

OBTENCIÓN DE NIVELES DE REMEDIACIÓN DE SUELO APLICANDO UNA EVALUACIÓN DE RIESGO ECOLÓGICO EN UN SITIO CONTAMINADO POR HIDROCARBUROS Y METALES EN CD. MADERO, TAMAULIPAS

Rosa María Flores Serrano y Rosario Iturbe Argüelles

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
Edificio 5, Cubículo 204, Circuito Interior s/n, Ciudad Universitaria,
Delegación Coyoacán, C.P. 04510, México D.F.

Tel. 56233600 ext 8653, Fax 56162164, e-mail: rfs@pumas.iingen.unam.mx

RESUMEN

En este trabajo se aplicó una evaluación de riesgo ecológico (ERE) en un sitio contaminado con hidrocarburos ubicado en Ciudad Madero, Tamaulipas, México, considerando como objetivos de evaluación a los organismos terrestres encontrados en el sitio (8 especies de mamíferos y 13 especies de aves). Para ello se aplicó el método del cociente de peligrosidad (CP), considerando únicamente la vía de exposición oral, y se obtuvieron factores de transferencia que posteriormente permitieron obtener las concentraciones en suelo que se espera sean protectoras para las especies de mamíferos y aves del sitio de estudio. Los contaminantes evaluados fueron los 16 HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) considerados como prioritarios por la U.S.EPA, BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) así como 8 metales (aluminio, cadmio, cromo, hierro, níquel, plomo, vanadio y zinc). Los resultados indicaron riesgo únicamente para el plomo en tres especies de aves, y son estos los datos que se presentan en el presente trabajo.

Palabras clave: riesgo ecológico, hidrocarburos, metales, aves, mamíferos, México.

ABSTRACT

An ecological risk assessment (ERA) was performed on a site contaminated by hydrocarbons to evaluate the potential harms to wildlife. The site was located in Ciudad Madero, Tamaulipas, Mexico and the assessment targets were the terrestrial organisms found at the place (8 mammal species and 13 bird species). The Hazard Quotient (HQ) method was applied, considering only the ingestion route of exposure. The information gathered during the assessment was used to obtain transfer factors that made possible to calculate protective soil concentrations which are expected to protect the health of the organisms evaluated. The contaminants considered for the assessment were the 16 PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) belonging to the priority pollutants as defined by the U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency), BTEX (Benzene, Toulene, Ethylbenzene, and Xylenes), as well as 8 metals (Aluminum, Cadmium, Chromium, Iron, Nickel, Lead, Vanadium, and Zinc). The results indicated risk only in the case of lead, and this was for three species of birds; this is the information presented in this work.

Key words: ecological risk assessment, hydrocarbons, metals, birds, mammals, Mexico.

INTRODUCCIÓN

La evaluación de riesgo ecológico es el proceso por medio del cual se evalúa la posibilidad de que efectos ecológicos adversos ocurran en el futuro o estén ocurriendo en el presente como resultado de la exposición a uno o más agentes productores de estrés, y se está aplicando a nivel internacional como una herramienta de protección al entorno ecológico.

En México no se tienen casos documentados de evaluaciones de este tipo, sobre todo en ambientes terrestres. Existen estudios relacionados con manifestaciones de impacto ambiental, así como de ecotoxicología, sobre todo estudios de toxicidad aguda en organismos acuáticos (ostras, algas y pulgas de agua, por ejemplo) y mesofauna del suelo (lombrices, principalmente). Asimismo, hay una gran experiencia en el uso de biomarcadores moleculares para la evaluación del efecto de contaminantes como los hidrocarburos aromáticos policíclicos en organismos acuáticos como ostras. Sin embargo, no existen estudios que integren la información ecotoxicológica generada en los laboratorios con la exposición en la cadena trófica y la magnitud de los efectos en los receptores finales, sobre todo los organismos que se encuentran en niveles tróficos superiores.

Por lo anterior, se propuso realizar una evaluación de riesgo ecológico (ERE), considerando organismos terrestres (aves y mamíferos) presentes en un sitio contaminado con hidrocarburos, ubicado en el norte de México. El método utilizado fue el del cociente de peligrosidad (CP).

En este trabajo se presentan únicamente los resultados del contaminante y los organismos para los cuales se obtuvo riesgo, es decir: plomo y las aves *Amazilia yucatanensis* (colibrí yucateco), *Crotophaga sulcirostris* (garrapatero) e *Hirundo rustica* (golondrina).

El método del CP, como su nombre lo indica, consiste en obtener cocientes que resultan de dividir las concentraciones o dosis de exposición de un organismo por un valor toxicológico de referencia (VTR). Se obtiene un CP para cada sustancia tóxica y para cada especie de biota de interés en un sitio.

En organismos terrestres, se consideran las dosis de exposición que pueden incluir las vías oral, dérmica e inhalatoria. En este trabajo se consideró únicamente la vía de exposición oral, ya que es la de mayor importancia, pues existen estudios que indican que la inhalación de partículas puede constituir menos del 0.1% del riesgo total, y la vía dérmica entre 1 y 11% del riesgo total (ECOFRAM, 1999; Sample y Suter, 1994; Sample *et al.*, 1996; U.S.EPA, 1998; y U.S.EPA, 2000). La dosis de exposición oral debe incluir la aportación por el consumo de alimentos, agua y suelo. Entre los alimentos, deben considerarse a su vez todos los tipos de alimentos consumidos por el organismo a evaluar. Los VTR para los organismos terrestres, son las dosis NOAEL (no observed adverse effect level) obtenidas en el laboratorio; estas dosis representan la dosis más alta probada, a la que no se obtuvieron los efectos adversos asociados con la sustancia tóxica de prueba. Puesto que, por lo general, no existen datos para las especies silvestres de interés, y generar este tipo de información resulta muy costoso, se usan las dosis NOAEL existentes para animales de laboratorio, y se extrapolan a los organismos de interés con base en el peso corporal.

Si el CP es mayor de 1, indica que se ha rebasado el VTR que se considera “seguro”, y por lo tanto es posible que se desarrollen los efectos adversos asociados a esa sustancia. Entonces se dice que el organismo está en riesgo.

METODOLOGÍA

La U.S.EPA (1998) establece tres pasos para realizar evaluaciones de riesgo ecológico: a) formulación del problema, b) análisis, y c) caracterización del riesgo. En la formulación del problema se integra la información referente al sitio: fuentes de contaminación, tipos de receptores, características de los receptores, efectos en los receptores, tipos de contaminantes presentes y sus concentraciones en los diferentes medios. El producto final de esta etapa es un modelo conceptual que identifica los valores ambientales a ser protegidos y las rutas de exposición. En el análisis se establece cómo puede ocurrir la exposición de los receptores a los contaminantes y en qué magnitud (dosis de exposición), y los efectos ecológicos potenciales que pueden esperarse si es que ocurre la exposición. La caracterización del riesgo es el paso final de una evaluación de riesgo, en ella se integra la información reunida en los pasos anteriores, para proporcionar un valor numérico de riesgo, que en este caso es el CP.

En este trabajo se siguieron estos pasos, y a continuación se presentan de manera breve los principales componentes de estas etapas.

Sitio de Estudio

El sitio de estudio es un área con vegetación ubicada al este del tiradero industrial de la refinería Francisco I. Madero, ubicada en Cd. Madero, Tamaulipas, México. El tiradero industrial tiene un área de 2.7 Ha, y el área circundante tiene una superficie de casi 21 Ha. Los suelos del sitio de estudio son de origen aluvial con contenidos importantes de arena. Las fuentes de contaminación son productos derivados del petróleo y chatarra depositados directamente en el suelo en forma aleatoria, y partículas procedentes de las chimeneas de procesos y quemadores existentes.

Se consideró un sitio testigo, para verificar si el sitio de estudio efectivamente estaba contaminado. Este sitio se localizó frente al sitio de estudio, y tiene un área de aproximadamente 14 Ha.

La vegetación en ambos sitios es de selva baja caducifolia espinosa, de acuerdo con la nomenclatura de Miranda y Hernández X. (1963); y en el caso del sitio testigo, se tienen además elementos de matorral de duna, es decir elementos halófitos.

Caracterización de contaminantes en suelo

Para esta caracterización se tomaron: 31 muestras superficiales (0-5 cm) y subsuperficiales (20-40 cm) de suelo en el sitio de estudio, así como 4 muestras superficiales (0-5 cm) y subsuperficiales (20-40 cm de suelo en el sitio testigo). La campaña tuvo una duración de dos

semanas (1 a 15 de julio del año 2000). La toma de muestras se realizó con un muestreador semiportátil diseñado en el Instituto de Ingeniería, UNAM, y las muestras se preservaron a 4°C hasta el momento de su análisis. Los análisis se realizaron en los Laboratorios ABC. Los contaminantes seleccionados para su análisis fueron BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) (método EPA 8260), los 16 HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) clasificados dentro de la lista sustancias tóxicas prioritarias de la U.S.EPA (método EPA 8310), y 8 metales (método EPA 6010).

Las concentraciones encontradas en el sitio de estudio fueron mayores que las encontradas en el sitio testigo, lo que permitió establecer que efectivamente se tenía un sitio contaminado (no se muestran los resultados por razones de espacio). Puesto que no se encontraron diferencias importantes en las concentraciones superficiales y subsuperficiales de suelo, se decidió trabajar únicamente con las muestras superficiales de suelo del sitio de estudio, ya que este estrato es el que más probablemente entra en contacto con los receptores.

De los contaminantes analizados se seleccionaron los contaminantes que pueden considerarse como contaminantes de interés ecológico potencial (CIEP) y que se retuvieron para ser evaluados a través de la ERE. Para ello primeramente se compararon las concentraciones del sitio de estudio con las concentraciones ecológicas de referencia (CER), las cuales son concentraciones que se suponen “seguras” para la biota que está más expuesta a los medios afectados. En este caso, por tratarse de un ecosistema terrestre, se buscaron CER para invertebrados y plantas terrestres. Se integró información de los siguientes documentos: Efroymsen *et al.* (1997a), Efroymsen *et al.* (1997b), EPTI (1999), RAIS (2001), TNRCC (2000) y U.S.EPA (1999). Se formó una base de datos de la que se obtuvo la media geométrica para cada contaminante. Se descartaron los contaminantes para los que la media geométrica del suelo del sitio de estudio fue menor que la media geométrica de las CER. Por otra parte se retuvieron los contaminantes que se consideran bioacumulables. En la tabla 1 se muestran los CIEP seleccionados para su evaluación, así como sus concentraciones.

Tabla 1. Concentraciones de los CIEP presentes en el suelo (mg/kg base seca), agua (mg/l) y biota (mg/kg base seca) del sitio de estudio

| Contaminante | Suelo | Agua | Invertebrados† | Plantas‡ |
|------------------------|------------|-------------|----------------|-----------|
| Antraceno | 4.30E-01 * | 5.00E-05*** | 9.96E-03 | 9.35E-03 |
| Benzo(a)antraceno | 3.20E-01** | 5.00E-05*** | 5.00E-03*** | 6.46E-03 |
| Benzo(a)pireno | 6.90E-02** | 5.00E-05*** | 5.00E-03*** | 4.00E-01 |
| Benzo(g,h,i)perileno | 8.00E-02** | 5.00E-05*** | 5.00E-03*** | 2.37E-02 |
| Benzo(k)fluoranteno | 2.68E-01** | 5.00E-05*** | 5.00E-03*** | 8.80E-02 |
| Criseno | 3.86E-01* | 1.07E-03 | 5.00E-03*** | 1.95E-02 |
| Fluoranteno | 1.50E-01* | 5.00E-05*** | 5.00E-03*** | 9.42E-03 |
| Indeno(1,2,3-cd)pireno | 5.00E-02** | 5.00E-05*** | 5.00E-03*** | 2.51E-02 |
| Pireno | 1.26E-01** | 5.00E-05*** | 5.00E-03*** | 5.00E-03† |
| Al | 2.24E+03* | 6.37E+00 | NR | NR |
| Cd | 2.85E-01** | 4.00E-04*** | 1.00E-02*** | 1.00E-02† |

| | | | | |
|---------|------------|-------------|-------------|----------|
| Cr (VI) | 1.21E+00* | 5.00E-05*** | 6.11E+00 | 8.90E+00 |
| Fe | 3.07E+03* | 5.30E+00 | 9.30E+01 | 7.16E+01 |
| Ni | 4.90E+00* | 1.39E-01 | 1.00E-02*** | 1.34E-01 |
| Pb | 1.52E+01** | 2.11E-02 | 2.70E+01 | 2.16E+00 |
| V | 2.07E+01* | 2.57E-01 | NR | NR |
| Zn | 2.36E+01** | 2.68E-01 | 3.36E+01 | 2.78E+01 |

* Se ha sobrepasado la concentración de referencia establecida (medias geométricas), y deben continuar considerándose en la evaluación

**Contaminante bioacumulable

***Por debajo del límite de detección analítico = Límite de detección/2

†En el caso de HAP es la media geométrica de 11 muestras (larvas, opilión, caracol de tierra, chinche, ciempiés, escolopendra, cochinilla, cucaracha de campo, grillo, hormiga, mariposa, palomilla y saltamontes). En el caso de metales es el resultado de una muestra compuesta

‡Media geométrica de hojas y tallos de 7 muestras de 6 especies (*Caesalpinia mexicana*, *Indigofera suffruticosa*, *Panicum maximum*, *Cynodon dactylon*, *Senna occidentalis* y *Psidium guajava*).

Caracterización de contaminantes en agua

Puesto que la dosis de exposición de los organismos contempla también la aportación por ingestión de agua, fue necesario caracterizar este medio. Las muestras se tomaron de charcos formados por escurrimientos superficiales de agua de lluvia dentro de la fosa del tiradero de residuos del sitio de estudio. Las muestras se tomaron en el mes de mayo de 2001 y el mes de febrero de 2002. Se tomaron 5 muestras en frascos color ámbar de boca angosta. Las muestras para determinar HAP se congelaron hasta el momento de su análisis (método de extracción con hexano, análisis por cromatografía de gases, laboratorio de Instrumentación de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM)- Unidad Xochimilco). Las muestras para analizar metales se preservaron con ácido nítrico a 4° C hasta el momento de su análisis (digestión ácida y análisis con cromatografía líquida de alta eficiencia, método EPA6010, Laboratorios ABC). Los resultados se muestran en la tabla 1.

Caracterización de contaminantes en biota

La caracterización biológica tiene como objetivo realizar un listado de las especies de flora y fauna existentes en el sitio de estudio, y elegir los objetivos o indicadores de evaluación. En el caso de la fauna, en el sitio de estudio se hizo un listado de las especies de mamíferos, aves y reptiles encontrados. En esta lista se incluyeron tanto los especímenes que fueron colectados como los que únicamente fueron observados, o de los cuales solamente se encontraron rastros como huellas o excretas identificables.

En este trabajo se aprovecharon las campañas de muestreo de biota para además obtener tejidos de hígado, estómago, cerebro, gónadas y músculo de los mamíferos, aves y reptiles colectados, a fin de analizar su contenido de HAP y metales, y usarlos posteriormente en el cálculo de los CP; también para tener más información respecto a la afinidad de los contaminantes por los diferentes tejidos. Asimismo, se analizaron las muestras de los invertebrados colectados, así como de hojas y tallos de algunos ejemplares de plantas; estas muestras se lavaron con agua destilada antes de su análisis. Los análisis se realizaron en el laboratorio de Instrumentación de la UAM-Xochimilco. Para el análisis de HAP se aplicó el Método de Referencia No. 57 (UNEP/IOC/IAEA/FAO). La cuantificación se realizó con un cromatógrafo de gases con detector

de ionización de flama (FID-GC, por sus siglas en inglés). Para el análisis de metales las muestras se digirieron con HNO₃ concentrado, Las determinaciones se realizaron con un espectrofotómetro de absorción atómica marca Shimadzu modelo AA-630-02-12.

Los resultados de estos análisis se presentan en la tabla 1 (medias geométricas, a menos que se indique otra cosa). En esta tabla se muestran las concentraciones encontradas en invertebrados y plantas, ya que son los organismos que sirven de alimento a las tres aves que se presentan en este trabajo (*C. sulcirostris* y *H. rustica* fueron clasificadas como aves insectívoras, y *A. yucatanensis* como omnívora, porque se alimenta de néctar de plantas e insectos, de acuerdo con la información bibliográfica consultada). Si bien en este trabajo no se analizó néctar, se consideró la concentración analizada en hojas y tallos de algunas plantas del sitio, lo cual es un enfoque conservador, ya que se espera que en el néctar la concentración sea menor.

Modelo conceptual

De acuerdo con Suter II (1996), el modelo conceptual es el resultado de la fase de formulación del problema de una ERE y debe considerarse como una hipótesis referente a la naturaleza de los riesgos ecológicos en un sitio contaminado. Se recomienda expresarlos en forma de diagrama de flujo y debe incluir: fuentes hipotéticas de contaminantes, rutas de transporte de los contaminantes, medios contaminados, organismos receptores y vías de ingreso a estos organismos. Debido a la limitación de espacio, únicamente se presenta la descripción del modelo conceptual considerado en este trabajo, para las aves de interés:

- fuente→suelo superficial→ ave (ingestión)
- fuente→agua de escurrimientos→ ave(ingestión)
- fuente→suelo superficial→plantas→ ave (ingestión)
- fuente→suelo superficial→ invertebrado(ingestión)→ ave (ingestión)

Lo que se indica entre paréntesis, son las posibles vías de exposición o vías de ingreso al organismo; como ya se explicó, sólo se evalúa la vía de exposición oral.

Caracterización del riesgo

La caracterización del riesgo es el paso final de una evaluación de riesgo, en ella se integra la información reunida en los pasos anteriores, para proporcionar un valor numérico de riesgo, que en este caso es el CP.

Para obtener los valores de CP de las tres especies de aves de interés, se aplicó la ecuación (1) de acuerdo con lo recomendado por TNRCC (2000).

$$CP = \frac{Dosis_{oral}}{VTR} \quad (1)$$

El numerador de la ecuación (1) se obtuvo a través de la ecuación (2), y el denominador (VTR) fueron las dosis NOAEL obtenidas para aves de laboratorio y que fueron extrapoladas a las especies de aves silvestres de interés.

$$\text{Dosis}_{\text{oral}} = \frac{\left[\left(\text{FME} \sum_{i=1}^N \{(\text{PA}_i) \times (\text{TITA}) \times (\text{C}_i)\} \right) + (\text{TI}_w \times \text{C}_w \times \text{FME}) + (\text{TI}_s \times \text{C}_s \times \text{FME}) \right]}{\text{PC}} \quad (2)$$

En la tabla 2 se presentan los valores de los parámetros de entrada necesarios para aplicar estas ecuaciones; cabe aclarar que únicamente se presenta la información concerniente a las tres especies de aves y el contaminante para los cuales se obtuvo riesgo. En la tabla 3 se describen los parámetros mencionados en la tabla 2.

Tabla 2 Valor de los parámetros para obtener CP a través de las ecuaciones (1) y (2)

| Parámetro | Especie de fauna | | |
|------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| | <i>A. yucatanensis</i> | <i>C. sulcirostris</i> | <i>H. rustica</i> |
| Cw | de tabla 1 | de tabla 1 | de tabla 1 |
| Cs | de tabla 1 | de tabla 1 | de tabla 1 |
| Ci | de tabla 1 | de tabla 1 | de tabla 1 |
| FME | 1 | 1 | 1 |
| PC | 0.00412 | 0.0776 | 0.0162 |
| PAi | PAp | 0 | 0 |
| | PAin | 0.5 | 1 |
| TI _s | 1.92E-06 | 1.97E-03 | 4.22E-06 |
| TITA | 0.00192 | 0.01161 | 0.00422 |
| TI _w | 0.0015 | 0.01064 | 0.00373 |
| VTR (para plomo) | 3.85 | 3.85 | 3.85 |

Tabla 3. Descripción de los parámetros empleados en las ecuaciones (1) y (2)

| Parámetro | Descripción |
|-----------|--|
| Cw | Concentración del contaminante en el agua (mg/l). De tabla 1. |
| Cs | Concentración del contaminante en el suelo (mg/kg b.s.). De tabla 1. |
| Ci | Concentración del contaminante en el tipo de alimento i (mg/kg b.s.). En este caso, material vegetal (plantas) e invertebrados. De tabla 1. |
| FME | Factor de modificación de la exposición. No se consideró ajuste por biodisponibilidad u otra condición que pueda modificar la exposición, por lo que tiene un valor de 1. |
| PC | Peso corporal de la especie de interés (kg en peso fresco). Media geométrica de los pesos reunidos de las colecciones de aves, mamíferos y reptiles del museo de Zoología de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional. N = 24, N= 60 y N = 29 para <i>A. yucatanensis</i> , <i>C. sulcirostris</i> y <i>H. rustica</i> , respectivamente. |
| PAi | Proporción de la TITA que está constituida por el tipo de alimento i (adimensional). En este caso fueron material vegetal (plantas) e invertebrados. |
| PAP | Proporción de la TITA que está constituida por material vegetal (adimensional). Se consideró una composición de dieta equitativa de lo indicado en literatura internacional. |
| PAin | Proporción de la TITA que está constituida por invertebrados (adimensional). Se consideró una composición de dieta equitativa de lo indicado en literatura internacional. |
| TIs | Tasa de ingestión de suelo de la especie de interés (kg b.s./d). Obtenido de multiplicar la TITA por el % en peso de ingestión incidental de suelo en alimentos de Gibson <i>et al.</i> (1997). Los porcentajes para <i>A. yucatanensis</i> , <i>C. sulcirostris</i> y <i>H. rustica</i> son 0.1, 17 y 0.1 %, respectivamente. |
| TITA | Tasa de ingestión total de alimentos de la especie de interés (kg b.s./d). Se obtuvieron de las ecuaciones alométricas en función del peso corporal propuestas por Nagy (2001): para <i>A. yucatanensis</i> se aplicó la de aves del orden de las Apodiformes, para <i>C. sulcirostris</i> la ecuación para aves insectívoras y para <i>H. rustica</i> la ecuación para aves del orden de las Passeriformes. |
| TIw | Tasa de ingestión de agua de la especie de interés (l/d). Se obtuvieron de aplicar ecuaciones alométricas en función del peso corporal propuestas por Calder y Braun (1983): en todos los casos se aplicó la ecuación genérica para aves. |
| VTR | Valor toxicológico de referencia = NOAEL [(mg/kg)/d]. Se obtuvieron de aplicar la ecuación de extrapolación alométrica que proponen Sample <i>et al.</i> (1996) y Sample y Arenal (1999), en donde se obtiene la dosis NOAEL para la especie silvestre en función de la dosis NOAEL para una especie de laboratorio, empleando un factor de escalamiento de b=1. El valor NOAEL de la especie de laboratorio se obtuvo de un estudio realizado por Pattee (1984) en halcón (<i>Falco sparverius</i>), para efectos reproductivos, con aplicación de plomo metálico en dieta por 7 meses. |
| b.s. | Base seca |

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la información de la tabla 2 se aplicaron las ecuaciones (1) y (2), obteniéndose los CP que se muestran en la tabla 4. Puesto que los CP fueron mayores de 1 en las tres especies de aves abordadas en este trabajo, se tiene que la dosis de exposición rebasó los VTR, y por lo tanto podría haber riesgo por exposición a plomo por la vía oral. Entonces se procedió a calcular las concentraciones en suelo que harían que no se rebasaran estos VTR. Para ello se sustituyó el valor de $CP = 1$ (situación en la que la dosis de exposición es igual al VTR) en la ecuación (1) y se despejó el parámetro C_s (concentración en suelo). Para que esto fuera posible, considerando la transferencia de contaminantes del suelo a la biota que sirve de alimento (plantas e invertebrados), fue necesario expresar la concentración en la biota que sirve de alimento en función de un factor de bioacumulación (FBA) que resultó de dividir la concentración en la biota (planta o invertebrado) por la concentración en el suelo que se muestran en la tabla 1. De esta manera, la concentración en la biota en la ecuación (1) se expresó como el producto del FBA por la concentración en suelo, y luego se procedió a despejar C_s .

En la tabla 4 se muestran los FBA empleados (que a su vez se obtuvieron con las concentraciones mostradas en la tabla 1), y las concentraciones en suelo protectoras de las especies de aves de interés.

Tabla 4. Cocientes de peligrosidad, factores de bioacumulación y concentraciones en suelo protectoras de las especies de aves de interés

| Parámetro | Especie de fauna | | |
|----------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| | <i>A. yucatanensis</i> | <i>C. sulcirostris</i> | <i>H. rustica</i> |
| CP | 1.77 | 1.15 | 1.83 |
| FBA _{s-p} (plomo) | 0.142 | 0.142 | 0.142 |
| FBA _{s-i} (plomo) | 1.781 | 1.781 | 1.781 |
| C _s | 8.57 | 13.18 | 8.28 |

CP = Cociente de peligrosidad (adimensional)

FBA_{s-p} = Factor de bioacumulación suelo-planta (adimensional)

FBA_{s-i} = Factor de bioacumulación suelo-invertebrado (adimensional)

C_s = concentración en suelo protectora de las especies de aves (mg/kg b.s.)

Los resultados indicaron riesgo ($CP > 1$) para las aves *A. yucatanensis*, *C. sulcirostris* y *H. rustica* por exposición a plomo por la vía oral. El resto de las especies de fauna evaluadas no indicaron riesgo para los 7 metales y 9 HAP restantes. Lo anterior se atribuye en parte a las relativamente altas concentraciones de plomo encontradas en las muestras de invertebrados y hojas de las especies colectadas.

Sin embargo, los resultados deben tomarse con reserva, ya que se tienen incertidumbres asociadas a las extrapolaciones alométricas para estimar tanto las tasas de ingestión de alimentos, agua y suelo, como los VTR.

Como puede verse, las evaluaciones de riesgo ecológico permiten no sólo determinar si existe riesgo para las especies de vida silvestre presentes en un sitio, sino que también permiten calcular

las concentraciones en los medios de exposición que se espera que protejan su salud; es decir, permiten establecer concentraciones de remediación de medios contaminados con base en riesgo para sitios específicos. Asimismo, si se tienen valores confiables de entrada, en particular de factores de transferencia y valores toxicológicos de referencia, pueden evaluarse efectos potenciales y concentraciones en suelo o agua, a futuro, a través del establecimiento de posibles escenarios.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El método del CP es un método de ERE relativamente fácil de aplicar, si se le compara con otros métodos que requieren de la generación de distribuciones de frecuencia de efectos y las variables de exposición; sin embargo, debe tenerse cuidado con la interpretación de los resultados, ya que los resultados obtenidos, dependen de la calidad de los datos puntuales que se ingresan a la ecuación de riesgo, en particular, los VTR.
- El método del CP permite establecer no sólo si existe riesgo para las especies silvestres presentes en un sitio, si no que también permite establecer concentraciones de limpieza para sitios contaminados (concentraciones de limpieza para sitio específico con base en riesgo).
- Los valores de riesgo ($CP > 1$) encontrados para las aves *A. yucatanensis*, *C. sulcirostris* y *H. rustica*, por exposición a plomo por la vía oral se atribuyen en parte a las relativamente altas concentraciones de plomo encontradas en las muestras de invertebrados y hojas de las especies colectadas., y a las incertidumbres existentes en los valores de VTR usados.
- Sería conveniente hacer estudios para determinar VTR en especies de mamíferos, aves y reptiles con pesos corporales y fisiologías más similares a las de los ejemplares silvestres de interés. Así como analizar más muestras de la biota que sirve de alimento.
- Pese a que se tiene más o menos bien caracterizada la flora y fauna de México, se necesita generar más información en lo referente a las características de las especies en cuanto a pesos corporales, composición de la dieta, tasas de ingestión y tamaños de ámbitos hogareños, por tipo de clima.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de las siguientes personas e instituciones: Dr. José Salvador Flores Guido (flora); Biol. Ángel Vega López, M. en C. Pilar Gabriela Ibáñez y Biol. Edmundo Pérez Ramos (fauna); Carlos Flores Torres, Jesús Flores Torres, Carlos Flores Vázquez, y David Garibay (muestreo de suelo); Museo de Zoología de la Facultad de Ciencias de la UNAM; Colección de aves, mamíferos y reptiles de la Escuela Nacional de CC. Biológicas del IPN; Dirección General de Estudios de Posgrado de la UNAM.

REFERENCIAS CITADAS

ECOFRAM (Ecological Committee on FIFRA Risk Assessment Methods) (1999). *ECOFRAM Terrestrial Draft Report*, ECOFRAM.

Sample, B E y Suter II, G W (1994). *Estimating Exposure of Terrestrial Wildlife Contamination. Draft. ES/ER/TM-125*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.

Sample, B E, Opresko, D M y Suter II, G W (1996). *Toxicological Benchmarks for Wildlife: 1996 Revision. ES/ER/TM-86/R3*. Lockheed Martin Energy Systems, Inc, Oak Ridge National Laboratory for the U.S. Department of Energy, Oak Ridge, pp 28-29.

U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency) (1998). *Guidelines for Ecological Risk Assessment. EPA/630/R-95/002F Final*. Published on May 14, 1998. Federal Register 63(93):26846-26924. U.S. Environmental Protection Agency, Washington D C, pp. 188.

U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency) (2000). *Ecological Soil Screening Guidance, Draft, Eco-SSL*. U.S. EPA, Washington, DC, pp 1-6.

Miranda, F y Hernández X, E (1963). *Los Tipos de Vegetación de México y su Clasificación, Bol. Soc. Bot. de México*, v 28, pp. 19-179.

Efroymsen, R A, Will, M E y Suter II, G W (1997a). *Toxicological Benchmarks for Contaminants of Potential Concern for Effects on Soil and Litter Invertebrates and Heterotrophic Processes: 1997 Revision, ES/ER/TM-126/R2*. ORNL, Oak Ridge TN.

Efroymsen, R A, Will, M E, Suter II, G W y Wooten, A C (1997b). *Toxicological Benchmarks for Screening Contaminants of Potential Concern for Effects on Terrestrial Plants: 1997 Revision, ES/ER/TM-85/R3*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge TN.

EPTI (Ecological Planning and Toxicology Inc.) (1999). *A Critical Review of Methods for Developing Ecological Soil Quality Guidelines and Criteria*, Corvallis.

RAIS (Risk Assessment Information System) (2001). *Ecological Benchmarks*. http://risk.lsd.ornl.gov/homepage/eco_tool.shtml, RAIS, EUA.

TNRCC (Texas Natural Resources Conservation Commission) (2000). *Guidance for Conducting Ecological Risk Assessment at Remediation Sites in Texas. Draft Final*. Texas Natural Resources Conservation Commission, Texas, pp. 267.

U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency) (1999). *Screening Level Ecological Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities (Peer Review Draft). Appendix E: Toxicity Reference Values.*, Office of Solid Waste, U.S.EPA, Washington D.C.

Suter II, G W (1996). *Guide for Developing Conceptual Models for Ecological Risk Assessments ES/ER/TM-186*. Environmental Restoration Risk Assessment Program Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. Estados Unidos de América.

Gibson, E, Strudwick, D y Walker, Ph (1997). *National Framework for Ecological Risk Assessment of Contaminated Sites: Part B: Derivation Ecological Impact Levels (EILs)*. Victorian Environmental Protection Authority, Environment Australia, Australia

Nagy, K A (2001). *Food Requirements of Wild Animals: Predictive Equations for Free-Living Mammals, Reptiles, and Birds. Nutrition Abstracts and Reviews Series B: Livestock Feeds and Feeding*, v 71, No 10, pp. 2R-31R.

Calder, W A y Braun, E J (1983). *Scaling of Osmotic Regulation in Mammals and Birds. Am. J. Physiol.*, v 244, pp R601-R606.

Sample, B E y Arenal, C A (1999). *Allometric Models for Interspecies Extrapolation of Wildlife. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, No 62, pp. 653-663

Pattee, O H (1984). *Eggshell thickness and reproduction in American kestrels exposed to chronic dietary lead. Arch Environ. Contam. Toxicol.*, v 13, pp. 29-34.