

ARTÍCULO ORIGINAL

Valoración del riesgo en salud en un grupo de población de Cali, Colombia, por exposición a plomo, cadmio, mercurio, ácido 2,4-diclorofenoxiacético y diuron, asociada al consumo de agua potable y alimentos

Ghisliane Echeverry¹, Andrés Mauricio Zapata², Martha Isabel Páez¹, Fabián Méndez², Miguel Peña³

¹ Grupo de Investigación en Contaminación Ambiental por Metales y Plaguicidas, Departamento de Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia

² Grupo de Investigación en Epidemiología y Salud Poblacional, Escuela de Salud Pública, Universidad del Valle, Cali, Colombia

³ Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Introducción. La exposición a contaminantes como plaguicidas y metales pesados, se asocia a problemas de salud. Diversos estudios revelan la presencia de estos contaminantes en Cali; sin embargo, no existe información sobre las rutas principales de esa exposición y su riesgo implícito.

Objetivo. Estimar los riesgos asociados a la exposición a cadmio, plomo y mercurio, y a los plaguicidas ácido 2,4-diclorofenoxiacético y diuron, debida al consumo de agua potable y alimentos en un grupo de población de Cali.

Materiales y métodos. Se obtuvieron datos ambientales e información sobre la población, y se valoró el riesgo empleando los modelos de la *Environmental Protection Agency* (EPA) de los Estados Unidos.

Resultados. Las concentraciones de los contaminantes evaluados estuvieron por debajo de las permisibles establecidas por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (3 µg/L⁻¹ de cadmio; 10 µg/L⁻¹ de plomo; 1 µg/L⁻¹ de mercurio; 1 µg/L⁻¹ de ácido 2,4 diclorofenoxiacético; 1 µg/L⁻¹ de diuron). En las muestras de pescado "manteco" (*Peprilus snyderi*), se detectaron concentraciones de cadmio entre 20 y 80 µg/kg⁻¹ por debajo del límite permisible establecido por la Organización Mundial de la Salud (100 µg/kg⁻¹). Los resultados de la valoración mostraron que el riesgo cancerígeno y no cancerígeno atribuible a la ingestión de alimentos y de agua potable con presencia de los contaminantes evaluados, estaba por debajo de los valores máximos admisibles según la EPA.

Conclusiones. Se cree que los hallazgos sobre contaminantes en estudios anteriores, pueden deberse a eventos puntuales de contaminación y se recomienda vigilar la bocatoma de agua y emitir alertas tempranas. El reporte sobre la presencia de cadmio en las muestras de pescado, sugiere que el control de la calidad de los alimentos por parte de las entidades reguladoras debe mejorar.

Palabras clave: medición de riesgo, salud pública, exposición a plaguicidas, contaminación de alimentos, contaminación del agua, metales pesados.

doi: <http://dx.doi.org/10.7705/biomedica.v35i0.2464>

Evaluation of human health risk for a population from Cali, Colombia, by exposure to lead, cadmium, mercury, 2,4-dichloro-phenoxyacetic acid and diuron associated with water and food consumption

Introduction: Exposure to pollutants such as pesticides and heavy metals has been linked to health problems. Several studies have revealed the presence of these contaminants in Cali; however, there is no information available about the main routes of exposure and risk of these contaminants.

Objective: To estimate the risk associated with the intake of cadmium, lead and mercury, and pesticides 2,4-D and diuron through the consumption of water and food in a population in Cali.

Materials and methods: Population and environmental data were obtained, and a risk assessment was performed using United States Environmental Protection Agency guidelines.

Contribución de los autores:

Ghisliane Echeverry: coordinación del proyecto, diseño del muestreo, recolección, preparación y coordinación del análisis de muestras, análisis de resultados, discusión y redacción del manuscrito

Andrés Mauricio Zapata: apoyo en el cálculo de la valoración del riesgo

Martha Isabel Páez, Fabián Méndez y Miguel Ricardo Peña: tutorías y aportes a la discusión

Miguel Ricardo Peña: revisión del manuscrito

Results: The concentrations of the evaluated pollutants were below permissible levels as established by the Colombian *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial* ($3 \mu\text{g/L}^{-1}$ of cadmium; $10 \mu\text{g/L}^{-1}$ of lead; $1 \mu\text{g/L}^{-1}$ of mercury; $1 \mu\text{g/L}^{-1}$ of 2,4 D; $1 \mu\text{g/L}^{-1}$ of diuron). Salema butterflyfish (*Peprilus snyderi*) samples contained levels of cadmium between 20 and $80 \mu\text{g/kg}^{-1}$, which are below the permissible limit set by the World Health Organization ($100 \mu\text{g/kg}^{-1}$). The results of the risk assessment indicated that the carcinogenic and non-carcinogenic attributable risk to population health from the intake of food contaminants was below the maximum level permitted by the United States Environmental Protection Agency.

Conclusions: It is believed that the findings in previous studies on pollutants may have been due to specific contamination events; therefore, monitoring and early warning about water intake is recommended. Furthermore, the report of cadmium being found in fish consumed as food suggests the need for quality control by regulators.

Key words: Risk assessment, public health, pesticide exposure, food contamination, water pollution; metals, heavy.

doi: <http://dx.doi.org/10.7705/biomedica.v35i0.2464>

Las consecuencias de la exposición a contaminantes tales como metales y plaguicidas, incluyen una amplia gama de efectos agudos y crónicos, reversibles e irreversibles. Los efectos pueden ir desde los más leves y comunes, como la irritación de la piel y las mucosas, hasta los que pueden afectar los sistemas inmunológico, endocrinológico o neurológico, y producir alteraciones genéticas o malformaciones congénitas, cambios hereditarios o cáncer (1).

Una forma de estudiar y cuantificar el riesgo para la salud humana debido a la exposición a contaminantes, consiste en la valoración del riesgo para la salud, lo que es común en estudios ambientales, ya que permite estimar el riesgo por exposición a diferentes matrices (de alimentos y de factores ambientales, entre otras) asociado a los contaminantes de interés mediante el uso de diferentes matrices, y tiene la ventaja de proporcionar un marco sistemático basado en principios científicos para comprender y manejar diversos riesgos. La valoración del riesgo en salud permite orientar la inversión de recursos nacionales, con el fin de proteger el ambiente y la salud pública.

En una valoración del riesgo para la salud de una población humana en particular, se deben identificar las posibles fuentes de contaminación y las rutas de exposición, que son las formas en que la población ingiere el contaminante: por vía oral

(por ingestión de comida, por el agua o el suelo), por vía respiratoria (por inhalación), o por absorción dérmica (contacto con la piel) (2).

El nivel de riesgo para la salud humana y la gravedad de la exposición se determinan por la cantidad de contaminante en el ambiente, por sus características químicas y su nivel de toxicidad, por las dosis ingeridas y el tiempo de exposición a estas dosis y, por último, por las condiciones físicas de las personas, es decir, la capacidad de bioacumulación o excreción de acuerdo con el metabolismo del organismo receptor (nutrición y estado de salud) (3). Estas variables dependen, a su vez, de los factores ambientales, sociales y biológicos determinantes en el área de estudio, lo que implica la construcción de un modelo que los integre y genere las circunstancias de riesgo más aproximadas a las condiciones de la población estudiada.

Se han propuesto varios métodos para estimar los riesgos potenciales para la salud causados por los contaminantes, clasificando sus efectos principalmente en cancerígenos y no cancerígenos (4). En este trabajo se siguieron las directrices de la *Risk Assessment Guidance for Superfund* (RAGS), de la *Environmental Protection Agency* (EPA) de los Estados Unidos (5), con el fin de valorar el riesgo para la salud humana de la exposición a metales pesados (plomo, cadmio y mercurio) y plaguicidas (ácido 2,4 diclorofenoxiacético y diuron) en una población en condiciones de marginación socioeconómica, considerada vulnerable tanto por sus hábitos nutricionales como por sus condiciones ambientales y de vivienda, y por los antecedentes de los efectos en la salud detectados en esta zona en estudios anteriores que podrían estar asociados a la exposición a metales pesados o plaguicidas (6).

Correspondencia:

Ghisliane Echeverry, Grupo de Investigación GICAMP, Departamento de Química, Universidad del Valle, Calle 13 N° 100-00, edificio 320, 2° piso, Cali, Colombia
Teléfono: (57) (317) 681 0939; fax: (572) 339 3248, extensión 9
ghisliane.echeverry@correounivalle.edu.co

Recibido: 09/07/14; aceptado: 14/04/15

Para este estudio, se eligió una zona donde ya se han realizado investigaciones sobre la relación entre ambiente y salud, en las cuales se han identificado condiciones ambientales de riesgo con efectos en la población vulnerable. Entre dichas investigaciones, cabe mencionar las dedicadas a los “Factores ambientales asociados a la ocurrencia de malformaciones congénitas en la ciudad de Cali” y los “Efectos de la exposición ambiental a plomo y cadmio en la ocurrencia de bajo peso al nacer (BPN) y restricción del crecimiento intrauterino (RCIU) en una cohorte de mujeres gestantes de la ciudad de Cali”, en las que se documentó la presencia de herbicidas y metales pesados en el río Cauca, cercano al sector estudiado, y de metales pesados en la red de distribución de agua potable y en alimentos consumidos en la zona.

Una vez determinada la zona de estudio, las directrices de la EPA sugieren seguir cuatro etapas: 1) la identificación del peligro, es decir, la determinación de los contaminantes objetivo, y la recolección y la evaluación de los datos; 2) la evaluación de la toxicidad; 3) la evaluación de la exposición, y 4) la caracterización del riesgo. En este trabajo se siguieron esas cuatro etapas para determinar el riesgo que representaba para esta población el consumo de agua potable proveniente de la red de distribución, así como de alimentos.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El área seleccionada corresponde a un sector del oriente de Cali, Colombia, específicamente las comunas 13, 14, 15 y 21, que agrupan al 27 % de la población urbana de la ciudad (figura 1). La población estimada es de 602.401 habitantes (51 % de ellos mujeres) distribuidos en 53 barrios, la mayoría de bajo nivel socioeconómico. Este sector limita al oriente con el río Cauca, que suministra cerca del 80 % del agua de consumo de Cali y en el que durante años se han vertido las aguas residuales municipales e industriales provenientes de los departamentos circundantes, habiéndose detectado en él la presencia de ácido 2,4 diclorofenoxiacético (2,4 D) y diuron; por el sur, el sector limita con una zona de expansión donde está ubicado el antiguo vertedero de residuos sólidos municipales “Navarro”, que operó durante cerca de 40 años, hasta el 2008, y donde se depositaban en sus últimos años de funcionamiento cerca de 1.700 toneladas de residuos por día; en este basurero se reportó la presencia de metales pesados (7).

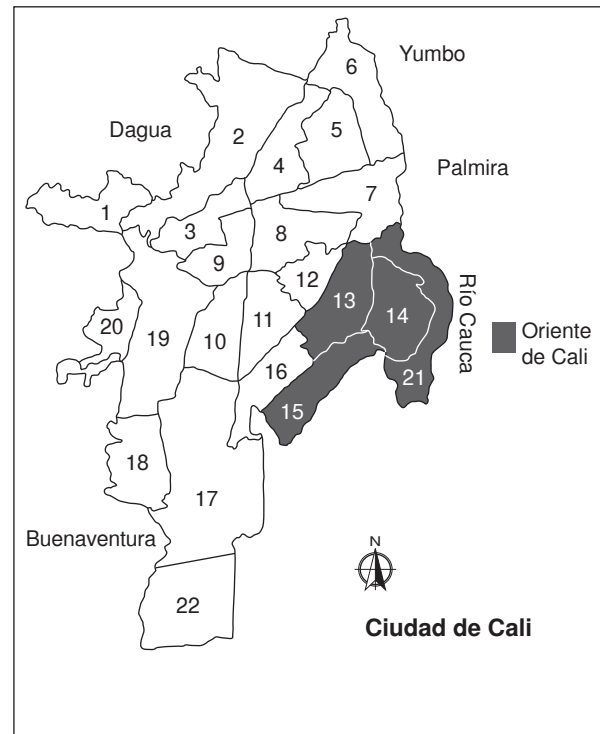


Figura 1. Mapa de la zona de estudio con las áreas de toma de muestras de agua de red y alimentos

Identificación del peligro: recolección y evaluación de los datos

Debido a su alta toxicidad y dada la evidencia existente de su presencia en la zona, se seleccionaron los siguientes contaminantes: plomo (Pb), cadmio (Cd) y mercurio (Hg), y los plaguicidas 2,4 D y diuron. Se eligió la exposición por vía oral (ingestión) por ser una de las de mayor impacto directo sobre la salud (8). Se recolectaron muestras de agua potable de la red de abastecimiento de la ciudad y muestras de alimentos consumidos en la zona de estudio.

Agua potable. Se seleccionaron los puntos de recolección de agua de la empresa abastecedora de agua potable de Cali en la zona de estudio, de acuerdo con criterios como su cercanía a la vivienda de las mujeres incluidas en la cohorte de los estudios anteriores, su proximidad con probables fuentes de contaminación y su accesibilidad para la toma de las muestras. Se programaron muestreos durante los periodos de sequía y de lluvia en el 2012. La recolección se hizo siguiendo los protocolos de recolección de agua de consumo de los *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, empleando envases de

vidrio para las muestras de plaguicidas y de plástico para las muestras de metales. La cadena de frío se mantuvo desde la recolección hasta el análisis (9), y las muestras se enviaron a laboratorios certificados para los respectivos análisis.

Alimentos. Para la selección de las muestras de alimentos, se tuvieron en cuenta los resultados de las encuestas del Grupo de Investigación en Epidemiología y Salud Poblacional (sic.) de la Universidad del Valle sobre los alimentos 'bioacumuladores' de mayor consumo. Además, se hicieron otras encuestas con el fin de conocer los principales abastecedores de la zona y el origen de los alimentos. Los sitios de toma de muestras se eligieron de acuerdo con los resultados de dichas encuestas. Se seleccionaron diferentes sitios de abastos distribuidos en las cuatro comunas. Las muestras de alimentos, cada una de 250 g, se tomaron directamente de los puntos de abasto y se empacaron en bolsas con cierre hermético; la cadena de frío se mantuvo hasta el momento del análisis en el laboratorio. Los análisis de metales y plaguicidas se hicieron en laboratorios certificados ajenos a la universidad.

Evaluación de la toxicidad

Una vez seleccionados los contaminantes de estudio, se evaluó la toxicidad o dosis-respuesta, uno de los aspectos más importantes en la valoración de riesgo. Los criterios de valoración del riesgo de los contaminantes responden a sus efectos cancerígenos y no cancerígenos. El riesgo cancerígeno se estima como la probabilidad gradual de que un individuo desarrolle cáncer durante su vida como resultado de la exposición a un contaminante potencialmente cancerígeno; este riesgo es proporcional a la exposición acumulada de nivel bajo, nivel que puede ser muy pequeño. El factor de pendiente del cáncer, que se utiliza para valorarlo, está establecido en la literatura científica (10) y es el resultado de estudios epidemiológicos y bioensayos con animales.

El riesgo no cancerígeno de una sustancia tóxica incluye los efectos de exposición que excluyen el cáncer y se evalúa usando la dosis de referencia, es decir, la exposición permisible o una estimación de la exposición diaria en humanos, la cual no suele generar un riesgo apreciable de efectos perjudiciales durante el tiempo de vida del individuo. Los valores de pendientes del cáncer y de dosis de referencia de los contaminantes estudiados, se encuentran en el cuadro 1 (10,11).

Cuadro 1. Dosis de referencia y factor de pendiente del cáncer (CSF) para los contaminantes 2,4 D, diuron, cadmio, mercurio y plomo

Contaminante	RfD (mg/kg·1/día ⁻¹)	CSF (mg/kg·1/día ⁻¹)
2-4D	0,01	0,0057
Cadmio	0,0005	0,0060
Diuron	0,002	0,0057
Mercurio	0,0001	0,035
Plomo	0,00357	*

RfD: *reference dose*; CSF: *cancer slope factor*

* Se considera que el plomo es un agente con gran probabilidad de causar cáncer en humanos, sin embargo, no se ha determinado su valor de CSF.

Evaluación de la exposición

La exposición de un contaminante por vía oral se estima usando la tasa de ingestión diaria de agua potable o de alimentos en mg por día⁻¹ y, la frecuencia de exposición, en días por año⁻¹. La tasa de ingestión y la frecuencia de exposición se evaluaron con base en los datos reales de la población, obtenidos por el Grupo de Investigación en Epidemiología y Salud Poblacional (sic.) en un estudio paralelo que hace parte de este proyecto, en el cual se encuestó a 233 mujeres adultas en edad fértil entre los 18 y 49 años de edad que habitaban en la zona de estudio, y se obtuvo información relevante sobre las características sociodemográficas, antropométricas y de movilidad, así como sobre la frecuencia y el recuerdo del consumo de alimentos en las 24 horas previas. Los resultados de esa investigación epidemiológica se describen en otra publicación. Para los fines de este estudio, se tomó la información correspondiente a la tasa de ingestión y la frecuencia de exposición, la duración de la exposición y el peso corporal de la población.

Caracterización del riesgo

Para la caracterización cuantitativa del riesgo, se evaluaron los contaminantes según su clasificación en cancerígenos y no cancerígenos (cuadro 1); los cálculos se hicieron con base en las directrices de la EPA (5). En ambos cálculos se incluyó el valor de la exposición o del consumo (I), calculado mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{CxIRxCFxEFxED}{BWxAT}$$

donde C corresponde a la concentración en la muestra (mg/kg⁻¹), IR a la tasa de ingestión de la muestra (mg/día⁻¹), CF al factor de conversión (1E-06 kg/mg⁻¹), EF a la frecuencia de exposición (días/

año⁻¹), ED a la duración de la exposición (años), BW al peso corporal (kg), y AT al tiempo promedio de exposición (días).

El valor de C se obtuvo del análisis de las muestras, en tanto que los valores de IR, EF, ED y BW se obtuvieron de la evaluación epidemiológica de la población en estudio. El tiempo promedio de exposición para el riesgo cancerígeno se tomó como la expectativa de vida (70 años) y para el riesgo no cancerígeno fue igual al tiempo de la duración de la exposición, la cual se evaluó bajo diferentes circunstancias probables, ya que las encuestas revelaron que no había uniformidad en el tiempo que la población había habitado en la zona y, por lo tanto, el tiempo durante el cual había estado expuesta no correspondía a un valor puntual, sino a un rango amplio.

Para la valoración del riesgo cancerígeno (*risk*, en la ecuación), el valor de I se multiplicó por el valor del factor de pendiente del cáncer (CSF) y, para la valoración del riesgo no cancerígeno (HQ), este se dividió por la dosis oral de referencia (RfD), mediante las siguientes dos ecuaciones.

$$Risk = I \times SF$$

$$HQ = I/R_fD$$

Según los protocolos de la EPA (12), el cálculo probabilístico del riesgo implica un muestreo aleatorio a partir del cual se genera cada una de las distribuciones de las variables incluidas en la exposición, siendo el método de Montecarlo uno de los métodos probabilísticos más ampliamente utilizados (13). La aplicación del análisis probabilístico en las evaluaciones de riesgos para la salud humana, es un desarrollo relativamente nuevo facilitado por el avance en las técnicas de muestreo estadístico y el aumento en la velocidad y la capacidad de los equipos capaces de responder a las necesidades computacionales intensivas propias de una simulación de Montecarlo. El producto de este proceso es una distribución de la probabilidad de las estimaciones del riesgo, que se genera cuando su cálculo (o el de cualquier otro modelo de punto final) se repite varias veces con el objetivo de probar las variables al azar.

Una vez establecido el modelo apropiado, se hizo la prueba de normalidad de Shapiro Wilks empleando el programa Statistica™, v. 8.0 (StatSoft, Poland). Se aplicó la prueba de ji al cuadrado para determinar la distribución a la que se ajustaban los datos. Por último, para el cálculo del riesgo de los plaguicidas diuron y 2,4 D, y del

cadmio, el plomo y el mercurio, se siguieron los lineamientos de un modelo probabilístico obtenido con el programa Crystal Ball™ (Crystal Ball 2000, Decisioneering Inc., Denver, Colorado) a partir de simulaciones del tipo de Montecarlo para 100.000 iteraciones. Los resultados obtenidos con este programa se compararon con el valor establecido en los lineamientos de la EPA (5). Se considera que existe un riesgo para la salud inadmisibles si el valor de riesgo para la salud cancerígeno calculado (HQ) se encuentra por encima de 1 y el valor de riesgo cancerígeno calculado (*risk*) es mayor de 10⁻⁵ y 10⁻⁴, dependiendo de cuán conservador se quiera ser en el resultado de la valoración del riesgo.

En el caso de la valoración del riesgo por consumo de agua potable, se evaluó el caso de consumo de 'aguadepanela' preparada con esta agua, ya que en los resultados de las encuestas figuraba como uno de los alimentos de mayor consumo, por lo que se lo consideró relevante para este estudio.

Resultados

Hallazgo de contaminantes y su distribución en el agua de red y los alimentos

Contaminantes en agua. Para la evaluación del agua de red, se seleccionaron siete puntos de muestreo distribuidos en toda la zona de estudio (un punto en la comuna 15, uno en la comuna 13, dos en la comuna 14 y tres en la comuna 21), los cuales se mantuvieron fijos durante todo el periodo de valoración y coincidían con algunos puntos de evaluación de la empresa abastecedora de agua potable de la ciudad.

Al iniciar la evaluación se hizo un muestreo preliminar (enero del 2012) y se analizó el contenido de los contaminantes estudiados en las muestras de los siete puntos seleccionados y en las de un blanco de control. Durante el primer semestre del 2012, se hicieron cuatro muestreos cada 15 a 30 días y se analizó el contenido de mercurio, plomo y cadmio en todas las muestras, y de 2,4 D y diuron en las muestras de dos muestreos. En ninguna de las muestras analizadas se detectó la presencia de 2,4 D o diuron por encima de los límites de detección (<0,40 µg/L⁻¹), como tampoco de mercurio (<1 µg/L⁻¹). Sin embargo, se reportaron concentraciones de plomo y cadmio entre 0,1 y 0,4 µg/L⁻¹. Durante la segunda etapa de muestreo (septiembre a diciembre del 2012), no se detectaron mercurio, 2,4 D ni diuron en ninguna de las muestras. Sin embargo, sí se registró la presencia de plomo (0,11-0,36 µg/L⁻¹) y de cadmio (0,30-0,43 µg/L⁻¹).

Contaminantes en alimentos. Uno de los hallazgos del trabajo de campo fue que el Valle del Cauca no produce la mayoría de los alimentos que consume su población, pues gran parte de ellos proviene de otros lugares de Colombia, como Nariño y Cundinamarca, y también de otros países, como Ecuador, Canadá y Argentina, entre otros. La mayoría de los expendios en donde se aplicó la encuesta, eran supermercados o pequeños mercados, los cuales venden toda clase de productos, como lácteos, carnes, frutas, verduras, granos y abarrotes. La mayoría de los productos comercializados en el sector provienen de las galerías grandes de la ciudad o de centros de abastos. Entre las galerías se destacan las de Santa Elena y La Alameda, como proveedores de las frutas y las verduras. El pescado proviene de diferentes sitios del continente (Buenaventura, Tumaco, el río Magdalena y, en algunos casos, de Chile y Argentina).

Inicialmente, se seleccionaron cuatro tipos de vegetales (tomate, cebolla, repollo y lechuga) y dos tipos de peces (“manteco” y tilapia), que se encontraban entre los alimentos ‘bioacumuladores’ de mayor consumo entre la población. Se hicieron dos muestreos de alimentos con un intervalo de un año, y se analizó el contenido de los contaminantes bajo estudio en todas las muestras recolectadas.

El número de muestras de cada alimento, fue el siguiente: en el muestreo 1 se incluyeron cuatro muestras de “manteco”, cuatro de tilapia, dos de

cebolla, dos de repollo, dos de lechuga, y dos de tomate; en el muestreo 2, se incluyeron cuatro muestras de tilapia, cuatro de “manteco”, cuatro de repollo y cuatro de lechuga. En ninguna de las muestras analizadas en los dos muestreos, se encontró 2,4 D, diuron, mercurio o plomo por encima de los límites de detección establecidos en los métodos analíticos empleados: 2,4 D y diuron, <math><10 \mu\text{g}/\text{kg}^{-1}</math> (métodos UPLC™, TOF, LV-GC/MS); mercurio, <math><30 \mu\text{g}/\text{kg}^{-1}</math> (espectroscopia de absorción atómica con vapor frío, CVAAS); plomo, <math><20 \mu\text{g}/\text{kg}^{-1}</math> (espectrometría de absorción atómica en horno de grafito, GFAAS). Sin embargo, es preciso valorar el riesgo para determinar si la presencia de estos contaminantes por debajo de tales límites implica un riesgo para la salud de la población. En tres de las muestras de “manteco” del primer muestreo, se encontraron concentraciones de cadmio entre 20 y 80 $\mu\text{g}/\text{kg}^{-1}$.

Valoración del riesgo

Las pruebas de Shapiro Wilks demostraron que las variables obtenidas de las encuestas de población (tasa de ingestión, frecuencia y duración de la exposición, y peso corporal), se ajustaban a una distribución rectangular (figura 2), y no hubo normalidad en ninguna de ellas, por lo tanto, se trabajó con los valores máximos y mínimos de cada una de estas variables de entrada. Para el caso de la duración de la exposición, se trabajó con valores proyectados a 5, 10 y 15 años, además

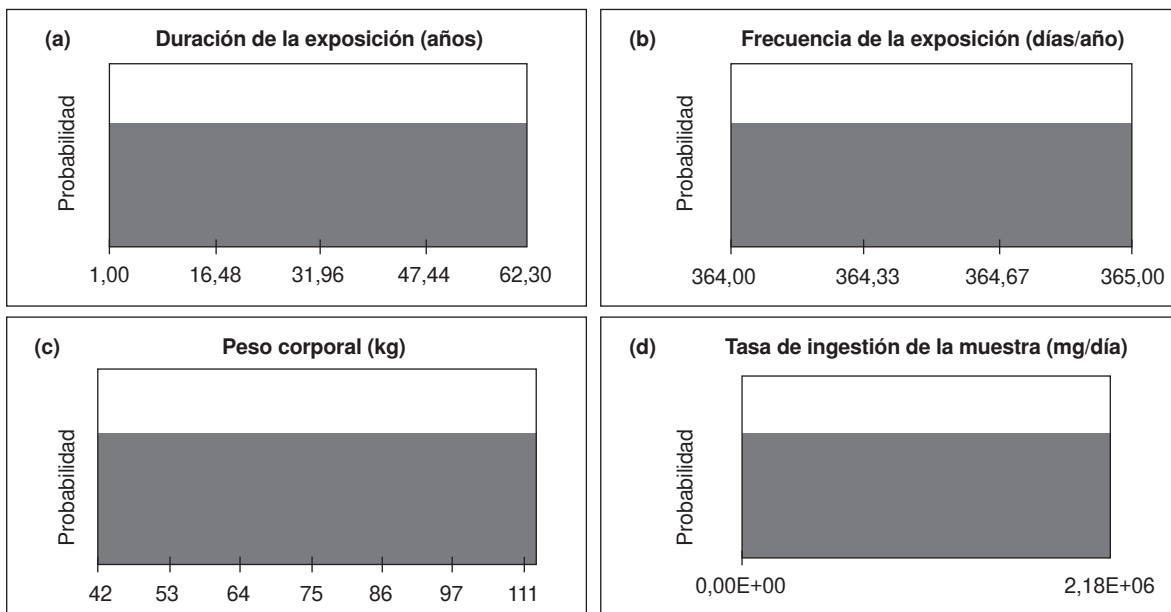


Figura 2. Resultados de las pruebas de Shapiro Wilks. Las variables de a) duración de la exposición, b) frecuencia de la exposición, c) peso corporal y d) tasa de ingestión, se ajustaron a una distribución rectangular

del tiempo de exposición real de cada madre, con el fin de evaluar una exposición a corto, mediano y largo plazo. Esto se hizo para todos los cálculos de riesgo hechos en las diferentes matrices y para todos los contaminantes evaluados.

En cuanto al valor de concentración empleado para la valoración del riesgo debido a la presencia de 2,4 D, diuron y mercurio en agua, cuyos valores no estuvieron por encima del límite de detección en ninguna de las muestras, se asumió como la máxima concentración el valor del límite de detección, para así evaluar el caso de mayor riesgo posible, y se consideraron tres situaciones: 1) asumiendo la concentración como el valor del límite de detección para cada contaminante (0,40 $\mu\text{g/L}^{-1}$ para el 2,4 D y el diuron, y 1,0 $\mu\text{g/L}^{-1}$ para el mercurio); 2) asumiendo la concentración como la mitad del límite de detección (0,20 $\mu\text{g/L}^{-1}$ para el 2,4 D y el diuron, y 0,5 $\mu\text{g/L}^{-1}$ para el mercurio), y 3) asumiendo la concentración como un cuarto del límite de detección (0,10 $\mu\text{g/L}^{-1}$ para el 2,4 D y el diuron, y 0,3 $\mu\text{g/L}^{-1}$ para el mercurio). En cada uno de estos casos, se calculó el valor de riesgo cancerígeno y no cancerígeno (cuadro 2).

En cuanto al valor de concentración del plomo y el cadmio en muestras de agua, cuyas concentraciones estaban por encima del límite de detección, la distribución de valores correspondió a una distribución normal para ambos contaminantes y, por lo tanto, el cálculo del riesgo se hizo con la media de los datos de cada contaminante.

En el caso de la valoración en alimentos, los cálculos para plomo, cadmio, mercurio, 2,4 D y diuron en las muestras de repollo, lechuga y tilapia,

se hicieron de manera similar a los cálculos en agua, ya que no hay reportes de concentraciones de estos contaminantes por encima de los límites de detección en muestras (2,4 D y diuron: $<10 \mu\text{g/kg}^{-1}$; mercurio: $<30 \mu\text{g/kg}^{-1}$; plomo: $<20 \mu\text{g/kg}^{-1}$; cadmio: $<20 \mu\text{g/kg}^{-1}$). Se evaluaron tres situaciones, asumiendo tres valores de concentración de cada contaminante: el valor del límite de detección, la mitad del límite de detección y un cuarto del límite de detección. De igual manera se procedió para la valoración del plomo, el mercurio, el 2,4 D y el diuron en las muestras de pescado "manteco"; sin embargo, para la valoración del riesgo por contaminación de cadmio en este pescado, en tres de cuyas muestras se registraron concentraciones por encima del límite de detección, se asumió la concentración como el valor más alto encontrado ($80 \mu\text{g/kg}^{-1}$), con el fin de evaluar el caso de mayor riesgo posible.

Discusión

En lo que se refiere a la presencia de los contaminantes en agua, no se encontraron diferencias significativas en las concentraciones halladas en los diferentes puntos de muestreo ni entre las dos etapas de muestreo, lo que indica que la calidad del agua de red en lo que tiene que ver con estos contaminantes es homogénea en toda la zona y no varió en las fechas muestreadas.

No se encontraron los plaguicidas 2,4 D o diuron en el agua de red; sin embargo, dado que en investigaciones anteriores se han encontrado concentraciones detectables en el río Cauca, que es la fuente de agua potable, se estimó que los hallazgos previos pudieron estar relacionados con

Cuadro 2. Valores de riesgo calculados para una duración de exposición de 15 años

Riesgo no cancerígeno (HQ)					
Contaminante/matriz	Lechuga	Repollo	'Manteco'	Agua de red	'Aguadepanela'
Cadmio	3,96E-03	3,56E-03	4,60E-02	3,00E-02	1,66E-02
Plomo	7,12E-03	2,69E-03	2,45E-03	5,73E-03	3,64E-03
Mercurio	3,08E-01	2,56E-01	2,55E-02	2,63E-01	1,57E-01
2,4 D	1,25E-03	4,67E-04	4,38E-04	1,07E-03	6,19E-04
Diuron	1,15E-02	4,84E-03	4,42E-03	5,25E-03	3,07E-03
Suma	3,32E-01	2,68E-01	7,88E-02	3,05E-01	1,81E-01
Riesgo cancerígeno (risk)					
Contaminante/matriz	Lechuga	Repollo	'Manteco'	Agua de red	'Aguadepanela'
Cadmio	1,49E-08	1,15E-08	3,09E-07	8,71E-08	5,51E-08
Mercurio	1,29E-06	1,07E-06	9,62E-07	9,45E-07	5,34E-07
2,4 D	7,19E-08	5,90E-08	4,80E-08	6,16E-08	3,77E-08
Diuron	1,36E-07	1,10E-07	1,09E-07	6,15E-08	3,77E-08
Suma	1,51E-06	1,25E-06	1,43E-06	1,16E-06	6,65E-07

eventos puntuales de contaminación y no con una contaminación continua del río que pueda afectar el agua potable. Es posible que en la bocatoma de la planta de tratamiento los plaguicidas se encuentren en concentraciones bajas debido a la dilución, o que el tratamiento de potabilización, aunque no es específico para plaguicidas, los remueva en la fase acuosa.

En cuanto a los resultados concernientes al plomo y el cadmio, aunque en ninguna muestra se encontraron niveles por encima del límite permisible establecido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (plomo: $10 \mu\text{g/L}^{-1}$; cadmio: $3 \mu\text{g/L}^{-1}$), límites que se ajustan a los estándares internacionales de calidad del agua, se debe tener en cuenta que al evaluar el riesgo se estudian exposiciones a largo plazo y que la presencia de estos contaminantes en el agua potable, aun en bajas concentraciones, puede ser una ruta de exposición significativa y representar un riesgo para la salud de la población, lo cual podría constatarse mediante la aplicación de modelos de riesgo.

En lo concerniente a la presencia de los contaminantes en alimentos, aunque se inspeccionen los diferentes lugares de su procedencia, no es posible saber con exactitud el origen de un determinado alimento en un período de tiempo específico, lo que dificulta conocer la fuente de la contaminación y seguir su distribución.

En cuanto al hallazgo de cadmio en el pescado “manteco”, este es un pez costero que puede verse expuesto a deposiciones de este metal en sedimentos. Las concentraciones encontradas estaban dentro de los límites permisibles en pescado fijadas por la Organización Mundial de la Salud ($100 \mu\text{g/kg}^{-1}$) (14). Sin embargo, para saber si el consumo de este alimento constituye un riesgo para la salud, es preciso aplicar un modelo de riesgo.

Para la valoración del riesgo, el uso del método de Montecarlo logra que la incertidumbre se propague mediante la valoración, dando lugar a las funciones de densidad de probabilidad para la descripción de las variables de entrada (tasa de ingestión, valor de concentración, peso corporal, tiempo promedio, frecuencia y duración de la exposición), y los parámetros del modelo que intervienen en la valoración del riesgo individual de exposición mediante la ingestión de agua y alimentos. El uso de funciones de probabilidad permite que la incertidumbre de los datos de entrada y los parámetros del modelo se contabilicen (13).

Los resultados evidenciaron que para cada caso, contaminante y matriz evaluados, el valor de riesgo permisible resultó estar por debajo de los límites máximos permitidos por la EPA (riesgo no cancerígeno <1 , $risk < 10^{-5}$), excepto el del riesgo no cancerígeno asociado al mercurio por consumo de agua potable y ‘aguadepanela’ en un tiempo de exposición de 5 y de 15 años, en los que se obtuvieron valores entre $1,87\text{E-}1$ y $7,54\text{E-}1$ cuando la concentración era igual al límite de detección ($1 \mu\text{g/L}^{-1}$). Se estableció que la variable que más aportó a este aumento en el valor de riesgo, fue la dosis oral de referencia para el mercurio, valor que aparece en el divisor de la tercera ecuación incluida en la sección de materiales y métodos; por lo tanto, entre más pequeño sea ese valor, mayor es el riesgo no cancerígeno por exposición a este contaminante.

Como se muestra en el cuadro 1, el valor de la dosis de referencia para el mercurio fue el más bajo, lo que significa que la tolerancia a la exposición a este contaminante sin generar riesgo se limita a dosis muy pequeñas, es decir, concentraciones por debajo del límite de detección, y a una frecuencia de consumo menor a la registrada en la población de estudio.

En este caso, no obstante, se trata de la frecuencia de consumo de agua, cuya disminución no es recomendable, por lo que la variable crítica es la concentración, ya que en ninguna de las muestras se reportó la presencia de mercurio y no existen evidencias claras de contaminación del agua potable por este metal. Se puede asumir, entonces, un riesgo mínimo calculado (un cuarto del límite de detección), que no supera el valor de riesgo admisible ($7,32\text{E-}08$). Se sugiere a las autoridades tener especial cuidado en el tratamiento y la distribución del agua de red, para evitar la presencia de este contaminante, y lograr en el corto plazo la validación de una técnica analítica que permita la cuantificación de mercurio por debajo del límite de detección aquí alcanzado ($<1 \mu\text{g/L}^{-1}$), con el fin de evaluar la red de distribución del agua.

Para el caso del cadmio en muestras de “manteco”, incluso en el caso de riesgo máximo (concentración de $80 \mu\text{g/kg}^{-1}$ y una duración de la exposición de 15 años), los valores de riesgo cancerígeno y no cancerígeno no superaron los valores máximos admisibles ($HQ=4,60\text{E-}2$; $risk=3,09\text{E-}7$).

Con el fin de conocer el valor de riesgo total en cada matriz, y dada la presencia de diferentes contaminantes, se sumaron los valores de riesgo de los

contaminantes y se compararon con los valores de riesgo admisible (15). Las figuras 3 y 4 muestran los resultados de la suma de los contaminantes en cada matriz. En todos los casos, los valores de riesgo estuvieron por debajo de los valores admisibles de riesgo cancerígeno y no cancerígeno.

Aunque no hubo evidencia de valores de riesgo admisible en este estudio, debe entenderse que las decisiones no pueden depender exclusivamente de un valor numérico, especialmente cuando este es cercano a los límites máximos permisibles. La valoración del riesgo es una herramienta científica que permite contar con una base para la gestión del riesgo; sin embargo, la adopción de decisiones debe acompañarse de un estudio que integre la valoración de diversos factores (ambientales, sociales, médicos), y la opinión de expertos, así como el conocimiento de los antecedentes y condiciones propias de la zona en cuestión.

En el país se han hecho investigaciones de este tipo con el fin de evaluar problemáticas ambientales que afectan a poblaciones humanas vulnerables (16), con lo que se ha establecido una base de información científica que permite a las autoridades reguladoras, así como a quienes prestan los servicios, conocer la situación ambiental y tomar decisiones.

Aunque en este trabajo no se encontraron evidencias de un riesgo admisible por exposición a los contaminantes evaluados, no se descarta la posibilidad de un riesgo potencial por el consumo del agua de red y de alimentos en la zona, sustentada en los hallazgos previos (y los propios de esta investigación) sobre las concentraciones de contaminantes en las matrices evaluadas. Se recomienda a las autoridades la vigilancia continua de la calidad del agua en la bocatoma y un mejor control de la calidad de los alimentos que se

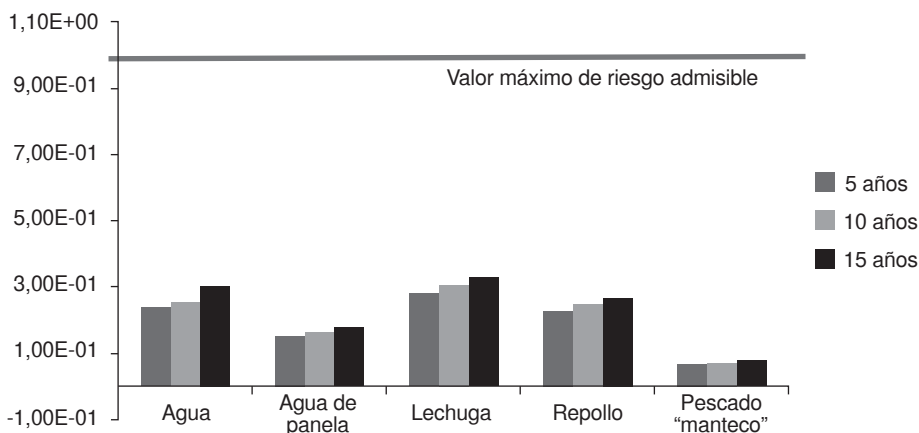


Figura 3. Valores totales del riesgo no cancerígeno encontrados en las diferentes matrices para el plomo, el mercurio, el cadmio, el 2,4 D y el diuron, con diferentes duraciones de exposición (5, 10 y 15 años)

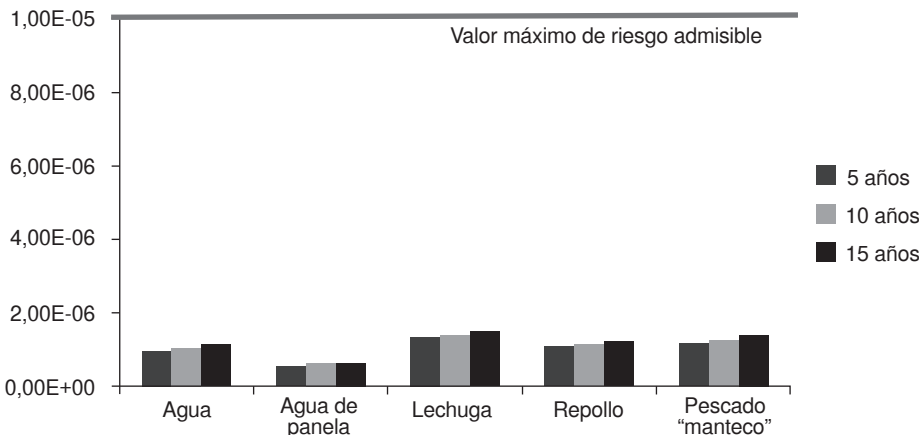


Figura 4. Valores totales del riesgo cancerígeno encontrados en las diferentes matrices para el plomo, el mercurio, el cadmio, el 2,4 D y el diuron, con diferentes duraciones de exposición (5, 10 y 15 años)

distribuyen en la zona y en toda la ciudad, lo que permitiría emitir alertas tempranas en el caso de picos de contaminación.

No puede descartarse la posibilidad de eventos futuros de contaminación que generen un riesgo potencial por la presencia de estos u otros contaminantes en las matrices estudiadas, ya que los antecedentes muestran evidencias de exposición.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias y a la Universidad del Valle, por el apoyo financiero a esta investigación, así como a los integrantes de los grupos de investigación participantes, por su colaboración.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan que no existe conflicto de intereses con respecto a esta publicación.

Financiación

Esta investigación fue financiada por Colciencias (código: 110651929211) y la Universidad de Valle.

Referencias

1. **Evans J.** Introducción al análisis de riesgos ambientales. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología; 2003.
2. **US Environmental Protection Agency.** Framework for metals risk assessment, risk assessment forum. Washington, D.C.: EPA; 2007. p. 170.
3. **Canales R, Leckie J.** Models of exposure to pesticides. En: Ott WR, Steinemann AC, Wallace LA, editors. Exposure analysis. Boca Ratón: CRC Press; 2006. p. 471-83. <http://dx.doi.org/10.1201/9781420012637.ch20>
4. **Goyer R.** Issue paper on the human health effects of metals. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, Risk Assessment Forum, Eastern Research Group, Inc; 2004. p. 48.
5. **US Environmental Protection Agency.** Risk assessment guidance for superfund. Volume I. Part A, Process for conducting probabilistic risk assessment. Washington, D.C.: EPA; 2001. p. 385.
6. **Pachajoa H, Ariza Y, Isaza C, Méndez F.** Defectos congénitos mayores en un hospital de tercer nivel en Cali, Colombia, 2004-2008. Rev Salud Pública. 2011;13:152-62. <http://dx.doi.org/10.1590/S0124-00642011000100013>
7. **Mendoza-Marín C, González LF, Benítez-Vásquez N.** Concentración de mercurio y zinc en los suelos superficiales aledaños al basurero de Navarro de la ciudad de Cali. Determinación de su distribución espacial. Revista de Ciencias. 2007;11:26-32.
8. **Dorne JL, Fink-Gremmels J.** Human and animal health risk assessments of chemicals in the food chain: Comparative aspects and future perspectives. Toxicol Appl Pharm. 2013;270:187-95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.taap.2012.03.013>
9. **American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.** Standard methods for examination of water and wastewater. 20th edition. Washington, D.C.: APHA, AWWA, WEF; 2005. p. 1368.
10. **US Environmental Protection Agency.** Supplementary – toxicity values for chemicals of potential concern. Washington, D.C.: EPA; 2008. p. 170.
11. **US Environmental Protection Agency.** Integrated Risk Information System (IRIS): A-Z list of substances. Washington D.C.: EPA; 2012. Fecha de consulta: 8 de agosto de 2012. Disponible en: <http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm?fuseaction=iris.showSubstanceList>.
12. **US Environmental Protection Agency.** Guidelines for carcinogen risk assessment. Washington, D.C.: EPA; 2005. p. 166.
13. **Lonati G, Zanoni F.** Monte-Carlo human health risk assessment of mercury emissions from a MSW gasification plant. Waste Manag. 2013;33:347-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.015>
14. **Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Organización Mundial de la Salud, Comisión del Codex Alimentarius.** Norma general del CODEX para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos. Roma: ONU, OMS, Codex; 1995. p. 50.
15. **Zheng N, Wang Q, Zhang X, Zheng D, Zhang Z, Zhang S.** Population health risk due to dietary intake of heavy metals in the industrial area of Huludao city, China. Sci Total Environ. 2007;387:96-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.07.044>
16. **Echeverry-Prieto G.** Evaluación de riesgo para la salud humana de una población vecina a un enterramiento de plaguicidas en la ciudad de Cartagena de Indias (tesis). Cali: Universidad del Valle; 2012.