



## INTRODUCCIÓN

Los elementos potencialmente tóxicos (EPT) se encuentran de forma natural en el suelo. No obstante, diversas actividades como la minería o la industria pueden contaminar este recurso debido a la alta generación de residuos. Por tanto, la concentración de EPT en el suelo se incrementa a niveles tóxicos para seres vivos. Por ello, es importante tomar acciones para prevenir dicha contaminación o remediar un suelo una vez contaminado, todo ello para evitar el daño al ecosistema y la salud pública. Regular ésto es la función de toda legislación ambiental. La regulación ambiental se basa en el derecho de toda persona de desarrollarse en un medio ambiente sano. Esta idea se encuentra en el artículo 11 del Protocolo de San Salvador, el cual surge basado en la declaración universal de los derechos humanos. Asimismo, en el artículo 4° párrafo cinco, la Constitución Mexicana menciona: **“Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley”**. Después de la constitución existen leyes complementarias, seguidas de reglamentos, los cuales vigilan el cumplimiento de los objetivos de las leyes. Finalmente, las normas oficiales mexicanas (NOM) y las normas mexicanas (NMX) son especificaciones técnicas que sirven para evaluar parámetros en los que se basa la evaluación de un sitio (Ruiz-Olivares, 2016) y determinar su grado de contaminación. En México, la ley que se encarga de los aspectos ambientales es la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA); y como ley complementaria, en el caso de que haya residuos implicados, se encuentra la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGP-GIR). Asimismo, la ley que regula el cumplimiento los sujetos responsables de la contaminación es la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LFRA; Figura 1). No obstante, otras leyes podrían aplicarse a un sitio contaminado, dependiendo específicamente de cada caso. Por ejemplo, si hay cuerpos de agua en riesgo, áreas naturales protegidas en las cercanías, etcétera. En cuanto a las NOMs, la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 aplica directamente a todos los suelos contaminados por EPT. En ésta se presentan los valores máximos permisibles que marcan un umbral sobre el cual es recomendable tomar acciones para remediar un suelo contaminado, y norma aspectos metodológicos precisos para evaluar el grado de contaminación de un suelo, además de los objetivos de la remediación de un sitio.

Un problema medioambiental relacionado con EPT, debe vincularse con cada nivel jerárquico de la Legislación Ambiental Mexicana y debe considerar cada ley y reglamento pertinente; según el caso específico de un sitio. De esta forma, un proyecto de remediación tendrá un sustento legal adecuado.



Figura 1. Organización jerárquica de la legislación ambiental mexicana.

## Criterios para la remediación de un suelo contaminado con EPT

En general, la concentración total de EPT en el suelo es la que se considera para plantear una alternativa de remediación. Sin embargo, varios investigadores han mencionado que la concentración total es un pobre indicador de toxicidad de EPT, debido a que sus diferentes formas químicas en la fase sólida varían considerablemente en términos de biodisponibilidad (Allen, 2001; Nolan *et al.*, 2003; Temminghoff *et al.*, 1998). La concentración total de EPT en suelo se refiere incluso a los elementos que son componentes estructurales de los minerales (Lim y Jackson, 1982), por lo que hay que aclarar que la concentración total no es el mejor indicador para reflejar el potencial de riesgo ambiental. Un nuevo enfoque considera evaluar la contaminación a través de la concentración disponible para los organismos (Adriano *et al.*, 2004). La concentración disponible para seres vivos (biodisponibilidad) es una fracción de la concentración total, la cual interactúa directamente con un ser vivo. Asimismo, esta depende de las propiedades específicas del suelo. Por ejemplo, 1 g de Pb presenta diferente riesgo en un suelo arenoso que en uno arcilloso. Si la mayor proporción del EPT está en forma no biodisponible o en una soluble, tendrá diferentes características en su movilidad, lixiviación y absorción en los organismos vivos. Más aun, el tipo de contaminante es muy importante para determinar su riesgo. Por ejemplo, el Hg y el As son más tóxicos que el Zn o el Cu. No hay consenso de cómo evaluar

la biodisponibilidad de un elemento. Además, porque esto depende del organismo sobre el cual se esté evaluando la toxicidad. En el caso de los seres humanos se maneja la bioaccesibilidad, que hace referencia a la concentración de un contaminante en un material que será absorbido por el organismo humano. Se han desarrollado métodos que tratan de estimar el grado de absorción de contaminantes que tendrían los diferentes órganos del cuerpo humano, tales como pulmones (Julien *et al.*, 2011), estómago e intestinos (Juhasz *et al.*, 2010) o saliva (Deshommes *et al.*, 2012) en contacto con materiales contaminados. En el caso de las plantas, un tipo de extracción común es la que se hace con agentes quelatantes, como el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) y el dietil-

entriaminopentaa-cético (DTPA). Este último fue desarrollado para la determinación de Zn, Fe, Mn y Cu, como microelementos esenciales en el suelo disponibles para ser absorbidos por las plantas (Lindsay y Norvell, 1978). Sin embargo, la extracción con DTPA ha sido aplicada en la extracción de otros EPT fuera del ámbito de la nutrición vegetal

(Baker y Amacher, 1982) para evaluar la contaminación del suelo. Esto se debe a que los EPT extraídos por este método se pueden relacionar con la concentración disponible para la planta. En este sentido, la NOM021-RECNAT-2000 menciona las concentraciones extraídas con DTPA de Pb, Cd y Ni que pueden ser tóxicas para las plantas. Sin embargo, esta norma solo aplica para suelos de uso agrícola y no para residuos peligrosos u otro tipo de materiales, además de que no son criterios que clasifiquen a un suelo como sujeto a remediar. Otra forma química de EPT que puede ser de utilidad para evaluar su toxicidad es la soluble en agua. Además de representar disponibilidad inmediata de EPT para ser absorbido por plantas, representa un riesgo, dada la posible lixiviación de éstos hacia otros sitios o hacia cuerpos de agua.

La NOM-147 utiliza principalmente dos criterios para evaluar el grado de contaminación de un suelo. El primero considera la concentración referencia total (CRT), que se define como la de un elemento, por encima de la cual se considera que existen riesgos para la salud. El segundo es la concentración de referencia soluble (CRS), que se refiere a aquella en una solución extractante, por encima de la cual se considera que existen riesgos potenciales al medio ambiente. Con base en los métodos analíticos de la NOM-147, la CRT es equivalente a la concentración total y la CRS a la soluble en agua (Cuadro 1). En la CRT es necesario diferenciar el uso de suelo para clasificarlo como sujeto a remediar; esto porque es de uso agrícola o residencial. El riesgo de exposición a los

EPT es mayor que en un suelo de uso industrial. Una vez que las concentraciones de un suelo superan las de referencia de uno o más EPT citados en el Cuadro 1, es necesario proceder a la remediación. La NOM-147 menciona que un proyecto de remediación debe alcanzar uno de los siguientes objetivos: 1) Remediar hasta las CRT, 2) Remediar hasta las concentraciones

de fondo. Es decir, la concentración natural del EPT en el sitio. Para esto es necesario obtener muestras en la cercanías del sitio, que no hayan sido expuestas a la contaminación, 3) Remediar hasta las concentraciones específicas totales (CRE, éstas se refieren a una relación entre la CRT y un factor que considera bioaccesibilidad) o 4) Remediar hasta las concentraciones de referencia de la fracción soluble + la concentración soluble de la muestra de fondo (Cuadro 1). Actualmente, para que un proyecto de remediación se considere exitoso es necesario cubrir uno de los cuatro puntos anteriores. Sin embargo, es importante mencionar que, aunque la CRE considera la bioaccesibilidad, la relaciona con la concentración CRT de un sitio y genera un cociente para evaluar el grado de riesgo de un sitio, lo cual es un término poco claro y dificulta la comparación de un suelo evaluado

**Cuadro 1.** Concentraciones de referencia para la remediación de un suelo contaminado con EPT.

EPT	Concentraciones de referencia totales		Concentraciones de referencia solubles mg L <sup>-1</sup>
	Uso agrícola/residencial mg kg <sup>-1</sup>	Uso industrial	
As	22	260	0.500
Ba	5,400	67,000	10,000
Be	150	1,900	0.122
Cd	37	450	0.100
Cr (VI)	280	510	--
Hg	23	310	0.020
Ni	1,600	20,000	1.100
Ag	390	5,100	0.500
Pb	400	800	0.500
Se	390	5,100	0.100
Ta	5.2	67	0.200
V	78	1,000	0.160

con la información científica generada. Asimismo, la NOM-147 no considera como EPT a Co, Cu, Fe, Mn y Zn; los cuales, a pesar de ser micronutrientes para seres humanos y plantas, representan un riesgo en concentraciones elevadas, por lo que la contaminación con estos elementos es un problema existente en el país que debe atenderse.

### **Pertinencia de la fitorremediación en la Legislación Ambiental Mexicana**

La necesidad de la remediación surge del estudio, análisis de la caracterización del sitio y el riesgo ambiental que representa. Por ello, debe considerarse el riesgo de exposición de los organismos a los EPT. ***La introducción de plantas a un sitio contaminado implica el establecimiento de una cubierta que, aunque puede no disminuir la concentración total de EPT en un suelo, es capaz de evitar su dispersión y así su riesgo ecológico o ambiental. Al estabilizar la fracción disponible de EPT de un suelo, las plantas representan una forma importante para disminuirla.*** Esto puede vincularse con la evaluación de la CRS mencionada en la NOM-147. Además, se ha demostrado la capacidad de las plantas para retener partículas que contienen EPT en las partes externas de sus tejidos, en lo que se ha llamado fito-barreras (Sánchez-López *et al.*, 2015), por lo que las plantas representan un mecanismo eficaz de disminución de la disponibilidad, dispersión y riesgo de los EPT y, al mismo tiempo, participación en mejorar la calidad del suelo contaminado. El paradigma de considerar únicamente las concentraciones totales de EPT en un sitio, como criterio de diagnóstico del grado de contaminación y el éxito de un proyecto de remedia-

ción, está cambiando en favor de una alternativa más integral, la cual diferencia la biodisponibilidad de estos contaminantes. Para una amplia aceptación regulatoria y pública, las alternativas de remediación dependen de la habilidad de reconocer esta diferencia física, química y biológica. Los cambios en las metas y guías favorecen fuertemente el desarrollo de técnicas de remediación para convertir la fracción biodisponible en el suelo en formas no disponibles, generalmente con el uso de enmiendas orgánicas e inorgánicas, que han demostrado cambiar la disponibilidad de los EPT en el suelo (Ver artículo: Fitorremediación asistida con enmiendas y fitoestabilización de elementos potencialmente tóxicos). Asimismo, debe considerarse el aspecto social y económico en un proceso de remediación, así como la valoración de los residuos o suelo contaminado para su aprovechamiento como insumos en las actividades productivas, protección de la población humana, ambiente y recursos naturales.

### **Participación de la comunidad científica y población en la resolución de problemas de contaminación**

Dado que se requiere de la participación interdisciplinaria para la resolución de los problemas medioambientales, la Legislación Ambiental Mexicana permite la participación de diversos sectores en el diagnóstico y resolución de dichos problemas. En primera instancia, la LGPGIR posee un capítulo que especifica la participación social y tiene como objetivo promover la participación de todos los sectores de la sociedad en la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de residuos. Ésto incluye al sector privado, social e instituciones

académicas, grupos y organizaciones sociales, y demás interesados (LGPGIR, Art. 35, sección VII). En su Artículo 36, la LGPGIR también establece que el gobierno tanto federal, estatal como municipal, integrarán órganos de consulta en los que participen instituciones públicas, académicas, organizaciones sociales y empresas. Éstas tendrán funciones de asesoría, evaluación y seguimiento en materia de la política de prevención y gestión integral de los residuos. Asimismo, podrán emitir opiniones y observaciones que consideren pertinentes. Ésto es importante porque permite a los centros de investigación contar con un respaldo legal en su participación en el diagnóstico de problemáticas ambientales. Al respecto, en su Artículo 49, la Ley de Ciencia y Tecnología menciona que los centros públicos de investigación colaborarán con las autoridades en las actividades de promoción de la metrología, en la elaboración de NOMs o MMX, y en la evaluación de la conformidad con las mismas, por lo que la comunidad científica puede participar en la discusión de las normas, siendo una oportunidad para complementar el marco legal mexicano con los avances científicos en relación con la contaminación de suelo por EPT. La LFRA (Art. 28, inciso I) reconoce el derecho para demandar la responsabilidad ambiental de la reparación del daño a las personas físicas habitantes de la comunidad adyacente al daño ocasionado al ambiente, por lo que las demandas ciudadanas están respaldadas con este artículo.

## **CONCLUSIONES**

**E**s importante el conocimiento de la Legislación Ambiental Mexicana en la evaluación de un problema de contaminación del

suelo por EPT. Esto debe integrar las leyes, reglamentos y normas ambientales mencionados en este artículo para así generar un respaldo legal completo. Es pertinente la integración de las tecnologías de la fitorremediación en el marco legal con la debida evaluación de sus efectos en los EPT del suelo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto CONACYT PD-CAPN-2013-215241

## LITERATURA CITADA

- Adriano D.C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. (2° ed). Springer Verlag. USA. 866 p.
- Adriano D.C., Wenzel W.W., Vangronsveld J., Bolan N.S. 2004. Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma* 122: 121-142.
- Allen H.E. 2001. Terrestrial ecosystem: an overview, In: Allen, H.E. (Ed), Bioavailability of metals in terrestrial ecosystems: importance of partitioning for availability to invertebrates, microbes, and plants. SETAC Press, Pensacola, Florida, pp 1-6.
- Baker D.E., Amacher M.C. 1982. Nickel, copper, zinc, and cadmium. In: Methods of Soil Analysis. 2nd edition. A. L. Page (ed.). American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. pp: 323-336.
- Deshommes E., Tardif R., Edwards M., Sauvé S., Prévost M. 2012. Experimental determination of the oral bioavailability and bioaccessibility of lead particles. *Chemistry Central Journal* 6: 138.
- Juhasz A.L., Weber J., Smith E. 2010. Impact of soil particle size and bioaccessibility on children and adult lead exposure in peri-urban contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials* 186: 1870-1879.
- Julien C., Esperanza P., Brunoab M., Allemanab L.Y. 2011. Development of an *in vitro* method to estimate lung bioaccessibility of metals from atmospheric particles. *Journal of Environmental Monitoring* 13: 621-630.
- Ley de Ciencia y Tecnología. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5/06/2002.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8/10/2003.
- Ley Federal de Responsabilidad Ambiental. Publicada en el diario oficial de la Federación el 7/06/2013.
- Lindsay W.L., Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*. 42: 421-428.
- Loredo-Portales R., Cruz-Jiménez G., Castillo-Michel H., Rocha-Amador D.O., Vogel-Mikuš K., Kump P., de la rosa Rosa G. Understanding Copper speciation and mobilization in soils and mine tailings from "Mineral La Aurora" in central Mexico: contributions from Synchrotron techniques. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 6: 447-456.
- NOM-021-RECNAT-2000. Norma Oficial Mexicana, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- Nolan A.L., McLaughlin M.J., Mason S.D. 2003. Chemical speciation of Zn, Cd, Cu, and Pb in pore waters of agricultural and contaminated soils using Donnan dialysis. *Environmental Science Technology* 37: 90-98.
- Ruiz-Olivares A., Carrillo-González R., González-Chávez M.C.A., Soto Hernández R.M. 2013. Potential of castor bean (*Ricinus communis* L.) for phytoremediation of mine tailings and oil production. *Journal of Environmental Management* 114: 316-323.
- Ruiz-Olivares A. 2016. Esquema de fitorremediación de un sitio contaminado con residuos de baterías de automóvil. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. México.
- Sánchez-López A.S., Carrillo-González R., González-Chávez M.C.A., Rosas-Saito G.H., Vangronsveld J. 2015. Phytobarrriers: Plants capture particles containing potentially toxic elements originating from mine tailings in semiarid regions. *Environmental Pollution* 205: 33-44.
- Temminghoff E.J.M, Van der Zee S.E.A.T.M., Da Haan F.A.M. 1998. Effects of dissolved organic matter on the mobility of copper in a contaminated sandy soil. *Eurasian Journal Soil Science* 49: 617-628.

