

Una revisión sobre la migración de las aves rapaces y los efectos toxicológicos de los metales pesados

A review on raptor migration and toxicological effects of heavy metals

—

Manuel Becerril-González
manuel.becerril@cch.unam.mx
ORCID 0000-0002-0245-0756

COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES, PLANTEL SUR. UNIVERSIDAD
NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO



Para citar este artículo:

Becerril González, M. (2022). Una revisión sobre la migración de las aves rapaces y los efectos toxicológicos de los metales pesados. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 11(31). <https://doi.org/10.31644/IMASD.31.2022.a03>

RESUMEN

Se expone la importancia de las rapaces migratorias y su uso como bio-indicadores para determinar la presencia y concentraciones de metales pesados y metaloides, se exhibe también un panorama general sobre los efectos toxicológicos. Cabe mencionar que actividades antrópicas como la minería, la petroquímica y la agricultura son una de las principales fuentes de emisión de contaminantes ambientales. Los efectos sobre la salud de las rapaces migratorias es variable y actualmente se realizan estudios para determinar los grados de afectación. Algunos metales pesados y metaloides tienen efectos negativos sobre biomoléculas importantes del metabolismo celular; a pesar de la cantidad de trabajos realizados, los resultados no son concluyentes y los cambios en las poblaciones naturales de las especies son diversos.

Palabras Clave:

Rapaces; migración; especies bio-indicadoras; metales pesados; Veracruz Río de Rapaces.

— *Abstract*—

In this work, the importance of migrating raptors as bioindicators to show the presence and concentration of heavy metals and metalloids is examined, in addition, a general view on the toxicity of these elements is discussed. Human activities such as mining, petroleum/oil industry and agriculture are the principal sources of environmental pollution, the effects of these industries on the health of migrating raptors are variable, at present, studies to determine the degree to which raptors are affected are being conducted. Some heavy metals and metalloids have negative effects on biomolecules essential to cell metabolism; despite the amount of written works on the subject their results are not conclusive and changes in natural populations of raptors are diverse.

Keywords:

Raptors; migration; indicator species; heavy metals; Veracruz Rio de Rapaces.

LO DE HOY SOBRE EL TEMA

Diversos temas ambientales han llamado nuestra atención en las últimas seis décadas, particularmente aquellos estudios que nos rinden cuentas sobre los efectos negativos que hemos causado como sociedad a los ecosistemas, éstos son diversos y han provocado efectos de diferentes magnitudes, sin embargo, cada vez se aportan mayores evidencias científicas y nuevos conocimientos para armar el intrincado rompecabezas ambiental, con sus piezas claves y procesos que lo mantienen en equilibrio.

Cabe mencionar que una de las formas en que podemos conocer los impactos de la contaminación ambiental es la presencia o ausencia de lo que hoy conocemos como especies bio-indicadoras,¹ varias de ellas las podemos “evaluar” debido a las técnicas de estudio específicas que nos llevan a saber aspectos de interés particular, por ejemplo, la toxicidad que puede generar un elemento o compuesto químico, afectando desfavorablemente alguna función metabólica de un ser vivo.

Actividades como la minería, la petroquímica, la agricultura y la industria en general son responsables de la generación de una serie de residuos altamente contaminantes o bien emplean en sus procesos los denominados metales pesados y metaloides (e.g., cadmio, cromo, mercurio, plomo, zinc, arsénico, entre otros), éstos pueden brindarnos información no solo sobre los niveles de contaminación ambiental, sino que, además, nos permiten evaluar el estado de salud de especies indicadoras, tal es el caso de las rapaces (Figura 1), dicho grupo de aves se clasifica en rapaces diurnas como: águilas, aguilillas, halcones, gavilanes, cernícalos, etcétera, y rapaces nocturnas como: búhos, lechuzas y tecolotes² la mayoría, desafortunadamente, bajo alguna categoría como especies en peligro de extinción o con poblaciones muy vulnerables al declive.

-
- 1 Son aquellas especies que nos brindan información muy valiosa, y a la cual se le puede analizar de manera cualitativa y cuantitativa para saber el estado de conservación o alteración de los ecosistemas.
 - 2 Las aves rapaces, de presa o de rapiña están conformadas por cuatro Órdenes: Strigiformes (búhos y afines), Cathartiformes (buitres del Nuevo Mundo), Accipitriformes (águilas y afines) y Falconiformes (halcones y afines) y siete Familias con más de 500 especies en todos los continentes (Del Hoyo y Collar, 2014).



Figura 1. Fotografía de *Rupornis magnirostris*, individuo juvenil, Aguillita Caminera, Papantla, Veracruz, ave rapaz residente en México y con amplia distribución en Sudamérica. Fuente: Elaboración propia (2015)

Es pertinente mencionar que debido a que las rapaces forman parte de las aves carismáticas, han sido estudiadas desde diferentes puntos de vista, dentro de los que se destacan: el estudio de su conservación, su distribución geográfica, la migración, el modelaje espacial, la valoración de las condiciones del paisaje y el uso de los sistemas de información geográfica (Rodríguez-Estrella y Bojórquez, 2004).

LA MIGRACIÓN DE LAS RAPACES EN EL MUNDO

La migración de las aves es uno de los fenómenos naturales de mayor interés en la ornitología (*i.e.*, estudio de las aves), aunque se saben muchas cosas al respecto, aún se desconocen aspectos básicos y específicos de esta extraordinaria travesía; por lo menos en las aves se tiene registro de 1,855 especies que migran anualmente (BirdLife, 2004a y 2004b), estas migraciones pueden ser de larga o corta distancia, de norte a sur o de este a oeste, se presenta de manera cíclica y se ha dicho que es el resultado de evitar las bajas temperaturas, tener acceso al alimento o bien tener sitios adecuados para la reproducción, cualquiera que sea el caso, durante el movimiento a través de las diversas rutas migratorias se pueden analizar a las aves y determinar con ello su estado de salud. Existen dos grandes rutas migratorias de rapaces reconocidas a nivel global, una sigue la migración desde del noreste de África para internarse en Asia y terminar en la parte centro y norte de Europa, ésta ha sido estudiada por la German Ornithologists' Society (Bairlein, 2003) y BirdLife International, y la otra en el norte-centro-sur del continente americano, analizada por la Universidad de Cornell de Nueva York, a través del Cornell Lab, la Audubon Society y en México la Asociación Civil Pronatura Veracruz desde 1991.

Particularmente, México es uno de los países que ofrece una oportunidad única para la observación y registro de especies migratorias, algunos

reportes mencionan que semanalmente se pueden registrar poco más de 300 especies, muy por arriba de otros sitios tropicales y subtropicales en el mundo, por ejemplo, solo en el estado de Veracruz existen más de 50 sitios importantes para su observación con presencia de más de 700 especies migratorias otoñales en total (Straub, 2007). Algunos datos compartidos por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad mencionan que en la migración de “Veracruz Río de Rapaces” solo en el año 2005 se registraron 5, 691, 204 individuos pertenecientes a 25 especies de rapaces y 4 géneros no identificados, lo que revela la magnitud de la migración en la Llanura Costera del Golfo.

En las rapaces migratorias se presentan graves problemas debido al cambio de uso de suelo para fines relacionados con la agricultura, ya que supone que afecta al 80% de las rapaces migratorias (Kirby *et al.*, 2008), además del uso de pesticidas organoclorados y fertilizantes, cabe destacar que muchas de las empresas dedicadas a la síntesis de estos productos presentan información parcial y en pocos casos se mencionan de manera general los riesgos para la salud y los ecosistemas, al parecer algunos de ellos ni siquiera están regulados por leyes ambientales, basta recordar el uso del FURADAN 350 L (*i.e.*, Carbofuran: 2-3-dihidro-2,2-dimetil-7-benzofuranil-metil carbamato) para luchar contra los nemátodos “gusanos redondos” en África que ha causado la muerte de leones y un número aún no determinado de buitres de diversas especies, rompiendo así el equilibrio ecológico, este producto en México es utilizado en diversos cultivos (*e.g.*, cacahuate, café, caña de azúcar, chile, calabaza, melón, pepino, sandía, fresa, maíz, papa, plátano y trigo entre otros) sobre todo por su disponibilidad y bajo precio (\$ 978.00 pesos por litro/cotizado a noviembre de 2021 en Mercado Libre) y aún se desconocen sus efectos específicos en la fauna silvestre.

Sin duda, la valoración del estado de salud de las rapaces migratorias es de vital importancia, debido a las condiciones eco-fisiológicas necesarias para realizar la migración completa, ya que se enfrentan a la destrucción de su hábitat y al cambio climático, y por si fuera poco, a las mismas condiciones de salud del ave (Klaassen *et al.*, 2012), en estos casos las necesidades energéticas del ATP (adenosín trifosfato, molécula altamente energética usada en el metabolismo celular) por vías aeróbicas y anaeróbicas están relacionadas con procesos metabólicos eficientes y, a su vez, con el estado de salud de los individuos, sean juveniles o adultos, y por otro lado, se ha observado una clara relación entre la ausencia de las especies migratorias y la pérdida de relaciones ecológicas y evolutivas.

LAS AVES COMO BIO-INDICADORES DE METALES PESADOS

En el caso concreto de las rapaces al ser especies posicionadas en lo más alto de las tramas alimenticias se pueden utilizar como especies bio-indicadoras (Figura 2) y por lo tanto, su monitoreo es un asunto de alta prioridad para los expertos pues son individuos que ayudan a determinar la presencia de metales pesados y su efecto sobre otra fauna y flora en general (Hermoso de Mendoza *et al.*, 2006).

En lo referente a la biología de las rapaces se debe contemplar que son parte de la avifauna que presenta ciclos de vida largos, algunas viajan grandes distancias y otras forman parte del “cuerpo sanitario” de la naturaleza (*i.e.*, carroñeros) que se encargan de limpiar el ecosistema de cuerpos de animales muertos o bien atrapan animales enfermos, eso no quiere decir que no se alimenten de animales sanos (*i.e.*, cazadores), pero podemos imaginar lo intrincado de la problemática a estudiar, algunas de estas rapaces se alimentan de otras aves, mamíferos de diversos tamaños, reptiles, anfibios, peces e incluso algunos incluyen en sus dietas insectos y moluscos. Lo anterior puede ayudar a comprender también las diferentes concentraciones de metales pesados presentes e incluso dependerá de la región en donde se distribuya el ave y la estación del año, así como de la edad de los individuos y su sexo.



Figura 2. Fotografía de *Accipiter cooperii*, individuo adulto, Gavilán de Cooper, Alcaldía Miguel Hidalgo, Segunda Sección del Bosque de Chapultepec de la CD MX, rapaz bio-indicadora y migratoria otoñal en “Veracruz Río de Rapaces”. Fuente: Elaboración propia (2018)

Los estudios más completos han sido los realizados en la Llanura Costera del Golfo, ya que se aproximan en gran medida a la realidad; su metodología incluye trabajar con todas las rapaces migratorias atrapadas a lo largo de cada año, esto se ha realizado en poco más de 20 años, tomando muestras

de sangre y plumas de rapaces vivas para posteriormente liberarlas; dichos estudios han sido analizados por equipos de trabajo de alta especialidad, como el que dirige en el estado de Veracruz el Dr. Ernesto Ruelas Inzunza de la Universidad Veracruzana y Pronatura Veracruz, obteniendo información valiosa sobre este tema.

Como una valoración general de los metales pesados y metaloides en los seres vivos, se presentan diversos efectos a nivel molecular, dentro de los cuales podemos observar los siguientes:

1. Bloqueo de grupos funcionales en biomoléculas, debido a la afinidad de los cationes metálicos por los grupos sulfhidrilos de las proteínas, específicamente a los residuos de cisteína, lo que ocasiona su desnaturalización (Schützendübel y Polle, 2002; Peralta-Videa *et al.*, 2009).
2. Desplazamiento de sitios catiónicos en enzimas importantes, por lo que pierden su función (Schützendübel y Polle, 2002; Smeets *et al.*, 2005).
3. Formación de especies reactivas de oxígeno debido a la autooxidación de metales como Fe^{2+} (ion hierro) o Cu^+ (ion cobre), lo que resulta en la formación de H_2O_2 (peróxido de hidrógeno) y del radical OH (hidroxilo), en el primer caso se ha observado que su acumulación aumenta considerablemente la muerte celular programada (*i.e.*, apoptosis), mientras que el radical OH es uno de los más reactivos que se conocen por su capacidad de iniciar reacciones en cadena de radicales libres que ocasionan modificaciones y daño irreversible a moléculas celulares como carbohidratos, DNA (ácido desoxirribonucleico, por sus siglas internacionales en inglés), proteínas y lípidos (Mithöfer *et al.*, 2004).

MALOS RECUERDOS DE EXPERIENCIAS PASADAS

Desde hace poco más de 50 años se habían registrado muertes de individuos adultos y pollos de Águila Cabeza Blanca (*Haliaeetus leucocephalus*), debido a la intoxicación por plomo, en esos casos las concentraciones iban de los 5-61 ppm (partes por millón) y 5-12 ppm respectivamente, esto llamó la atención de la comunidad científica dedicada a tratar temas de contaminación ambiental por sustancias químicas, lo más inmediato era detectar las fuentes a exposición prolongada en dichas rapaces, aun cuando se hacía referencia a que solo esto sucedía en países subdesarrollados en zonas tropicales y subtropicales, actualmente la evidencia sugiere lo contrario y establece, desafortunadamente, una generalidad en términos de exposiciones prolongadas y absorción de metales pesados en muchos países desarrollados o no, cuyas políticas ambientales han sido insuficientes para frenar estos problemas. La

verdad sigue siendo que las aves presentan concentraciones altas y letales de alguno o algunos de estos elementos químicos.

La minería en nuestro país es una de las principales causas de contaminación ambiental por metales pesados, debido al manejo inadecuado de sus residuos conocidos como “jales mineros” los reportes indican que en México podrían existir millones de toneladas de jales dispersos en el territorio nacional, de los que todavía se desconocen sus condiciones y su potencial de afectación al ambiente (Yañez *et al.*, 2003; Meza-Figueroa *et al.*, 2009; Mireles *et al.*, 2012; Cortés-Jiménez *et al.*, 2013; Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006).

METALES PESADOS Y METALOIDES PRESENTES EN RAPACES: HISTORIAS RECIENTES CON EVIDENCIAS CIENTÍFICAS

Desde hace algún tiempo se ha investigado el efecto provocado por diversas concentraciones de metales pesados y metaloides en el tejido hepático de rapaces, como en algunas zonas de España, en donde las “concentraciones normales de As (arsénico), Cd (cadmio), Pb (plomo) y Zn (zinc)” al parecer no tienen efectos toxicológicos graves sobre la salud de las mismas (Hermoso de Mendoza *et al.*, 2006), sin embargo, estos datos no son totalmente concluyentes, cabe mencionar que se debe contrastar la información de diversas fuentes y contar con metodologías estrictas para valorar el impacto que se tiene en el ambiente. En el anterior estudio, por ejemplo, fueron analizadas nueve especies de rapaces para un total de 85 individuos, de los cuales en tres especies se analizaron 3 individuos de cada una y para una especie se estudiaron 44 ejemplares, este último representa el 51.7% de las muestras analizadas, basta mencionar que solo para España se han registrado 33 especies de aves rapaces.

En varias especies silvestres, incluidas el Águila Cabeza Blanca y el Águila Real (*Haliaeetus leucocephalus* y *Aquila chrysaetos* respectivamente), a través de los análisis sanguíneos se han reportado efectos nocivos sobre el sistema neurológico, así como en el aparato reproductivo, resultado de las altas concentraciones de arsénico, mercurio y plomo (Lehner *et al.*, 2013).

En especies como el Cóndor Californiano (*Gymnogyps californianus*), que se encuentra en peligro de extinción (SEMARNAT, 2010. NOM-059-SEMARNAT-2010) y cuyos hábitos alimenticios los ubican dentro de las rapaces carroñeras, la exposición a plomo es muy elevada toda vez que se han encontrado residuos de municiones de plomo en animales muertos, provocando efectos nocivos en la actividad sináptica y problemas en la conformación del tejido óseo (Hunt, 2012), además de que acorta la longevidad y tiene efectos negativos sobre la reproducción (e.g., la espermatogénesis). En el mismo caso de ingesta por carne contaminada por Pb se encuentran

Águilas Reales (Iwata *et al.*, 2000; Hunt *et al.*, 2006; Krone *et al.*, 2009), Buitres del Viejo Mundo y Aguilillas de diversas especies (Mateo, 2009; Fisher *et al.*, 2006).

En el Cernícalo Americano (*Falco sparverius*) el ácido δ -aminolevulínico es un precursor en la síntesis de la hemoglobina, sin embargo, se puede elevar su concentración debido a la intoxicación por plomo, afectando a su vez la síntesis de porfirinas que dan como resultado que en la hemoglobina la parte del grupo hemo no se produzca de manera apropiada, y por tanto, no se realice adecuadamente el transporte de oxígeno al cuerpo (Pattee, 1985).

Nighat y sus colaboradores realizaron en 2013 estudios en Pakistán de cinco especies de la Familia *Falconidae* (halcones), nueve de *Accipitridae* (aguilillas) y cuatro *Strigidae* (búhos) debido a las altas concentraciones actuales de metales pesados en dicho país, con el objetivo de implementar medidas remediales, aunque los resultados han sido diversos en términos de concentraciones, en todos los casos han sido detectados y muestran una devastadora crisis ecológica debido a la industrialización; particularmente en países del sur de Asia, exhibiendo, entre otras cosas, el manejo inadecuado de los desechos sólidos y líquidos en zonas urbanas (Karn y Harada, 2001; Hinrichsen *et al.*, 1997; Pandey, 2006).

Arsénico

Las aves rapaces nos permiten evaluar casos específicos como el del arsénico, en donde dicho elemento, además de ser cancerígeno, es un tóxico bioacumulable (Hermoso de Mendoza *et al.*, 2006). Actualmente, se desarrollan trabajos de investigación en donde se estudian los contenidos alimenticios de diversas especies de aves, sobre todo en rapaces, debido a que en restos de contenido estomacal se han encontrado rastros de As. Posiblemente su uso como arsenopirita FeAsS en productos agrícolas como pesticidas y herbicidas (Londoño-Franco *et al.*, 2016) sea una de las principales vías de ingestión directa, los hábitos alimenticios de algunas rapaces incluyen mamíferos de pequeño y mediano tamaño que se encuentran en zonas de cultivo y que ingieren metales pesados en su dieta habitual.

Cadmio

El caso del cadmio es diferente, pues demuestra exposición reciente a alguna fuente en sangre y a exposición prolongada en plumas, sin embargo, se deben tomar en cuenta variables como la edad, la época de toma de muestra, el sitio en donde fue tomada, etc. No obstante, se aprecia que individuos juveniles presentan menores concentraciones y en rapaces adultos se multiplica hasta por 10 veces su concentración (Hermoso de Mendoza *et*

al., 2006). Los efectos (al igual que la presencia de plomo) sobre el sistema endocrino de las aves pueden afectar el desarrollo y crecimiento, la muda de plumas, la migración (Stoica *et al.*, 2000; Martin *et al.*, 2003), causa enfermedades respiratorias, e inhibe la producción de huevos y el grosor de la cáscara de los mismos.

El Cd al ser utilizado como parte de algunos abonos puede estar presente en el suelo y en cuerpos de agua debido a algunos medicamentos (Figura 3), además de que podemos encontrarlo en cereales, vegetales y tubérculos (Londoño-Franco *et al.*, 2016) que forman parte de la dieta de algunos roedores y por lo tanto puede ser la vía de ingestión directa por las aves rapaces.



Figura 3. Fotografía de *Pandion haliaetus*, individuo adulto, Águila Pescadora, Tecolutla, Veracruz, algunos individuos presentan concentraciones letales de Cd debido a su alimentación estrictamente piscívora.
Fuente: Elaboración propia (2020)

Cromo

La presencia de Cr ha evidenciado que es un elemento que causa daños al material genético (*i.e.*, agente mutagénico) y en general a las células eucariontes de muchas especies (Robles-Camacho y Armienta, 2000), obviamente se han encontrado altas concentraciones no letales de cromo en aves rapaces, se continúa investigando ya que es un micro-mineral esencial en el metabolismo de lípidos, carbohidratos y proteínas, sin embargo, los resultados diversos plantean estudios más específicos al respecto.

Mercurio

Los análisis de sangre, plumas y huevos para pollos de Águila Cabeza Blanca (*Haliaeetus leucocephalus*), en algunos sitios de EE. UU., revelan que en un 95% de las muestras se halla Hg y que en la mayoría las concentraciones son

bajas (0.025-0.079 mg/kg – ppm), la presencia de mercurio está correlacionada con la dieta de la especie. No obstante, es importante recordar que algunos estudios establecen que en individuos adultos la cantidad de metales pesados puede ser 10 veces mayor su concentración con respecto a individuos juveniles o pollos. Es interesante que algunas evaluaciones consideran que para esta especie entre 2008 y 2010 la cantidad y concentración de mercurio en sangre y plumas ha ido en descenso (Mojica y Watts, 2011).

Por su parte, Carlson y colaboradores en 2012, encontraron mercurio en todas las muestras de sangre que analizaron en la misma especie, en promedio 0.28 ppm y en pollos se observó que en el 7.8% de los casos tuvieron niveles altos, mayores a 0.7 ppm, esto puede generar en los individuos diversos efectos toxicológicos a mediano y largo plazo durante su desarrollo.

En el Aguililla Pecho Rojo (*Buteo lineatus*) los niveles detectados de Hg son alarmantemente elevados en sangre y plumas, tanto en pollos como individuos adultos (Hanneman, 2021), por lo que no debemos pensar en generalizar en ningún momento estas situaciones, en algunas especies los riesgos de toxicidad son mayores con respecto a otras, resultado de sus hábitos alimenticios, distribución geográfica o tiempos de exposición a diversos elementos químicos, entre otras variables.

En nuestro país, Campbell (2018), ha encontrado mayor concentración de mercurio en muestras de sangre en rapaces residentes como el Aguililla Cola Corta, Halcón Fajado y Aguililla Caminera (*Buteo brachyurus*, *Falco femoralis* y *Rupornis magnirostris*, respectivamente) mientras que en rapaces migratorias como el Gavilán de Cooper y el Gavilán Pecho Canela (*Accipiter cooperii* y *Accipiter striatus*) la mayor concentración del mismo elemento es mayor en plumas, lo que sugiere claramente que las rapaces en general presentan contaminación en su cuerpo por la presencia de Hg y están expuestas e ingieren dicho metal pesado, cualquiera que sea el caso, lo podemos asociar claramente a los sitios de reproducción-anidación en el norte del continente Americano y sus sitios de descanso a lo largo de las rutas migratorias en donde las actividades industriales y las zonas urbanas generan contaminación por la gran cantidad de estos metales, para el caso mexicano es posible que al haber realizado este trabajo en el estado de Veracruz que se caracteriza por sus actividades petroquímicas, las concentraciones sean esperadamente altas debido a la alimentación y su posición en la cadena alimenticia.

El hecho es que en muchos países se puede detectar mercurio en agua, dichas muestras han sido tomadas de fuentes naturales como ríos, humedales, lagos, zonas costeras y océanos en donde las rapaces consumen peces contaminados con diversos metales pesados, entre ellos mercurio. En países industrializados, la contaminación del agua está asociada a la expansión de los proyectos industriales (Carlson *et al.*, 2012), por lo que deberían ser evaluados con criterios científicos más estrictos.

Otro aspecto a considerar es que los efectos adversos por mercurio varían en función de su forma química, concentración y tiempo de exposición, por ejemplo, la forma más tóxica del mercurio es el metil mercurio $[\text{CH}_3\text{Hg}]^+$ ya que se absorbe en un 90% comparado con el cloruro de mercurio (HgCl_2) del cual solo se absorbe un 2% (UNEP, 2003).

Plomo

En especies de rapaces que se alimentan de ratas y ratones, y en cuyo caso se han acercado a centros urbanos, es más posible que los altos niveles de Pb detectados en huesos y plumas (Hunt, 2012) estén relacionados con fuentes de contaminación antrópica. El caso del Cernícalo Americano (*Falco sparverius*), (Figura 4), es uno de los ejemplos que actualmente se siguen trabajando debido a las concentraciones letales por plomo, sobre todo por el consumo de ratones de campo y su relación con pesticidas en zonas de cultivo; lo mismo sucede con diversas especies de búhos (Figura N° 5) y tecolotes en México, ya que el pelo de roedores que es expulsado en forma de egagrópilas (i.e., regurgitación de material que no fue degradado en el tubo digestivo del ave y que puede contener: huesos, dientes, pelo, plumas y materia orgánica diversa) es indicativo y acumulativo de metales pesados (McLean *et al.*, 2009).

En el caso de los Programas de Conservación y Reintroducción de rapaces como el Águila Cabeza Blanca (*Haliaeetus leucocephalus*), la solución desde el 2007 ha consistido en el cambio de perdigones o balas no tóxicas “libres de plomo” para que al ser ingeridas accidentalmente en carroña no causen daño, esto solo es parte de las acciones realizadas en la caza legal de mamíferos como trofeos deportivos en el estado de California EE. UU. (Pagel *et al.* 2012).



Figura 4. Fotografía de *Falco sparverius*, individuo macho adulto, Cernícalo Americano, Alcaldía Coyoacán, CD MX, actualmente se estudia la especie para conocer sus concentraciones de Pb en sangre, huesos, plumas y cerebro. Fuente: Elaboración propia (2016)



Figura 5. Fotografía de *Ciccaba virgata*, individuo adulto, Búho Café, Municipio de Jalpan de Serra, Querétaro.
Fuente: Elaboración propia (2017)

Zinc

En aves como el Águila Pescadora (*Pandion haliaetus*), (Figura 6), se ha considerado que la concentración fisiológica normal es de alrededor de 38 ppm en hígado, no obstante, se debe tener un registro actualizado debido a los altos niveles de contaminación por Zn en ríos, humedales, lagos y cuerpos de agua continentales en donde dicha especie se alimenta de peces seguramente con presencia de Zinc. No olvidemos que la disponibilidad de los metales pesados se debe básicamente a la historia geológica del sitio en donde se encuentran o bien a las diversas actividades antrópicas, entre ellas, el riego con aguas residuales altamente contaminadas por metales pesados.

Las altas concentraciones de este metal hace que el número de huevos por nido (*i.e.*, nidada) disminuya y particularmente se presenta un crecimiento anormal de los huesos de las aves conocido como osteocondrosis (Martorell, 2009). Finalmente, este elemento es uno de los que presenta mayor movilidad en el ambiente y es bioacumulable (Zarazúa *et al.*, 2013).



Figura 6. Fotografía de *Pandion haliaetus*, individuo adulto, Águila Pescadora, Ría Lagartos, Yucatán, puede presentar concentraciones altas de Zn debido a su alimentación estrictamente piscívora.
Fuente: Elaboración propia (2014)

La Norma Oficial Mexicana (SEMARNAP, 1996. NOM-001-ECOL-1996) que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, abarca nueve metales pesados y metaloides y La Norma Oficial Mexicana (SEMARNAT/SSA, 2004. NOM-147-SEMARNAT/SSA-2004), que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de los suelos contaminados establece 12 metales pesados; de los cuales en este trabajo de investigación documental se incluyeron seis (As, Cd, Cr, Hg, Pb y Zn) ya que forman parte de estudios relacionados con aves rapaces, los resultados son variados, aunque desafortunadamente se observa un incremento de la presencia y concentración de metales pesados en aguas y suelos en la mayoría de los trabajos publicados. En el 90% de los estudios verificados, se aprecia que los promedios permitidos en agua y suelos para metales pesados están muy por arriba de los límites máximos permisibles, esto implica establecer estudios que den seguimiento a las rutas que siguen estos elementos químicos así como su permanencia en el ambiente y su potencial efecto sobre la salud de la flora y la fauna.

CONCLUSIONES

En algunos casos las aves rapaces presentan niveles no letales o subletales de metales pesados, sin embargo, su evaluación continua puede brindar información importante a futuro y aclarar los efectos toxicológicos a largo plazo.

Aunque no es una generalidad, diversas poblaciones de aves en todo el mundo están disminuyendo considerablemente, algunas de ellas posiblemente relacionadas con el Cambio Climático, o bien por efectos graves de la contaminación ambiental.

Este trabajo de investigación documental puede ser útil para analizar la migración de rapaces proveniente del norte del continente americano y que converge en la ruta de los estados mineros y petroleros como: Chihuahua, Guanajuato, Hidalgo, Querétaro, San Luis Potosí, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas y en donde los datos por contaminación de suelos y agua están muy por arriba de lo permitido en las normas oficiales mexicanas, es altamente probable que la actividad minera desarrollado desde tiempos de la Colonia y la petrolera, sean las razones por las cuales existen lugares que pueden ser considerados como sitios de alta exposición por metales pesados y metaloides en aves rapaces, cabe mencionar que esto no es tan diferente en los países del norte como EE. UU. y Canadá debido a su propia historia minera y petrolera, además de la creciente industria en todas las áreas del desarrollo, con sus claras consecuencias para la flora y la fauna.

En rapaces, los resultados indican que algunas aves aumentaron sus poblaciones, otras se han mantenido constantes, mientras que otras van en franca disminución, por lo tanto, faltarían estudios concluyentes sobre el tema.

La cercanía a zonas urbanas, industriales o agrícolas puede incrementar las concentraciones de metales pesados en aves por los hábitos alimenticios propios de cada especie. En algunos casos, como en el Río Lerma en el Estado de México, se ha registrado baja biodiversidad (Zarazúa *et al.*, 2013) posiblemente asociada a las altas concentraciones de metales pesados, ya que es un sitio de descarga de aguas contaminadas por actividades industriales, agrícolas y urbanas. Es importante, además, considerar la persistencia de metales pesados en la naturaleza y sus intrincadas redes en los ecosistemas.

Sin duda, la información presentada es una fuente muy confiable que nos permite tomar decisiones sobre la contaminación por metales pesados en modelos como las aves rapaces y establece otras dudas sobre ¿qué sucederá con la flora y fauna a corto, mediano y largo plazo? ya que su destino está íntimamente ligado al futuro de nosotros mismos.

REFERENCIAS

- Bairlein, F.** (2003). The study of bird migrations – some future perspectives. *Bird Study* 50: 243-253.
- BirdLife International.** (2004a). *Birds in Europe: population estimates, trends, and conservation status*. United Kingdom.
- BirdLife International.** (2004b). *State of the world's birds 2004: indicators, for our changing world*. United Kingdom.
- Campbell, M.L.** (2018). *Metales pesados en aves rapaces residentes y migratorias en Veracruz, México*. Tesis de Maestría en Ciencias en Ecología y Biotecnología. Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada. Universidad Veracruzana, pp. viii-126.
- Carlson, J.T., Harmata, A.R., & Restani, M.** (2012). Environmental contaminants in nestling Bald Eagles produced in Montana and Wyoming. *Journal of Raptor Research* 46: 274-282.
- Cortés-Jiménez, E.V., Mugica-Álvarez, V., González-Chávez, M.C., Carrillo-González, R., Martínez-Gordillo, M., & Vaca-Mier, M.** (2013). Natural revegetation of alkaline tailing heaps at Taxco, Guerrero, Mexico. *International Journal of Phytoremediation* 15: 127-141.
- Del Hoyo, J., & Collar, N.J.** (2014). *Illustrated checklist of the birds of the world. Volume 1. Non-passerines*. HBW and BirdLife International, Lynx. Spain, pp. 476-699.
- Fisher, I.J., Pain, D.J., & Thomas, V.G.** (2006). A review of lead poisoning from ammunition sources in terrestrial birds. *Biological Conservation* 131: 421-432.
- Hanneman, M.J.** (2021). *Migratory ecology, stopover and winter habitats, and mercury concentrations of Red-Shouldered Hawks (Buteo lineatus) breeding in central and northeastern Wisconsin*. Thesis Master of Science in Natural Resources (Wildlife). University of Wisconsin-Stevens Point, Wisconsin. United States of America, pp. iii-7.
- Hermoso de Mendoza, M., Soler, R.F., Hernández, M.D., Gallego, R.M.E., López, B.A. & Pérez, L.M.** (2006). Estudio comparativo del nivel hepático de metales pesados y metaloides en aves rapaces diurnas de Galicia y Extremadura. *Revista de Toxicología* 23: 138-145.
- Hinrichsen, D., Robey, B., & Upadhyay, U.D.** (1997). *Solutions for a water-short world population reports, Series M, No. 14*. Baltimore, John Hopkins School of Public Health, Population Information Program.
- Hunt, W.G.** (2012). Implications of sublethal lead exposure in avian scavengers. *Journal of Raptor Research* 46: 389-393.
- Hunt, W.G., Burnham, W., Parish, C.N., Burnham, K., Mutch, B., & Oaks, J.L.** (2006). Bullet fragments in deer remains: implications for lead exposure in scavengers. *Wildlife Society Bulletin* 34: 168-171.

- Iwata, H., Watanabe, M., Kim, E-Y, Gotoh, R., Yasunaga, G., Tanabe, S., Masuda, Y., & Jujita, S. (2000).** *Contamination by chlorinated hydrocarbons and lead in Steller's Sea Eagle and White-tailed Sea Eagle from Hokkaido, Japan.* Pages 91-106 in M. Utea and M.J. McGrady (Eds.), First Symposium on Steller's and White-tailed Sea Eagle in East Asia. Wild Bird Society of Japan, Tokyo, Japan.
- Londoño-Franco, L.F., Londoño-Muñoz, P.T., & Muñoz-García, F.G. (2016).** Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 14: 145-153.
- Martorell, J. (2009).** Intoxicaciones en aves. *Asociación de Veterinarios Españoles Especialistas en Pequeños Animales* 29: 172-178.
- Mateo, R. (2009).** *Lead poisoning in wild birds in Europe and the regulations adopted by different countries.* Pages 71-98 in R.T. Watson, M. Fuller. M. Pokras, and W.G. Hunt (Eds.), Ingestion of lead from spend ammunition: implications for wildlife and humans. The Peregrine Fund, Boise, ID U.S.A.
- McLean, C.M., Koller, C.E., Rodger, J.C., & MacFarlane, G.R. (2009).** Mammalian hair as and accumulative bioindicator of metal bioavailability in Australian terrestrial environments. *Science of the Total Environment* 407: 3588-3596.
- Mojica, E.K., & Watts, B.D. (2011).** *Bald Eagle nest productivity and contaminant monitoring at naval support facility Indian Head, Maryland: Final Report.* Center for Conservation Biology, pp. 6-27.
- Nighat, S., Iqbal, S., Nadeem, M.S., Mahmood, T., & Shah, S.I. (2013).** Estimation of heavy metals residues from the feathers of Falconidae, Accipitridae, and Strigidae in Punjab, Pakistan. *Turkish Journal of Zoology* 37: 488-500.
- Pagel, J.E., Sharpe, P.B., Garcelon, D.K., Little, A.E., Taylor, S.K., Faulkner, K.R., & Gorbics, C.S. (2012).** Exposure of Bald Eagles to lead on the northern Channel Islands, California. *Journal of Raptor Research* 46: 168-176.
- Pandey, S. (2006).** Water pollution and health (review article). *Kathmandu University Medical Journal* 4: 128-134.
- Karn, S.K., & Harada, H. (2001).** Surface water pollution in three urban territories of Nepal, India, and Bangladesh. *Environmental Management* 28: 483-496.
- Kirby, J.S., Stattersfield, A.J., Butchart, S.H.M., Evans, M.I., Grimmett, R.F.A., Jones, V.R., O'Sullivan, J., Tucker, G.M., & Newton, I. (2008).** Key conservation issues for migratory land- and waterbird species on the world's major flyways. *Bird Conservation International* 18: 49-73.
- Klaassen, M., Hoyer, B.J., Nolet, B.A., & Buttermer, W.A. (2012).** Ecophysiology of avian migration in the face of current global hazards. *Philosophical Transactions of The Royal Society B* 367: 1719-1732.
- Krone, O., Kenntner, N., Trinogga, A., Nadjafzadeh, M., Scholtz, F., Sulawa, J., Totschek, K., Schuck-Wersig, P., & Zeischank, R. (2009).** *Lead poisoning in White-tailed Sea Eagle: causes and approaches to solutions in Germany.* Pages 289-301 in R.T. Watson, M. Fuller. M. Pokras, and W.G. Hunt

- (Eds.), Ingestion of lead from spend ammunition: implications for wildlife and humans. The Peregrine Fund, Boise, ID U.S.A.
- Lehner**, A.F., Rumbelha, W., Shlosberg, A., Stuart, K., Johnson, M., Domenech, R., & Langner, H. (2013). Diagnostic analysis of veterinary dried blood spots for toxic heavy metals exposure. *Journal of Analytical Toxicology* 37: 406-422.
- Martin**, M.B., Reiter, R., Pham, T., Avellanet, Y.R., Camara, J., & Lahm, M. (2003). Estrogen-like activity of metals in MCF-7 breast cancer cells. *Endocrinology* 144: 2425-2436.
- Meza-Figueroa**, D., Maier, R.M., de la O-Villanueva, M., Gómez-Álvarez, A., Moreno-Zazueta, A., Rivera, J., Campillo, A., Grandlic, C.J., Anaya, R., & Palafox-Reyes, J. (2009). The impact of unconfined mine tailings in residential areas from a mining town in a semi-arid environment: Nacozari, Sonora, Mexico. *Chemosphere* 77: 140-147.
- Mithöfer**, A., Shulze, B., & Boland, W. (2004). Biotic and heavy metal stress response in plants: evidence for common signals. *FEBS Letters* 566: 1-5.
- Mireles**, F., Dávila, J.I., Pinedo, J.L., Reyes, E., Speakman, R.J., & Glascock, M.D. (2012). Assessing urban soil pollution in the cities of Zacatecas and Guadalupe, Mexico by instrumental neutron activation analysis. *Microchemical Journal* 103: 158-164.
- Pattee**, O.H. (1985). Eggshell thickness and reproduction in American Kestrels exposed to chronic dietary lead. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 13: 29-34.
- Peralta-Videa**, J.R., López, M.L., Narayan, M., Saupe, G., & Gardea-Torresdey, J. (2009). The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology* 41: 1665-1677.
- Ramos-Arroyo**, Y.R., & Siebe-Grabach, C.D. (2006). Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 23: 54-74.
- Robles-Camacho**, J. & Armienta, M.A. (2000). Natural chromium contamination of groundwater at Leon Valley Mexico. *Journal of Geochemical Exploration* 68: 167-181.
- Rodríguez-Estrella**, R., & Bojórquez, T.L.A. (2004). *Spatial analysis in raptor ecology and conservation*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, pp. 1-174.
- Schützendübel**, A., & Polle, A. (2002). Plant responses to abiotic stress: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. *Journal of Experimental Botany* 53: 1351-1365.

- SEMARNAP.** (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. *Establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes de las Descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales*. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México, pp. 2-18.
- SEMARNAT.** (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. *Protección Ambiental-Especies Nativas de México de Flora y Fauna Silvestres-Categorías de Riesgo y Especificaciones para su Inclusión, Exclusión o Cambio-Lista de Especies en Riesgo*. Diario Oficial de la Federación, Segunda Sección. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, pp. 25-26.
- SEMARNAT/SSA.** (2004). Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA-2004. *Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de los suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – Secretaría de Salubridad y Asistencia, México, pp. 38-45.
- Smeets, K., Cuypers, A., Lambrechts, A., Semane, B., Hoet P., Van Laere, A., & Vangronsveld, J.** (2005). Introduction of oxidative stress and antioxidative mechanisms in *Phaseolus vulgaris* after Cd application. *Plant Physiology and Biochemistry* 43: 437-444.
- Stoica, A., Katzenellenbogen, B.S., & Martin, M.B.** (2000). Activation of estrogen receptor α by the heavy metal cadmium. *Molecular Endocrinology* 14: 545-553.
- Straub, R.** (2007). *Site guide to the birds of Veracruz*. Pronatura-CONABIO. México, pp. 13-16.
- UNEP.** (2013). *Global mercury assessment 2013: Sources, emissions, releases and environmental transport*. United Nations Environmental Programme Chemicals Branch, Ginebra, Suiza, pp. 32.
- Yañez, L., García-Nieto, E., Rojas, E., Carrizales, L., Mejía, J., Calderón, J., Razo, I., & Díaz-Barriga, F.** (2003). DNA damage in blood cells from children exposed to arsenic and lead in a mining area. *Environmental Research* 93: 231-240.
- Zarazúa, G., Ávila-Pérez, P., Tejeda, S., Valdivia-Barrientos, M., Zepeda-Gómez, C., & Macedo-Miranda, G.** (2013). Evaluación de los metales pesados Cr, Mn, Fe, Cu, Zn y Pb en sombrero de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*) del curso alto del Río Lerma, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 29 (Sup. 2): 17-24.