0	23,5	76,4	MA	Se clasifica la frecuencia de aparición en: a) Ocasional: aparece como contaminante en un solo muestreo (25 %). b) Frecuente: aparece en 2 muestreos (50 %). c) Regular: aparece en más de 2 muestreos (superior al 50 %).
Contenido total o pseudototal de MP en sedimentos y suelos ^(26,27) (MPsed y suelo)	11,8	11,8	76,4	MA	Se clasifica la peligrosidad de la contaminación: ⁽²⁸⁾ a) No peligroso: RfD > 0,05; RfC > 0,18; CSfo < 0,05 y CSfd < 0,014. b) Poco peligroso: RfD: 5/10 ⁻⁴ -5/10 ⁻² ; RfC: 1,8/10 ⁻³ -1,8/10 ⁻¹ ; CSfo: 0,5-5 y CSfd: 1,4/10 ⁻² -1,4. c) Peligroso: RfD: 5/10 ⁻⁶ -5/10 ⁻⁴ ; RfC: 1,8/10 ⁻⁴ ,8/10 ⁻³ ; CSfo: 5-50 y CSfd: 1,4-14. d) Muy peligroso: RfD < 5/10 ⁻⁶ ; RfC < 1,8/10 ⁻⁴ ; CSfo >50 y CSfd >14.

Leyenda: D, dimensión; A, adecuado; BA, bastante adecuado; MA, muy adecuado; RfD, dosis oral de referencia (mg/kg/día-1); RfC, concentración de referencia inhalada (mg.m-3); CSfo, factor de carcinogenicidad oral (mg/kg/día-1); CSfd, factor de carcinogenicidad por inhalación (mg/m-3); MP, metales pesados.

Preparación y planificación: El equipo de asesores diseñó e impartió un programa de capacitación a 2 técnicos y 3 estudiantes de pregrado de la carrera de Agronomía. Se decidió que la estrategia de muestreo a seguir debía ser aguas arriba y aguas debajo de los principales focos contaminantes puntuales. Cada muestreo (MP y análisis complementarios) se planificó para 16 puntos en aguas superficiales: 4 en el afluente Ganuza (G1-G4), 5 en el río Mampostón (M1-M5), 4 en la derivadora Pedroso (P1-P4) y 3 en la presa Mampostón (PM1-PM3).^(41,47) Los procedimientos analíticos utilizados se resumen en la tabla 2.

Evaluación analítica de las matrices abióticas: La evaluación de la calidad químico-física del agua superficial de la subcuenca Mampostón permitió comprobar que las estaciones G2 y G3 del río Ganuza y M5 (río Mampostón) presentaron aportes orgánicos y de sales solubles que establecen limitaciones para su uso. Las concentraciones medias de Pb disuelto superaron los límites permisibles en las estaciones G1, G2, G4, M2, M3 y P1. Los valores máximos reportados

fueron: 345,8 µg/L-1 (M3); 236,6 µg/L-1 (P1); 85,5 µg/L-1 (G2).^(49,50)

El estudio de los sedimentos confirmó la presencia de contenidos elevados de Cu, Co, Pb, Cd y Zn en las fracciones arcillosas/coloidales de los sedimentos en las estaciones del río Ganuza,⁽⁴⁹⁾ con concentraciones medias de Cu (298,1 mg/kg⁻¹), Zn (312,4 mg/kg⁻¹) y Cd (5,1 mg/kg⁻¹) superiores en G2, respecto al resto de la unidad hidrológica de acuerdo al ANOVA simple realizado para determinar la variabilidad espacial ($p < 0,05$). En el río Mampostón existen concentraciones elevadas de As en el punto M5 (10,5 mg/kg⁻¹), que supera las concentraciones encontradas en el resto de la subcuenca. También, en esta unidad hidrológica, el contenido de Pb (108,76 mg/kg⁻¹) en el punto M3, es superior al resto de los puntos.

La contaminación se caracterizó como diseminada-restringida, frecuente y muy peligrosa. Los análisis complementarios indicaron un elevado pH, altas concentraciones de materia orgánica, arcilla y calcio, lo que indica que los MP se van

Tabla 2. Conjunto de indicadores para la evaluación de las diferentes dimensiones de la contaminación por metales pesados. Dimensión severidad

Indicador	Porcentaje de respuestas (%)			Clase Delphi	Criterios para la interpretación
	A	BA	MA		
<p>Factor de enriquecimiento (EF) ⁽²⁹⁾</p> <p>EF</p> $= \frac{Ci(m)/CFe(m)}{Ci(mr)/CFe(mr)}$	5,8	29,4	64,8	MA	<p>El ecosistema no se encuentra contaminado si $EF_{sed} < 1^{(30)}$ y $EF_{su} < 2^{(31)}$ en todos los puntos y para todos los metales evaluados.</p> <p>El ecosistema se encuentra contaminado si:</p> <p>a) $EF_{sed} > 1$ en al menos un punto y un metal ⁽³⁰⁾ y se clasifica el enriquecimiento en sedimentos en:</p> <p>ligera: $1 < EF_{sed} < 3$</p> <p>moderada: $3 < EF_{sed} < 5$</p> <p>fuerte: $5 < EF_{sed} < 3$</p> <p>severa: $EF_{sed} > 10$</p> <p>b) $EF_{su} > 2$ en al menos un punto y un metal ⁽³¹⁾ y se clasifica el enriquecimiento en suelo:</p> <p>moderado: $2 < EF_{su} < 10$</p> <p>fuerte: $11 < EF_{su} < 20$</p> <p>severo: $21 < EF_{su} > 40$</p> <p>extremo: $EF_{su} > 40$</p>
<p>Cociente de riesgo ecológico (SQG-Q) ⁽³²⁾</p> $PEL - Qi = \frac{C(i)}{PEL(i)}$ $SQG - Q = \frac{\sum_{i=1}^n PEL - Qi}{n}$	0	35,2	64,8	MA	<p>Se clasifica el posible riesgo ecológico del sedimento contaminado (SQG-Q): ⁽³²⁾</p> <p>no impactado: $SQG-Q < 0,1$</p> <p>impacto moderado: $0,1 < SQG-Q < 1$</p> <p>alto impacto: $SQG-Q > 1$</p>

Leyenda: D, dimensión; A, adecuado; BA, bastante adecuado; MA, muy adecuado; Ci, concentración del metal i; CFe, concentración de Fe; m- muestra; mr, material de referencia; PEL-Qi, cociente del nivel de efecto probable; PEL(i), concentración donde es frecuente que ocurra efectos adversos para el metal i; (26) n, número de metales analizados.

a asociar a las fracciones finas del sedimento, siendo este, la matriz de mayor impacto para la biota local. ⁽⁴⁹⁾

El indicador EF muestra enriquecimiento moderado por Pb y As en los puntos anteriormente referidos, excepto G2, donde el enriquecimiento por Pb se clasifica como severo. Por otra parte, el indicador SQG-Q indica que el 100 % de los sedimentos estudiados en los ríos y la derivadora Pedroso, probablemente generen efectos adversos moderados- severos. Los contenidos de tierras raras (REE) tienen un origen natural. ⁽⁵⁷⁾

Interpretación de datos y categorización: La unidad hidrológica presa Mampostón se encuentra en la categoría I (no contaminada), ya que no se evaluó ningún punto de muestreo con elevadas concentraciones de MP en aguas y sedimentos

a lo largo de los 2 años de evaluación. La clasificación del resto de las unidades hidrológicas no puede ser determinada en esta fase y debe continuarse con la evaluación de la siguiente etapa del procedimiento.

Comunicación de los resultados y toma de decisiones

Las principales presiones contaminantes que determinan los resultados explicados anteriormente se determinaron en un taller participativo con 21 actores institucionales, sociales y decisores del territorio.

Las presiones en el río Ganuza son consideradas las de mayor impacto (valores de jerarquía = 63-60), relacionadas con la rotura de las calderas de la pasteurizadora El Aljibe.

Tabla 3. Conjunto de indicadores para la evaluación de las diferentes dimensiones de la contaminación por metales: Dimensión impacto

Indicador A	Porcentaje de respuestas (%)			Clase Delphi	Criterios para la interpretación
	BA	MA			
<p>Porcentaje de plantas cuyo contenido de MP supera el valor de fitotoxicidad en hojas (PDF) ^(33,34,35,36)</p> $PDF = \frac{PHCF}{PT} * 100$	0	17,6	82,4	MA	<p>Las concentraciones de MP en hojas de las plantas evaluadas superan el valor de fitotoxicidad. Se clasifica el impacto sobre las plantas en base al porcentaje que supera el criterio anterior (PDF):</p> <p>Si PDF <10 %: impacto bajo.</p> <p>Si PDF: 10-50 %: impacto moderado.</p> <p>Si PDF > 50 %: impacto alto.</p>
<p>Factor de Bioconcentración (FBC) ⁽³⁷⁾</p> $FBC = \frac{Cx (raiz)}{Cx (hábitat)}$	0	29,4	70,6	MA	FBC > 1 El metal se está concentrando en la planta con respecto al hábitat donde se desarrolla.
<p>Cociente de peligro ecotoxicológico en peces (CPeT) ⁽³⁸⁾</p> $CPeT = \frac{\sum_{x=1}^n \left(\frac{C(x)+TI+FCE}{PC} \right)}{NOAEL}$	5,8	46,9	46,9	MA	<p>Si CPeT < 1- no hay peligro ecotóxicológico.</p> <p>Si CPeT > 1- existe peligro ecotóxicológico y se clasifica: potencial: si ocurre solo para la concentración máxima. real: si ocurre para la media aritmética.</p>
<p>Factor de bioacumulación (FBA) ⁽³⁷⁾</p> $FBA = \frac{Cx (músculo)}{Cx (hábitat)}$	5,8	46,9	46,9	MA	FBC > 1. El metal se está concentrando en la planta con respecto al hábitat donde se desarrolla.
<p>Prevalencia de lesiones histopatológicas en músculo de peces (PLH) ^(39,40)</p> $PLH = \frac{PeCLH}{PeT} * 100$	29,4	70,6	0	BA	<p>PLH en peces indica efecto tóxico. Se clasifica el impacto sobre la comunidad ictea:</p> <p>Si PLH < 10 %-bajo</p> <p>Si PLH entre 10 % - 50 %- moderado</p> <p>Si PLH > 50 % - alto</p>
<p>Porcentaje de plantas con contenidos de MP en fruto agrícola por encima de valores de referencia (PDN) ⁽¹³⁾</p> $PDN = \frac{PCVR}{PT} * 100$	0	23,5	76,4	MA	<p>Las concentraciones de MP en el fruto agrícola de plantas de consumo humano son superiores a las normas de referencia. Se clasifica el impacto esperado en el ser humano:</p> <p>Si PDN < 10 % del fruto agrícola (muestras): impacto esperado bajo.</p> <p>Si 10 % < PDN < 50 % del fruto agrícola (muestras): impacto esperado moderado.</p> <p>Si PDN > 50 % del fruto agrícola (muestras): impacto esperado alto.</p>

Salud de los ecosistemas

Salud humana

Tabla 3. (continuación)

Indicador A	Porcentaje de respuestas (%)		Clase Delphi	Criterios para la interpretación	
	BA	MA			
Porcentaje de peces con contenido de MP en músculo ventral está por encima de los valores de referencia (PDP) ⁽¹³⁾ $PDP = \frac{PeCVR}{PeT} * 100$	6,0	47,0	47,0	MA	Las concentraciones de metales pesados en los músculos de peces de consumo humano son superiores a lo regulado por la norma de referencia. Se clasifica el riesgo de impacto en ser humano: Si PDP < 10 %: impacto esperado bajo. Si 10 % < PDP < 50 %: impacto esperado moderado. Si PDP > 50 %: impacto esperado alto.
Índice de peligro crónico no carcinogénico (HI) ⁽⁴²⁾ $HQ_i = \frac{(C_i * DE * FCE)}{P} / Rf$ $HI = \sum_{j=1}^n HI_j = \sum_{i=1}^m HQ_i$	0	23,5	76,5	MA	Se evidencia peligro de desarrollar enfermedades crónicas (HI > 1). Se caracteriza la extensión del peligro: Solo HI potencial > 1 para los sectores de la población en contacto directo con el área contaminada-peligro potencial restringido. Solo HI potencial > 1 para otros sectores de la población del área de influencia-peligro potencial diseminado. HI real > 1 para los sectores de la población en contacto directo con el área contaminada - peligro real restringido. HI real > 1 para otros sectores de la población del área de influencia-peligro real diseminado.
Índice de riesgo carcinogénico (ELCR) ⁽⁴²⁾ $ELCR = \frac{C * DE * FCE}{P} * CSFo$	0	11,8	88,2	MA	Se evidencia riesgo de desarrollar cáncer (ELCR evaluado > ELCR referencia). Se caracteriza la extensión del riesgo: Solo ELCR potencial > ELCR referencia para los sectores de la población en contacto directo con el área contaminada- riesgo potencial restringido. Solo ELCR potencial > ELCR referencia para otros sectores de la población del área de influencia- riesgo potencial diseminado. ELCR real > ELCR referencia para los sectores de la población en contacto directo con el área contaminada - riesgo real restringido. ELCR real > ELCR referencia para otros sectores de la población del área de influencia-riesgo real diseminado.

Leyenda: D, dimensión; A, adecuado; BA, bastante adecuado; MA, muy adecuado; PHCF, plantas con concentraciones de metales pesados en hojas por encima del valor de fitotoxicidad; PT, plantas totales; PeCLH, peces con lesiones histopatológicas; PeT, peces totales; C(x), concentración máxima o media del metal x en sedimento (mg/kg⁻¹) o agua (µg/L⁻¹); NOAEL (µg/L⁻¹ o mg/kg⁻¹), concentración en agua y sedimento a la que no se observan efectos adversos para el metal x; ⁽⁴¹⁾ TI, tasa de ingestión: asumir igual a la tasa de ingestión de alimentos: 4 % del peso corporal; ⁽⁴²⁾ factor de corrección de la exposición (asumir un valor de 1); MP, metales pesados. HQ_i, peligro no carcinogénico para el metal i en una vía de exposición; C_i, concentración del metal i; DE, exposición diaria (datos generados por encuesta poblacional); Rf, dosis de referencia; ⁽⁴¹⁾ FCE, factor de corrección de la exposición (datos generados por encuesta poblacional, si no existen se considera 1); P, peso de cada persona evaluada (kg); HI_j, peligro no carcinogénico para la vía j como la sumatoria de todos los metales significativos en esa vía (i=1-m); CSFo, factor carcinogenicidad. ⁽⁴¹⁾

Por otra parte, el empleo de los puentes para el lavado automotriz, es considerado el segundo problema de mayor impacto (valor de jerarquía = 60-50).

Un tercer grupo de problemas (valor de jerarquía = 45) se genera por el vertimiento de residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de materia orgánica animal y desechos de fincas pecuarias.

Se concibieron un total de 11 tareas para el SRT. Las de mayor impacto están relacionadas con el control de las ilegalidades y las inspecciones ambientales, ya que tienen repercusión a corto plazo. Se planificaron acciones para elevar la percepción de riesgo en la comunidad como talleres científicos, charlas comunitarias y divulgación de información por medios de comunicación masiva (radio y prensa escrita).

Etapa III: alcance de la contaminación (periodo 2015-2016).

Preparación y planificación: Se capacitaron 5 estudiantes de pregrado de la carrera de Medicina Veterinaria, 2 técnicos y 3 profesores del grupo FITOPLANT para el trabajo con muestras biológicas. Para la aplicación de la encuesta epidemiológica se capacitaron 5 estudiantes de pregrado de las carreras de Agronomía y Medicina Veterinaria y 3 profesores de la UNAH.

Los biomonitores propuestos se identificaron en los siguientes puntos de muestreo:

- Plantas: *T. dominguensis* (puntos P1 y P2); *E. crassipes* (punto P4) y *O. sativa* (punto M2).
- Peces: *Oreochromis* spp., *T. tinca* y *C. gariepinus* (Derivadora Pedroso).

El muestreo se concibió según se muestra en la tabla 4. El área de influencia de la contaminación para las poblaciones

Tabla 4. Detalles del procesamiento analítico de muestras durante las fases de evaluación de las etapas II, III y IV del procedimiento

Matriz	Determinación	Método	Equipo
Agua N = 16 (3 réplicas)	MP y elementos mayoritarios	Medición directa	ICPMS- ICPOES (lectura) material de referencia: SLRS-5. ⁽⁵¹⁾
	COD	Oxidación catalítica a 680 °C	TOC-5000 Shimadzu
	COP	Cromatografía en fase gaseosa	NA 2100 Protein de ThermoFisher
Sedimento N = 16 (3 réplicas)	pH, CE	Potenciometría	pHmetro (electrodo de vidrio combinado para pH/CE y de platino/calomel para Eho)
	pH, CE, Eho		
	MP total	Fluorescencia de rayos X	Espectrómetro con detector Si (Li). Estándar utilizado: IAEA-SL1 ⁽⁵²⁾ .
	MP pseudototal y elementos mayoritarios	Digestión biácida (HNO ₃ /HCl/H ₂ O ₂ (v/v 3/1/2))	Digiprep (digestión) y ICPMS- ICPOES (lectura). Estándares utilizados: WQB-1 ⁽⁵³⁾ y LKSD-3 ⁽⁵⁴⁾ .
	MP biodisponible	Extracción en EDTA 0,05N	
	Materia orgánica Granulometría	Ignición Tamizado (fracción total). Difracción de Rayos X (fracción < 63µm)	Horno 580 °C LA-950V2 Horiba-Partica
Plantas macrófitas (n=20; (muestra compuesta de 5 plantas)	MP (tallo, hoja y raíz) Puntos de muestreo: P1 y P4	Digestión biácida (HNO ₃ /HCl (v/v 2/1))	Digiprep (digestión) y ICPMS- ICPOES (lectura). Estándar utilizado: NIST-SRM 1547. ⁽⁵⁵⁾
	Arroz (n=20; (muestra compuesta de 5 plantas)	MP (raíz y grano) Punto de muestreo: M2	
Peces (n = 10 % de la pesca diaria en 2 meses) Total Tilapia: 52 (I) y 31 (T) Tenca: 17 (I) Claria: 27 (I) y 16 (T)	MP (músculo) Puntos de muestreo: P1-P4	Digestión biácida (HNO ₃ /HCl (v/v 2/1))	Digiprep (digestión) y ICPMS- ICPOES (lectura). Estándar utilizado: Tort-2 ⁽⁵⁶⁾
	Histopatología (músculo)	Conservación: formol (10 %) Tinción: hematoxilina-eosina. Microscopía óptica	Corte: micrótopo LEUZ (inclusión en parafina) Observación: microscopio óptico 40 y 100X.

Leyenda: n, número de muestras por muestreo; MP, metales pesados; COD y COP, Carbono orgánico disuelto y particular respectivamente; CE, conductividad eléctrica; Eho, potencial de oxidación-reducción; I, impacto; T, tendencia.

aledañas se determinó a partir de las rutas de venta trazadas por los pescadores entrevistados ($n = 55$) en la derivadora Pedroso. Los resultados indicaron que el 21 % de la Claria y el 31 % de la Tilapia, son utilizados para autoconsumo, quedando el excedente disponible para la venta en los poblados Ayala, ICA, Zaragoza, Catalina de Güines y Güines. La Tenca es un pescado de poca disponibilidad, pues la pesca no es abundante. Se entrevistaron 2939 personas, reportándose 944 consumidores de pescado (32,1 %).⁽⁴⁸⁾

Evaluación del impacto de la contaminación

En plantas macrófitas, las concentraciones de MP en hojas son superiores al valor de fitotoxicidad en el 32 % de las plantas muestreadas (PDF). Este porcentaje se refiere a los metales Cr, As y Cd (16 %, 28 % y 32 % respectivamente) lo que se corresponde con el efecto ecológico probable predicho a través del indicador SQG-Q.⁽³²⁾

Se comprobó que el agua de aniego utilizada para el cultivo del arroz (*O. sativa*) tiene bajos contenidos de MP, que en los suelos hay bajos contenidos de Pb y Cr y algo superiores de Zn, Co, Cu y Cd y que, aunque los MP se bioacumularon en las raíces de las plantas, sus contenidos en el grano son inferiores a los establecidos en la norma cubana para consumo humano.⁽¹³⁾ Los resultados del indicador PDP indican, de acuerdo con las regulaciones cubanas,⁽¹³⁾ que las concentraciones de Cd no son recomendables para el consumo en el 37,5 %-44,0 % de los peces evaluados, mientras que el Pb es elevado en el 14 %-20 % de los mismos.

El cociente de peligro ecotóxico (CPeT) para la fauna ictia indica peligro real relacionado con los metales Cd y Pb en las tres especies de peces estudiadas, y de As para *C. gariepinus* y *T. tinca*. El cociente supera la unidad para las concentraciones máximas reportadas en el 28 % de los peces (CPeT potencial) y aumenta hasta un 34 % si se realiza la evaluación a partir de la concentración media (CPeT real).

El indicador PLH se estimó después de comprobar, mediante una prueba de independencia entre variables, que existe relación entre la aparición de lesiones y la existencia de altas concentraciones de metales en los peces ($p < 0,01$ se rechaza la hipótesis nula), lo que permite utilizar el indicador para evaluar la ecotoxicidad de los metales pesados. El 42 % de las clarias, 76 % de la tenca y 33 % de las tilapias presentaron concentraciones elevadas de metales pesados y lesiones tisulares según se observa en la figura 3 y tabla 5.

Se alcanza el límite de peligro crónico (HI real > 1) cuando el consumo de pescado contaminado alcanza los 81 g/día⁻¹, lo que corresponde a la ración diaria del 10,3 % de la población,⁽⁴⁸⁾ (pescadores y sus familias). Estos valores pueden inducir daño gastrointestinal,⁽⁵⁸⁾ trastornos neurológicos y enfermedades del corazón^(59,60) y trastornos hematológicos.⁽⁶¹⁾ En menores de edad, se alcanza el límite de peligro crónico potencial en el 38 % de encuestados, sin embargo, no llega a sobrepasarse el límite real.⁽⁴⁸⁾ ELCR fue estimado a partir de $5,8 \times 10^{-4}$, de acuerdo a la metodología de la USEPA.⁽⁴²⁾ Los valores de ELCR potencial se encontraron en el 32,5 % de la población adulta y en el 40,2 % de los menores de edad, mientras que el ELCR real se produce en el 15,2 % de la población adulta y en el 9,7 % de los menores de edad (pescadores y sus familias).

Interpretación de los datos y categorización: Las 3 unidades hidrológicas en estudio presentan Categoría IV. La clasificación del peligro crónicas y del riesgo carcinogénico es real-restringido.

Comunicación de los resultados: Se preparó un informe, en el que se detallaron los hallazgos de la etapa y se informó, tanto al grupo multidisciplinario, como al Consejo de la Administración Provincial (CAP).

Etapa IV: respuesta (periodo 2017-2018). El chequeo de la implementación de la SRT se realizó en un taller con representantes del gobierno, el CPRD de los municipios San José

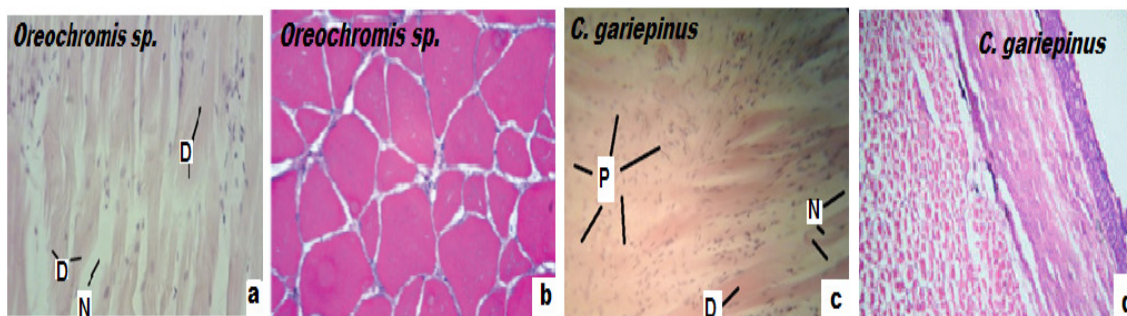


Fig. 3. Observación microscópica de fibra muscular ventral de peces comerciales de la derivadora Pedroso durante la etapa de respuesta (a y c- peces capturados en la derivadora Pedroso; b y d- imágenes histológicas sin signos patológicos de cada una de las especies evaluadas (40,41,62). Manifestaciones histopatológicas identificadas: D: degeneración; N: necrosis y P: proliferación fibroblástica. NOAEL- máxima concentración de metales pesados a la que no se han reportado efectos adversos.

de las Lajas y Güines, para un universo de 45 personas. Se logró controlar el vertimiento de aguas albañales a la derivadora Pedroso, se participó en jornadas ambientales en la localidad de Ayala, 2 talleres del grupo FITOPLANT y acciones de concientización a través de la radio y el periódico provincial.

A partir de este análisis, se decidió que el listado de presiones contaminantes establecidas en la etapa II, era adecuado para un nuevo ciclo de trabajo, omitiendo el problema relacionado con el vertimiento de aguas albañales en la derivadora Pedroso.

De las estrategias propuestas para un ecosistema en categoría IV, se propuso continuar con las que se habían implementado para el SRT, readecuando sus tareas, introducir el monitoreo del riesgo a la salud humana y estudiar la remediación *in situ*. El plan de acción se enmarcó dentro del objetivo estratégico general de la Estrategia Ambiental Provincial.⁽⁶³⁾ Se planificaron 7 acciones basadas en las estrategias de control de las fuentes contaminantes, implementación del monitoreo en las diferentes matrices y lucha contra las ilegalidades. Se planificaron 8 acciones para el monitoreo del riesgo a la salud humana, incluidas la limitación del acceso al recurso contaminado y la búsqueda de una alternativa socialmente aceptable para sustituirlo, que fueron debatidas durante los talleres con el CAP.

Evaluación de la dimensión tendencia: los contenidos de Zn, Pb y Cd en sedimentos, podrían representar un bajo peligro para la biota de los ecosistemas evaluados, ya que se encuentran entre los valores de efecto ecológico no observable (TEL) y el probable (PEL) atribuyéndosele, según Long y Mc Donald, (32) un potencial de impacto inferior al 10 %. En el caso del metal Cu, las concentraciones en sedimentos, superan el valor del PEL para el ecosistema Ganuza (G2). La contaminación se caracterizó como puntual-restringida, frecuente y peligrosa. Las concentraciones de As se encuentran en valores normales.

El factor de enriquecimiento (EF) indica un enriquecimiento ligero ($1 < EF < 3$) para todos los MP. La mejoría en las condiciones de contaminación se manifiesta en un descenso del índice de riesgo ecológico (SQG-Q) en el río Ganuza (impacto moderado). La presa Mampostón mantiene la categoría I: no contaminado.

La bioacumulación en peces indica que el Zn presenta concentraciones en músculo superiores a los valores bio-disponibles en sedimentos, para ambas especies evaluadas (Claria y Tilapia) y CPET real > 1 en el 30 % de los peces. Los resultados anteriores se confirman a partir de que las evaluaciones histopatológicas, vuelven a mostrar relación entre la aparición de las lesiones y el contenido de MP en los peces, según la prueba de Chi-cuadrado, lo que se manifiestan en el 26 % de los ejemplares de *C. gariepinus* capturados y en el 32 % de *Oreochromis sp.*, encontrándose lesiones similares a las de la etapa anterior (v. figura 3).

La falta de correspondencia entre los resultados de las matrices abióticas y bióticas puede ser explicada a partir de las características de la acumulación-retención de los MP. Los MP esenciales tienen tiempos de retención inferiores al mes, produciéndose la excreción del 70 % del metal en este tiempo. (58,60) Sin embargo, en MP no esenciales (Cd y Pb) se produce una excreción inferior al 32 % en semanas, siendo retenido el resto del metal en órganos como hígado, piel o hueso por periodos prolongados, incluso superiores a los 26 años en animales de ciclos de vida largos y en el hombre.^(41,61)

El 23,4 % del total de peces muestreados, presenta concentraciones, de al menos un metal, por encima de los valores de referencia establecidos en Cuba⁽¹³⁾ y EUA,⁽⁶⁴⁾ por lo que la transmisión esperada al ser humano se clasifica como moderada.

En cuanto a las plantas, el porcentaje de muestras que superan el rango de fitotoxicidad, para al menos un metal, es de 32 %, principalmente por Cr, As y Cd.

Tabla 5. Prueba de independencia de hipótesis que relaciona las lesiones histopatológicas encontradas en peces y la elevada concentración de metales pesados en su músculo ventral

Prueba de independencia	Periodo 2015-2016					Periodo 2017-2018				
	Opción	PLH		Chi-cuadrado	p	Opción	PLH		Chi-cuadrado	p
		Sí	No				Sí	No		
Peces con concentraciones de metales pesados por encima del NOAEL en músculo ventral.	Sí	40	9	42,70	0,000	Sí	31	5	27,8	0,000
	No	7	40			No	0	11		
Razón de verosimilitud = 46,74 Lambda = 0,66					Razón de verosimilitud = 27,8 Lambda = 0,63					

Las evaluaciones de HI y ELCR durante el periodo 2017-2018 evidencian que existe disminución de la carga metálica total, por lo que HI es inferior al calculado para el periodo precedente. Sin embargo, las variables asociadas a ELCR no cambian o son superiores a las del ciclo anterior, ya que las concentraciones de As aumentan (Anexos)

Comunicación de los resultados y ajuste del plan de acción

Los resultados se discutieron en sesión del CAP y se presentaron como logros de la etapa la reparación de las calderas de El Aljibe y la construcción de la laguna de oxidación de la finca Aleida Fernández. Se realizó la capacitación de los activistas de medio ambiente de las empresas del territorio y se continuó la ejecución de las acciones de divulgación de la información científica (talleres FITOPLANT) y de educación ambiental (charlas, actividades en los Consejos Populares de los poblados ICA y Ayala e intervenciones en la radio y la prensa territorial). Se fomentaron acciones de participación ciudadana en la limpieza de los márgenes de la derivadora Pedroso.

Conclusiones

Se desarrolla un modelo conceptual para el manejo de la contaminación metálica en sistemas fluviales que permite la evaluación de la presencia, severidad, impacto y tendencia de la contaminación y brinda las herramientas para la selección e implementación de las estrategias de manejo más adecuadas en cada territorio.

Se establece un procedimiento para el manejo de la contaminación metálica en 4 etapas: contexto de trabajo, diagnóstico, alcance de la contaminación y respuesta. Dentro de ellas se desarrollan fases que permiten escalar las tareas y la marcha analítica para ahorrar recursos materiales y humanos.

La implementación del procedimiento en el sistema fluvial Pedroso-Mampostón permite categorizar sus 4 ecosistemas (presa Mampostón -Categoría I; río Ganuza, derivadora Pedroso y río Mampostón- categoría IV), así como, elaborar y ejecutar un plan de acción que ha logrado disminuir la carga contaminante en las matrices abióticas, lo que indica que el manejo es adecuado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. N'Guessan YM, Probst J L, Bur T, Probst A. Trace elements in stream bed sediments from agricultural catchments (Gascogne region. S-W France): where do they come from? *Science of the Total Environment*. 2009;407(8):2939-52.
2. Erdoğan Z, Ates DA. Determination of cadmium and copper in fish samples from Sir and Menzelet dam lake Kahramanmaraş, Turkey.

- Environmental Monitoring and Assessment. 2006;117:281-90.
3. Agah H, Leemakers M, Elskens M, Fatemi SMR, Baeyens W. Accumulation of trace metals in the muscles and liver tissues of five fish species from the Persian Gulf. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2009;157:499-514.
4. Yi YJ, Zhang SH. Heavy metal (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) concentrations in seven fish species in relation to fish size and location along the Yangtze River. *Environmental Science Pollution Research*. (2012;19:3989-96.
5. Monroy M, Maceda-Veiga A, de Sostoa A Metal concentration in water, sediment and four fish species from Lake Titicaca reveals a large-scale environmental concern. *Science of the Total Environment*. 2014;487:233-44.
6. EAUK (Agencia de Medioambiente del Reino Unido) Remedial Targets Methodology. Hydrogeological risk assessment for land contamination. Environmental Agency of United Kingdom. [Internet] 2006 [Consulta 07 oct 2020]. Disponible en: www.environment-agency.gov.uk/publications
7. CITMA (Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente). Estrategia Ambiental Nacional 2016-2020. 20p.
8. ONN (Oficina Nacional de Normalización) NC 27:2012. Norma cubana para el vertimiento de residuales al alcantarillado. Oficina Nacional de Normalización. 2012:12p.
9. ONN (Oficina Nacional de Normalización) (1999) NC 39: 1999. Calidad del aire. Requisitos higiénico-sanitarios. Oficina Nacional de Normalización. ICS: 13.040. 11p.
10. ONN (Oficina Nacional de Normalización) (2012). NC 827:2012. Norma Cubana para Agua Potable. Requisitos Sanitarios. Oficina Nacional de Normalización. 12p.
11. ONN (Oficina Nacional de Normalización) (1999) NC 22: 1999. Norma cubana para agua de uso en la acuicultura. 9p.
12. ONN (Oficina Nacional de Normalización) (1999) NC 27: 1999. Norma cubana para agua de uso recreativo. Especificaciones. 10p.
13. ONN (Oficina Nacional de Normalización) (2015). NC 493: 2015. Norma cubana para contaminantes metálicos en alimentos. Regulaciones sanitarias. 9p.
14. Linstone HA, Turoff M. The Delphi Method: techniques and application. Addison-Wesley publishing. Massachusetts. [Internet] 1975 [Consulta: 25 feb 2017]. Disponible en: <http://www.is.njit.edu/pubs/delphi/boo>
15. Hoddinott J Escogiendo indicadores de resultado de la seguridad alimentaria del hogar. En: Métodos para proyectos de desarrollo rural. Seguridad alimentaria en la práctica. Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI). Washington. DC. 2003:31-45.
16. López P. Contribución al desarrollo de la habilidad. Diagnóstico Patológico en la carrera de Medicina Veterinaria. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Pedagógicas. La Habana. 2005. 134p.
17. Hurtado de Mendoza S, Méndez D Sistema automatizado para método consulta experto (Versión 1.0) [Multiplataforma]. Ed. Cecofis. La Habana, Cuba. 2007
18. SPSS INC (2002) SPSS [Programa Estadístico]. - [s.l.]: SPSS INC. - 11.5.
19. IJC (International Joint Commission). On International joint Commission Activities Highlights of International Joint Commission's Biennial Meeting on Great Lakes Water Quality. Focus. [Internet]

- 1988;13(1). [Consulta: 13 abr 2016]. Disponible en: <https://ijc.org-focus-volume-13-issue-1-marchapril-1988>. ISSN 0832-6673
20. Alonso-Hernández CM, Conte F, Mistic C, Barsanti M, Gómez-Batista M, Díaz-Asencio M, Covazzini-Harriague A, Pannacciulli FG. An overview of Gulf of Batabanó (Cuba): Environmental features as revealed by surface sediment characterization. *Continental Shelf Research*. 2011;31:749-57.
 21. USEPA (United State Environmental Protection Agency). EPA's Contaminated Sediment Management Strategy. EPA-823-R-98-001. 1998. 129p.
 22. INHEM (Instituto Nacional de Higiene y Epidemiología) Guías Alimentarias. Ministerio de Salud Pública. Instituto de Nutrición e Higiene de los Alimentos. La Habana. Cuba. 2009. 47p.
 23. Cochram C (1981) Classification of the rural and urban areas starting from their population density. Before the realization of surveys. Tasmania. 141p.
 24. Rueda-Jaimes G, Correal S, Camacho P Consistencia interna y validación del constructor de la Escala de involucramiento emocional y crítica familiar (FEICS) en Bucaramanga, Colombia. *Revista Colombiana Psiquiatría*. 2007;36:25-38.
 25. Soler del Sol A (2013) Ley No 81 del Medio Ambiente. Organización Nacional de Bufetes Colectivos. La Habana. 119p. ISBN 978-959-7066-85-9
 26. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) SQUIRT, Screening Quick Reference Tables for in Sediment. [Internet] 2005 [Consulta 21 abr 2016]. Disponible en: http://response.restoration.noaa.gov/book_shelf/122_NEW-squirts.Pdf
 27. Rodríguez M, Montero A, Muñoz O, Araújo do Nascimento C, de Aguiar A, Miranda C, Agra Y. Background concentrations and reference values for heavy metals in soils of Cuba. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015;187:4198-203. Disponible en: DOI <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4198-3>
 28. AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Norma UNE 150008-2008). Asociación Española de Normalización y Certificación, España. 2008.
 29. Wedepohl KH The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1995;59:1217-32.
 30. Birch GF A test of normalization methods for marine sediments including a new post-extraction normalization (PEN) technique. *Hydrobiology*. 2003;492:5-13.
 31. Sutherland RA. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*. 2000;39:330-41.
 32. Long ER, MacDonald DD. Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems. *Human Ecology Risk Assessment*. 1998;4:1019-39.
 33. Chaney RL Toxic Element Accumulation in Soils and Crops: Protecting Soil Fertility and Agricultural Food-Chains. *Inorganic Contaminants in the Vadose Zone*. 1989;3:140-58. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74451-8>. ISSN: 0070-8356
 34. Allen SE. *Chemical Analysis of Ecological Materials*. 2nd Edition, Blackwell Scientific Publications, Oxford and London. 1989.234p.
 35. Kabata-Pendias A, Pendias H. *Trace Elements in Soils and Plants*, third ed. CRC Press, Boca Raton. 2001. 413 p.
 36. Sharma A, Kaur M, Kaur J, Kaur A. Heavy metal pollution: a global pollutant of rising concern.. 27p. [Internet] 2016 [Consulta: 03 mar 2019]. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-9734-8.ch001>. Disponible en: <http://www.researchgate.net/publications/30648464/>
 37. Liu W, Shen L, Liu J, Wang W. Uptake of Toxic Heavy Metals by Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivated in the Agricultural Soil near Zhengzhou City, People's Republic of China. S.-R. Li. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2007;79:209-13. DOI <https://doi.org/10.1007/s00128-007-9164-0>
 38. SEMARNAT (Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales). Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de evaluación de riesgo ambiental de sitios contaminados. SEMARNAT- MÉXICO. [Internet] 2006 [Consulta 03 mar 2021]. Disponible en: www.semarnat.gob.mx
 39. Murugesan M, Palani S, Athif P, Bukhari A. Toxicological effect of Al2O3 nanoparticles on histoarchitecture of the freshwater fish *Oreochromis mossambicus*. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2018;59:74-81.
 40. Maurya PK, Malik DS, Kumar K, Gupta N, Kumar S. Haematological and histological changes in fish *Heteropneustes fossilis* exposed to pesticides from industrial waste water. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2019;25(5):1251-78.
 41. USEPA (United State Environmental Protection Agency). Integrated Risk Information System (IRIS). United States Environmental Protection Agency, Environmental Criteria and Assessment Office, Cincinnati, Ohio. [Internet] 2013. [Consultado: 21 nov 2017] Disponible en: <http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/index.htm>
 42. USEPA (United State Environmental Protection Agency). Guidance for assessing chemical contaminant data for use in fish advisories. Volumen 2: Risk assessment and fish consumption limits. Third ed. Office of Health and Environmental Assessment, Washington, DC. EPA 823-B-00-008. 2000. 383p.
 43. Mesa MA, Hernández R, Díaz-Rizo O. Assessment of heavy metal pollution in sediments from the Mampostón sub-watershed (Mayabeque, Cuba) using X-ray Fluorescence Analysis. *Nucleus*. 2020;67:28-32.
 44. CITMA (Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente) Inspecciones ambientales a fuentes contaminantes de la cuenca Mayabeque. Departamento de Inspecciones. 2015. 13p.
 45. MINAG (Ministerio de la Agricultura de Cuba). Informe anual sobre los resultados agrícolas de la provincia Mayabeque. Ministerio de la Agricultura. 2014. 34p.
 46. Febles JM, Amaral Sobrinho N, Pérez Y, Zoffoli JH, Lima MO. Relación entre los procesos de erosión-sedimentación-contaminación en suelos del Distrito Pecuario "Alturas de Nazareno", Cuba. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 2014;48(2):173-83.
 47. Mesa MA, Díaz O, Sánchez-Pérez JM, Baqué D, Tavella MJ. Bioacumulación de metales pesados en arroz cultivado bajo condiciones de contaminación en la subcuenca Mampostón. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 2016;24(5):25-30.
 48. Mesa MA, Díaz O, García H, Alarcón OA, Tavella MJ, Bague D, Sánchez-Pérez JM. Heavy metals bioaccumulation and risk estimation in edible freshwater fish from Pedroso reservoir (Mayabeque, Cuba). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2021;37. DOI <https://doi.org/10.20937/RICA.53850>
 49. Mesa MA, Díaz O, Sánchez-Pérez JM., García H, Alarcón OA Relationship between micro-granulometric profile and chemical sediment composition in Mampostón subwatershed, Mayabeque, Cuba. *Journal of South American Earth Science*. 2020. Disponible en: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sames.2020.102538>

50. Guerrero L, Mesa MA y Díaz O. Aptitud para el riego agrícola del agua superficial de la subcuenca Mampostón, Mayabeque, Cuba. *Cultivos Tropicales*. 2021;42(3):e11. ISSN 0258-5936
51. NRC-CNRC (National Research Council). River water reference material for trace metals SLRS-5. National Research Council of Canada. Ottawa. Canada. 2009. 6p.
52. IAEA (1994) Reference Material IAEA-356 Polluted Marine Sediment. IAEA/AL/080 Report, IAEA, Vienna.
53. NWRI (National Water Research Institute). Certified reference material WBQ-1, trace metals in sediment. Certificate of Analysis, Research and Applications Branch, National Water Research Institute, Burlington, Ontario, Canada. 1990. 8p.
54. Lynch J. Additional Provisional Elemental Values for LKSD-1, LKSD-2, LKSD-3, LKSD-4, STSD-1, STSD-2, STSD-3 and STSD-4. *Geostandards Newsletters*. 1999;23(2) 251-60.
55. Mackey E, Spatz R (2009) Assessment of stability of trace elements in two natural matrix environmental standard reference materials: NIST-SRM 1547 Peach leaves and NIST-SRM 1566a Oyster tissue. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2009;281(1):91-6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-009-0073-z>
56. NRC-CNRC (National Research Council) TORT-2 (Lobster hepatopancreas) reference material for trace metals. National Research Council of Canada. Ottawa. Canada. 2002. 10p.
57. Mesa MA, Díaz O, Baqué D, Sánchez-Pérez JM, Tavella M. Factores de transferencia suelo-planta de Elementos Tierras Raras en arroz (*Oryza sativa*, L.). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 2018;27(2):1-8.
58. ATSDR (Agency for Toxic Substance and Disease Registry) (2004) Toxicological profile of cooper. Department of Health and Human Services. [Consulta: 21 jul 2019]. Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/>
59. Cal/EPA (California State Environmental Protection Agency). Comparison of Cal/EPA and USEPA Toxicity Values. Report of the Risk Assessment Advisory Committee of USA. Appendix B. California State. 2017. 71p.
60. ATSDR (Agency for Toxic Substance and Diseases Registry). Toxicological profile of zinc. Department of Health and Human Services. [Internet] 2005. [Consulta: 21 oct 2017]. Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/>
61. ATSDR (Agency for Toxic Substance and Diseases Registry). Toxicological profile of lead. Department of Health and Human Services. [Internet] 2019 [Consulta: 21 oct 2019]. Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/>
62. Mohamed F. Histopathological Studies on *Tilapia zillii* and *Solea vulgaris* from Lake Qarun, Egypt. *World Journal of Fish and Marine Sciences*. 2009;1(1):29-39. ISSN 1992-0083.
63. EAP (Administración Provincial de Mayabeque). Estrategia Ambiental Provincial. Ciclo Estratégico 2016-2020. Dirección Provincial del CITMA. 2016. 33p.
64. USEPA (United State Environmental Protection Agency). USEPA 5:10 Risk-based concentration table. Philadelphia. [Internet] 2010 [Consulta: 23 jul 2018]. Disponible en: <http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/index.htm>

Recibido: 27/07/2022

Aprobado: 03/09/2022

Agradecimientos

Queremos agradecer a los expertos que participaron en la validación del modelo conceptual, en especial a Ramiro Valdés Carmona, Fernando Guridi Izquierdo y Daniel Ajax García Cortés, por sus aportes en la concepción de la investigación. A David Baqué, Marie J. Tavella, Virginié Payeré y Frederic Julien (Ecolab, Toulouse, Francia) por su colaboración durante las estancias de la beca de investigación en Francia. Al Consejo Provincial de la Cuenca Mayabeque, al CITMA provincial y a los compañeros de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Mayabeque por la ayuda prestada durante el monitoreo. A las personas que abrieron sus hogares durante la evaluación del impacto de la contaminación en los poblados de Zaragoza, ICA, Ayala, Catalina y Güines. A los estudiantes de la carrera de Agronomía y Medicina Veterinaria por su dedicación al proyecto.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses entre ellos, ni con la investigación presentada.

Contribuciones de los autores

- Concepción y diseño de la investigación: María Aurora Mesa Pérez; Oscar Díaz Rizo y José Miguel Sánchez Pérez.
- Adquisición de datos: María Aurora Mesa Pérez; Oscar Díaz Rizo; Marie J. Tavella; David Baqué; Humberto García Acosta; Lilisbet Guerrero Domínguez; Daylén Hernández Rodríguez; Onelia Adriana Alarcón Santos y Carlos Miguel Díaz Almeida.
- Análisis e interpretación de datos: María Aurora Mesa Pérez; Oscar Díaz Rizo; Marie J. Tavella; David Baqué; Humberto García Acosta; Lilisbet Guerrero Domínguez; Daylén Hernández Rodríguez; Onelia Adriana Alarcón Santos y Carlos Miguel Díaz Almeida.
- Escritura y revisión del artículo: María Aurora Mesa Pérez; Oscar Díaz Rizo y José Miguel Sánchez Pérez.
- Aprobación final del artículo: María Aurora Mesa Pérez y Oscar Díaz Rizo.

Financiamiento

Proyecto: "Evaluación ecotoxicológica de la subcuenca Mampostón mediante la utilización de indicadores biológicos de contaminación por metales pesados en el suelo. Proyecto Institucional grupo Fitoplant-UNAH 9572. Proyecto: "ToulHavane". Proyecto Internacional del grupo Fitoplant y el Instituto Politécnico de Toulouse UNAH-INPT. Beca de estudio: Servicio de Cooperación y de Acción Cultural de la Embajada de Francia en La Habana

Cómo citar este artículo

Mesa Pérez MA, Díaz Rizo O, Sánchez-Pérez JM, García Acosta H et al. Procedimiento para el monitoreo y gestión de la contaminación por metales pesados en sistemas fluviales de Cuba. *An Acad Cienc Cuba [internet]* 2022 [citado en día, mes y año];13(2):e1286. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1286>

El artículo se difunde en acceso abierto según los términos de una licencia Creative Commons de Atribución/Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0), que le atribuye la libertad de copiar, compartir, distribuir, exhibir o implementar sin permiso, salvo con las siguientes condiciones: reconocer a sus autores (atribución), indicar los cambios que haya realizado y no usar el material con fines comerciales (no comercial).

© Los autores, 2023.

ANEXOS

Anexo 1. Resumen de los resultados de la implementación del procedimiento de monitoreo y gestión de sistemas fluviales contaminados por metales pesados en el sistema fluvial Pedroso-Mampostón y cálculo del índice de influencia para las matrices abióticas (VI_{ma})

Indicador	Variables	Resultados 2013-2014	Resultados 2015-2016	E	Índice de Influencia	Resultados 2017-2018	E	Índice de Influencia
MP _{agua}	Número de puntos que superan los niveles de referencia.	4 (G1, G2, M3 y P1)	3 (G1, G2 y M3)	1	*100 = 33,3	0	1	*100 = 83,3
	Cantidad de metales que indican contaminación en al menos un punto.	1 (Pb)	1 (Pb)	0	Continuar el plan, puede ser que el sistema necesite un tiempo mayor de evolución.	0	1	Continuar con el plan, el sistema responde favorablemente
	Número de unidades hidrológicas contaminadas.	3 (G; M y P)	2 (G y M)	1		0	1	
MP _{sed}	Número de puntos donde se superan los niveles de referencia.	4 (G1, G2, M3 y M5)	4 (G1, G2, M3 y M5)	0		1 (G2)	1	
	Cantidad de metales por encima del PEL en al menos un punto.	4 (Cu, Cr, As, Pb)	4 (Cu, Zn, Cd y Pb)	0		1 (Pb)	1	
	Número de unidades hidrológicas con concentraciones por encima del PEL para al menos un metal.	2 (G y M)	2 (G y M)	0		1 (G)	1	
EF	Número de puntos de muestreo con $3 < EF < 5$ para al menos un metal.	0	0	1		0	1	
	Número de puntos de muestreo con $5 < EF < 10$ para al menos un metal.	1 (M5)	0	1		0	1	
	Número de puntos de muestreo con $EF > 10$	3 (G1, G2 y M3)	0	1		0	1	
	Número de metales que muestran enriquecimiento.	2 (Pb y As)	0	1		0	1	
SQG-Q	Número de puntos de muestreo con impacto moderado	12	11	-1		13	-1	
	Número de puntos de muestreo con alto impacto	1 (G2)	2 (G1 y G2)	-1		0	1	

Legenda: E, evaluación de cambio; ND, no determinado en esa etapa; G, ríoGanuzá; M, río Mampostón; P, derivadora Pedroso.

Anexo 2. Resumen de los resultados de la implementación del procedimiento de monitoreo y gestión de sistemas fluviales contaminados por metales pesados en el sistema fluvial Pedroso Mampostón y cálculo del índice de influencia para las matrices bióticas (VIe y VIh)

Indicador	Variables	Resultados 2015-2016	Resultados 2017-2018	E	Índice de Influencia
PDF	Porcentaje de muestras cuyo contenido de metales en hojas supera el rango de fitotoxicidad para al menos un metal.	32 %	32 %	0	$VIe = \frac{1}{6} * 100 = 16$
	Número de metales que superan el rango de fitotoxicidad en hojas.	3 (As, Cr y Cd)	3 (As, Cr y Cd)	0	
CPET	Porcentaje de peces con CPET potencial > 1 para al menos un metal	28 %	34 %	0	Revisar los elementos del plan que influyen sobre los indicadores.
	Porcentaje de peces con CPET real > 1 para al menos un metal.	23 %	30 %	0	
	Número de metales que indican CPET > 1	3 (Cd, Pb y As)	3 (Cd, As y Pb)	0	
PLH	Porcentaje de peces con lesiones histopatológicas (PLH)	53,1 %	34,0 %	1	
PDP	Porcentaje de peces cuyo contenido de metales supera la norma cubana de alimentos (PDP)	48,5 %	23,4 %	1	$VIh = \frac{4}{12} * 100 = 33,3$
	Número de metales que superan los valores de referencia.	3 (Cu, Cd y Pb)	1 (Pb)	1	
PDN	Porcentaje muestras compuestas de plantas comestibles que supera los valores de referencia para al menos un metal.	< 10 %	ND	0	Continuar el plan, puede ser que el sistema necesite un tiempo mayor de evolución.
	Número de metales que superan los valores de referencia en plantas comestibles en más del 10 % de las plantas.	0	ND	0	
HI	Porcentaje de adultos con HIpotencial >1	61,4 %	6,90 %	1	
	Porcentaje de adultos con HIreal >1	10,36 %	3,94 %	1	
	Porcentaje de menores con HIpotencial >1	38 %	0 %	1	
	Porcentaje de menores con HIreal >1	0 %	0 %	1	
ELCR	Porcentaje de adultos con ELCRpotencial > 10 ⁻⁴	32,5 %	30,6 %	0	
	Porcentaje de adultos con ELCRreal > 10 ⁻⁴	15,2 %	21,7 %	-1	
	Porcentaje de menores con ELCRpotencial > 10 ⁻⁴	40,2 %	35,8 %	0	
	Porcentaje de menores con ELCRreal > 10 ⁻⁴	9,7 %	24,6 %	-1	

Leyenda: ND, determinación no realizada, pues se consideró que no era un indicador a seguir en ciclos posteriores ya que la evaluación anterior no era relevante.

