



# EVALUACIÓN MUNDIAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO

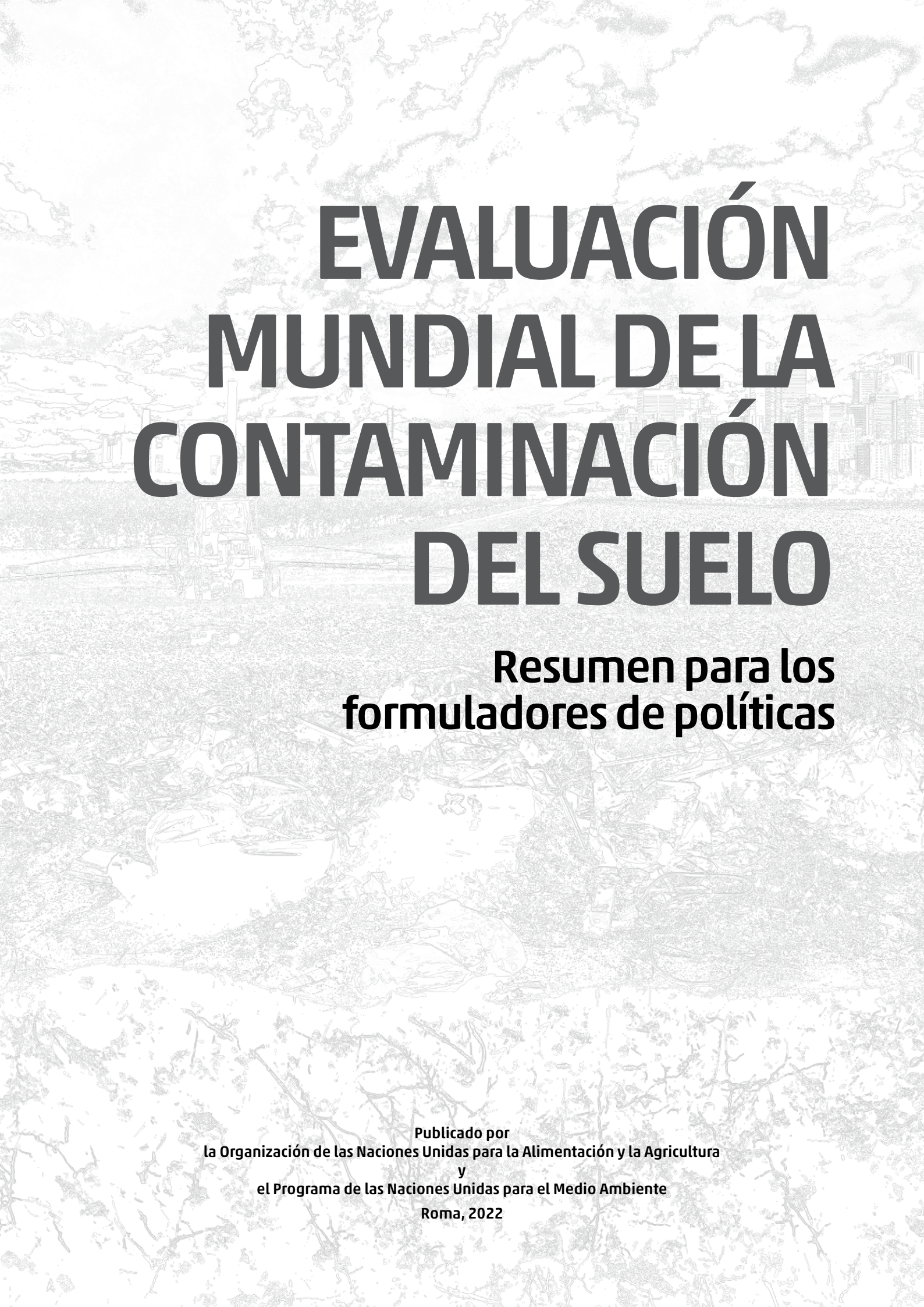
Resumen para los formuladores de políticas











# **EVALUACIÓN MUNDIAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO**

**Resumen para los  
formuladores de políticas**

Publicado por  
la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura  
y  
el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente  
Roma, 2022



## Cita requerida:

FAO y PNUMA. 2022. *Evaluación mundial de la contaminación del suelo – Resumen para los formuladores de políticas*. Roma, FAO.  
<https://doi.org/10.4060/cb4827es>

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) o del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), juicio alguno sobre la condición jurídica o el nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO o el PNUMA los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o las políticas de la FAO o del PNUMA.

ISBN 978-92-5-135794-1 [FAO]

© FAO, 2022



Algunos derechos reservados. Esta obra se distribuye bajo licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Organizaciones intergubernamentales (CC BYNC-SA 3.0 IGO; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/legalcode/legalcode>).

De acuerdo con las condiciones de la licencia, se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra para fines no comerciales, siempre que se cite correctamente. En ningún uso que se haga de esta obra debe darse a entender que la FAO refrenda una organización, productos o servicios específicos. No está permitido utilizar el logotipo de la FAO. En caso de adaptación, debe concederse a la obra resultante la misma licencia o una licencia equivalente de Creative Commons. Si la obra se traduce, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la referencia requerida: "La presente traducción no es obra de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La FAO no se hace responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción. La edición original en [idioma] será el texto autorizado".

Todo litigio que surja en el marco de la licencia y no pueda resolverse de forma amistosa, se resolverá a través de mediación y arbitraje según lo dispuesto en el artículo 8 de la licencia, a no ser que se disponga lo contrario en el presente documento. Las reglas de mediación vigentes serán el reglamento de mediación de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual <http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules>, y todo arbitraje se llevará a cabo de manera conforme al reglamento de arbitraje de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI).

Materiales de terceros. Si se desea reutilizar material contenido en esta obra que sea propiedad de terceros, por ejemplo, cuadros, gráficos o imágenes, corresponde al usuario determinar si se necesita autorización para tal reutilización y obtener la autorización del titular del derecho de autor. El riesgo de que se deriven reclamaciones de la infracción de los derechos de uso de un elemento que sea propiedad de terceros recae exclusivamente sobre el usuario.

Ventas, derechos y licencias. Los productos informativos de la FAO están disponibles en la página web de la Organización ([www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications)) y pueden adquirirse dirigiéndose a [publications-sales@fao.org](mailto:publications-sales@fao.org). Las solicitudes de uso comercial deben enviarse a través de la siguiente página web: [www.fao.org/contact-us/licence-request](http://www.fao.org/contact-us/licence-request). Las consultas sobre derechos y licencias deben remitirse a: [copyright@fao.org](mailto:copyright@fao.org).

Diseño de portada: Matteo Sala



# Índice

Colaboradores	VI
Prólogo	IX
Prefacio	XI
Abreviaturas y acrónimos	XVII
Resumen ejecutivo	XVIII
Contaminantes del suelo: propiedades, fuentes y efectos sobre la salud	1
Contaminantes inorgánicos	3
Oligoelementos	3
Radionúclidos	4
Amianto	4
Contaminantes orgánicos	4
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	4
Compuestos orgánicos volátiles	5
Fenoles, clorobenzenos y clorofenoles	5
Explosivos	5
Dioxinas y compuestos similares a las dioxinas	7
Bifenilos policlorados	7
Éteres de difenilo polibromados	7
Sustancias per- y polifluoroalquilo	8
Plaguicidas	8
Contaminantes emergentes	9
Productos farmacéuticos y de cuidado personal	9
Plásticos y polímeros sintéticos	9
Ftalatos y otros plastificantes	10
Nanomateriales	10
Impactos de la contaminación del suelo en los ecosistemas	11
Impactos de la contaminación del suelo en los ecosistemas terrestres y la cadena alimentaria	12
Impactos de la contaminación del suelo sobre los ecosistemas acuáticos	14
Impactos socioeconómicos de la contaminación del suelo	15
Estado y tendencias de la contaminación del suelo por región	17
Asia y el Pacífico	18
Europa Oriental, el Cáucaso y Asia Central (Eurasia)	21
Europa	25
América Latina y el Caribe	28
Cercano Oriente y África del Norte	31
América del Norte	33
África subsahariana	36
Acciones para confrontar la contaminación del suelo	39
Gobernanza y marcos legales para confrontar la contaminación del suelo	39
Mejora de los conocimientos, la vigilancia y la presentación de informes	42
Gestión de la contaminación del suelo	42
Gestión de los suelos como fuente de contaminación	45
Acciones prioritarias para prevenir y detener la contaminación del suelo y para remediar los suelos contaminados	46
Lagunas en el conocimiento	46
Concienciación y comunicación	47
Cooperación regional	48
Referencias	51
Glosario	57







# Cuadro y figuras

Cuadro 1.	Relaciones entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la contaminación del suelo	XII
Figura 1.	Cronología y principales hitos del desarrollo del informe de la Evaluación Mundial de la Contaminación del Suelo	XVI
Figura 2.	Categorización sistemática de los principales contaminantes en los suelos según la IUPAC (Nič <i>et al.</i> , 2009). Los compuestos halogenados comprenden compuestos fluorados, clorados y bromados	1
Figura 3.	Rutas de entrada y destino de los contaminantes en los suelos	2
Figura 4.	Principales efectos de los contaminantes del suelo en la salud humana, indicando los órganos o sistemas afectados y los contaminantes que los causan	6
Figura 5.	La contaminación del suelo provoca una cadena de procesos de degradación que conduce a la reducción y, en última instancia, a la pérdida de los servicios ecosistémicos	11
Figura 6.	Transferencia de contaminantes a la red trófica terrestre desde el suelo a los pastos y cultivos, que son ingeridos por la fauna silvestre, el ganado y los seres humanos, o desde el suelo a los invertebrados, ingeridos por aves y aves de corral, y finalmente transferidos a los seres humanos	13
Figura 7.	Procesos en el medio terrestre exacerbados por el cambio climático que aumenta el impacto de la contaminación del suelo en el medio acuático	14
Figura 8.	Pérdidas económicas cuantificables debidas a la contaminación del suelo	16
Figura 9.	Regiones de la Alianza Mundial por el Suelo consideradas en este informe	17
Figura 10.	Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en Asia y el Pacífico	18
Figura 11.	Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en Europa Oriental, el Cáucaso y Asia Central	21
Figura 12.	Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en Europa	25
Figura 13.	Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en América Latina y el Caribe	28
Figura 14.	Posibles fuentes de residuos sólidos y su impacto en el ser humano y el medio ambiente	30
Figura 15.	Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en Cercano Oriente y África del Norte	31
Figura 16.	Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en América del Norte	33
Figura 17.	Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en África subsahariana	36
Figura 18.	Etapas de la remediación de la contaminación de un emplazamiento según las directrices del Marco Nacional de Recuperación	44
Figura 19.	Mecanismos de las plantas para la absorción y estabilización de contaminantes orgánicos e inorgánicos	45
Figura 20.	Jerarquía de gestión de residuos	47
Figura 21.	Dificultades técnicas para la reducción de la contaminación del suelo según la percepción de los expertos que han contribuido a la elaboración de este informe	48



# Colaboradores

Todos los nombres se presentan en orden alfabético.

## Coordinación General

Ronald Vargas Rojas (FAO-AMS)

## Editor Jefe

Natalia Rodríguez Eugenio (FAO-AMS)

## Autores

### Capítulo 1. Presentación de la situación

*Autores principales:* Natalia Rodríguez Eugenio (FAO-AMS), Abdelkader Bensada (PNUMA) y Ronald Vargas (FAO-AMS)

### Capítulo 2. Principales contaminantes del suelo y su destino en el entorno del suelo

*Autores principales:* Bernd M. Bussian (FAO-AMS), Natalia Rodríguez Eugenio (FAO-AMS), y Susan C. Wilson (Australia)

*Autores colaboradores:* Andrea Ceci (Italia), Carolina Parelho (Portugal), Dmytro Semenov (Ucrania), Mojtaba Yahyaabadi (República Islámica del Irán)

### Capítulo 3. Fuentes de contaminación del suelo

*Autores principales:* Natalia Rodríguez Eugenio (FAO-AMS) y Marilena Ronzan (FAO-AMS)

### Capítulo 4. Impactos ambientales, sanitarios y socioeconómicos de la contaminación del suelo

*Autor principal:* Natalia Rodríguez Eugenio (FAO-AMS)

### Capítulo 5. Estado y tendencias mundiales de la contaminación del suelo

*Autores principales:* Bernd M. Bussian (FAO-AMS), Natalia Rodríguez Eugenio (FAO-AMS) y Hugo Bourhis (FAO-AMS)

### Capítulo 6. Estado de la contaminación del suelo en Asia y el Pacífico

*Autores principales:* Ravi Naidu (Australia) y Bhabananda Biswas (Australia)

*Autores colaboradores:* Zueng-Sang Chen (Provincia china de Taiwán), Luchun Duan (China), Joytishna Jit (Países insulares del Pacífico), Jeonggwan Kim y Kihwan Lee (República de Corea), Mohammad Mahmudur Rahman (Bangladesh), Tanapon Phenrat (Tailandia y Myanmar), Nabeel Khan Niazi (Pakistán) y M.A. Ayanka Wijayawardena (Sri Lanka)

*Agradecimientos:* Algunos contenidos han sido facilitados y revisados por Muhammad Shahid (Pakistán), Natasha (Pakistán), Duangporn Kantachote (Tailandia), Peerapat Kosolsaksakul (Tailandia) y Oramas Suttinun (Tailandia)

### Capítulo 7. Estado de la contaminación del suelo en Europa Oriental, el Cáucaso y Asia Central

*Autor principal:* Valentina Pidlisnyuk (Chequia)

*Autores colaboradores:* Tatyana Stefanovska (Ucrania), Asil Nurzhanova (Kazajstán)

*Agradecimientos:* Michail Kalinin (Belarús)

### Capítulo 8. Estado de la contaminación del suelo en Europa

*Autores principales:* Natalia Rodríguez Eugenio (FAO-AMS) y Marilena Ronzan (FAO-AMS)

### Capítulo 9. Estado de la contaminación del suelo en América Latina y el Caribe

*Autor principal:* Rosalina González Forero (Colombia)

*Agradecimientos:* Valentina Barragan (Colombia), Daniela Serna (Colombia), Nathaly Castillo (Colombia), Yeferson Mendez (Colombia), Smith Ortega (Colombia), Olegario Muñiz Ugarte (Cuba), Clístenes Williams Araújo do Nascimento (Brasil)

### Capítulo 10. Estado de la contaminación del suelo en el Cercano Oriente y África del Norte

*Autor principal:* Talal Darwish (Líbano)

### Capítulo 11. Estado de la contaminación del suelo en América del Norte

*Autores principales:* Geoffrey Siemering (Estados Unidos de América), Natalie Feisthauer (Canadá) y Marilena Ronzan (FAO-AMS)

### Capítulo 12. Estado de la contaminación del suelo en el África subsahariana

*Autor principal:* Mariné Blaauw (Sudáfrica)

*Agradecimientos:* Andrew McCartor (Estados Unidos de América), Brandon McGugan (Sudáfrica), Chung Tran (UNIDO)

### Capítulo 13. Acciones para confrontar la contaminación del suelo

*Autor principal:* Richard Thompson (FAO-AMS)

*Autores colaboradores:* Diego Arán (España), Pilar Bernal (España), Bhabananda Biswas (Australia), Andrea Ceci (Italia), Giada Migliore (Italia), Ravi Naidu (Australia), Erika Santos (Portugal), Pavlos Tyrologou (Grecia), Donato Visconti (Italia), Susan C. Wilson (Australia), Mojtaba Yahyaabadi (República Islámica del Irán)

*Estudios de casos (Compañía y lugar de intervención):* Terratherm/Cascade (Estados Unidos de América, Viet Nam) EDL (Nueva Zelanda, Viet Nam), Regenesys (Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, Estados Unidos de América, Italia), B&A (Italia), Ambiente (Italia), Nuo (Italia), Mares Q8 (Italia), BAW (Italia), Teseco (Italia), PeroxyChem (Italia), TopNetwork (Italia), Haemers Technologies (Italia, Francia, África Occidental), Veolia GRS Valtech (Francia, Marruecos, Italia, Serbia, Suiza),

Veolia Kruger (Dinamarca), Veolia MPPE (Alemania),  
Green Soil (Bélgica), Bio2X/Fortum (India)

## Capítulo 14. Conclusiones y camino a seguir

*Autores principales:* Natalia Rodríguez Eugenio (FAO-AMS), y Ronald Vargas (FAO-AMS)

### Consejo Editorial

*GTIS:* Rafla Attia (Túnez), Megan Balks (Nueva Zelanda), Samuel Francke-Campaña (Chile), Ellen Graber (Israel), Edmon Hien (Burkina Faso), Jin Ke (China), Generose Nziguheba (Burundi), Ashok Patra (India), Gary Pierzynski (Estados Unidos de América), Peter de Ruiter (los Países Bajos)

*Representantes de las Alianzas Regionales por el Suelo:* Clístenes Williams Araújo Do Nascimento (ASLAC, Brasil), Victor Chude (AfSP, Nigeria), Samuel M. Contreras (ASP, Filipinas), Sadeq Jaafar Hasan Dwence (NENA, Iraq), Olegario Muniz Ugarte (ASLAC, Cuba), Iman Sahib Salman (NENA, Iraq), Yiyi Sulaeman (ASP, Indonesia), Mari Vargas (ASLAC, Venezuela, República Bolivariana de), Piotr Wojda (ESP, Unión Europea)

*Representantes de las Agencias de las Naciones Unidas:* Abdelkader Bensada (PNUMA), Eva Kohlschmid (FAO), Marco Martuzzi (OMS), Jing Xu (FAO)

*Revisores externos:* Lucia Buvé (NICOLE, Bélgica), Natalie Feisthauer (Departamento de Agricultura y Agroalimentación de Canadá (AAFC), Canadá), Andrew McCartor (Pure Earth, Estados Unidos de América), Matthew Taylor (Consejo Regional de Waikato, Nueva Zelanda), Nicholas Tymko (NICOLE, Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte), Pavlos Tyrologou (Federación Europea de Geólogos, Bélgica), Jeyanny Vijayanathan (Forest Research Institute, Malasia), Roland Weber (POPs Environmental Consulting, Alemania)

### Edición y publicación

Dan Pennock

Lea Pennock

Isabelle Verbeke (FAO-AMS)

Magdeline Camille Vlasimsky (FAO-AMS)

Bofei Li (FAO-AMS)

### Traducido por

Rosa Maria Cervantes Negrete

### Dirección artística

Matteo Sala (FAO-AMS)





# Prólogo

La era del Antropoceno —el período más reciente de la historia de la Tierra en el que la actividad humana comenzó a tener un impacto significativo en el clima y los ecosistemas del planeta— se caracteriza por cambios mundiales masivos, como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la pobreza y la inseguridad alimentaria. El reto para la sociedad es adaptarse a estos cambios y mitigarlos, transformando al mismo tiempo nuestros sistemas agroalimentarios, haciéndolos más eficientes, inclusivos, resilientes y sostenibles, para lograr una mejor producción, una mejor nutrición, un mejor medio ambiente y una mejor vida, sin dejar a nadie atrás. Un enfoque transformador que está en consonancia con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que se propone lograr el desarrollo socioeconómico, conservando el medio ambiente.

La fina corteza de la superficie de la Tierra, el suelo, sustenta toda la vida terrestre y participa en la regulación y prestación de muchos servicios ecosistémicos clave que son esenciales para el medio ambiente y para la salud y el bienestar humanos. El suelo es la base del sistema agroalimentario y el medio en el que crecen casi todos los cultivos que producen alimentos: cerca del 95% de los alimentos que consumimos provienen del suelo. Después de los océanos, el suelo es el mayor almacén de carbono activo y un metro cúbico de suelo puede almacenar hasta 600 litros de agua, lo que permite que los cultivos crezcan incluso durante los períodos de sequía.

La biodiversidad —sobre y bajo tierra— es vital para garantizar la salud de los suelos y los ecosistemas de los que dependemos. La biodiversidad del suelo contribuye al ciclo de los nutrientes y del carbono, regula la aparición de plagas y enfermedades, y sirve como fuente de productos farmacéuticos que contribuyen a mejorar nuestra salud. Los suelos también proporcionan materiales de construcción, combustible y fibra. Son la base de las infraestructuras humanas y preservan nuestro patrimonio cultural.

Sin embargo, los suelos del mundo se encuentran bajo una gran presión. El informe del estado mundial del recurso suelo presentado en 2015 por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) y el Grupo técnico intergubernamental sobre los suelos (GTIS) identificó diez principales amenazas para los suelos del mundo: la erosión, la pérdida del carbono orgánico, la pérdida de la biodiversidad, la contaminación, la acidificación, la salinización y sodificación, el desequilibrio de nutrientes, la compactación, el sellado y el anegamiento, son las principales presiones sobre la salud del suelo y

que limitan su capacidad de proporcionar estos servicios ecosistémicos clave para el bienestar de los seres humanos.

La contaminación del suelo, un proceso de degradación química que consume los suelos fértiles, puede ser invisible a los ojos humanos, pero compromete los alimentos que comemos, el agua que bebemos y el aire que respiramos. La mayoría de los contaminantes tienen su origen en las actividades humanas y se liberan en el medio ambiente debido a prácticas inadecuadas de producción, consumo y eliminación, como las prácticas agrícolas insostenibles, los procesos industriales y la minería poco respetuosos con el medio ambiente, así como la gestión deficiente de los residuos. La contaminación no conoce fronteras; los contaminantes se desplazan por suelo, aire y agua, y entran en los sistemas agroalimentarios, afectando al medio ambiente y a la salud humana.

La contaminación del suelo ha sido reconocida internacionalmente como una gran amenaza para la salud del suelo y su capacidad de proporcionar servicios ecosistémicos. La Asamblea de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, en su tercer período de sesiones de diciembre de 2017, abordó el problema e hizo un llamado mundial a la acción mediante la Resolución 3/6 *Gestión de la contaminación del suelo para lograr el desarrollo sostenible*. La Asamblea también pidió al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) que colaborara con las Organizaciones y entidades pertinentes, entre ellas la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNUCLD) para elaborar un informe sobre el alcance y las tendencias futuras de la contaminación del suelo.

Además, en mayo de 2018, la Alianza Mundial por el Suelo de la FAO, junto con el PNUMA, la OMS y la Secretaría de los Convenios de Basilea, Rotterdam y Estocolmo, organizó el Simposio Mundial sobre la Contaminación del Suelo, en el que se acordó “Sé la solución a la contaminación del suelo” como un camino común a seguir.

El *Informe sobre el Estado Mundial de la Contaminación del Suelo* que presentamos hoy es el resultado de un proceso inclusivo realizado por científicos de todas las regiones del mundo, en donde se reúne la ciencia detrás de la contaminación del suelo. El informe, un esfuerzo conjunto coordinado por la Alianza Mundial por el Suelo de la FAO y apoyado por el PNUMA, contribuye a la concienciación sobre las amenazas que plantea la contaminación del suelo y la interrelación con otras presiones ambientales mundiales.

Es hora de volvernos a conectar con nuestros suelos ya que es donde empieza nuestro alimento. La contaminación del suelo no debe seguir siendo una realidad oculta. Seamos todos parte de *la solución a la contaminación del suelo*.



QUDongyu

Director General de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)



Inger Andersen

Director Ejecutivo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)







# Prefacio

La contaminación del suelo es invisible al ojo humano, pero compromete la calidad de los alimentos que comemos, el agua que bebemos y el aire que respiramos, y pone en riesgo la salud humana y medioambiental. La mayoría de los contaminantes tienen su origen en actividades humanas como los procesos industriales y la minería, la mala gestión de los residuos, las prácticas agrícolas insostenibles, los accidentes que van desde pequeños derrames químicos hasta accidentes en centrales nucleares, y los múltiples efectos de los conflictos armados. La contaminación no conoce fronteras: los contaminantes se extienden por los ecosistemas terrestres y acuáticos, y muchos de ellos se distribuyen a nivel mundial mediante el transporte atmosférico. Además, se redistribuyen a través de la economía mundial por medio de las cadenas alimentarias y de producción.

La contaminación del suelo ha sido reconocida internacionalmente como una de las principales amenazas para la salud del suelo, y afecta a la capacidad del suelo para proporcionar servicios ecosistémicos, incluida la producción de alimentos inocuos y suficientes, comprometiendo la seguridad alimentaria mundial. La contaminación del suelo dificulta la consecución de muchos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, incluidos los relacionados con el fin de la pobreza (ODS 1), el hambre cero (ODS 2) y salud y bienestar (ODS 3). La contaminación del suelo afecta más a los más vulnerables, especialmente a los niños y a las mujeres (ODS 5). El suministro de agua potable se ve amenazado por la lixiviación de contaminantes en las aguas subterráneas y en la escorrentía (ODS 6). Las emisiones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O procedentes de suelos gestionados de forma insostenible aceleran el cambio climático (ODS 13). La contaminación del suelo contribuye también a la degradación de la tierra y a la pérdida de la biodiversidad terrestre (ODS 15) y acuática (ODS 14), así como a la disminución de la seguridad y la resiliencia de las ciudades (ODS 11), entre otros (Cuadro 1).

En respuesta a esta amenaza mundial y multidimensional, la Asamblea de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEA, por sus siglas en inglés)<sup>1</sup> en su tercera sesión, celebrada en Nairobi, Kenia, del 4 al 6 de diciembre de 2017, se reunió bajo el lema “Hacia un planeta libre de contaminación” (PNUMA, 2017). Como resultado, la Resolución 3/6 de la UNEA, solicitó “al Director Ejecutivo que presente un informe sobre el alcance y las tendencias futuras de la contaminación del suelo [...] en colaboración con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Alianza Mundial por el Suelo (AMS) y su Grupo técnico intergubernamental sobre los suelos (GTIS), y otras organizaciones pertinentes de las Naciones Unidas para el quinto período de sesiones de la Asamblea de las

Naciones Unidas para el Medio Ambiente”. El presente informe es la respuesta a esa petición. El Informe sobre el Estado Mundial del Recurso Suelo, elaborado por el GTIS de la FAO, identificó 10 amenazas mundiales para el suelo que ponen en peligro la prestación de servicios ecosistémicos clave del suelo (FAO y GTIS, 2015). La contaminación del suelo fue identificada como una de las amenazas más preocupantes para la salud y el funcionamiento del suelo. En 2018, la Alianza Mundial por el Suelo de la FAO organizó el Simposio Mundial sobre la Contaminación del Suelo (GSOP18). El simposio, coorganizado por la AMS y el GTIS, el PNUMA, la Secretaría de los Convenios de Basilea, Rotterdam y Estocolmo, y la OMS, fue el primer intento para construir una red internacional de expertos, académicos, sector industrial y empresas de remediación, para reunir la información existente e identificar las lagunas y las opciones de acciones prioritarias (FAO, 2018b).

Tras el éxito de la organización del GSOP18, se organizaron múltiples eventos a lo largo del año para sensibilizar sobre la contaminación del suelo, dirigidos a diferentes partes interesadas, desde académicos y expertos técnicos hasta formuladores de políticas, que concluyeron con la celebración del Día Mundial del Suelo el 5 de diciembre de 2018 bajo el lema “*Sé la solución a la contaminación del suelo*”.

Con base en el documento final del GSOP18 “*Sé la solución a la contaminación del suelo*” (FAO, 2018a), así como en una intensa consulta y evaluación bibliográfica, este informe ha sido desarrollado por la AMS en estrecha consulta con el PNUMA, la OMS y una amplia gama de expertos y partes interesadas para cumplir con la solicitud de la UNEA-3. El informe aborda el alcance y las tendencias de la contaminación del suelo, teniendo en cuenta la contaminación del suelo, tanto la puntual como la difusa, y describe los riesgos e impactos de la contaminación del suelo en la salud, el medio ambiente y la seguridad alimentaria, incluida la degradación del suelo y la carga de enfermedad resultante de la exposición al suelo contaminado. El proceso de elaboración del informe incluyó evaluaciones regionales exhaustivas de la contaminación del suelo, y los capítulos regionales ofrecen una visión general de los problemas de contaminación del suelo a escala mundial que hacía falta desde hace tiempo (Figura 1). El Consejo Editorial estaba formado por más de 30 expertos internacionales en representación del GTIS, Alianzas Regionales por el Suelo, foros internacionales pertinentes, grupos de expertos, y el sector privado.

El Resumen para Formuladores de Políticas presenta las principales conclusiones del informe, junto con las opciones de acción para facilitar las consideraciones de políticas mundiales en el proceso de la UNEA. El informe principal es una publicación exhaustiva que está disponible en el sitio web de la FAO.

<sup>1</sup> La UNEA es el órgano decisorio de más alto nivel del mundo en materia de medio ambiente. La Asamblea, creada en junio de 2012, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (Río+20), convoca a los 193 Estados miembros de la ONU para abordar los retos medioambientales más críticos a los que se enfrenta el mundo. A través de sus resoluciones y llamamientos a la acción, proporciona liderazgo mundial y cataliza la acción intergubernamental en materia de medio ambiente tan importantes para la salud de nuestro planeta.



Cuadro 1. Relaciones entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la contaminación del suelo

**1.1** Para 2030, erradicar la pobreza extrema para todas las personas en el mundo, actualmente medida por un ingreso por persona inferior a 1,25 dólares al día

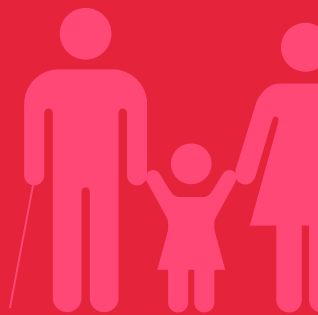
**2.4** Para 2030, asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos y aplicar prácticas agrícolas resilientes que aumenten la productividad y la producción, contribuyan al mantenimiento de los ecosistemas, fortalezcan la capacidad de adaptación al cambio climático, los fenómenos meteorológicos extremos, las sequías, las inundaciones y otros desastres, y mejoren progresivamente la calidad del suelo y la tierra

**3.4** Para 2030, reducir en un tercio la mortalidad prematura por enfermedades no transmisibles mediante la prevención y el tratamiento y promover la salud mental y el bienestar

**3.9** Para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo

# Objetivos relacionados con

Alrededor del 79% de las personas en situación de extrema pobreza viven en áreas rurales y dependen en gran medida de los recursos naturales para subsistir, principalmente a través de la agricultura. La contaminación del suelo reduce el rendimiento y la calidad de las cosechas, lo que provoca una reducción de los ingresos de las poblaciones rurales y exacerba la carga de contaminantes.



La contaminación del suelo afecta la seguridad del mismo al reducir el rendimiento de los cultivos, dificultando la cantidad y la calidad de los alimentos producidos. La contaminación del suelo también degrada la estructura del suelo y el contenido de carbono orgánico, reduciendo así la resiliencia de los paisajes terrestres a las inundaciones y a las sequías, y la capacidad de contribuir a la adaptación al cambio climático y su mitigación.



La contaminación del suelo está estrechamente relacionada con una gran variedad de enfermedades. La Organización Mundial de la Salud (OMS) calcula que alrededor del 16% del total de la mortalidad mundial se atribuye a enfermedades relacionadas con la contaminación ambiental (incluida la contaminación del agua, el aire y el suelo). Sin embargo, la carga de enfermedad atribuida únicamente a la contaminación del suelo y a las enfermedades transmitidas por el suelo sigue siendo en gran medida desconocida y puede estar muy subestimada.



# Vínculos entre los ODS

**1** FIN DE LA POBREZA



**2** HAMBRE CERO



**3** SALUD Y BIENESTAR





**5.5** Asegurar la participación plena y efectiva de las mujeres y la igualdad de oportunidades de liderazgo a todos los niveles decisorios en la vida política, económica y pública

**6.3** De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial

**7.2** De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas

**8.4** Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, conforme al Marco Decenal de Programas sobre modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados

# la contaminación del suelo

Alrededor del 45% de las mujeres del mundo trabajan en empleos vulnerables (Banco Mundial, 2020), muchas de ellas en áreas agrícolas marginales o como chatarreras, y suelen tener menos acceso a la educación y, por consiguiente, disponen de menos recursos y soluciones para reducir su exposición a la contaminación del suelo.

La mejora y la protección de la calidad del agua solo pueden lograrse si se abordan todas las formas de contaminación, incluida la del suelo. Por un lado, la contaminación del agua conduce a la contaminación del suelo a través de prácticas como el riego con agua contaminada o el vertido de aguas residuales. Por otro lado, la contaminación del suelo da lugar a la contaminación del agua a través de la lixiviación de contaminantes, la escorrentía superficial y la erosión del suelo. La defecación al aire libre es responsable de una mayor carga de contaminación del suelo y de la transmisión de enfermedades transmitidas por el suelo.

Alrededor del 65% de la producción mundial de energía proviene de la combustión de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo), que son una fuente importante de contaminantes ambientales.

Las reservas mal gestionadas y la difusión de sustancias químicas en el medio ambiente provenientes de las actividades industriales, son fuentes importantes de contaminación del suelo, tanto en el emplazamiento industrial como, más ampliamente, a través del transporte de partículas por el aire y el agua.



# y la contaminación del suelo

**5** IGUALDAD DE GÉNERO

**6** AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO

**7** ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE

**8** TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO





**10.1** De aquí a 2030, lograr progresivamente y mantener el crecimiento de los ingresos del 40% más pobre de la población a una tasa superior a la media nacional

La contaminación del suelo provocará la reducción de las tierras agrícolas productivas, del rendimiento y calidad de los cultivos, lo que en última instancia se traducirá en una disminución de los ingresos para las poblaciones rurales que ya enfrentan pobreza extrema. Los impactos en la salud humana que afectan desproporcionadamente a las poblaciones/comunidades más pobres debido a la contaminación del suelo reducen la capacidad humana para mejorar sus circunstancias económicas.

**10** REDUCCIÓN DE LAS DESIGUALDADES



**11.2** De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad

**11.6** De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo

El transporte y la mala gestión de los residuos son dos de las principales causas de la contaminación del suelo en las áreas urbanas. Si se promueven sistemas sostenibles para todos y se reduce el impacto ambiental de las ciudades, se puede reducir la contaminación del suelo en ellas y crear un entorno más saludable. Los espacios verdes urbanos presentan grandes oportunidades para el desarrollo personal y social, así como para la salud y el bienestar de los seres humanos; sin embargo, si se contaminan serán una vía más para el ingreso de los contaminantes en el organismo.

**11** CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES



**12.2** De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales

**12.4** De aquí a 2020, lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente

**12.5** De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización

Los patrones de producción y consumo modernos basados en la rápida obsolescencia de los productos, han llevado a una incesante producción de residuos y a la excesiva extracción de materias primas. El mundo produce más de 2 000 millones de toneladas de residuos sólidos al año. Aunque una parte de estos residuos se almacena, se recicla y se reutiliza, gran parte no se gestiona adecuadamente y a menudo termina contaminando el medio ambiente, incluido el suelo. Con el rápido crecimiento de la población y la urbanización, se prevé que la generación anual de residuos aumente a 3 400 millones de toneladas en 2050. La gestión insostenible de los residuos representa la principal fuente de contaminación del suelo en algunos países, especialmente en el hemisferio sur.

**12** PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES



**13.1** Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países

La agricultura insostenible es una de las principales causas de la contaminación del suelo y también tiene un gran impacto en el cambio climático. En 2018 se aplicaron en todo el mundo unos 109 millones de toneladas de fertilizantes nitrogenados sintéticos. El exceso de nitrógeno altera los ciclos biológicos del suelo y se libera a la atmósfera en forma de  $N_2O$ , lo que provoca emisiones de 700 000 de  $CO_2$  equivalentes. En 2017, las emisiones agrícolas representaron el 20% de todas las actividades humanas.

**13** ACCIÓN POR EL CLIMA



Objetivo  
con la  
del su

Vínculos entre los ODS y la



**14.1** De aquí a 2025, prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes

**15.3** Para 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo

**16.3** Promover el estado de derecho en los planos nacional e internacional y garantizar la igualdad de acceso a la justicia para todos

**16.7** Garantizar la adopción en todos los niveles de decisiones inclusivas, participativas y representativas que respondan a las necesidades

**17.7** Promover el desarrollo de tecnologías ecológicamente racionales y su transferencia, divulgación y difusión a los países en desarrollo en condiciones favorables, incluso en condiciones concesionarias y preferenciales, según lo convenido de mutuo acuerdo

**17.9** Aumentar el apoyo internacional para realizar actividades de creación de capacidad eficaces y específicas en los países en desarrollo a fin de respaldar los planes nacionales de implementación de todos los Objetivos de Desarrollo Sostenible, incluso mediante la cooperación Norte-Sur, Sur-Sur y triangular

# Objetivos relacionados con la contaminación del suelo

Alrededor del 80% de la contaminación marina procede de actividades realizadas en tierra. La erosión de los suelos contaminados aporta plásticos, nutrientes y sustancias químicas orgánicas que son contaminantes preocupantes en los ecosistemas marinos.

La contaminación del suelo provoca una reacción en cadena en los ecosistemas terrestres, empezando por la contaminación de las plantas que crecen en el suelo contaminado, y luego continuando a través de la cadena alimentaria hasta los humanos, lo que provoca la contaminación de ecosistemas enteros. Los suelos fuertemente contaminados también provocan la degradación del suelo, aumentando la susceptibilidad a la erosión y al adelgazamiento de la cubierta forestal.

Los grupos étnicos minoritarios y los más pobres y vulnerables son los más afectados por la contaminación del suelo. Estos grupos tienen menos acceso a la justicia y a menudo sufren discriminación y múltiples formas de racismo. Las desigualdades del medio ambiente existen tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados y se ven favorecidas por la falta de información y datos sobre el estado del medio ambiente, lo que limita la capacidad de reacción, actuación y decisión de las poblaciones afectadas.

Los países desarrollados están más avanzados en el desarrollo de tecnologías de detección de contaminantes emergentes, de producción industrial innovadora respetuosa con el medio ambiente y de tecnologías de remediación de la contaminación del suelo, por lo que deben colaborar activamente en la transferencia de conocimientos.

# contaminación del suelo





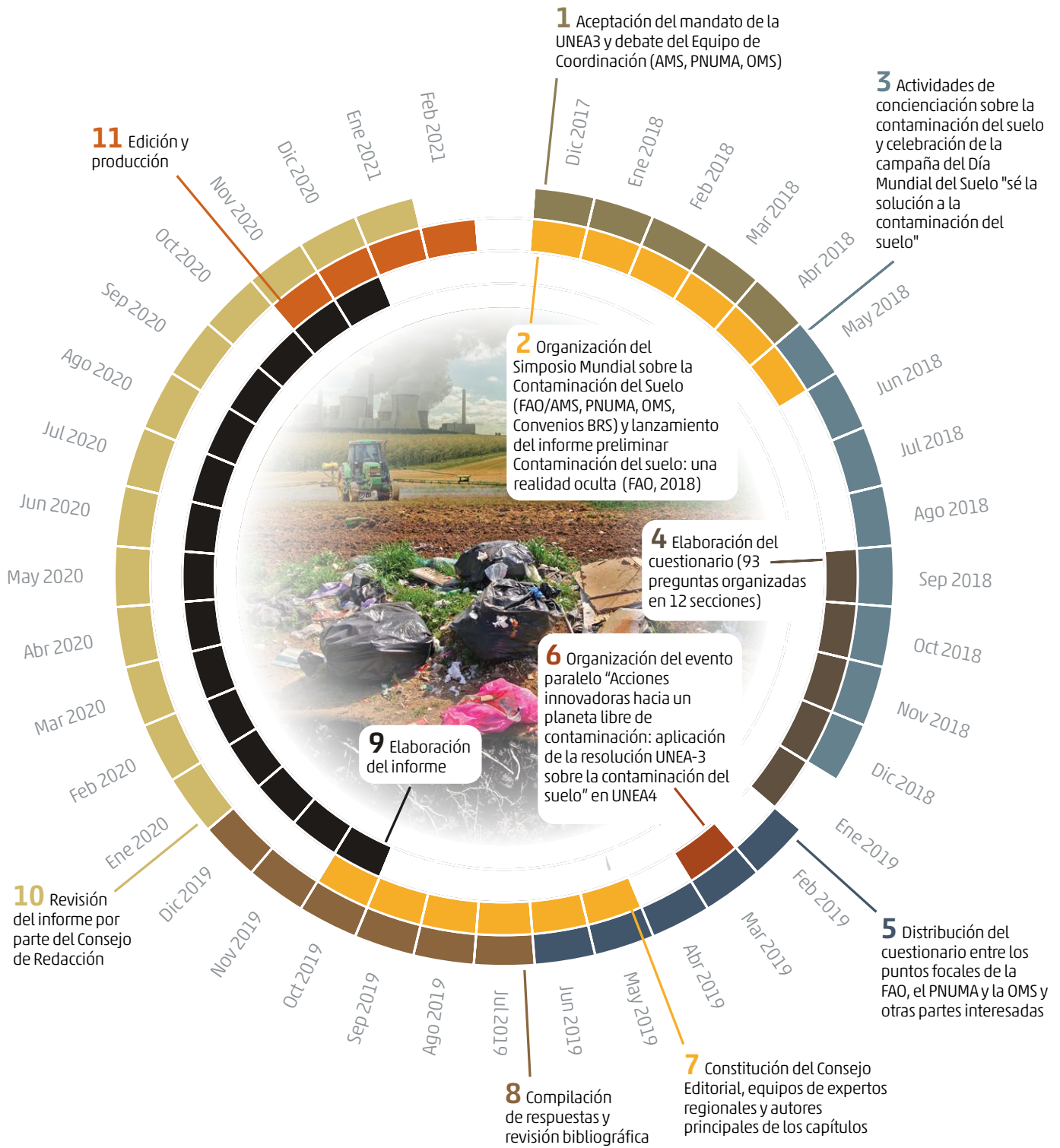


Figura 1. Cronología y principales hitos del desarrollo del informe de la Evaluación Mundial de la Contaminación del Suelo

# Abreviaturas y acrónimos

AAFC	Departamento de Agricultura y Agroalimentación de Canadá
ACAP	Plan de Acción del Consejo Ártico
AES	Alianza Europea por el Suelo
ADN	Ácido desoxirribonucleico
AMS	Alianza Mundial por el Suelo
ASEAN	Asociación de Naciones del Asia Sudoriental
ASLAC	Alianza por el Suelo de América Latina y el Caribe
ASP	Alianza Asiática por el Suelo
ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades de los Estados Unidos de América
BPA	Bisfenol A
BPCs	Bifenilos policlorados
BTEX	Compuestos de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno.
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CI	Cociente intelectual
DDPCs	Dibenzo-p-dioxinas policloradas
DDT	1,1,1-tricloro 2,2-bis(p-clorofenil)etano
DFPCs	Dibenzofuranos policlorados
EFSA	Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria
EIONET	Red Europea de Información y Observación del Medio Ambiente
EOL	Al final de su vida útil
EPA	Agencia de Protección Ambiental
EUR	Euro
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GEI	Gas de efecto invernadero
GSOP	Simposio Mundial sobre la Contaminación del Suelo
GSS	Gestión sostenible del suelo
GTIS	Grupo técnico intergubernamental sobre los suelos
HAPs	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
HCH	Hexaclorociclohexano
HMX	Ciclotetrametilentanitramina
INI	Iniciativa Internacional del Nitrógeno
IPCC	Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático
ISO	Organización Internacional de Normalización

ITRC	Consejo Interestatal de Tecnología y Regulación
IUPAC	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
JRC	Centro Común de Investigación, Comisión Europea
MNM	Nanomateriales manufacturados
NENA	Alianza por el Suelo del Cercano Oriente y África del Norte
NICOLE	Red para la gestión sostenible de la tierra coordinada por la industria en Europa
NPRI	Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes de Canadá
OCPS	Plaguicidas organoclorados
ODS	Objetivos de desarrollo sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PAE	Ester de ftalato
PBDDs	Dibenzo-p-dioxinas polibromadas
PBDEs	Éteres de difenilo polibromados
PBDFs	Dibenzofuranos polibromados
PFAS	sustancias per- y polifluoroalquilo
PFCP	Productos farmacéuticos y de cuidado personal
PFOA	Ácido perfluorooctanoico
PFOS	Ácido perfluorooctanosulfónico
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
POs	Plaguicidas obsoletos
POPs	Contaminantes orgánicos persistentes
RDX	Perhidro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazina
RSU	Residuos sólidos urbanos
TNT	Trinitrotolueno
TRI	Inventario de liberación de sustancias tóxicas de los Estados Unidos de América
TSIP	Programa de identificación de emplazamientos tóxicos
UNEA	Asamblea de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
UNIDO	Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial
UNSCEAR	Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas
USD	Dólar estadounidense
VGS	Valores guía de contaminación del suelo
VGSSM	Directrices voluntarias para la gestión sostenible de los suelos
VOCs	Compuestos orgánicos volátiles



# Resumen ejecutivo

**1.** La degradación mundial del medio ambiente debido a las presiones de las crecientes demandas de los sistemas industriales y agroalimentarios, en respuesta a un aumento de la población mundial, es uno de los principales retos mundiales a los que se enfrenta la humanidad.

**2.** Desde la antigüedad, las actividades humanas han liberado al medio ambiente miles de diversos compuestos químicos sintéticos y elementos naturales potencialmente tóxicos. Estos contaminantes pueden tener tiempos de residencia en el medio ambiente del orden de cientos a miles de años, y están distribuidos por todo el planeta.

**3.** La contaminación es un problema mundial que no conoce fronteras. Los contaminantes se encuentran en todos los continentes, incluso en sus zonas más remotas, y son fácilmente transportados de un país a otro.

**4.** El suelo es uno de los principales receptores de contaminantes. La contaminación del suelo es una de las principales amenazas para la salud del suelo, aunque sus impactos van mucho más allá de la dimensión del suelo, y los contaminantes del suelo pueden tener consecuencias irreparables para la salud humana y medioambiental.

**5.** El suelo contaminado puede actuar como fuente de contaminantes para todos los compartimentos ambientales, como el agua, el aire, los alimentos y los organismos, incluidos los seres humanos. La salud humana y medioambiental están interconectadas como enfatizan las iniciativas “Salud Planetaria” y “Una Sola Salud”; sin embargo, ninguna de las dos puede abordarse eficazmente sin abordar la contaminación del suelo.

**6.** La contaminación del suelo puede provocar la pérdida de servicios ecosistémicos y causar graves pérdidas económicas y desigualdades sociales, todo ello pone en peligro el cumplimiento de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

**7.** Las principales fuentes de contaminantes que contribuyen a la contaminación del suelo son (por orden de importancia) las actividades industriales, la minería, el tratamiento de residuos, la agricultura, la extracción y procesamiento de combustibles fósiles y las emisiones del transporte. Sin embargo, no existen datos concretos y comparables sobre las emisiones reales de cada sector.

**8.** Con excepción de los aportes agroquímicos, la mayoría de las emisiones de contaminantes al suelo no son fáciles de cuantificar y, por consiguiente, siguen siendo muy inciertas. Los contaminantes industriales se liberan al medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida, desde la fabricación hasta la producción de los materiales que contienen contaminantes, su transporte, uso y eliminación.

**9.** Desde principios del siglo XXI, la producción anual mundial de productos químicos industriales se ha duplicado hasta alcanzar alrededor de 2 300 millones de toneladas y se prevé que aumente un 85% para el 2030. Por lo tanto, se espera que la contaminación del suelo y del medio ambiente aumente a menos que se produzca un rápido cambio en los patrones de producción y consumo, y exista un compromiso político hacia una verdadera gestión sostenible en la que se respete plenamente la naturaleza.

**10.** A pesar de décadas de investigación, inventario y vigilancia de los suelos contaminados por fuentes puntuales en varios países, todavía existen importantes lagunas en el conocimiento e incertidumbre sobre el número y el alcance de las zonas afectadas, lo que se ve agravado por la aparición de nuevos contaminantes. La laguna en el conocimiento sobre los suelos afectados por contaminación difusa y su impacto en otros compartimentos ambientales es aún mayor.

**11.** La proliferación de contaminantes orgánicos y contaminantes emergentes, como los productos farmacéuticos, los antimicrobianos que dan lugar a bacterias resistentes, los productos químicos industriales y los residuos plásticos, constituye una preocupación social creciente. En la actual situación de pandemia mundial provocada por la COVID-19, la presión sobre el medio ambiente ha aumentado al intensificarse la liberación de residuos.

**12.** Considerando la gran cantidad de contaminantes, la variedad de sus características físico-químicas y sus múltiples interacciones con el suelo (que determinan el destino de los contaminantes), resulta complejo estimar la carga de contaminantes. Todavía faltan conocimientos científicos sobre el destino de los contaminantes emergentes. Esto hace que el establecimiento de modelos de distribución a nivel mundial sea muy difícil en ausencia de análisis sistemáticos regulares en laboratorios de suelos (que se centran más en la parte agronómica de los suelos) y de sistemas de vigilancia en muchos países del mundo.

**13.** La identificación y evaluación del riesgo en emplazamientos potencialmente contaminados es el primer paso esencial en la gestión de la contaminación del suelo. Si la contaminación en un emplazamiento determinado se encuentra en niveles que pueden causar daños a los organismos, la información sobre ese emplazamiento debe recopilarse al nivel gubernamental apropiado y ponerse a disposición del público, y las acciones de remediación o de minimización de riesgos deben tomarse en consecuencia, especialmente si el emplazamiento se utiliza para la producción de alimentos o como reservorio de agua para consumo humano.

**14.** La identificación del emplazamiento también permite rastrear la propiedad del lugar, lo que es fundamental para el principio de “quien contamina paga”. Aunque muchos países cuentan con procesos eficaces para identificar y evaluar los emplazamientos contaminados, este paso fundamental de identificar a la parte responsable (contaminadora) sigue faltando en muchos países.

**15.** La gestión y remediación de los emplazamientos contaminados son necesarias para proteger la salud humana y medioambiental. Los capítulos regionales del informe principal muestran que en cada región existen ejemplos de enfoques exitosos para la gestión de emplazamientos contaminados. El intercambio de conocimientos a nivel regional facilitaría en gran medida el avance en el tratamiento de la contaminación del suelo.

**16.** Se necesitan canales claros de comunicación entre el mundo académico, los formuladores de políticas y la sociedad para garantizar que la información oportuna con base científica sobre las posibles amenazas que plantean los contaminantes esté disponible para los formuladores de políticas y otras partes interesadas.

**17.** La remediación de la contaminación del suelo es una labor técnicamente compleja y costosa, que oscila entre decenas de miles a cientos de millones de dólares estadounidenses al año. El costo de remediación varía de un emplazamiento a otro en función de las características del mismo, el tipo de contaminantes y su concentración, los compartimentos ambientales afectados (por ejemplo, capa superior del suelo, agua subterránea, agua superficial), las medidas de protección que deben adoptarse para proteger a la población durante las obras de remediación y el uso del suelo posterior a la remediación, así como la tecnología elegida.

**18.** La producción, el uso, el transporte y la eliminación de los contaminantes del suelo más perjudiciales están regulados por convenciones mundiales (los Convenios de Estocolmo, Basilea, Rotterdam y de Minamata). En algunas regiones, estos convenios mundiales se amplían mediante acuerdos regionales como la Convención de Bamako sobre la prohibición de la importación a África, la fiscalización de los movimientos transfronterizos y la gestión dentro de África de desechos peligrosos. Se debe alentar firmemente a los países que no son parte de estos convenios a que los adopten.

**19.** En la situación actual de una tendencia de empeoramiento mundial de la contaminación del suelo, es necesario un mayor compromiso político, empresarial y social para buscar soluciones alternativas al uso de contaminantes altamente tóxicos y aumentar la inversión en investigación, prevención y remediación.

**20.** La alianza y cooperación reforzadas son esenciales para garantizar la disponibilidad de conocimientos, el intercambio de experiencias exitosas y el acceso universal a tecnologías limpias y sostenibles, sin dejar a nadie atrás.







# Contaminantes del suelo: propiedades, fuentes y efectos sobre la salud

Las sustancias químicas que actúan como contaminantes ambientales en el suelo y que pueden causar riesgos para la salud humana y el medio ambiente son compuestos orgánicos o inorgánicos. La figura 2 presenta una categorización sistemática de algunos de los contaminantes más comunes en los suelos según sus propiedades químicas. En la figura no se incluyen los contaminantes emergentes debido a que pueden encontrarse en una amplia gama de categorías. El destino en el suelo (Figura 3), incluida la retención o movilidad a otros compartimentos ambientales y los efectos sobre los organismos vivos, está determinado por las características intrínsecas del contaminante y por las propiedades locales del suelo. La identificación de las fuentes de los oligoelementos en el medio ambiente es de vital importancia para comprender sus patrones de contaminación y para tomar decisiones relativas a la remediación de la contaminación.

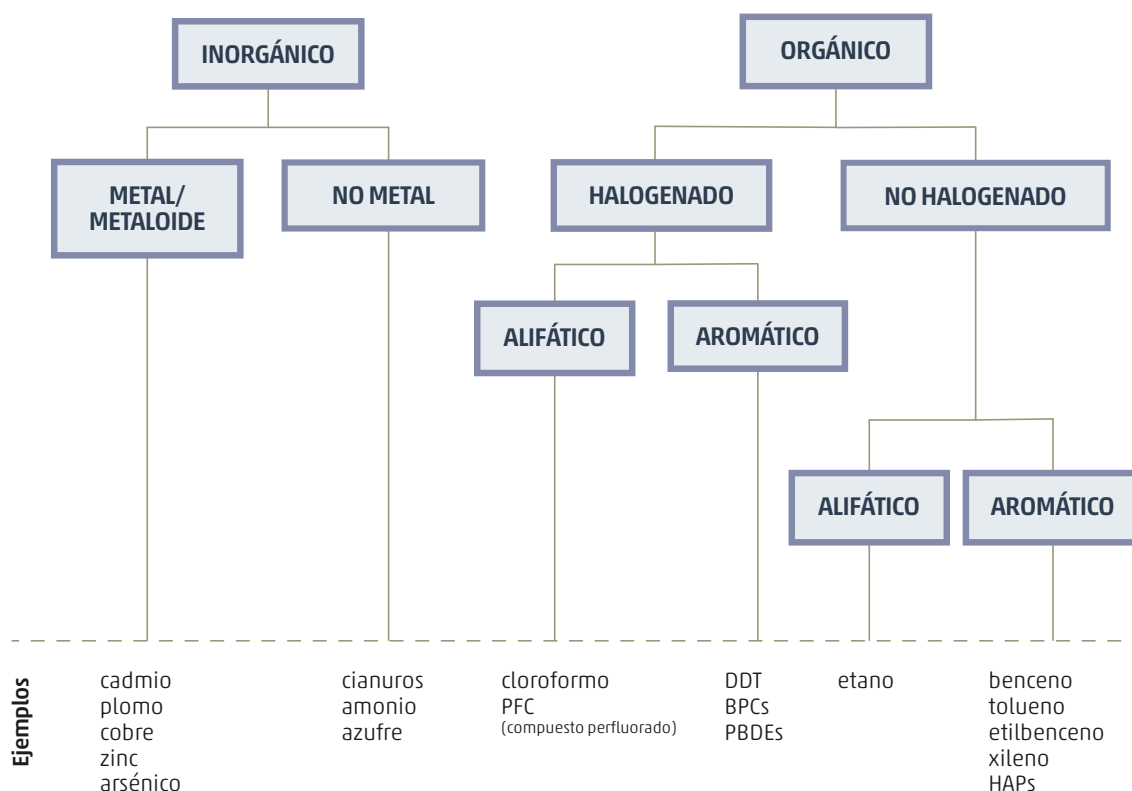


Figura 2. Categorización sistemática de los principales contaminantes en los suelos según la IUPAC (Niè *et al.*, 2009).

Los compuestos halogenados comprenden compuestos fluorados, clorados y bromados

Fuente: adaptada de Swartjes, 2011.

La contaminación del suelo suele tener un impacto a largo plazo en la salud humana (Figura 4) y son muchas las variables que determinan la relación entre la exposición a la contaminación del suelo (*soil pollution*)<sup>2</sup> y la enfermedad, por ejemplo:

- Contaminante(s) y concentraciones > los seres humanos están expuestos a múltiples contaminantes en momentos específicos y a lo largo de su vida. Las mezclas de contaminantes a las que estamos expuestos varían a lo largo de nuestra vida y pueden tener efectos sinérgicos, antagónicos o aditivos.
- Vías de exposición > existen tres vías principales de exposición (inhalación, ingesta y absorción dérmica), que a menudo se combinan y ocurren simultáneamente.
- Fuentes de origen de la exposición > los contaminantes del suelo pueden alcanzar a los seres humanos a través del suelo, polvo, agua o alimento. Todos pueden ocurrir por separado o simultáneamente.
- Vulnerabilidades individuales y especificidad comunitaria > Las personas con enfermedades preexistentes o los individuos más vulnerables, como los fetos, los neonatos y los niños, serán más sensibles que los adultos sanos. Ciertas comunidades corren un mayor riesgo de exposición debido a sus tradiciones y cultura alimentaria (por ejemplo, los geófagos), su situación socioeconómica y su proximidad a las fuentes de contaminación.

<sup>2</sup> En este documento se hace una diferenciación entre la contaminación del suelo referida a la presencia de contaminantes en el suelo pero que no suponen un riesgo para la salud humana y medioambiental y aquella que sí supone un riesgo debido a las concentraciones elevadas y la movilidad y disponibilidad de los contaminantes, entendida en inglés como *soil pollution*. Cuando se hace referencia a este segundo término, se incluye entre paréntesis el término en inglés para facilitar la comprensión del lector.



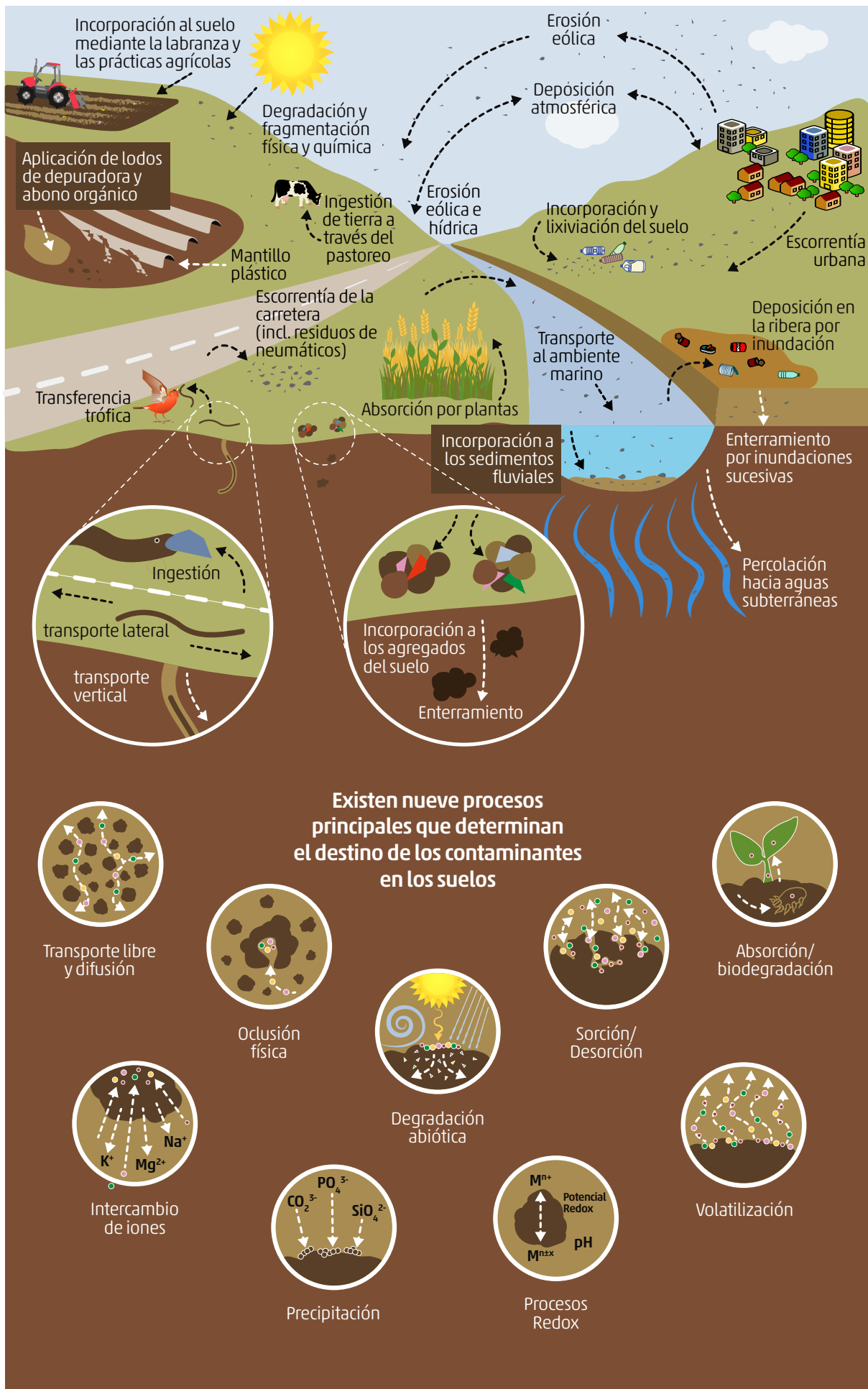


Figura 3. Rutas de entrada y destino de los contaminantes en los suelos  
Fuente: adaptado de Hurley y Nizzetto, 2018.

## Contaminantes inorgánicos

Este grupo de contaminantes incluye elementos o compuestos que ocurren de forma natural en la roca madre o que tienen un origen antropogénico. A continuación, se describen los principales contaminantes inorgánicos (oligoelementos, radionúclidos y amianto).

### | Oligoelementos<sup>3</sup>

El término “oligoelementos” se refiere a un grupo de elementos ubicuos que normalmente se encuentran en niveles muy bajos en el medio ambiente y que pueden ser tóxicos para los organismos. Entre los oligoelementos se encuentran los metales pesados (es decir, aquellos con una masa atómica elevada) como el plomo (Pb), el cadmio (Cd), el cobalto (Co), el cobre (Cu), el cromo (Cr), el mercurio (Hg), el estaño (Sn), el níquel (Ni) y el zinc (Zn). Los no metales que se consideran oligoelementos son el arsénico (As), el antimonio (Sb) y el selenio (Se).

Los oligoelementos son persistentes y no pueden ser degradados por los procesos metabólicos. Los oligoelementos pueden presentarse en muchas formas diferentes, como son sales, óxidos, sulfuros, complejos organometálicos, o pueden estar presentes en forma de iones disueltos en la solución del suelo. El reparto entre el aire, el agua y el suelo es impulsado por procesos químicos como la adsorción a partículas o la disolución en agua dependiente del pH (Alloway, 2012).

Los oligoelementos tienen un origen geogénico (natural), ya que muchas rocas contienen altas concentraciones de oligoelementos que se liberan en el medio ambiente a través de la meteorización o la acción antropogénica. Muchos suelos tienen una concentración natural de fondo de oligoelementos que se origina en el material parental del suelo, la cual debe establecerse para evaluar los incrementos de concentración inducidos por el hombre. La contaminación del suelo por oligoelementos ocurre a partir de fuentes puntuales como zonas industriales, minas, vertederos sanitarios con eliminación de residuos que contienen oligoelementos, pinturas, residuos de la combustión del carbón, los vertidos de productos petroquímicos y, en menor medida, la deposición de gases de escape emitidos por los coches que utilizan gasolina con plomo. Las fuentes difusas de contaminación por oligoelementos incluyen la aplicación de fertilizantes y plaguicidas, la aplicación de estiércoles y lodos de depuradora, el riego con aguas residuales y la deposición atmosférica (como polvo contaminado).

Los oligoelementos se acumulan en los tejidos de los organismos vivos. Algunos oligoelementos son micronutrientes esenciales para los organismos, como el hierro, el cobre, el zinc, el manganeso, el níquel,

el boro, el selenio y el molibdeno. Sin embargo, a altas concentraciones pueden ser tóxicos. Entre los oligoelementos, el zinc, el níquel, el cobalto y el cobre son relativamente más tóxicos para las plantas; mientras que el arsénico, el cadmio, el plomo, el cromo y el mercurio son relativamente más tóxicos para los animales superiores, incluidos los seres humanos.

Las consecuencias para la salud humana de determinados oligoelementos como el arsénico, el cadmio, el plomo y el mercurio son bien conocidas (Landrigan *et al.*, 2018). Una amplia gama de órganos y sistemas se ven afectados por los oligoelementos, causando enfermedades cardiovasculares, alteraciones del neurodesarrollo, trastornos hematológicos e inmunológicos, complicaciones reproductivas y cáncer. A continuación, se ofrece información sobre tres de los oligoelementos más preocupantes para la salud y el medio ambiente, aunque existen otros oligoelementos que también son responsables de la contaminación del suelo (véase el informe completo para conocer más detalles sobre otros oligoelementos).

La exposición crónica al arsénico puede provocar lesiones en la piel como hiperpigmentación, queratosis y ulceración; problemas en el sistema respiratorio; enfermedades cardiovasculares; alteraciones neurológicas y del desarrollo; trastornos hematológicos e inmunológicos; complicaciones reproductivas y cáncer (OMS, 2020). La principal fuente de arsénico es el agua contaminada, aunque los alimentos regados con agua contaminada con arsénico o cultivados en suelos contaminados también pueden ser un importante factor de exposición dietética al arsénico.

El plomo es altamente tóxico para los seres humanos. La Comisión Lancet estima que cerca del 2% de las muertes anuales en el mundo se deben al plomo, como se indica en el estudio de Carga Mundial de Enfermedades; el 82% de estas muertes se producen en países con ingresos bajos y medios (Prüss-Ustün *et al.*, 2016). El plomo provoca aumento de la presión arterial, insuficiencia renal, accidentes cerebrovasculares y otras enfermedades cardiovasculares en los adultos. En los niños, la toxicidad sobre el neurodesarrollo (incluido el deterioro cognitivo) es la consecuencia más importante de la toxicidad del plomo.

El mercurio tiene numerosos y bien conocidos efectos sobre la salud de los seres humanos, incluidas la toxicidad cardiovascular, reproductiva y para el desarrollo, la neurotoxicidad, la nefrotoxicidad, la inmunotoxicidad y la carcinogenicidad, y como tal es considerado por la OMS como uno de los diez principales contaminantes de interés sanitario (OMS, 2017). Los bebés son especialmente vulnerables, ya que pueden estar expuestos tanto por transferencia a través de la placenta durante el embarazo como a través de la leche materna, lo que conduce a un desarrollo reducido y deterioro del cerebro fetal y neonatal.

<sup>3</sup> Elementos que generalmente se encuentran en el suelo a bajas concentraciones, menos de 100 mg/kg, que son biológicamente importantes de alguna manera. La importancia biológica incluiría elementos que son esenciales o tóxicos para cualquier organismo, algunos elementos pueden ser ambos, dependiendo de su concentración. Muchos de los oligoelementos que revisten importancia son metales, mientras que otros son metaloides, no metales, actinoides y halógenos que ocurren en una variedad de estados químicos (elemental, cationes, aniones, oxianiones, metilados, etc.).



## Radionúclidos

Los radionúclidos son contaminantes que producen radiaciones ionizantes durante la desintegración de átomos activos y, como tales, suponen un alto riesgo para el medio ambiente y los organismos. La contaminación del suelo por radionúclidos tiene su origen en procesos naturales, como la meteorización de las rocas madre y las erupciones volcánicas, o en actividades antropogénicas, como el refinamiento histórico del radio (para el tratamiento del cáncer) y el uranio, el uso de minerales de fosfatos y cobalto radiactivos, las pruebas con armas nucleares o los accidentes nucleares.

Los radionúclidos en el suelo son absorbidos por las plantas y, por lo tanto, quedan disponibles para su posterior redistribución dentro de la cadena alimentaria. Los seres humanos están expuestos a la radiación ionizante a través de la inhalación e ingestión de alimentos y partículas de suelos contaminados. La radiación ionizante provoca alteraciones en el ADN, lo que da lugar a mutaciones y alteraciones de las células. La exposición a la radiación ionizante tiene un efecto a largo plazo sobre el riesgo de padecer cánceres, como el de tiroides, leucemia, glándulas salivales, pulmón, hueso, esófago, estómago, colon, recto, piel, mama, riñón, vejiga y cerebro. Es posible que los efectos solo se manifiesten tras varios años o varias décadas de exposición (UNSCEAR, 2011).

## Amianto

El amianto es un término genérico que designa una amplia gama de fibras de silicato mineral hidratado de origen natural que pertenecen a los grupos serpentina y anfíboles de los minerales que forman las rocas. El amianto se ha utilizado ampliamente en diversos materiales de construcción. Todos los tipos de fibras de amianto son potencialmente perjudiciales para la salud humana, pero los efectos dependen del tipo de material de amianto, su uso, condición, ubicación y exposición (OMS, 2019). Debido a su alta toxicidad, 67 países, según informa la Secretaría Internacional para la Prohibición del Amianto, han prohibido el uso del amianto y de los materiales que lo contengan. Sin embargo, siguen existiendo grandes consumidores de amianto, como India, China, la Federación de Rusia, Brasil e Indonesia (Kazan-Allen, 2019).

Aunque es especialmente importante en la exposición ocupacional, las fibras de amianto también pueden ser inhaladas por las personas que se encuentran en los alrededores de los emplazamientos mineros o por exposición accidental durante las actividades de jardinería y recreo debido a la erosión o meteorización de los suelos y las rocas que contienen amianto. El amianto inhalado es responsable del 80% de los casos de mesotelioma en todo el mundo, un tumor maligno que afecta a los pulmones, al abdomen o al pericardio. El cáncer de laringe y el de ovarios también están relacionados con la exposición al amianto.

## Contaminantes orgánicos

Los contaminantes orgánicos son moléculas basadas en el carbono, muchas de las cuales son de origen antropogénico, pero también, en menor medida, de compuestos derivados de procesos naturales como los incendios forestales o las erupciones volcánicas. Los contaminantes orgánicos sintéticos pueden producirse para usos específicos, como plaguicidas o como productos químicos industriales o intermedios, como los bifenilos policlorados (BPCs) u otros compuestos orgánicos halogenados y volátiles. Los contaminantes orgánicos también pueden producirse de forma no intencionada como subproductos en las emisiones industriales, frecuentemente procedentes de las industrias mineras y petroleras, que liberan hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs).

En comparación con los oligoelementos y los radionúclidos, el conocimiento sobre la huella global de los suelos contaminados por contaminantes orgánicos es menor. La diversidad de contaminantes orgánicos es enorme y muchos estudios han puesto de manifiesto la preocupación por los efectos desconocidos de las mezclas de contaminantes orgánicos en los suelos, en los ecosistemas y la salud humana. Los suelos contaminados con contaminantes orgánicos se localizan principalmente alrededor de los centros industriales o urbanos, aunque algunos contaminantes orgánicos tienen una distribución generalizada debido a su potencial de transporte a larga distancia y a su persistencia en el medio ambiente. Los contaminantes orgánicos provocan la contaminación de la cadena alimentaria y representan una amenaza para la salud humana.

## Hidrocarburos aromáticos policíclicos

Los HAPs son compuestos que únicamente contienen carbono e hidrógeno. Hay varios miles de HAPs posibles, liberados por eventos naturales como las erupciones volcánicas o los incendios forestales, o a través de una amplia gama de actividades antropogénicas, antiguas y actuales, como la producción y la combustión de petróleo y combustibles fósiles, la quema al aire libre de residuos sólidos urbanos e incineradores, y la producción de creosota. Los HAPs son contaminantes ubicuos en los suelos y están presentes en concentraciones decrecientes en los suelos industriales, urbanos, agrícolas y forestales (Zeng *et al.*, 2019).

Muchos HAPs, específicamente las moléculas más grandes, son cancerígenos, mutagénicos y/o tóxicos para la reproducción, siendo el más tóxico el benzo(a)pireno. Los HAPs son altamente lipofílicos y pueden ser absorbidos por los pulmones, el intestino y la piel, y son capaces de pasar la barrera placentaria afectando al neurodesarrollo del feto. Tienen consecuencias crónicas en la edad adulta, contribuyendo a las enfermedades cardíacas, la obesidad y la inmunosupresión (Drwal, Rak y Gregoraszcuk, 2019).

## Compuestos orgánicos volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles (VOCs, por sus siglas en inglés) abarcan una serie de clases de químicos que existen principalmente como líquidos altamente volátiles (es decir, que cambian fácilmente de estado líquido a gaseoso) a temperatura ambiente. Los VOCs que se encuentran con más frecuencia en los suelos son los compuestos BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) que se biodegradan fácilmente. Los VOCs se liberan principalmente de fuentes naturales, como los incendios forestales. Las fuentes antropogénicas adquieren mayor relevancia en actividades como la extracción y combustión de petróleo y gas natural, las actividades petroquímicas, y su uso en productos industriales como pinturas, lubricantes, adhesivos y otros productos del petróleo. Su volatilidad dificulta la determinación cuantitativa de la concentración en el suelo; sin embargo, los VOCs se encuentran entre las categorías más significativas de contaminantes encontrados en los emplazamientos industriales contaminados.

Debido a su naturaleza volátil, los seres humanos están expuestos a los VOCs principalmente a través de la inhalación, tanto en el aire interior mediante la difusión del gas del suelo como en el exterior (ATSDR, 2004). La ingestión y el contacto dérmico también son posibles, pero normalmente se limitan a la exposición ocupacional. Los VOCs tienen una serie de efectos tóxicos, y algunos promueven respuestas carcinogénicas, mutagénicas y teratogénicas. Los efectos hematológicos, la leucemia mielógena aguda y el síndrome mielodisplásico son las principales enfermedades que se atribuyen a la exposición aguda a los BTEX, respaldadas por pruebas más sólidas (Galbraith, Gross y Paustenbach, 2010).

## Fenoles, clorobenzenos y clorofenoles

Los fenoles, clorobenzenos y clorofenoles son derivados clorados del benceno y del fenol. El fenol y los compuestos relacionados pueden aparecer de forma natural en el suelo a través de la síntesis por parte de las plantas y los hongos, la liberación por descomposición de materia orgánica o la cloración por microorganismos de compuestos mono y poliaromáticos en el suelo y el agua. Las actividades industriales son fuentes antropogénicas importantes, como la producción de tintes, polímeros, resinas, productos farmacéuticos, plaguicidas, fertilizantes, desinfectantes y conservadores orgánicos. Pueden liberarse durante la producción, el uso y la eliminación de productos que contengan fenol, así como en la generación de aguas residuales industriales y urbanas, y llegar al suelo a través de aguas residuales, lodos de depuradora y liberación directa.

Los compuestos que contienen fenol fabricados por el ser humano son contaminantes de interés prioritario debido a su distribución generalizada en el medio ambiente, su persistencia y toxicidad (ECB-JRC, 2006). Los compuestos fenólicos pueden ser absorbidos fácilmente por la piel y las vías respiratoria y gastrointestinal y, una vez en el cuerpo, pasan por una degradación metabólica en el

hígado, los intestinos y riñones que lleva a la formación de especies más reactivas. Son potentes neurotoxinas. Los clorofenoles se consideran potencialmente cancerígenos para los seres humanos. También se ha informado sobre la actividad de disrupción endocrina en animales y humanos. Aunque la exposición ambiental a estos contaminantes es baja, se dispone de pocos o ningún estudio sobre los efectos de la exposición aguda o crónica a esta categoría de contaminantes en los seres humanos (ATSDR, 2020).

## Explosivos

Aunque los explosivos no están tan ampliamente distribuidos en el suelo como otros contaminantes orgánicos, todavía existen muchas zonas contaminadas heredadas de la Primera y Segunda Guerras Mundiales, de las guerras civiles y de emplazamientos militares repartidos por todo el planeta. Las instalaciones de producción y los campos de entrenamiento son los emplazamientos más comunes contaminados con explosivos. La contaminación del suelo proviene principalmente del uso de compuestos explosivos nitroaromáticos (como el trinitrotolueno (TNT), ciclotetrametilentetranitramina (HMX) y perhidro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazina (RDX)), para los que la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de América ha recomendado restricciones de concentración debido a su toxicidad para el medio ambiente y la salud humana (Chatterjee *et al.*, 2017).

La población puede estar expuesta a estos contaminantes mediante la ingestión de suelos contaminados o de alimentos producidos en suelos contaminados y zonas aledañas, así como por inhalación accidental o contacto dérmico directo con el contaminante o el suelo contaminado. Se han observado efectos ecotoxicológicos en bacterias, organismos acuáticos y terrestres y cultivos, por lo que se podrían esperar mecanismos similares en los seres humanos. Sin embargo, las consecuencias de la exposición a los explosivos para la salud han sido escasamente estudiadas y existe controversia sobre algunos de los resultados (Lima *et al.*, 2011).



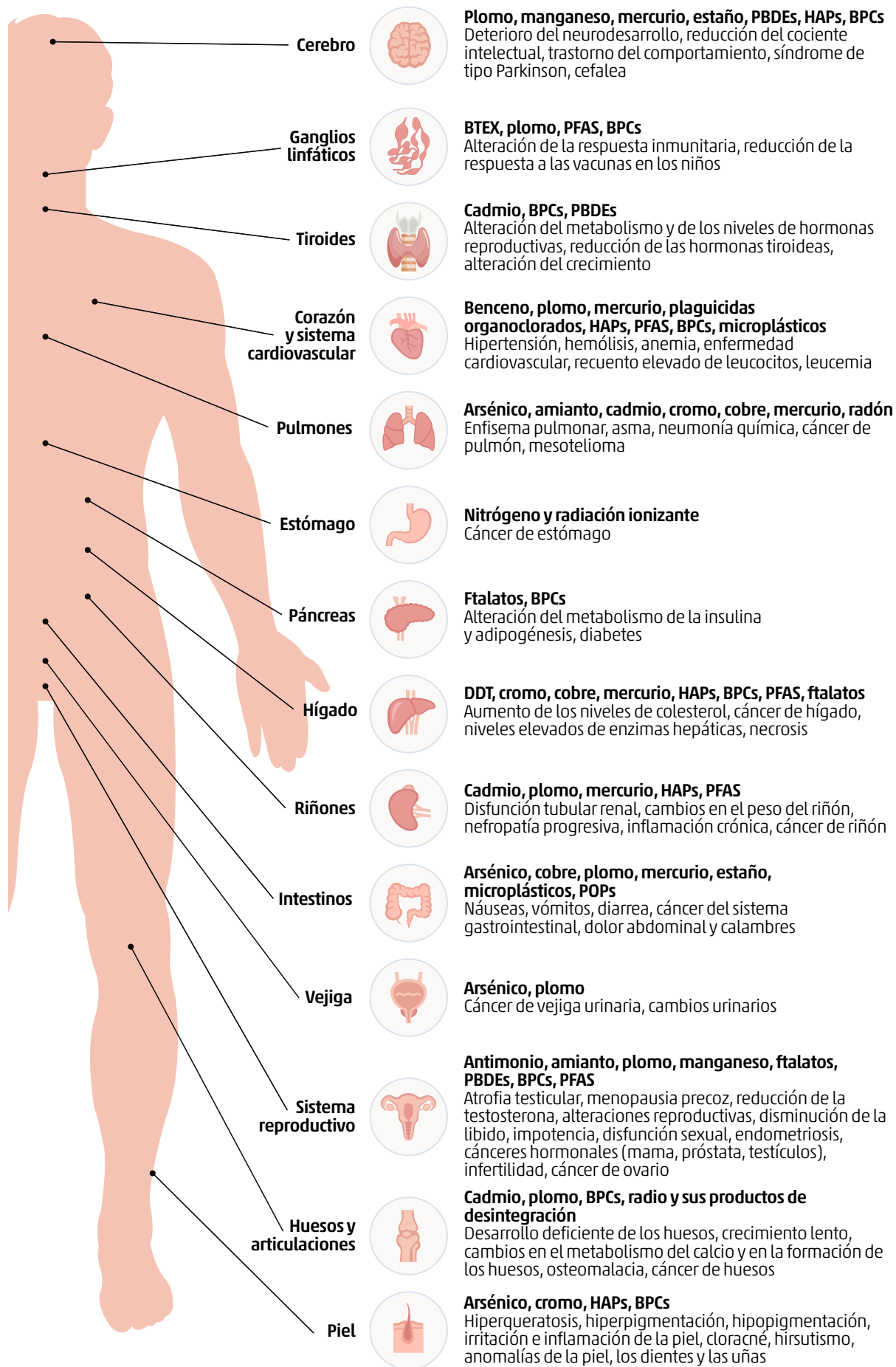


Figura 4. Principales efectos de los contaminantes del suelo en la salud humana, indicando los órganos o sistemas afectados y los contaminantes que los causan

Fuente: creada a partir de la información de ATSDR, 2018; Campanale *et al.*, 2020; Carré *et al.*, 2017 y las referencias citadas en la Cuadro 2 del Capítulo 4 del informe completo.

## | Dioxinas y compuestos similares a las dioxinas

Las dioxinas y los compuestos similares a las dioxinas, incluidas las dibenzo-p-dioxinas policloradas/bromadas (DDPCs/PBDDs), los dibenzofuranos policlorados/bromados (DFPCs/PBDFs) y los bifenilos policlorados similares a las dioxinas (BPCs similares a las dioxinas) son grupos de compuestos orgánicos que contienen benceno y cantidades variables de cloro. La formación de DDPCs y DFPCs se produce principalmente como subproducto de procesos industriales asociados a la combustión incompleta durante los procesos de incineración, incluida la incineración inadecuada de residuos y la quema de basura, especialmente de residuos electrónicos. Como fuente menor, también pueden formarse durante procesos naturales como los incendios forestales y las erupciones volcánicas.

Aunque las concentraciones de DDPCs y DFPCs en los suelos son bajas, estos compuestos son extremadamente persistentes y son capaces de atravesar la membrana celular y acumularse en los tejidos vivos. En la actualidad existe preocupación por estos compuestos, ya que niveles bajos son suficientes para producir defectos de nacimiento en pequeños mamíferos, interactuar con el ADN y causar carcinogenicidad (OMS, 2016). La ingesta de alimentos contaminados es la principal vía de exposición a las dioxinas. Las dioxinas y los BPCs similares a las dioxinas se han relacionado con una mayor incidencia de cáncer, retraso neurológico y, en última instancia, como causa de muerte. El linfoma no Hodgkin y la supresión del sistema inmunitario también se atribuyen a la exposición a las dioxinas. El cloracné es probablemente la enfermedad más conocida relacionada con la exposición a las dioxinas; sin embargo, es causada por la exposición a altas concentraciones (niveles séricos > 20 000 pg/g de grasa), varios órdenes de magnitud mayores que los niveles de fondo ambiental y las concentraciones en los alimentos (Knutsen *et al.*, 2018).

## | Bifenilos policlorados

Los bifenilos policlorados no similares a las dioxinas (BPC no similares a las dioxinas) son también contaminantes de amplia distribución, muy persistentes en el medio ambiente y capaces de acumularse en la cadena alimentaria. Se absorben rápidamente en el tracto gastrointestinal, desde donde se distribuyen y acumulan en el hígado y el tejido adiposo. Como también atraviesan la placenta y se absorben en la leche, los BPCs pueden acumularse en el feto y el lactante.

Debido a su gran estabilidad química y resistencia eléctrica, los BPCs se utilizaron en una amplia gama de aplicaciones industriales, como fluidos en condensadores y transformadores, fluidos hidráulicos, retardantes de fuego y plastificantes. Dada la preocupación por su persistencia y toxicidad en el medio ambiente, el uso y la producción de BPCs cesaron en la mayoría de los países a finales de la década de 1970, y pertenecen al grupo de los doce contaminantes orgánicos persistentes (POPs, por sus siglas en inglés) iniciales del Convenio de Estocolmo.

Sin embargo, el legado de los BPCs ya liberados en el medio ambiente y el control de nuevas liberaciones siguen siendo una preocupación (Klocke y Lein, 2020).

En los suelos y sedimentos, los BPCs se adsorben fuertemente al carbono orgánico y, por lo tanto, el suelo actúa como reservorio de BPCs. Si las prácticas de gestión del suelo reducen la cantidad de carbono orgánico del suelo, los BPCs pueden liberarse y entrar en la cadena alimentaria. La principal vía de exposición a los BPCs no similares a las dioxinas es la ingesta de alimentos y agua contaminados. Los BPCs no similares a las dioxinas son disruptores endocrinos y se han relacionado con la inmunotoxicidad, la neurotoxicidad y la carcinogénesis, especialmente relacionada con el cáncer de mama (Carpenter, 2015).

## | Éteres de difenilo polibromados

Desde su introducción en la década de 1970, los éteres de difenilo polibromados (PBDEs, por sus siglas en inglés) se han utilizado como retardantes de llama bromada en una amplia gama de materiales como plásticos, espumas, resinas y adhesivos. Su producción se ha eliminado en muchos países desde su inclusión en la lista de POPs del Convenio de Estocolmo, y las cargas ambientales y humanas se han reducido con el tiempo desde entonces. Sin embargo, los PBDEs se encuentran en prácticamente todas las matrices ambientales, incluidos los organismos silvestres y los seres humanos, debido a su larga persistencia y a su uso en muchos productos (Besis y Samara, 2012).

Los PBDEs pueden llegar a los suelos a través de los vertederos no controlados, los lixiviados de vertederos sanitarios y la aplicación de lodos de depuradora como nutrientes. Se han notificado concentraciones relativamente altas, especialmente en las zonas de desmantelamiento y reciclaje de residuos electrónicos. En los suelos, los PBDEs pueden unirse a la materia orgánica, persistir durante un largo periodo de tiempo (vidas medias estimadas de 28 años), afectar a la biota del suelo mediante bioacumulación y biomagnificación a lo largo de la cadena alimentaria, y transferirse a los ecosistemas acuáticos (aguas dulces y marinas) por sedimentación.

Los PBDEs se han asociado a la neurotoxicidad, y varios estudios han encontrado pruebas sólidas de la relación entre la exposición prenatal a los PBDEs y el deterioro de las capacidades motoras, cognitivas y de comportamiento de los niños pequeños, que muestran niveles de cociente intelectual (CI) más bajos o un comportamiento agresivo, entre otros efectos. Estos efectos pueden estar relacionados con el impacto de los PBDEs en la producción y regulación de la hormona tiroidea, siendo los PBDEs disruptores endocrinos. También se han asociado varios tipos de cáncer con la carga corporal de PBDEs, incluyendo el de mama, el cáncer colorrectal, de tiroides papilar, ovarios y cuello de útero o el carcinoma de endometrio (Wu *et al.*, 2020).



## | Sustancias per- y polifluoroalquilo

Las sustancias per- y polifluoroalquilo (PFAS por sus siglas en inglés) son una familia de sustancias químicas antropogénicas que han demostrado ser persistentes en el medio ambiente, tóxicas tanto para los animales como para los seres humanos, y muy móviles en los medios acuáticos. La familia de las PFAS puede incluir entre 5 000 y 10 000 sustancias químicas diferentes, por lo que la gama de comportamientos es muy variada. Muchas PFAS son resistentes al aceite, al agua, a la grasa y al calor, por lo que se utilizan en aplicaciones como tejidos y revestimientos de pisos resistentes al agua y a las manchas, pinturas y productos de limpieza y espumas contra incendios (ITRC, 2020).

Las principales fuentes de PFAS en el medio ambiente son los vertidos, las emisiones a la atmósfera y la eliminación inadecuada de los residuos de fabricación y las aguas residuales. Estas fuentes han dejado en todo el mundo contaminación ambiental en aguas superficiales y subterráneas y en los suelos, incluso en zonas remotas, así como en alimentos como el pescado, la carne y los huevos, lo que ha provocado la preocupación del público por su riesgo para la salud humana y ecosistémica. Las estimaciones recientes de las cargas mundiales de algunas PFAS en los suelos oscilan entre 1 500 y 9 000 toneladas, lo que demuestra que los suelos constituyen un depósito mundial de estos contaminantes de larga vida (Brusseau, Anderson y Guo, 2020).

Las PFAS son disruptores endocrinos e interactúan con las hormonas tiroideas, alterando el funcionamiento del sistema cardiovascular y el metabolismo de los lípidos, lo que aumenta el riesgo de obesidad. El aumento de la concentración de colesterol y otros lípidos en la sangre, o dislipidemia, es uno de los principales efectos sobre la salud atribuibles a las PFAS, asociados a enfermedades crónicas como obesidad, hipertensión, diabetes y hepatotoxicidad. Algunas pruebas también relacionan la exposición prenatal a las PFAS con el deterioro del neurodesarrollo; sin embargo, se requiere mayor investigación en este campo (Sunderland *et al.*, 2019).

## | Plaguicidas

Los plaguicidas son sustancias activas, o mezclas de sustancias, que se utilizan para prevenir, destruir o controlar cualquier plaga que cause daños a los seres humanos o que interfiera en actividades humanas como la producción, el procesamiento, el almacenamiento, el transporte o la comercialización de alimentos, madera y productos de madera, fibras y otros productos agrícolas. Los insecticidas, fungicidas, nematocidas, roenticidas y herbicidas son algunos ejemplos, que también pueden incluir repelentes de insectos y reguladores del crecimiento de insectos o plantas. En la actualidad, se utilizan unos 1 000 plaguicidas diferentes compuestos por más de 800 ingredientes activos y su número sigue aumentando.

Históricamente, el uso de plaguicidas ha permitido grandes avances en la agricultura y también en el sector

de la salud pública como control de vectores para enfermedades como la malaria. Sin embargo, el uso excesivo e inadecuado de los plaguicidas, así como la mala gestión de las existencias de plaguicidas obsoletos y altamente nocivos, pueden causar daños involuntarios a las especies no objetivo (FAO y GTIS, 2017). El uso de plaguicidas suscita una gran preocupación en la sociedad. El mayor problema es que en muchos países siguen existiendo almacenes de plaguicidas obsoletos. Los derrames y las fugas de estos depósitos siguen causando una importante contaminación del suelo. Los derrames accidentales y las fugas de plaguicidas no restringidos, así como la eliminación inadecuada de los contenedores de almacenamiento, pueden dar lugar a niveles inseguros de plaguicidas en los suelos; se trata de una fuente puntual de contaminación del suelo muy extendida. Los plaguicidas se han extendido por todo el sistema tierra-atmósfera y la contaminación por plaguicidas se produce en todo el mundo. Muchos estudios han puesto de manifiesto la preocupación por los efectos desconocidos de las mezclas de plaguicidas en los suelos sobre el ecosistema y la salud humana; sin embargo, dado el gran número de plaguicidas en uso es prácticamente imposible estudiar y asignar riesgos de toxicidad a todas las posibles combinaciones (Bonner y Alavanja, 2017; Kim, Kabir y Jahan, 2017).

Muchos plaguicidas son muy persistentes en el medio ambiente y sus residuos tóxicos pueden afectar a organismos beneficiosos y no objetivo, incluidos los humanos, y contaminar las aguas y los suelos a escala mundial. Una serie de plaguicidas y residuos de plaguicidas pueden bioacumularse en altas concentraciones en plantas y animales y causar una biomagnificación en la cadena alimentaria. Algunos plaguicidas también están asociados a la contaminación de los suelos por oligoelementos.

Se ha informado sobre brotes de alimentos contaminados con plaguicidas en muchos lugares, aunque la fuente de los plaguicidas apenas se estudia en profundidad (Ge *et al.*, 2017; Hwang, Zimmerman y Kim, 2018). Los estudios sobre los efectos en la salud por exposición a plaguicidas están relacionados principalmente con la exposición ocupacional o la autointoxicación, en concentraciones relativamente altas que no ocurren en la población general. El número de estudios epidemiológicos que relacionan las enfermedades crónicas con la exposición ambiental a los plaguicidas es muy bajo debido a su amplia distribución y coexistencia con otros contaminantes, y a la dificultad de establecer relaciones casuales, unido al escaso apoyo para este tipo de investigaciones. Sin embargo, las pruebas científicas apuntan a una relación entre la exposición a los plaguicidas y las enfermedades crónicas como el cáncer, el asma, las alergias y los trastornos del desarrollo (Kim, Kabir y Jahan, 2017).



## Contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes son un amplio grupo de sustancias químicas sintéticas o naturales y microorganismos que no han sido controlados previamente en el medio ambiente, pero que están generando una creciente preocupación entre la comunidad científica y los formuladores de políticas debido a su potencial toxicidad o riesgo para la salud humana y medioambiental.

### Productos farmacéuticos y de cuidado personal

Los productos farmacéuticos pueden definirse como cualquier sustancia química activa (natural o sintetizada) diseñada para prevenir o curar enfermedades y mejorar la calidad de vida de las personas o los animales. Existen más de 4 000 productos farmacéuticos y químicos que se utilizan ampliamente desde hace décadas, incluyendo fármacos, agentes de diagnóstico, anticonceptivos orales, cosméticos, fragancias, suplementos nutricionales y aditivos utilizados en muchos artículos de limpieza del hogar. Muchos PFCPs son compuestos biológicamente activos, diseñados para interactuar con los procesos hormonales o los tejidos vivos; por esta razón, es importante conocer su destino, efectos y riesgos potenciales cuando se liberan en el medio ambiente. Algunas de estas sustancias químicas son persistentes en el medio ambiente, mientras que otras se consideran “pseudopersistentes” debido a su uso y liberación continuos en el medio ambiente. Se calcula que la producción mundial oscila entre las 100 000 y las 200 000 toneladas anuales; sin embargo, solo unos pocos PFCPs son supervisados y regulados, y para la mayoría no existen requisitos legales para evaluar el impacto de su exposición a largo plazo (Boxall *et al.*, 2012).

Los productos farmacéuticos, tras su administración, son absorbidos y sufren reacciones metabólicas para producir subproductos (metabolitos) que pueden ser más perjudiciales que los compuestos originales o pueden volver a transformarse en los compuestos activos originales. Una elevada proporción de fármacos no son completamente asimilados por los seres humanos o los animales; el compuesto original o los residuos de fármacos parcialmente metabolizados (a veces activados) son excretados en las heces o la orina. Estos compuestos no siempre pueden ser degradados en su totalidad por plantas de tratamiento convencionales de aguas residuales antes de entrar en el medio ambiente. Por ello, los PFCPs se liberan continuamente en las aguas residuales urbanas y en el estiércol. Cuando este estiércol y los lodos de depuradora se aplican a las tierras agrícolas como fertilizantes, o cuando las aguas residuales tratadas se utilizan para el riego agrícola, los cultivos pueden absorber PFCPs que pueden persistir en los suelos desde unos pocos hasta varios cientos de días (Al-Farsi *et al.*, 2018).

Hasta la fecha, la información sobre la presencia de los PFCPs en el medio ambiente es incompleta, al igual que los conocimientos sobre sus efectos en los organismos no objetivo y el riesgo potencial de exposición. Los efectos adversos de la exposición a los PFCPs constatados incluyen toxicidad aguda y crónica, bioacumulación, disrupción endocrina, inflamación, irritación, cambios en las tasas de fertilidad y de género en la población, y desarrollo de asma, aunque los estudios epidemiológicos pertinentes son muy limitados o no existen (Pereira *et al.*, 2015; Wilkinson *et al.*, 2016). La liberación de PFCPs en el medio ambiente también da lugar a la resistencia microbiana y bacteriana, causando 700 000 muertes cada año debido a enfermedades resistentes a los medicamentos (Miranda, Godoy y Lee, 2018).

### Plásticos y polímeros sintéticos

Los plásticos se utilizan ampliamente en casi todos los aspectos de la vida diaria debido a su versatilidad, alto rendimiento, gran resistencia y rentabilidad. Los plásticos, polímeros y otros materiales relacionados se originan principalmente a partir del procesamiento del petróleo crudo y el gas natural y, en algunos casos, de otras materias primas (como el carbón y la biomasa). La producción anual de resinas poliméricas en todo el mundo ha aumentado desde la década de 1950, y se estima que crecerá hasta casi 500 millones de toneladas anuales en 2100 (Li, Tse y Fok, 2016). Debido a su gran resistencia a la degradación y eliminación inadecuada, los artículos y residuos de plástico se encuentran habitualmente en todos los compartimentos ambientales. Los plásticos persisten en el medio ambiente durante décadas, y pueden descomponerse parcialmente por acción mecánica (maquinaria agrícola, camiones de recolección de basura y plantas de tratamiento) o por meteorización, lo que da lugar a una gran variedad de plásticos de diferentes tamaños en los ecosistemas.

Las partículas de micro y nanoplásticos pueden ser ingeridas y absorbidas por los organismos y transferidas a través de la cadena alimentaria. La ingesta de alimentos y agua contaminados es la principal vía de exposición a los micro y nanoplásticos para los seres humanos. Las pruebas de bioacumulación y biomagnificación de plásticos en la cadena alimentaria terrestre sugieren que los plásticos también se acumulan en el cuerpo humano. Nuevas pruebas demuestran la acumulación de micro y nanoplásticos en los tejidos humanos, pudiendo incluso atravesar la placenta (Ragusa *et al.*, 2021). Sin embargo, el riesgo que suponen los plásticos para la salud humana y el medio ambiente no es solo su presencia *per se*, que puede causar estrés oxidativo, inflamación, respuestas inmunitarias graves o alterar la capacidad de detectar materiales exógenos y de reaccionar contra ellos, sino su capacidad de adsorber y transportar otros contaminantes y aditivos plásticos que pueden liberarse en el organismo (Prata *et al.*, 2020). Es necesario seguir investigando para conocer las vías de exposición y los posibles efectos adversos en nuestra salud.



## | Ftalatos y otros plastificantes

Los plastificantes, como el bisfenol A (BPA, por sus siglas en inglés) o los ésteres de ftalato (PAEs, por sus siglas en inglés), son aditivos que aumentan la flexibilidad o la plasticidad, y se utilizan en la industria como aditivos en plásticos para hacer los productos de plástico más flexibles. Se encuentran en dispositivos electrónicos, equipos deportivos, dispositivos médicos, contenedores para almacenamiento de alimentos, botellas reutilizables, materiales de construcción, piezas de automóviles y en papeles térmicos como en los comprobantes de pago de tarjetas de crédito, recibos bancarios y papeles de fax. Los ftalatos también se han empleado en las industrias de cosméticos y perfumería (Wang *et al.*, 2018).

Los plastificantes no están ligados químicamente a los polímeros de plástico, por lo que pueden lixiviarse fácilmente en el medio ambiente y son liberados durante la meteorización del plástico. Los PAEs y BPA se encuentran en muchos suelos agrícolas cercanos a zonas urbanas o periurbanas y pueden proceder de la aplicación de lodos de depuradora, el uso agrícola de películas de plástico, el uso de aguas residuales urbanas para riego o la deposición atmosférica. Tanto los ftalatos como los BPAs se han detectado en alimentos y en seres humanos, y figuran como agentes tóxicos en las normas internacionales.

Los ftalatos son disruptores endocrinos y teratógenos reconocidos. Los niños son los más vulnerables a la exposición a los ftalatos, ya que sufren alergias alimentarias y trastornos neuroconductuales tras la exposición prenatal y en los primeros años de vida (Benjamin *et al.*, 2017).

## | Nanomateriales

La nanotecnología surgió en la década de 1990, y su uso y aplicaciones se han extendido enormemente desde entonces. Los nanomateriales se definen como materiales con al menos una dimensión entre 1 nm y 100 nm; sin embargo, las nanopartículas con las tres dimensiones entre 1 nm y 100 nm son especialmente importantes

(ISO, 2008). Los nanomateriales manufacturados (MNM, por sus siglas en inglés) tienen numerosas aplicaciones en medicina y tecnología y han permitido muchos avances en innumerables campos científicos, incluidos los plásticos, la electrónica, los textiles, los cosméticos, los catalizadores y la ciencia medicinal. Los MNM son diversos en cuanto a sus propiedades físicas, químicas, eléctricas y magnéticas.

Los MNM pueden aplicarse deliberadamente al suelo para remediar la contaminación, pero también se liberan involuntariamente a través de diversas vías, como son las aguas residuales y los lodos. El suelo es un importante reservorio, y el actual crecimiento de la nanotecnología para el aporte selectivo de plaguicidas y fertilizantes en la producción de cultivos alimentarios probablemente aumentará el aporte de MNM en los suelos (Kuenen *et al.*, 2020).

Sus características intrínsecas y su tamaño pequeño facilitan la difusión de los nanomateriales a través de las membranas celulares. Las interacciones entre los nanomateriales y los componentes celulares y el material genético aún no se han dilucidado del todo, y varían en función del tamaño, la morfología, la carga superficial y el recubrimiento del nanomaterial. La inhalación es la principal vía de exposición a los MNM, sobre todo en la exposición ocupacional, pero la ingestión puede ser más relevante a medida que la nanotecnología aplicada a alimentos y envases alimentarios evoluciona. La exposición dérmica también puede ser importante para los consumidores. Los estudios sobre los impactos de los MNM en el medio ambiente y la salud humana se encuentran todavía en una fase inicial, y los datos existentes no son suficientes para comprender los mecanismos de toxicidad. Las pruebas que podrían atribuir la exposición a los MNM a diferentes enfermedades son todavía muy escasas, por lo que no se pueden extraer conclusiones sólidas. Con el fin de proteger el medio ambiente y la salud humana, sigue siendo fundamental continuar investigando su destino, comportamiento, biodisponibilidad y toxicidad en los suelos, así como mejorar los conocimientos sobre las concentraciones ambientales (Pietrojusti *et al.*, 2018).



# Impactos de la contaminación del suelo en los ecosistemas

La contaminación del suelo afecta a la biodiversidad terrestre y edáfica, al reducir el número de organismos debido a la toxicidad causada por los contaminantes, y al producir cambios en las comunidades debido a la sustitución de las especies más sensibles por otras más tolerantes a la contaminación. Las bajas concentraciones de contaminantes en el suelo suelen dar lugar a estrategias de adaptación mediante cambios en la fisiología y en los comportamientos de alimentación. También pueden producirse cambios en la actividad de los organismos del suelo, lo que provoca la alteración de los ciclos biogeoquímicos. Además, los suelos contaminados se convierten a su vez en una fuente de contaminación para las aguas subterráneas, a través de la lixiviación de contaminantes, y para el agua dulce y el medio marino, ya que los contaminantes pueden ser transportados a través de la erosión eólica e hídrica. Todos esos cambios pueden ser graduales o permanecer inactivos hasta que se alcanza un punto de inflexión y se produce una grave degradación. Esto provoca una cadena de procesos de degradación en los ecosistemas terrestres y acuáticos que, en última instancia, conduce a la pérdida de servicios ecosistémicos (Figura 5).

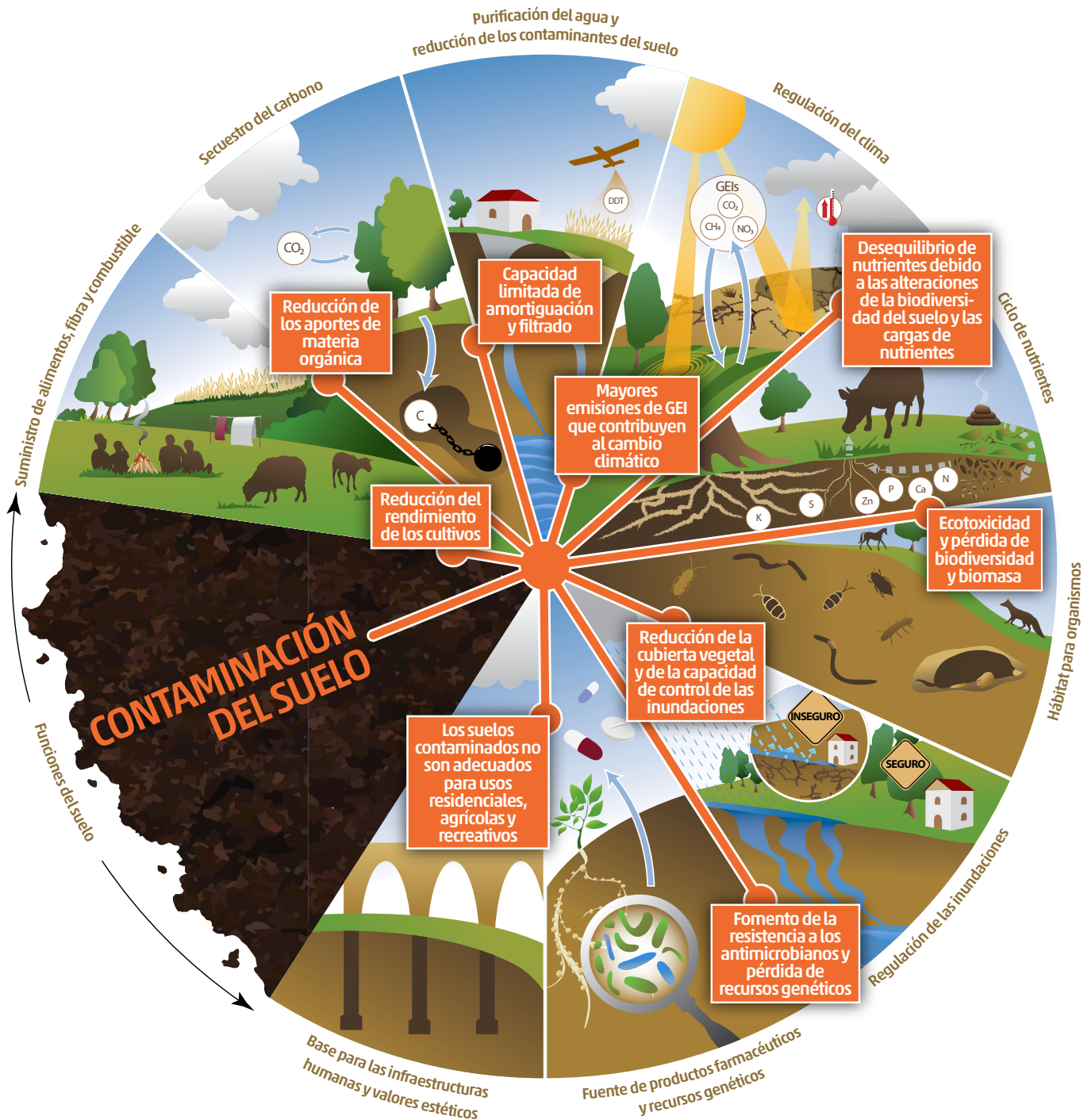


Figura 5. La contaminación del suelo provoca una cadena de procesos de degradación que conduce a la reducción y, en última instancia, a la pérdida de los servicios ecosistémicos



La pérdida de biodiversidad reduce el aporte de hojarasca en la superficie del suelo y la descomposición de la hojarasca y la mineralización de la materia orgánica y, por lo tanto, reduce el aporte de carbono orgánico al suelo y altera el reciclaje de nutrientes. La descomposición de la hojarasca puede reducirse de un 10% a un 80% en los suelos gravemente contaminados en comparación con los suelos no contaminados (Kozlov y Zvereva, 2015).

La degradación de las propiedades físicas provocada como resultado de la pérdida de materia orgánica del suelo y la reducción de la presencia y actividad de los organismos edáficos también se produce en los suelos muy contaminados (Korkina y Vorobeichik, 2018). La presencia de ciertos contaminantes, como las sales y los agentes tensioactivos, también contribuye a la dispersión de las arcillas y a la degradación irreversible de la estructura del suelo. Esta degradación física del suelo aumenta el riesgo de erosionabilidad del mismo.

La acidificación del suelo es, junto con la contaminación del suelo, una de las amenazas más olvidadas para la salud del suelo, debido a la capacidad de amortiguación del pH de los suelos; sin embargo, la capacidad amortiguadora del pH es limitada, especialmente en los suelos arenosos. En las zonas agrícolas, la acidificación del suelo se debe principalmente a la aplicación de fertilizantes minerales nitrogenados y a la orina del ganado, así como a la cosecha repetida de biomasa vegetal. Se estima que el pH del suelo se ha reducido globalmente una media de 0,26 debido a la deposición ácida y a las adiciones de N (Tian y Niu, 2015). La acidificación del suelo también aumenta la movilización y biodisponibilidad de ciertos oligoelementos, lo que aumenta el riesgo para la salud humana y ambiental, y disminuye el crecimiento de los cultivos.

Los fertilizantes nitrogenados se oxidan a nitrito ( $\text{NO}_2$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3$ ) por las bacterias nitrificantes del suelo. El nitrato y el nitrito son muy móviles en los suelos y pueden lixiviarse a las aguas subterráneas. Dentro de la matriz del suelo, las bacterias desnitrificantes convierten el nitrato en nitrógeno elemental (gas  $\text{N}_2$  que se devuelve a la atmósfera de manera inofensiva), a través de las especies intermedias óxido nítrico y óxido nitroso ( $\text{NO}$  y  $\text{N}_2\text{O}$ ), que son altamente volátiles y pueden escapar de los suelos hacia la atmósfera. El  $\text{N}_2\text{O}$  es un gas de efecto invernadero muy potente, con un potencial de calentamiento global 256 veces mayor que el  $\text{CO}_2$ , por lo que contribuye significativamente al cambio climático (IPCC, 2014). Según el informe del Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés) sobre la Tierra y el Cambio Climático, las bacterias desnitrificantes son responsables del 80% de las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  (IPCC, 2019).

Las respuestas ecotoxicológicas a la contaminación del suelo en los ecosistemas terrestres son muy variables y dependen de la fuente de contaminación, los principales contaminantes, la duración de la exposición, el nivel trófico afectado y el clima. En general, los grupos tróficos reducen su desempeño en el sentido del tamaño corporal y la supervivencia con la proximidad a la fuente de contaminación, mientras que los consumidores primarios son más resilientes a la contaminación en términos de diversidad y abundancia (Kozlov y Zvereva, 2011). Sin embargo, las respuestas al estrés son específicas de cada lugar y la generalización de patrones locales a una escala global tiene grandes incertidumbres.

Una amplia gama de contaminantes es absorbida por las raíces de las plantas y translocada a los tejidos comestibles. Los organismos que viven en el suelo también pueden acumular contaminantes del suelo. Las plantas y los organismos del suelo se encuentran en los niveles más bajos de la red alimentaria terrestre y, cuando son ingeridos por animales de pastoreo, aves, anfibios o mamíferos, los contaminantes entran en la cadena alimentaria terrestre y se acumulan en grandes cantidades en los animales de la parte superior de la cadena alimentaria (Figura 6) (Baudrot *et al.*, 2018; Huerta-Lwanga *et al.*, 2017).

Normalmente, la exposición de la fauna silvestre a los contaminantes se produce a niveles de dosis bajas a lo largo de su vida, a menos que se haya producido una fuerte liberación de contaminantes. Los efectos sobre la salud de la exposición crónica a bajas dosis y los efectos sinérgicos, sumatorios o antagónicos de tales mezclas han sido generalmente ignorados en los ecosistemas terrestres. Los contaminantes del suelo tienen efectos neurotóxicos, cancerígenos, teratogénicos y de disrupción endocrina en los vertebrados. Los efectos sobre la salud y el comportamiento de los animales dependen del tipo de contaminante y de la mezcla de contaminantes a los que estén expuestos, de los hábitos de vida y de alimentación, los cuales determinan el tiempo e intensidad de la exposición, y del desarrollo y el estado inmunitario del animal; los organismos inmaduros o enfermos son más susceptibles a los efectos negativos y son menos capaces de evitar las zonas y los alimentos contaminados (Death, Griffiths y Story, 2019).

Los herbívoros se diferencian de los omnívoros en cuanto a la exposición a contaminantes, mientras que los primeros acumulan mayores concentraciones de oligoelementos o radionúclidos; los segundos suelen presentar mayores concentraciones de contaminantes lipofílicos, como los BPCs o las PFAS (Kowalczyk *et al.*, 2018). Los reptiles y anfibios son especialmente sensibles a los contaminantes hidrofílicos e iónicos, ya que estos pueden atravesar la pared permeable de sus huevos, y estar en contacto con ellos a lo largo de las diferentes fases de su ciclo vital (Sparling *et al.*, 2010).

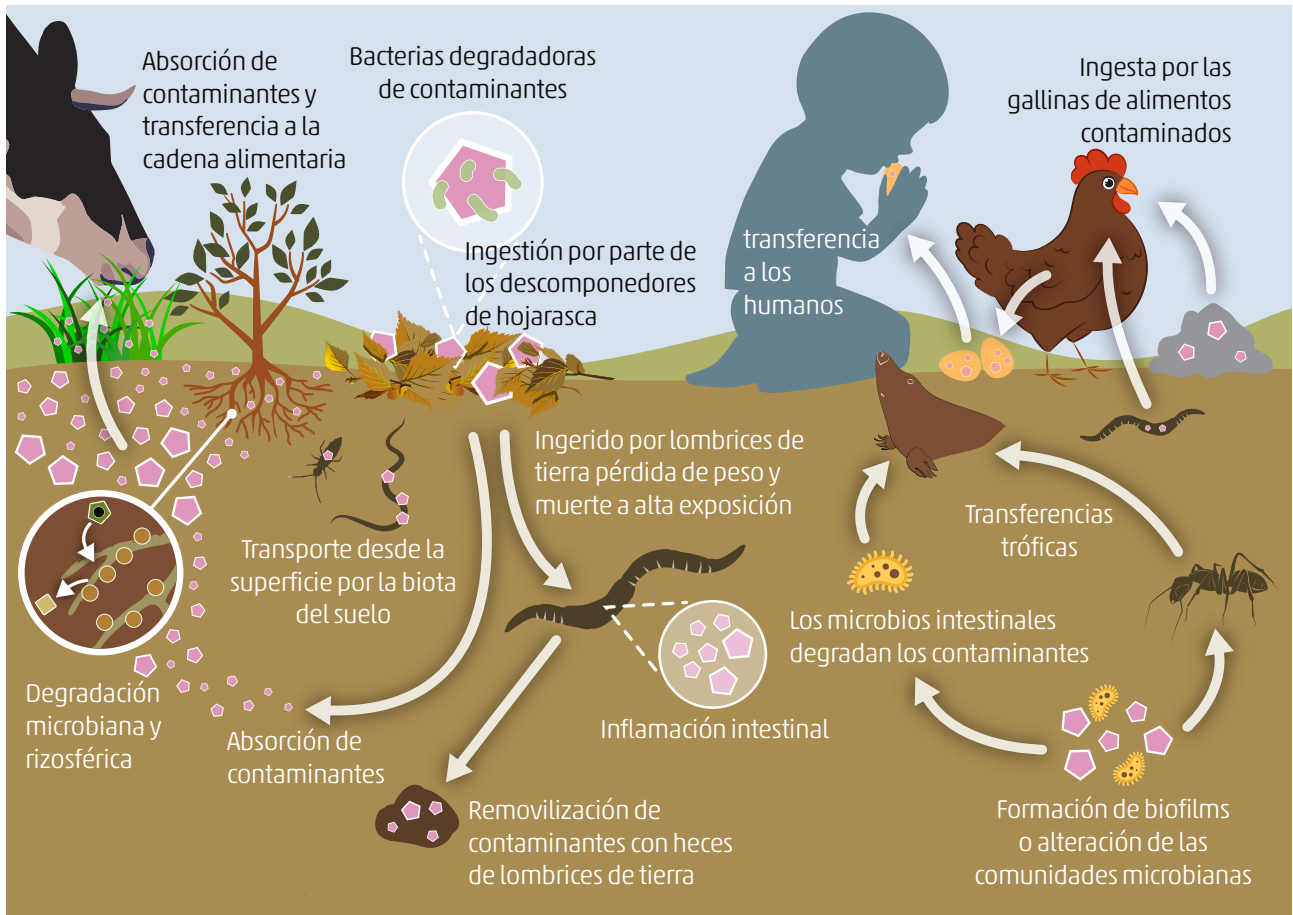


Figura 6. Transferencia de contaminantes a la red trófica terrestre desde el suelo a los pastos y cultivos, que son ingeridos por la fauna silvestre, el ganado y los seres humanos, o desde el suelo a los invertebrados, ingeridos por aves y aves de corral, y finalmente transferidos a los seres humanos

Fuente: adaptada de Ng *et al.*, 2018.





## Impactos de la contaminación del suelo sobre los ecosistemas acuáticos

Las precipitaciones, las inundaciones, el deshielo y el riego aumentan el contenido de agua en los poros del suelo y, una vez que el suelo se satura, pueden provocar el anegamiento de las zonas llanas y la escorrentía en laderas. La materia orgánica disuelta, las partículas finas y los contaminantes adsorbidos son transportados por el agua de escorrentía y pueden llegar a humedales, ríos y lagos cercanos, y ser transportados finalmente a mares y océanos (Shi y Schulin, 2018). El cambio climático exagera estos procesos, aumentando el riesgo de contaminación del medio acuático por actividades realizadas en tierra (Figura 7).

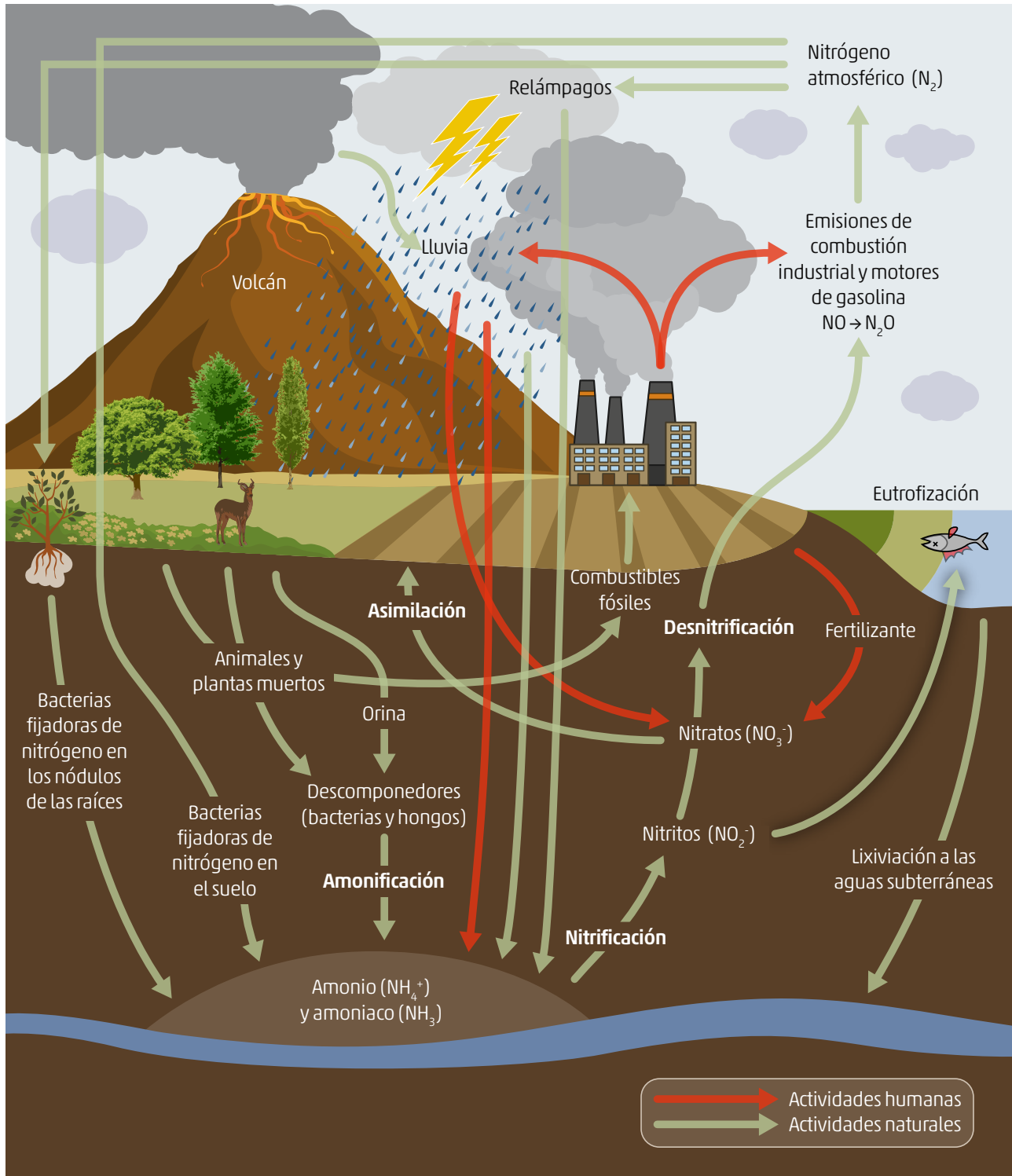


Figura 7. Procesos en el medio terrestre exacerbados por el cambio climático que aumenta el impacto de la contaminación del suelo en el medio acuático

Fuente: adaptada de Encyclopedia Britannica, 2020; Lehnert *et al.*, 2015.

## Impactos socioeconómicos de la contaminación del suelo

Se considera que las actividades terrestres son responsables de más del 80% de la contaminación marina (Cicin-Sain *et al.*, 2011). Se estima que cada año se pierden y movilizan 35 000 millones de toneladas de suelo debido a la erosión; de este total, unos 12 000 millones de toneladas corresponden a la capa superior del suelo agrícola y a los nutrientes y contaminantes asociados a ella, que se vierten en arroyos, ríos, lagos y zonas costeras cada año (Kok, Papendick y Saxton, 2009). La escorrentía aumenta la carga de nutrientes provocando la eutrofización de las aguas, transporta contaminantes inorgánicos y orgánicos que reducen la calidad del agua y afectan a los ecosistemas acuáticos, además de que transporta partículas del suelo que enturbian el agua y reducen la profundidad de los cauces de agua.

Se estima que en promedio el 50% de los nutrientes añadidos a los suelos son lixiviados o transportados a ríos, lagos y finalmente hacia los mares y los océanos (Cosme, Mayorga y Hauschild, 2018). La pérdida de nutrientes del suelo provoca niveles excesivos de nutrientes en las vías fluviales, lo que favorece la eutrofización y la aparición de cianobacterias y florecimiento de algas que consumen grandes volúmenes de oxígeno, impidiendo la vida de otros organismos. Algunas de estas cianobacterias son también tóxicas para los organismos acuáticos y los seres humanos (Lehnert *et al.*, 2015). Los ciclos de eutrofización producen “zonas muertas” en muchos de los principales cuerpos de agua del mundo como el Golfo de México, la Bahía de Bengala, el Río Hudson, la Bahía de San Francisco, el Mar Mediterráneo y el Mar Báltico.

La eliminación de desechos mal gestionada en los países costeros es responsable de 4,8 a 12,7 millones de toneladas métricas de plástico que ingresan al océano por la erosión del viento o que son transportadas por vías fluviales o aguas residuales, mientras que entre 75 000 y 1,1 millones de toneladas son descargadas en los ríos procedentes de actividades terrestres (Eunomia, 2016). Solamente en los suelos agrícolas, se estima que el contenido de microplásticos oscila entre 63 000–430 000 y 44 000–300 000 toneladas en Europa y América del Norte, respectivamente (Nizzetto, Futter y Langaas, 2016). Una vez ingeridos, los micro y nanoplásticos pueden tener diversos efectos sobre los organismos acuáticos, que van desde alteraciones fisiológicas en organismos de producción primaria (alteración de la producción de clorofila) hasta la inhibición del apetito, la reducción del crecimiento o incluso el colapso del sistema digestivo debido a la acumulación de plásticos en los animales superiores y su consecuente muerte. Adicionalmente, los plásticos adsorben otros contaminantes en sus superficies, como oligoelementos, HAPs, plaguicidas y otros contaminantes orgánicos, contribuyendo a su transferencia a la red alimentaria y causando otros efectos adicionales en la salud de los organismos acuáticos (Alimi *et al.*, 2018).

La contaminación del suelo tiene el mayor impacto en la salud de los grupos de población más vulnerables como fetos, niños y mujeres embarazadas. La contaminación también tiene efectos importantes sobre la salud y el bienestar de los grupos más pobres y marginados (Landrigan *et al.*, 2018). Los países más pobres y los países de ingresos medios acumulan las tasas más altas de mortalidad y carga de enfermedades atribuibles al medio ambiente, pero también existen diferencias en el estado de salud entre los distintos grupos sociales dentro de un país.

Los países y regiones más pobres tienen un menor acceso a tecnologías limpias y a tecnologías de remediación de la contaminación, y sus regulaciones ambientales y de seguridad alimentaria suelen ser más débiles (Mackie y Hašič, 2019). El acceso a espacios verdes limpios, comida saludable e inocua, saneamiento público o seguros de salud, políticas ambientales y de desarrollo urbano y tecnologías limpias son los principales determinantes socioeconómicos que influyen sobre la distribución desigual de la carga de enfermedades atribuibles al medio ambiente (Pasetto, Mattioli y Marsili, 2019).

Muchos países en desarrollo han demostrado su capacidad para adoptar rápidamente normas y medidas para reducir la liberación de contaminantes al suelo, pero necesitan transferencia de conocimientos y tecnología de países más desarrollados (Hilton, 2006).

La contaminación del suelo tiene un costo directo de remediación y gestión que puede oscilar entre miles de dólares a cientos de millones de dólares anualmente. El costo de remediación varía de un lugar a otro, en función de las características del lugar, como el tamaño de la zona afectada, la concentración de los contaminantes, los compartimentos ambientales que serán remediados (capa superior del suelo, zona vadosa, aguas subterráneas, aguas superficiales), las medidas de protección que deben tomarse para proteger a la población durante el trabajo de remediación, el nivel aceptable que debe alcanzarse dependiendo del uso de la tierra después de su remediación y la tecnología elegida (Darmendrail *et al.*, 2004).

Existen otros costos indirectos que a menudo son desatendidos, lo que lleva a la subestimación de los impactos de la contaminación del suelo. Muchos servicios ecosistémicos son obstaculizados por la contaminación del suelo, perdiendo productividad y resiliencia a largo plazo (Figura 8). La contaminación del suelo provoca una reducción de los rendimientos de las cosechas y desperdicio de alimentos debido a los altos niveles de contaminantes, a la pérdida de biodiversidad y al aumento en la incidencia de plagas, la disminución de la calidad del agua y eutrofización de los ambientes acuáticos. A menudo se subestima el costo económico de las enfermedades relacionadas con la contaminación del suelo, muchas de ellas crónicas y con efectos a largo plazo, y de la pérdida de la productividad humana (Attina y Trasande, 2013).





Figura 8. Pérdidas económicas cuantificables debidas a la contaminación del suelo

## Estado y tendencias de la contaminación del suelo por región

Es fundamental realizar una evaluación del alcance y la gravedad de los suelos contaminados existentes para comprender la magnitud del problema y determinar la prioridad que debe tener su tratamiento, teniendo en cuenta los numerosos factores de estrés del medio ambiente que existen.

Aunque la mayoría de los contaminantes del suelo son ubicuos, su distribución y principales fuentes varían según las regiones. También existen diferencias significativas en los marcos regulatorios que tratan de abordar la contaminación del suelo. Las siguientes secciones resumen las principales fuentes de contaminación del suelo y presentan el estado de los conocimientos sobre la contaminación del suelo en las diferentes regiones (Figura 9).

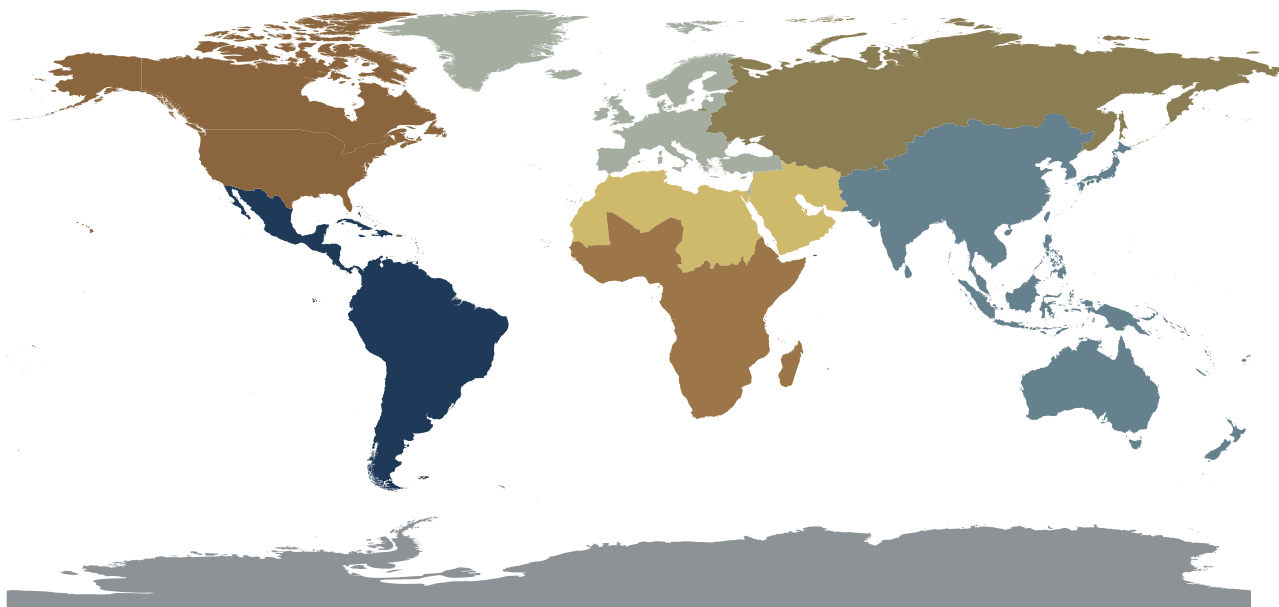


Figura 9. Regiones de la Alianza Mundial por el Suelo consideradas en este informe

Fuente: ONU, 2020, modificada de acuerdo con la organización de la Alianza Regional por el Suelo de la AMS.

Se adoptaron dos metodologías para evaluar el alcance regional de la contaminación del suelo. En primer lugar, se envió a los países un cuestionario desarrollado por las principales agencias de las Naciones Unidas a través de los Puntos Focales de la Alianza Mundial por el Suelo (AMS) y redes de socios, así como la red del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). El cuestionario (incluido en el Anexo 1 del informe principal) se utilizó para reunir información sobre la legislación nacional y regional, las principales actividades contaminantes según son percibidas por los organismos gubernamentales y los datos existentes sobre contaminación del suelo en inventarios y sistemas de vigilancia del suelo, así como los sistemas de vigilancia relacionados con la salud humana. En segundo lugar, los autores reunieron información públicamente disponible en una amplia variedad de fuentes, incluyendo informes de organismos internacionales, agencias regionales y nacionales, organizaciones ambientales y bibliografía científica. Este informe también complementa los

datos pertinentes existentes recopilados durante la última década a través del informe del *Estado Mundial del Recurso Suelo* (FAO y GTIS, 2015), las *Actas del Simposio Mundial sobre la Contaminación del Suelo 2018* (FAO, 2018b), y la publicación *La contaminación del suelo: una realidad oculta* (Rodríguez Eugenio, McLaughlin y Pennock, 2018) que acompañó al Simposio de 2018.

Para diversas regiones, una importante fuente de información es la base de datos del Programa de identificación de emplazamientos tóxicos (TSIP, por sus siglas en inglés) (Pure Earth, 2020). El TSIP fue iniciado en 2005 por el Blacksmith Institute (actualmente Pure Earth/Blacksmith Institute) con el objetivo de identificar y localizar emplazamientos tóxicos en países de ingresos bajos y medios. El TSIP ha evaluado unos 5 000 emplazamientos en 50 países. El TSIP no pretende ser un inventario exhaustivo de emplazamientos contaminados, sino que es más bien un esfuerzo para empezar a comprender el alcance del problema.



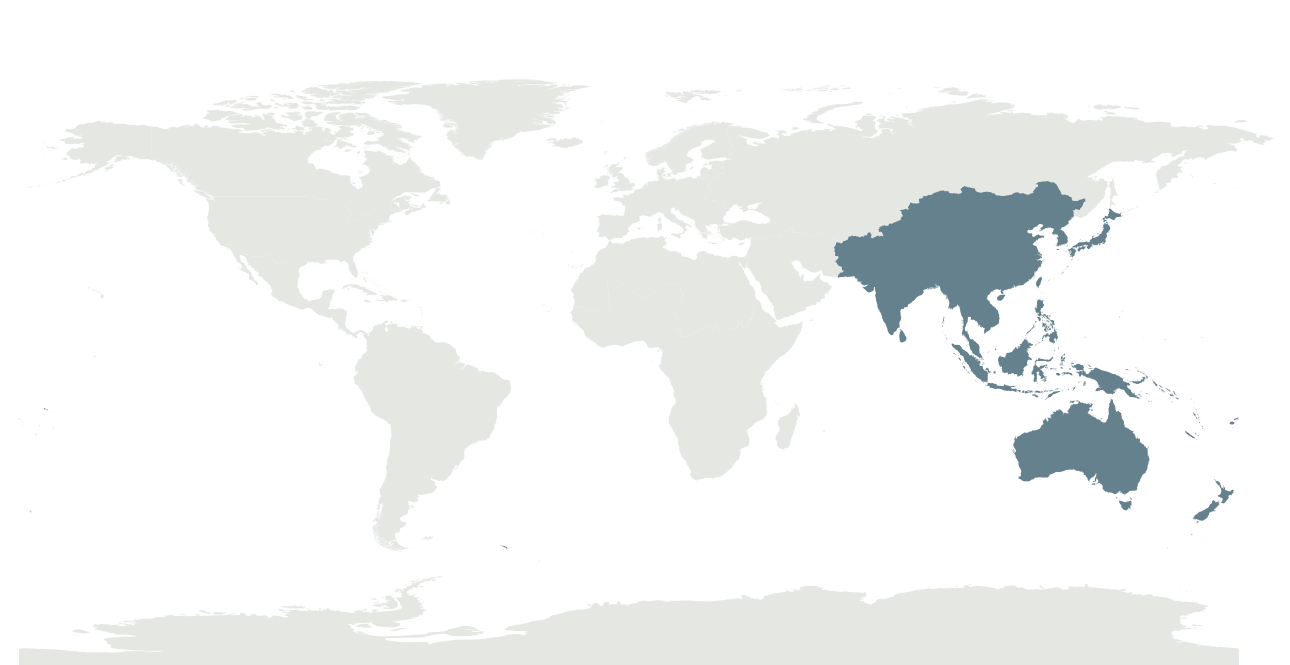
## Asia y el Pacífico

La región de Asia y el Pacífico abarca 41 países en cuatro subregiones: Asia Oriental, Asia Meridional, Asia Sudoriental y el Pacífico. A continuación, se muestran algunos detalles de las principales fuentes de contaminación del suelo en Asia y el Pacífico y su distribución en la región (Figura 10).



Figura 10. Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en Asia y el Pacífico

Los cuadros representan una estimación de la importancia relativa de cada fuente según la percepción de los expertos regionales, y su tamaño está relacionado con su importancia relativa. Cuanto mayor es el tamaño, mayor es la importancia relativa.



Fuente del mapa: ONU, 2020, modificado de acuerdo con la organización de la Alianza Regional por el Suelo de la AMS

### Agricultura

La agricultura es una importante fuente de contaminación en los países asiáticos. Diversos países como China, Bangladesh, la República de Corea o Nueva Zelanda han realizado estudios nacionales o regionales de contaminación del suelo en zonas agrícolas, y han observado que los valores de las directrices de seguridad

para los oligoelementos con frecuencia se superan. Las mayores fuentes de oligoelementos son el riego de arrozales que utiliza aguas subterráneas contaminadas con arsénico, aguas residuales descargadas de parques industriales y áreas de transporte, y como resultado de la contaminación histórica por el uso a largo plazo de fertilizantes fosfatados contaminados por cadmio y flúor.

La aplicación a gran escala de plaguicidas POP, ha contaminado en el pasado grandes áreas con DDPCs y DFPCs en Asia Oriental. En Japón, los arrozales a lo largo del país han sido contaminados con más de 450 kg de DDPC/DFPC, y los DDPC/DFPC han sido transportados durante décadas conjuntamente con partículas del suelo en sedimentos de ríos, lagos y océanos. En Australia, más de 2 000 km<sup>2</sup> de suelos agrícolas y sedimentos en la costa este son afectados por DDPC/DFPC por el uso en el pasado de pentaclorofenol (PCP, por sus siglas en inglés) en la agricultura. En forma similar, el uso de PCP en China para el control de caracoles ha contaminado los suelos agrícolas. El uso más reciente de plaguicidas que contienen DDPC/DFPC, como quinceteno y 2,4-D en agricultura o en campos de golf, dio como resultado la liberación y formación adicional de DDPC/DFPC. También se han identificado suelos contaminados en Viet Nam en un antiguo sitio de almacenamiento de plaguicidas.

El subcontinente indio ha utilizado durante mucho tiempo plaguicidas persistentes, incluyendo el DDT y el Hexaclorociclohexano (HCH). Los suelos están contaminados en los emplazamientos productores de plaguicidas como los antiguos productores de HCH en la India o la antigua producción de DDT en Pakistán. En Bangladesh, los plaguicidas organoclorados (OCP, por sus siglas en inglés) están presentes en el suelo y el agua debido al extenso uso de estas sustancias químicas antes de que los OCP fueran prohibidos por la Convención de Estocolmo. Los suelos agrícolas en China también muestran una alta concentración de contaminantes orgánicos, pero en menor grado que la contaminación por oligoelementos. En Nueva Zelandia, el uso de agroquímicos y el tratamiento del ganado ha dado como resultado la contaminación del suelo por el compuesto heredado DDT y también por dieldrin, los oligoelementos y sus compuestos como el arsénico y el arsenato de plomo.

El uso del Agente Naranja, que contiene compuestos de dioxina, durante la Guerra de Viet Nam entre 1962 y 1971, resultó, según se ha informado, en riesgos para la salud tanto carcinogénicos como no carcinogénicos para los civiles locales y el personal militar que participó en la guerra. Sin embargo, el riesgo sanitario asociado a la contaminación por dioxina del Agente Naranja y su biodisponibilidad en el suelo han sido investigados solamente en un número muy pequeño de estudios debido a dificultades técnicas.

La identificación de “contaminantes emergentes” en el suelo también adquiere relevancia en la región y algunos países, como Australia, han iniciado programas de identificación y vigilancia de estos contaminantes de creciente preocupación.

### Actividades industriales

Los riesgos de la contaminación del suelo en las regiones industriales de China son más graves que en las regiones agrícolas. En general, la contaminación por oligoelementos es más grave en China sudoriental que en China noroccidental. Una evaluación exhaustiva centrada en la contaminación del suelo por oligoelementos en las

zonas mineras, recomendó que las provincias del sur y la provincia de Liaoning tengan prioridad en el control de la contaminación. En comparación con los suelos con influencia de la minería de metales, las concentraciones de oligoelementos en los suelos de minas de carbón, fueron inferiores. La contaminación del suelo al borde de las carreteras en las áreas urbanas y suburbanas de China es causada por la deposición de sustancias químicas tóxicas emitidas por los vehículos.

A causa del crecimiento económico tan acelerado de la India debido a las actividades industriales, agrícolas y mineras, la contaminación del suelo con oligoelementos es significativa e incluye cobre, cadmio, níquel, plomo, arsénico y cromo. Las actividades antropogénicas fueron consideradas como el principal impulsor posible.

En Bangladesh, las curtidurías y las industrias ladrilleras son fuentes de contaminación del suelo por oligoelementos y constituyen una amenaza para el ambiente y la salud humana. Hazaribagh, en la ciudad de Daca, se considera un lugar fuertemente contaminado debido a los efluentes de las curtidurías cargados de cromo. Se detectaron niveles de cromo extremadamente altos en el emplazamiento, y existe una concentración excesiva en los subsuelos.

Las fuentes de minerales monometálicos son las más explotadas por China, seguida de la India, Viet Nam, Indonesia, la República de Corea y Japón. Existe la posibilidad de que se deteriore la calidad del aire y el agua en las inmediaciones de las actividades de explotación de canteras. Sin embargo, no existe información consolidada sobre el efecto de la explotación de canteras sobre el estado de contaminación del suelo en la región Asia-Pacífico.

La contaminación por oligoelementos es alta en los países de Asia Sudoriental, y el problema ha empeorado debido al número creciente de industrias químicas y a una regulación ambiental generalmente débil en la región (Ding, 2019). La minería es la principal causa de contaminación por oligoelementos en el suelo, sedimentos y aguas superficiales en Tailandia.

Los emplazamientos mineros australianos, tanto de minas antiguas como de las activas, representan un riesgo de contaminación del suelo por drenaje ácido/lodos, fugas de almacenamiento de petróleo y relleno *in situ* de residuos del proceso. Australia tiene aproximadamente 60 000 emplazamientos mineros abandonados.

En Nueva Zelandia, una serie de polígonos industriales están contaminados con diversas sustancias tóxicas. Los emplazamientos antiguos para tratamiento de la madera y plantas de producción de gas pueden contener oligoelementos como arsénico, cromo, cobre, boro y compuestos orgánicos como el alquitrán de hulla y el pentaclorofenol. Las fugas accidentales de complejos químicos desde zonas urbanas e industriales causan la contaminación del suelo por hidrocarburos del petróleo, mientras que las operaciones mineras como el procesamiento de minerales y los emplazamientos históricos con presas de relave, constituyen otra fuente de contaminación del suelo por oligoelementos (como el arsénico y el cadmio).



## Eliminación y gestión de residuos

Tailandia es una de las economías de más rápido crecimiento en la región y la preocupación por los lugares contaminados también está creciendo, no solo por los desechos nativos, sino también por los contaminantes importados. Las principales fuentes de contaminación son la minería, las industrias petroquímicas y el vertido ilegal de desechos, así como las instalaciones de procesamiento de residuos (incluyendo los vertederos sanitarios y las instalaciones de reciclaje).

En Australia, los residuos sólidos generados por el rápido crecimiento de las instalaciones de paneles solares, actualmente resulta ser una nueva preocupación para los vertederos sanitarios. Normalmente, la vida útil de un panel solar es de unos 20 años, por lo que los paneles de las primeras instalaciones están siendo retirados en Australia. Los principales componentes de los paneles solares fotovoltaicos son el vidrio, el polímero y el aluminio, pero también pueden contener materiales potencialmente peligrosos como plomo, cobre y zinc, galio, telurio, indio, tierras raras y plásticos.

La eliminación no regulada o mínimamente regulada de vehículos y embarcaciones al final de su vida útil (EOL, por sus siglas en inglés) es una fuente de contaminación del suelo. En esta región, además de los vehículos desechados en el país, la eliminación de vehículos y embarcaciones importados EOL también es un mercado creciente, el cual se denomina principalmente como la “industria desmanteladora”. Por ejemplo, Bangladesh tiene una de las mayores industrias de desguace de embarcaciones del mundo, en donde los vehículos EOL proceden de muchos países desarrollados. La amenaza que representan los vehículos EOL para la salud del suelo y los sedimentos depende en gran medida de la gestión y la regulación. Por ejemplo, los vehículos EOL constituyen un gran mercado para el reciclaje del aluminio. Por otra parte, constituyen una fuente importante de sustancias químicas que son dañinas para los seres humanos y para los ecosistemas. Los contaminantes incluyen oligoelementos (cadmio, mercurio, cobre, cromo, plomo), BPCs, HAPs y otros POPs. La contaminación atmosférica local proveniente de estas sustancias prioritarias también puede producir contaminación del suelo por deposición aérea y precipitaciones.

## Fuentes geogénicas

Esta región está particularmente afectada por contaminantes de origen geogénico. El arsénico es considerado el contaminante móvil más severo proveniente de fuentes geogénicas en Asia Meridional. Aunque se ha detectado arsénico en aguas subterráneas en todo el mundo, como consecuencia de procesos naturales, los países de Asia Meridional están entre los más vulnerables a la contaminación de las aguas subterráneas por arsénico. La fuente de arsénico en aguas subterráneas/acuíferos se deriva de sedimentos que transportan arsénico, principalmente procedente de la disolución de oxihidróxidos de hierro por reducción donde la materia orgánica y los microbios juegan un papel fundamental en la movilización del arsénico. Las grandes extracciones de agua subterránea para riego podrían ser la razón principal de esa contaminación. Asia Meridional, particularmente la región del delta de Bengala, es una zona crítica de contaminación por arsénico proveniente de fuentes geogénicas. La actividad geotérmica y volcánica del “cinturón de fuego” del Pacífico también contribuye con arsénico y otros metales a los suelos y aguas de la región.

## Accidentes industriales y actividad militar

En Japón, la contaminación del suelo por sustancias radiactivas continúa siendo un problema importante. El caso de Fukushima es un incidente notable. El 11 de marzo de 2011 ocurrió el desastre nuclear de Fukushima Daiichi. En mayo de 2013, el comité científico de las Naciones Unidas sobre los efectos de la radiación atómica llegó a la conclusión de que no había ningún impacto inmediato para la salud derivado de la exposición, pero que los impactos futuros todavía no habían sido determinados. Sin embargo, los suelos contaminados principalmente con cesio-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) siguen siendo una preocupación importante. Las autoridades inicialmente planearon utilizar la cantidad masiva de suelo recolectado de los 13 000 km<sup>2</sup> del área expuesta para fines de construcción como cimientos de carretera y terraplenes. Sin embargo, ha habido una considerable preocupación pública sobre la posibilidad de reutilizar estos suelos contaminados.

Las operaciones de defensa, las pruebas con armas militares y el legado de las pruebas con bombas nucleares continúan siendo un aspecto clave en la región de Asia y el Pacífico. Sin embargo, la información sobre el efecto y alcance de estas operaciones sobre la contaminación del suelo suele ser limitada. El legado de las pruebas nucleares en las Islas del Pacífico por los Estados Unidos de América incluye la contaminación del suelo. Por ejemplo, alrededor de 85 000 m<sup>3</sup> de residuos radiactivos quedaron enterrados en la Isla Runit, con un tiempo de desintegración estimado de 24 000 años.



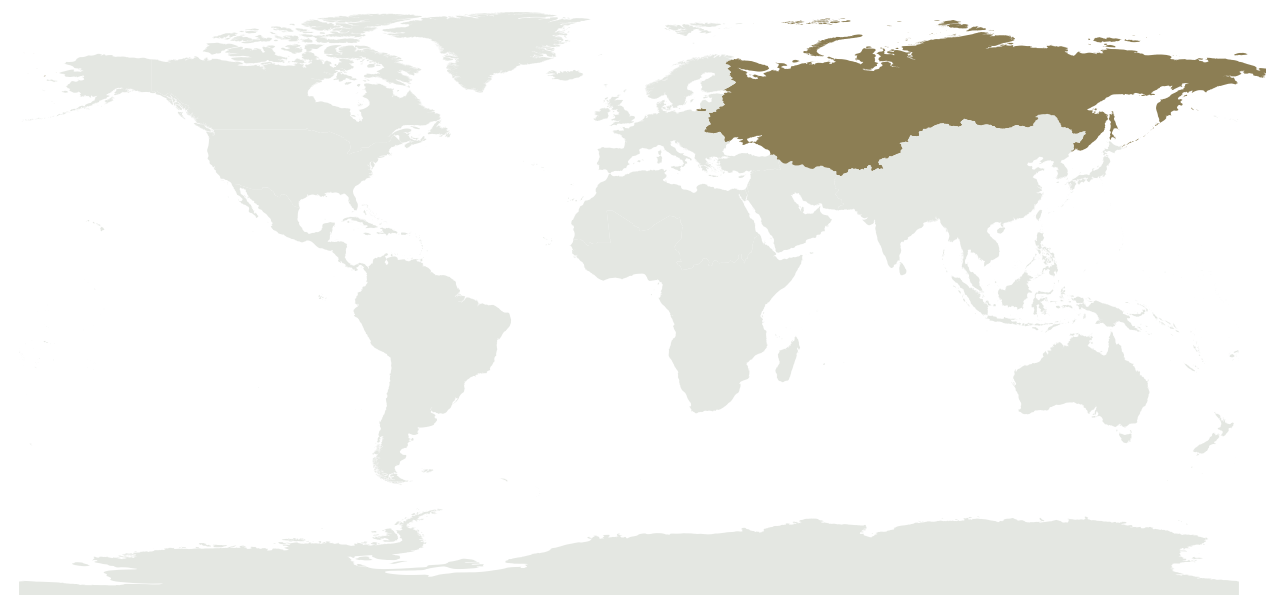
## Europa Oriental, el Cáucaso y Asia Central (Eurasia)

La región de Eurasia abarca un área de alrededor de 2 millones de hectáreas con una población estimada de 239,8 millones de personas. De acuerdo con las diferencias políticas y culturales, la ubicación geográfica y los antecedentes socioeconómicos, los 12 países pueden dividirse en tres sub-regiones: los países de Europa Oriental (Belarús, la República de Moldova, la Federación de Rusia y Ucrania), las repúblicas del Cáucaso (Armenia, Azerbaiyán y Georgia) y los países de Asia Central (Kirguistán, Kazajistán, Uzbekistán, Tayikistán y Turkmenistán).

Eurasia tiene una variedad de problemas de contaminación del suelo que se remontan principalmente a las actividades realizadas en la antigua Unión Soviética, de la que formaron parte los países de Eurasia previo a su colapso en 1991. Los suelos de Eurasia podrían ser considerados como fuertemente contaminados debido al rápido e intensivo desarrollo industrial de la Unión Soviética, la excesiva militarización de algunas zonas y el desequilibrado uso de agroquímicos (FAO, 2018b). A continuación, se muestran algunos detalles de las principales fuentes de contaminación del suelo (*soil pollution*) en Europa Oriental, el Cáucaso y Asia Central, y su distribución en la región (Figura 11).



Figura 11. Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en Europa Oriental, el Cáucaso y Asia Central. Los cuadros representan una estimación de la importancia relativa de cada fuente según la percepción de los expertos regionales, y su tamaño está relacionado con su importancia relativa. Cuanto mayor es el tamaño, mayor es la importancia relativa.



Fuente del mapa: ONU, 2020, modificado de acuerdo con la organización de la Alianza Regional por el Suelo de la AMS



No existen inventarios regionales o nacionales exhaustivos de emplazamientos contaminados disponibles para la región. De acuerdo con la base de datos del TSIP, existen 424 emplazamientos contaminados en ocho países de la región euroasiática (Armenia, Azerbaiyán, Kazajstán, Kirguistán, la Federación de Rusia, Tayikistán, Ucrania y Uzbekistán). La contaminación por oligoelementos ocurre en 54% de los emplazamientos, siendo el plomo (16 %) y el arsénico (10%), junto con los radionúclidos, incluido el uranio (15%), los que afectan a la mayor parte de los emplazamientos. Los contaminantes orgánicos persistentes se encontraron en el 27% de los emplazamientos mientras que el 19% de los emplazamientos incluyeron compuestos orgánicos volátiles, dióxido de azufre, materia particulada, amianto y cianuro. De los emplazamientos examinados, 177 fueron emplazamientos históricos, 102 estaban activos y 118 se incluían en ambas categorías. El informe indica que solo una pequeña fracción del total de puntos críticos fue capturada en los datos, pero no proporciona información general de utilidad.

## Agricultura

Un informe de la Asociación Internacional de HCH y Plaguicidas (IHPA - International HCH & Pesticides Association, por sus siglas en inglés) de 2016 evaluó los plaguicidas obsoletos y otros contaminantes orgánicos persistentes (POPs) en países de Europa Oriental, el Cáucaso y Asia Central. Los residuos de plaguicidas fueron mayores en los países de Asia Central (76,1 mil toneladas), seguidos por Europa Oriental (34 mil toneladas) y el Cáucaso (17,75 mil toneladas). Otros residuos de POPs fueron encontrados en mayor concentración en los países de Asia Central (242,6 mil toneladas), seguida por Europa Oriental (44,95 mil toneladas) y el Cáucaso (2,8 mil toneladas). Kazajstán representa un alto porcentaje del total de otros residuos de POPs con 240,400 mil toneladas de otros residuos de POPs.

No se han encontrado estimaciones comparables para la Federación de Rusia, pero se han operado grandes emplazamientos de producción de organoclorados en la Federación de Rusia (como Ufa y Chapaevsk) que crearon grandes áreas contaminadas por POPs, incluyendo contaminación con dioxinas.

A finales de 1990, existían 183 emplazamientos antiguos para eliminación de plaguicidas y pistas de aterrizaje agrícolas al sur de Kirguistán. En total, fueron enterradas por lo menos 1 876 toneladas de plaguicidas, incluyendo 1 033 toneladas de POPs en dos grandes vertederos no controlados. La contaminación del suelo aún existe en zonas de eliminación de plaguicidas, antiguas bodegas de plaguicidas, pistas de aterrizaje agrícolas y campos de algodón, cuya producción exigía la aplicación de grandes cantidades de plaguicidas.

Los diferentes inventarios realizados en la región euroasiática, indican que los datos estadísticos sobre plaguicidas obsoletos y POPs no han sido recolectados en forma sistemática, y que los datos existentes no están

suficientemente definidos y son poco fiables, lo que provoca una incertidumbre inherente a los datos y a los planes de uso de suelo. Por ejemplo, en Ucrania en 2005, el número de plaguicidas obsoletos fue de 22 000 toneladas en 5 000 depósitos mientras que, de acuerdo con los inventarios realizados en 2007, se reportaron cantidades mayores, con 25 000 toneladas en 4 000 almacenes. Los datos recibidos durante el inventario de 2015 nuevamente reportaron cerca de 24 500 toneladas, a pesar de que en el periodo 2007-2015, unas 35 000 toneladas fueron destruidas en el extranjero.

A principios del año 2000, se inició la reducción de la contaminación del suelo por plaguicidas obsoletos en toda la región euroasiática. Por lo tanto, en virtud del Plan de Acción del Consejo Ártico (ACAP, por sus siglas en inglés) para Eliminar la Contaminación del Ártico, unas 2 000 toneladas de plaguicidas obsoletos fueron reenvasadas en el noroeste de la Federación de Rusia. Con el apoyo del Banco Mundial, 1 150 toneladas de POPs y 1 060 toneladas de bifenilos policlorados (BPCs), y los suelos contaminados con BPCs fueron tratados en Moldova en 2006-07. El Ministerio Holandés de Relaciones Exteriores, en colaboración con la Fundación Holandesa DOEN y el Programa PSO de Desarrollo de Capacidades en Países en Desarrollo, financiaron la reducción de plaguicidas obsoletos en Moldova, Kirguistán y Georgia (2005-08); unas 400 toneladas de estos productos fueron reenvasadas y almacenadas. En Armenia, en el marco de un programa de la FAO, se destruyeron 1 050 toneladas de plaguicidas POPs, y se enterraron 12 700 toneladas de suelo con menor contaminación de plaguicidas POPs.

## Actividades industriales y minería

La minería y el procesamiento de minerales son grandes fuentes puntuales de contaminación por oligoelementos en toda la región. En Armenia, las principales fuentes de contaminación del suelo son los residuos de las industrias química y minera, las cuales fueron explotadas intensamente durante la era soviética. En particular, las áreas afectadas por los desechos de la planta de caucho sintético de Nairid (Nairid), la extracción de cobre (Alaverdi) y la extracción de molibdeno (Kajaran y Megri) son motivo de preocupación en Armenia. En Tayikistán, la industria local está causando una contaminación transfronteriza, como sucede con la planta de aluminio Tursunzade, que es una de las mayores fundiciones en la región y que contamina constantemente el suelo con flúor en la frontera con Uzbekistán. En Kirguistán, la principal causa de contaminación del suelo son las actividades mineras antiguas y presentes, particularmente la extracción de uranio.

También existe contaminación del suelo en Uzbekistán y Kazajstán causada por el desastre del Mar de Aral. Las enormes extracciones de agua realizadas durante décadas llevaron a la reducción del Mar de Aral. En la década de 1980, el lago redujo entre un 75% y 80% su volumen y de un 50% a un 60% su área; en la década de 1990 quedó dividido en el pequeño Mar de Aral del norte y el gran Mar de Aral del sur. En 2019, solo el 10% del antiguo Mar de Aral se llenó de agua y el resto quedó

transformado en desierto. El antiguo lecho marino se ha convertido en una fuente constante de contaminación por la movilización de sedimentos contaminados por plaguicidas y oligoelementos; unos 75 millones de toneladas anuales de toxinas y sales son movilizadas por la erosión de los sedimentos contaminados y depositadas a lo largo de miles de kilómetros cuadrados.

La Federación de Rusia y Kazajistán ocupan la primera y segunda posición entre los países de Eurasia en extensión de suelos contaminados por bifenilos policlorados (BPC). Se realizó el inventario de BPCs en residuos industriales en la Federación de Rusia en el año 2000 para 600 empresas, y se revisaron los sectores químico y petroquímico, las industrias metalúrgicas ferrosas y no ferrosas, de ingeniería mecánica y maderera (además del sector militar). Los desechos industriales liberaron unas 3 160 toneladas de BPCs al suelo, además del derrame Sovtol que contaminó el suelo con unas 140 toneladas de BPCs.

En Kazajistán, se desarrolló un programa para el control, gestión y vigilancia de los POPs de acuerdo con el “Concepto de protección ambiental de la República de Kazajistán para 2004-2015”. Desde entonces, 80 toneladas de transformadores eléctricos y 169 toneladas de condensadores eléctricos han sido incinerados en Francia, y se eliminaron 10 052 condensadores eléctricos en Alemania. Aproximadamente 56 000 condensadores todavía se encuentran en diferentes zonas, de los cuales 15 000 fueron enterrados en las instalaciones nucleares de Semipalatinsk.

En Azerbaiyán, Turkmenistán, Kazajistán y la Federación de Rusia, la industria del petróleo es una de las principales fuentes de contaminación del suelo. En Azerbaiyán, ocurrió una contaminación masiva por petróleo, cuando el petróleo del Mar Caspio abastecía de forma intensiva a toda la Unión Soviética. Se considera que un área de más de 33 000 hectáreas fue contaminada debido a las actividades de bombeo y procesamiento de petróleo en la Península de Absheron, y casi la mitad de esta área –15 000 ha– se encuentra fuertemente contaminada y constituye una importante preocupación ambiental. En Turkmenistán, las principales causas de contaminación del suelo son las industrias petrolera y química localizadas en la parte occidental del país en las costas del Mar Caspio.

En la Federación de Rusia, se encuentran contaminadas alrededor de 100 000 ha de tierras agrícolas debido a derrames petroleros. En las regiones petroleras de Kazajistán Occidental y la meseta de Turgay, un área de más de 500 000 hectáreas, existen grandes secciones de suelo contaminado con petróleo y materiales radiactivos, altos niveles de salinidad con aguas residuales industriales y transformación tecnológica del paisaje del suelo, provocando acumulación de oligoelementos tóxicos como plomo, cobalto, níquel y vanadio.

### **Expansión urbana y tratamiento de residuos urbanos**

La expansión urbana es uno de los principales impulsores de la contaminación del suelo en la Federación de Rusia y Ucrania. El crecimiento urbano no controlado produce aumento de la producción de residuos urbanos

y sobrecarga de los vertederos sanitarios, contaminación del suelo producida por el transporte, y la expansión de la infraestructura de transporte incluyendo estaciones de gasolina y petróleo, aeropuertos, estaciones de tren y autobús. Esto es particularmente cierto para las ciudades metropolitanas.

### **Actividades militares**

En Ucrania y otros puntos de la región, las actividades militares pasadas y presentes constituyen un importante impulsor de la contaminación del suelo. Durante la era soviética, Ucrania era explotada activamente por el ejército soviético para emplazamientos de pruebas armamentísticas, almacenamiento de cohetes y áreas de estacionamiento de tanques y aeronaves.

Después de la independencia en 1991, se informó que unos 4 500 emplazamientos militares habían ocupado 600 000 ha de tierras agrícolas, y solo se controló un número muy limitado de estos lugares. Los emplazamientos estaban gravemente contaminados con oligoelementos, productos de petróleo y otras sustancias químicas y subproductos militares.

Los emplazamientos mineros abandonados y destruidos durante el conflicto militar en Ucrania oriental en la región de Donbass, representan un desafío ambiental. Cuando una mina es abandonada, el agua subterránea ya no se bombea, llena las cavidades de las minas, provocando contaminación del agua y suelo y la subsidencia. Existen unas 35 minas ya inundadas, y se pronostica que 70 quedarán inundadas en los años venideros. Se estima que la escorrentía anual de agua contaminada proveniente de las minas inundadas es de 760 millones de metros cúbicos, de los cuales se depositan cerca de 2,5 millones de toneladas/año de sales y oligoelementos (mercurio, plomo y arsénico) en cuerpos de agua y en el suelo.

La contaminación del suelo por radionúclidos y oligoelementos de antiguas actividades militares ha sido identificada como la causa de contaminación de los emplazamientos militares en Abjasia, Osetia del Sur y Kazajistán; sin embargo, en algunos emplazamientos existe poca o nula información disponible sobre el lugar en el que enterraron los materiales radiactivos en el pasado.

### **Accidentes industriales**

La contaminación por radionúclidos constituye un problema grave a lo largo de la región, tanto por la catástrofe de Chernóbil (Ucrania) en abril de 1986, como por el legado de una extensa extracción de uranio y una antigua actividad militar en otras partes de la región. La contaminación mundial por radionúclidos resultante de la catástrofe de Chernóbil se estima en 34 millones de hectáreas. Del total del área contaminada, 20 millones de hectáreas de suelos radiactivos altamente contaminados se encuentran en Europa, 70% de los cuales está en países de Europa Oriental: Belarús, Ucrania y la Federación de Rusia. En 1986, justo después de la explosión en la central nuclear de Chernóbil, un área de 400 000 hectáreas adyacente al reactor fue aislada en Ucrania (conocida como la “zona muerta” de los 30 km) y no hay actividad ahí incluso hoy en día. Además, se excluyó de su cultivo



un área contaminada por radionúclidos equivalente a 204 000 hectáreas en Ucrania, 210 000 hectáreas en Belarús y 17 000 hectáreas en la Federación de Rusia.

Con el paso de los años, el nivel de contaminación del aire y del agua ha disminuido; sin embargo, ha surgido una contaminación secundaria debido a la transferencia de radionúclidos del suelo a las plantas, movilizándose hacia la flora y fauna desde el suelo y agua contaminados. Los seres humanos se ven afectados por el consumo de productos agrícolas contaminados que exceden los niveles de radionúclidos permitidos, especialmente en cultivos de raíces largas como papas, betabels o zanahorias, bayas y setas porque la contaminación radiactiva se mueve de la superficie a las capas más profundas del suelo. Además, el pescado, la carne y los productos lácteos se han convertido en fuentes de contaminación radiactiva secundaria debido al consumo de pasto contaminado por los animales.

Desde 2010, ha surgido una tercera fuente de contaminación por radionúclidos como resultado de los frecuentes incendios en el área que circunda al reactor de Chernobyl y de tormentas de polvo que transportan partículas contaminadas a gran distancia a través del viento y la lluvia.

En Asia Central se llevan a cabo actividades de extracción y procesamiento de uranio desde la década de 1940, especialmente en las zonas montañosas situadas sobre el río Syr Darya y el valle de Fergana, donde confluyen

las fronteras de Kirguistán, Kazajistán, Tayikistán y Uzbekistán. Los emplazamientos cerrados que contienen uranio y otros residuos peligrosos procedentes del procesamiento radiactivo en zonas densamente pobladas, como el valle de Fergana, constituyen una amenaza para el medio ambiente y la salud humana. Los riesgos han sido reconocidos por la Resolución de las Naciones Unidas 68/218 de 2013, que pide ayuda a Asia Central para la remediación de estos emplazamientos.

En Turkmenistán, los residuos radiactivos que fueron generados como un subproducto durante la fabricación de yodo y bromo desde aguas subterráneas mediante métodos de absorción, también habían afectado la calidad del suelo en las localidades de Khazar y Balkanabat. Los residuos radiactivos se generaron durante los años 1940-1990 cuando se utilizó el método de adsorción con carbón activo para la producción de yodo y bromo a partir de las aguas subterráneas ricas en minerales de estas dos ciudades. En 2009-2012, Turkmenistán puso en marcha un programa en el que se remediaron 47 500 m<sup>2</sup> de los territorios de las plantas industriales. Los residuos radiactivos de los emplazamientos más contaminados se recogieron, se envasaron en bolsas o se transportaron al lugar de almacenamiento, construido en el desierto, a unos siete kilómetros del mar Caspio. En 2010, el lugar de almacenamiento se reforzó aún más con muros de hormigón y se equipó con perforaciones de control y un sistema de drenaje.



## Europa

El capítulo europeo presenta la situación y tendencias de la contaminación del suelo en los 27 Estados miembros de la Unión Europea y Albania, Bosnia y Herzegovina, Islandia, Israel, Montenegro, Macedonia del Norte, Noruega, Serbia, Suiza, Turquía y el Reino Unido de la Gran Bretaña e Irlanda del Norte. La región tiene una población total de aproximadamente 550 millones de personas, y es relativamente homogénea en cuanto a desarrollo e ingresos.

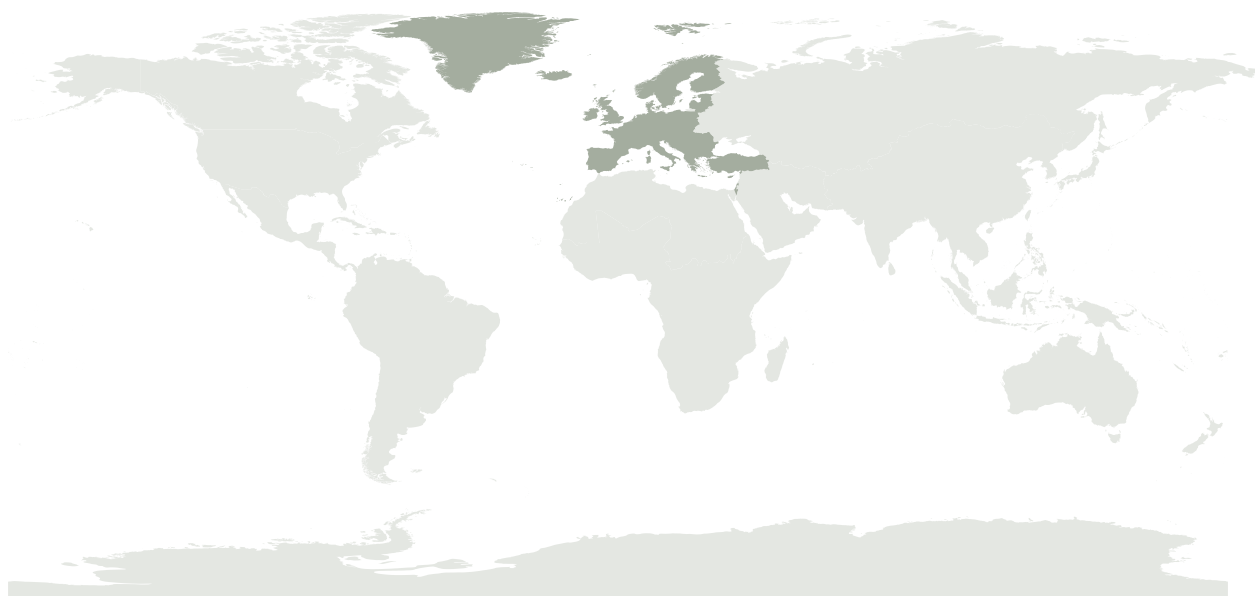
La principal fuente de información del estado de los suelos y el medio ambiente en 37 de los 38 países son los informes e indicadores regulares de la Agencia Europea del Medio Ambiente y la Red Europea de Información y Observación del Medio Ambiente (EIONET, por sus siglas en inglés). En cuanto a Israel, se hizo una revisión de la literatura científica.

En Europa se identificaron alrededor de 650 000 emplazamientos como potencialmente contaminados y que están incluidos en los inventarios nacionales y/o regionales. A continuación, se muestran algunos detalles sobre las fuentes principales de contaminación del suelo en Europa y su distribución en la región (Figura 12).



Figura 12. Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en Europa

Los cuadros representan una estimación de la importancia relativa de cada fuente según la percepción de los expertos regionales, y su tamaño está relacionado con su importancia relativa. Cuanto mayor es el tamaño, mayor es la importancia relativa.



Fuente del mapa: ONU, 2020, modificado de acuerdo con la organización de la Alianza Regional por el Suelo de la AMS



## Actividades industriales y comerciales

Los países europeos tienen una larga historia industrial que, en conjunto con las actividades comerciales, así como la eliminación y el tratamiento de residuos, han causado casi dos tercios de la contaminación puntual del suelo. Los principales contaminantes asociados a estas actividades industriales son los aceites minerales, los oligoelementos (como arsénico, cadmio, plomo, níquel o zinc) y los contaminantes orgánicos como son los solventes halogenados y no halogenados, los BPCs y los HAPs. Las PFASs también constituyen una gran preocupación en Europa ya que han sido detectadas en suelos, aguas subterráneas, en la biota y en la población europea. Las PFASs también se utilizan en una amplia variedad de productos de consumo y en aplicaciones industriales, aunque se desconoce la cantidad exacta y tipo de PFASs utilizadas en Europa. Se estima que existen alrededor de 100 000 sitios emisores de PFASs.

En los Estados miembros de la Unión Europea, se sospecha que unos 2,8 millones de emplazamientos están potencialmente contaminados, aunque solo una cuarta parte de ellos está incluida en los registros nacionales. En Suiza, el 60% de los emplazamientos contaminados corresponde a zonas industriales mientras que el resto son vertederos sanitarios y áreas en las que ocurrieron accidentes industriales. Los altos niveles de cadmio en los suelos eslovenos se originan principalmente de antiguas actividades industriales, como las fundidoras de zinc. De acuerdo con el informe del Ministerio de Protección Ambiental Israelí, las actividades industriales son responsables de tres cuartas partes de los emplazamientos contaminados en el país, debido principalmente al inadecuado tratamiento o eliminación de aguas residuales industriales, desechos y materiales peligrosos.

## Agricultura

La agricultura ha sido tradicionalmente la principal actividad de uso del suelo en Europa y representa aproximadamente 25% de la cobertura terrestre de Europa (194 304 ha de tierra). La agricultura representa una fuente importante de contaminación difusa en la región, debido principalmente al uso de agroquímicos. Los análisis de los suelos agrícolas muestreados en la encuesta de la Unión Europea sobre el uso y la ocupación de la tierra (LUCAS, por sus siglas en inglés) mostró que el 80% de los suelos agrícolas contienen residuos de plaguicidas, el 58% de los suelos presenta una mezcla de residuos de plaguicidas y solo un 17% de los suelos se encuentra libre de plaguicidas. Los principales plaguicidas detectados en suelos agrícolas fueron el glifosato y sus subproductos, el DDT y sus residuos y los fungicidas. En Francia, los plaguicidas más comunes encontrados en suelos eran subproductos del lindano, especialmente en la región del norte, que pudieron proceder de la volatilización del lindano aplicado a zonas intensivamente cultivadas, el cual era posteriormente transportado por los vientos prevalentes procedentes del sudoeste y depositados en una cuenca densamente habitada. En Finlandia, aproximadamente 15% de las muestras de aguas subterráneas situadas en zonas de agricultura intensiva, contenían plaguicidas y superan las normas de calidad para contenidos de plaguicidas.

Aunque el balance bruto de nitrógeno ha disminuido en décadas recientes, en los Estados miembros de la Unión Europea, un 45% de los aportes de nitrógeno aún proviene de fertilizantes sintéticos, mientras que el estiércol representa el 38% de los aportes de nitrógeno. Aproximadamente 65-75% de los suelos agrícolas de los 27 países de la Unión Europea exceden el valor crítico para nitrógeno en escorrentías hacia aguas superficiales (2,5 mg N/1) por encima del cual se espera que ocurra eutrofización. Aproximadamente 40% de los suelos agrícolas necesitarían una reducción de aportes de nitrógeno para evitar la eutrofización de los cuerpos de agua circundantes. En Macedonia del Norte, la cría de animales y la gestión del estiércol, el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados inorgánicos y las adiciones de estiércol a los suelos, fueron responsables del 89% de las emisiones de amoníaco (NH<sub>3</sub>). Este porcentaje aumenta a 98% las emisiones de amoníaco en Bosnia y Herzegovina. También fueron detectados oligoelementos como arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc en los suelos agrícolas originados por múltiples fuentes, incluidos los plaguicidas, fertilizantes sintéticos, estiércoles, materiales encalados, lodos de depuradora, abonos orgánicos y la deposición atmosférica. Aproximadamente 21% de los suelos agrícolas en Europa presentan niveles de cadmio superiores a los umbrales reglamentarios.

## Entornos urbanos

Aproximadamente el 73% de la población de Europa vive en las ciudades, y se espera que esta proporción alcance el 82% para el año 2050. Los suelos urbanos son afectados por las emisiones de escape de los automóviles, la eliminación inadecuada de desechos y una variedad de contaminantes domésticos, especialmente contaminantes orgánicos.

En Europa, cada año se producen unos 640 millones de toneladas de desechos de construcción y demolición urbanos y desechos electrónicos, de los cuales solo la mitad es reciclada en promedio, aunque la tasa de reciclaje se reduce al 30% para los desechos electrónicos. Israel tiene una alta tasa de rellenado sanitario, y solo el 21% de los residuos sólidos urbanos del país son reciclados, mientras que el resto es eliminado en vertederos sanitarios que están llegando a su máxima capacidad, y tienen el potencial de contaminar el suelo y las aguas subterráneas. Aunque ha habido un importante progreso en Europa en lo que respecta al control de los vertederos sanitarios y a las medidas de contención, siguen existiendo numerosos vertederos ilegales esparcidos por toda Europa. Por ejemplo, se identificaron unos 340 vertederos ilegales en Bosnia y Herzegovina en 2018.

## Minería

Las actividades mineras son comunes y están ampliamente distribuidas en Europa; sin embargo, las diferencias en las regulaciones han producido un impacto desigual en el ambiente. La minería y el procesamiento de minerales han desempeñado un papel fundamental en la historia y la economía de los Balcanes occidentales y Turquía, especialmente la minería de antimonio, cobalto, cobre,

galio, plomo, elementos de tierras raras, zinc y amianto. Los sitios abandonados y huérfanos se encuentran diseminados por toda la región sin las medidas de contención adecuadas. Montenegro ha incrementado su producción de residuos peligrosos derivados de la minería en los últimos años, alcanzando valores de 326 000 toneladas en 2019. Las actividades de extracción de minerales y carbón en Serbia también han dejado algunos vertederos sanitarios industriales de efectos duraderos que constituyen un riesgo para las poblaciones vecinas.

En España, en el emplazamiento de Guadiamar, se descargaron varios cientos de metros cúbicos de relaves de minas en los sistemas de aguas cercanos, afectando 4 600 ha de agricultura y pastizales a causa de la ruptura de la presa minera en 1998. En Hungría, en 2010, cerca de un millón de metros cúbicos de una suspensión de lodo rojo fueron descargados al medio ambiente debido a un fallo de una pared del tanque en una industria de alúmina. La respuesta a la emergencia y las medidas de remediación costaron al gobierno húngaro unos 127 millones de euros. En Montenegro, 3,9 millones de toneladas de relaves de flotación tóxicos de las minas de plomo y zinc fueron depositados en los márgenes del Río Cetina.

## Actividades militares

Muchos países en Europa todavía padecen el legado de la contaminación causado por las industrias de fabricación de armas al igual que las reservas de armas químicas y las municiones sobrantes de la Primera y la Segunda Guerra Mundial. Solo en Alemania, unos 3 200 emplazamientos contaminados están en espera de ser remediados. El conflicto de Kosovo también ha dejado reservas de armas en los países de los Balcanes. En Montenegro, a pesar de la desmilitarización y la gestión de las armas restantes, el suelo contaminado por bombas de uranio empobrecido todavía representa un peligro para la población. Actualmente se están llevando a cabo medidas de rutina en cuatro emplazamientos de Serbia para vigilar la contaminación por uranio empobrecido. Después de la guerra, Serbia tuvo la tasa más alta de tumores malignos en Europa, con más de 30 000 personas diagnosticadas con cáncer en los primeros 10 años desde el bombardeo, y una tasa de mortalidad de uno de cada tres casos. Bosnia y Herzegovina es uno de los países más contaminados por minas terrestres en el mundo. Hasta la fecha, se han registrado unos 1 366 asentamientos afectados por minas terrestres que limitan las actividades agrícolas y ganaderas debido a la liberación de oligoelementos y contaminantes orgánicos como son HAPs o BPCs.





## América Latina y el Caribe

La región de América Latina y el Caribe incluye 43 países y territorios. Los países en la región pueden ser agrupados en tres subregiones: el Caribe, América Central y América del Sur.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2019) indicó que la región tiene la más alta desigualdad en el mundo, especialmente con respecto al acceso al cuidado de la salud y al ejercicio de los derechos políticos, económicos, sociales y culturales.

A continuación, se presentan algunos detalles de las principales fuentes de contaminación del suelo en América Latina y el Caribe, y su distribución en la región (Figura 13).

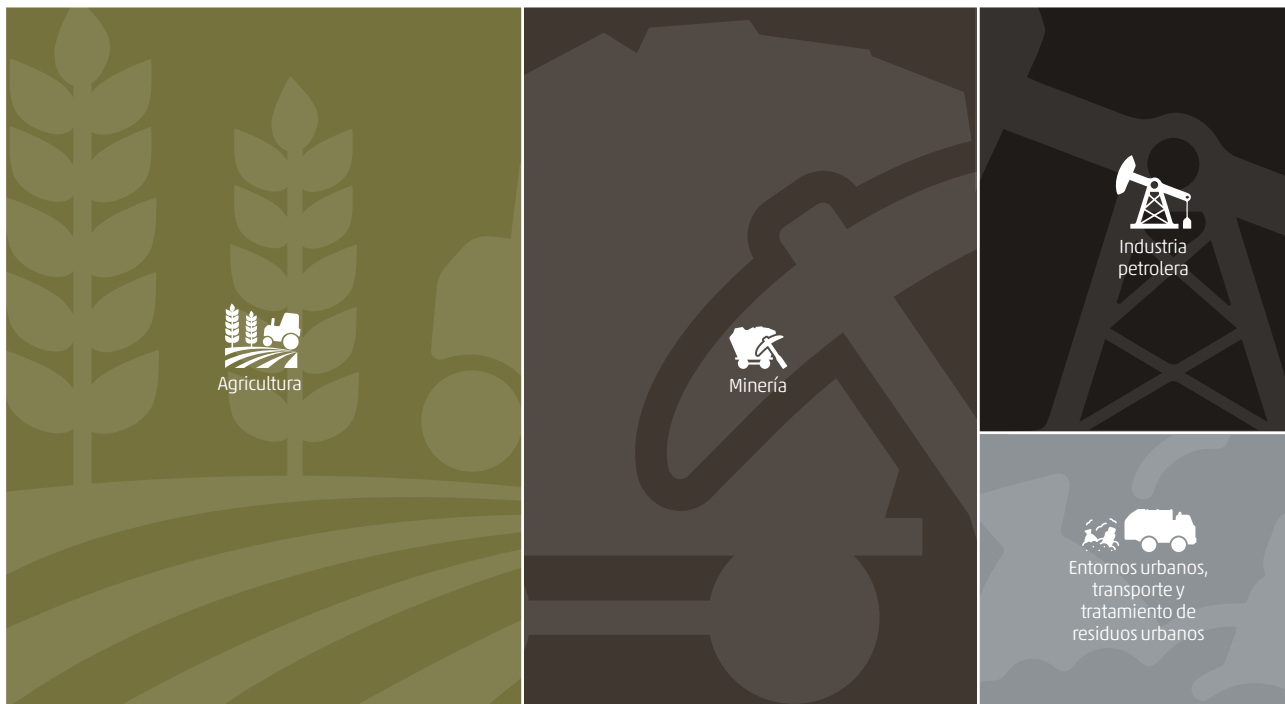


Figura 13. Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en América Latina y el Caribe

Los cuadros representan una estimación de la importancia relativa de cada fuente según la percepción de los expertos regionales, y su tamaño está relacionado con su importancia relativa. Cuanto mayor es el tamaño, mayor es la importancia relativa.



Fuente del mapa: ONU, 2020, modificado de acuerdo con la organización de la Alianza Regional por el Suelo de la AMS

## Agricultura

América Latina y el Caribe tienen las reservas más grandes de tierra cultivable del mundo. Durante los últimos 50 años, la superficie agrícola de la región aumentó de 561 a 741 millones de hectáreas.

Las principales prácticas agrícolas que contribuyen a la contaminación del suelo en la región son el mal manejo de los fertilizantes minerales y plaguicidas, que son ampliamente aplicados en la región, y el uso de abono no compostado y purines como fertilizantes. La región de América Latina y el Caribe tiene el mayor uso medio de plaguicidas por superficie cultivada en el mundo. De acuerdo con la CEPAL (2012), el mal uso de plaguicidas y malas prácticas de gestión pueden provocar impactos transfronterizos por escorrentías cargadas de plaguicidas transportadas hacia los ríos y el océano.

El uso de fertilizantes también ha aumentado en las últimas décadas. México, Argentina y Chile son los países con las tasas más altas de contaminación por nitrógeno en agua debido a la aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados en la región de América Latina y el Caribe. El uso de fertilizantes fosfatados también ha aumentado en la región durante el siglo XXI, y es de especial importancia en los países sudamericanos. Además del alto riesgo de eutrofización que representan los fosfatos lixiviados o transportados por la escorrentía a cuerpos de agua circundantes, los fertilizantes fosfatados constituyen una fuente de oligoelementos, en particular de cadmio.

Existe una urgente necesidad de tratar las peligrosas reservas de plaguicidas obsoletos en la región. Los contenedores de plaguicidas abandonados y las reservas enterradas son un problema generalizado. Por ejemplo, en Colombia unas 500 toneladas de plaguicidas obsoletos se encuentran en almacenes y enterramientos ilegales en diferentes zonas del país; sin embargo, estos sitios aún no han sido identificados con exactitud. En El Salvador, el Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales encontró más de 62 toneladas de residuos de plaguicidas además de solventes y equipo contaminantes.

Como sucede con el almacenamiento de los plaguicidas obsoletos, muchas áreas de la región están contaminadas por el uso de plaguicidas en el pasado. Por ejemplo, en Nicaragua se usaron de manera intensiva toxafeno, DDT, dieldrin, endrin, lindano y endosulfán en las décadas de 1980 y 1990, y sus residuos aún permanecen en el suelo.

## Minería

La minería es una fuente de contaminación del suelo por oligoelementos en la región, y está asociada a la extracción de metales preciosos como son aluminio, bauxita, cobre, estaño, hierro, litio, níquel, oro, plata, plomo y zinc. El informe del 2018 de la CEPAL indica que América Latina y el Caribe tiene una importante participación en las reservas mundiales de los principales

minerales metálicos con 61% de litio, 39% de cobre, 32% de plata y níquel, 25% de molibdeno y estaño, 23% de zinc, 18% de bauxita y aluminio, 15% de hierro y plomo, y 11% de oro (CEPAL, 2018).

En Jamaica, México, Colombia, Ecuador, Chile, Brasil, Suriname y Argentina se ha reportado una importante contaminación por oligoelementos asociados a la minería. En América Central, el oro, la plata, el plomo y el zinc son los elementos mineros más comunes, asociados a la contaminación por arsénico, cadmio, cianuro, hierro, mercurio y plomo. Las operaciones artesanales y a pequeña escala de extracción de oro son generalmente comunes en la región. La utilización de compuestos de mercurio y arsénico en las actividades mineras y el uso de enormes cantidades de agua para la explotación de petróleo de esquisto, producen la contaminación corriente abajo en suelos y aguas. No existe un resumen exhaustivo para la región de las actividades mineras y su impacto en el medio ambiente, por lo que esta lista probablemente esté incompleta.

## Gestión de residuos urbanos

La mala gestión de residuos sólidos y aguas residuales ha provocado una grave contaminación de suelos en la región. El vertido directo en el cauce más cercano sin tratamiento previo, es una práctica frecuente que tiene un impacto directo sobre los suelos.

En 2016, la región generó 231 millones de toneladas de desechos sólidos urbanos, de los cuales, en promedio, solo el 55% fueron gestionados correctamente y el 4,5% fueron reciclados. Sin embargo, había grandes diferencias entre los países.

Tres cuartas partes de las aguas residuales retornan a los ríos y otras fuentes de agua, algunas de las cuales se usan posteriormente para el riego de los suelos de cultivo. Las aguas residuales pueden contener una gran diversidad de contaminantes que van desde microorganismos patógenos hasta contaminantes orgánicos y oligoelementos como cromo, cobre, mercurio y zinc, que pueden crear problemas de salud pública y ambientales. Muchos países en la región cuentan con un sistema de canalización para la recolección y distribución de las aguas residuales que, en muchos casos, han tenido un mal mantenimiento y han empezado a filtrarse, causando la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas.

Además, la mezcla de desechos domésticos y residuos industriales peligrosos era una práctica común en la región de América Latina y el Caribe. Los residuos industriales peligrosos eran descargados en vertederos a cielo abierto sin gestión de lixiviado o contención, y sin previo tratamiento, poniendo en riesgo el medio ambiente y la salud de los seres humanos (Figura 14). Las actividades industriales liberan mezclas de contaminantes orgánicos e inorgánicos al suelo.



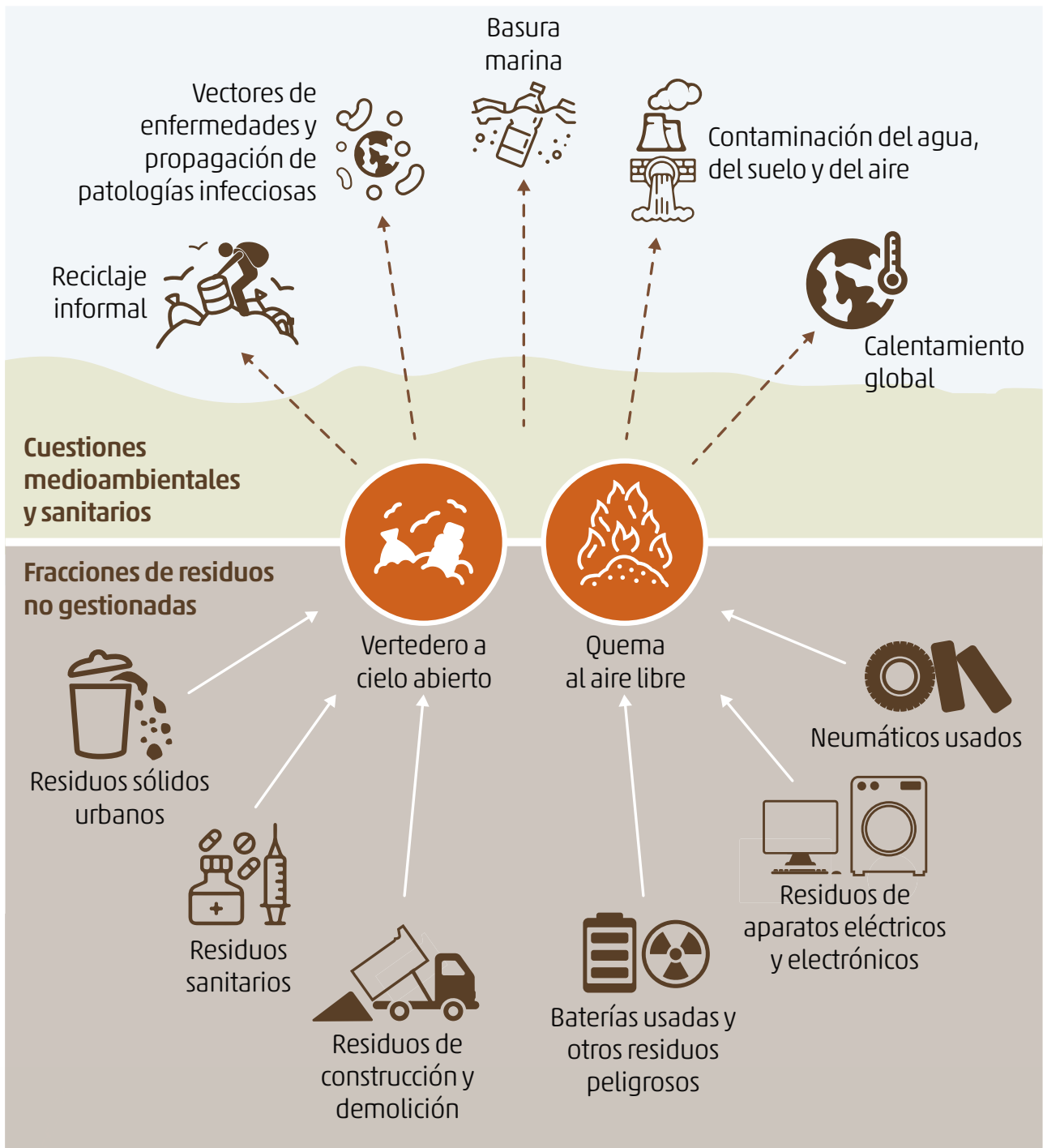


Figura 14. Posibles fuentes de residuos sólidos y su impacto en el ser humano y el medio ambiente

Fuente: adaptado de Ferronato y Torretta, 2019.



## Cercano Oriente y África del Norte

La región del Cercano Oriente y África del Norte (NENA, por sus siglas en inglés) se compone de 20 países, los cuales incluyen: Argelia, Bahrein, Egipto, Irán (República Islámica de), Iraq, Jordania, Kuwait, Líbano, Libia, Mauritania, Marruecos, Omán, Palestina, Qatar, la Arabia Saudita, la República Árabe Siria, Túnez, los Emiratos Árabes Unidos y el Yemen.

La población total de la región NENA es mayor a 485 millones de personas, de la cual las poblaciones rurales representan alrededor del 38%, aunque para algunos países este porcentaje es significativamente menor. Los productos internos brutos en la región NENA también difieren mucho de un país a otro. Con una parte importante de su territorio desértico o degradado (más del 80% del área), la región NENA tiene una baja proporción de suelos productivos, y la dispersión de contaminantes por transporte del polvo es una preocupación particular en la región. A continuación, se muestran algunos detalles de las principales fuentes de contaminación del suelo en el Cercano Oriente y África del Norte y su distribución en la región (Figura 15).

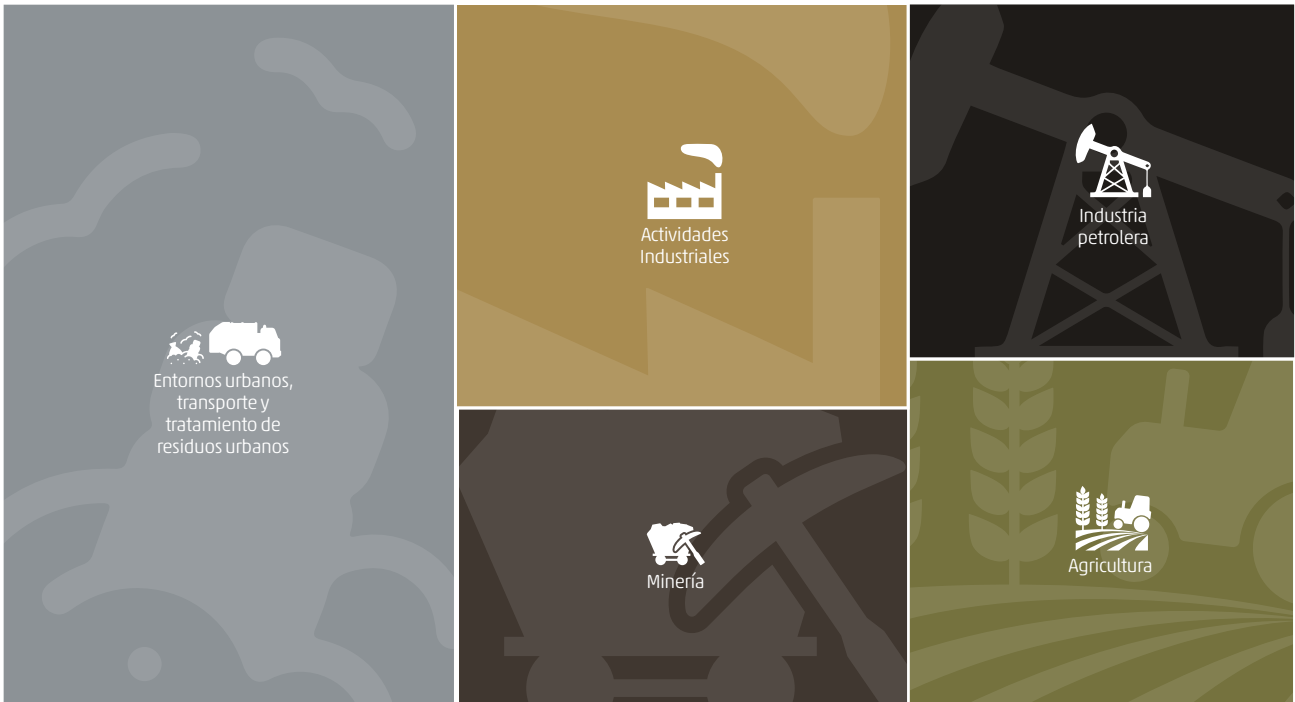
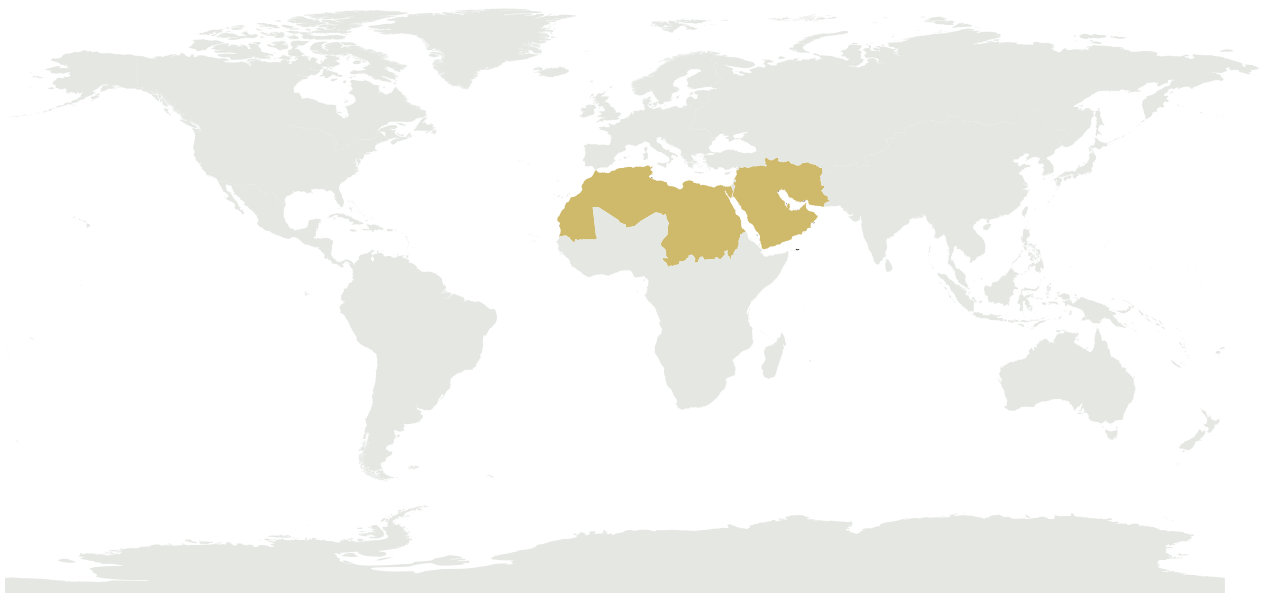


Figura 15. Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en Cercano Oriente y África del Norte

Los cuadros representan una estimación de la importancia relativa de cada fuente según la percepción de los expertos regionales, y su tamaño está relacionado con su importancia relativa. Cuanto mayor es el tamaño, mayor es la importancia relativa.



Fuente del mapa: ONU, 2020, modificado de acuerdo con la organización de la Alianza Regional por el Suelo de la AMS



## Gestión de residuos urbanos y redes de transporte

En la región NENA, la gestión de los residuos sólidos consiste principalmente en el relleno sanitario o en vertederos no controlados a cielo abierto. Los vertederos sanitarios y no controlados a menudo reciben residuos domésticos, hospitalarios e industriales que con frecuencia son quemados. Más de 81 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos son generados cada año en Egipto, de los cuales menos del 20% es tratado adecuadamente y menos del 5% es reciclado. En la República Islámica de Irán, se eliminaron más de 2 000 toneladas de residuos médicos peligrosos, incluidos materiales infecciosos, tóxicos, de combustión espontánea, así como sustancias potencialmente carcinogénicas, corrosivas y reactivas en el mismo vertedero sanitario que los residuos domésticos sin control alguno. Un 85% de los residuos urbanos son recolectados en Marruecos, pero menos del 40% es eliminado en vertederos sanitarios controlados.

El transporte es la fuente principal de contaminación en Argelia, Bahrein, Irán (República Islámica de), Iraq, Kuwait, Líbano, Libia, Omán, Qatar, la Arabia Saudita y los Emiratos Árabes Unidos. El transporte no solo es la fuente de emisión de gases, sino también la principal fuente de aporte de oligoelementos (como cadmio, cromo, plomo y níquel) en el suelo. El polvo recolectado de los pavimentos en las calles de Abadán, la República Islámica de Irán, en áreas con tráfico vehicular denso, mostró altos niveles de oligoelementos.

## Actividades industriales

Las principales industrias en la región son la fabricación de papel, plástico y tuberías; la industria del cemento, el procesamiento de alimentos; la construcción; la extracción, transporte y refinado de petróleo y la producción energética. La industria es una de las principales fuentes de contaminación del suelo por oligoelementos (arsénico, bario, cobalto, cromo, níquel y zinc) en la región NENA.

Numerosos estudios indican que la deposición de polvo es la principal fuente de contaminación difusa que transporta oligoelementos liberados por la industria y la producción energética, y puede encontrarse en el aire, el agua y el suelo en partes importantes de la región NENA. Existe una creciente preocupación en la región por el aumento de la frecuencia de las tormentas de polvo desde tierras desnudas y desérticas, que transportan materia particulada debido a la erosión eólica. El viento que sopla desde la superficie del suelo también puede transportar oligoelementos asociados a la materia particulada. A medida que viaja, la materia particulada puede ser enriquecida con las emisiones de la industria y el transporte, y puede causar problemas de salud en las áreas urbanas. Por ejemplo, se llevó a cabo el control del contenido de cadmio, cromo, níquel, plomo y zinc, del polvo doméstico interior y del polvo de la calle al aire libre en 76 emplazamientos en Bahrein. El plomo predominó entre los oligoelementos en áreas con tráfico pesado, pero también se observaron niveles elevados de zinc, cadmio, cromo y níquel. Los gases de los tubos de escape de los

automóviles y el polvo fueron las principales fuentes de plomo y níquel tanto en el polvo de la calle como en el del interior. En Sudán, se observan daños ambientales graves como la emisión de polvo y gas, la deforestación, la contaminación con mercurio y el deterioro del paisaje debido a la extracción de oro.

## Agricultura

La intensificación agrícola ha sido durante mucho tiempo una prioridad para abordar la seguridad alimentaria para una creciente población en la región, y ha estado estrechamente vinculada al uso de insumos agroquímicos. La agricultura en esta región con frecuencia se concentra en los deltas y las llanuras de inundación de los ríos. Los oligoelementos y muchos otros contaminantes migran adheridos a partículas erosionadas del suelo y se asientan como sedimentos en los cuerpos de agua. Las inundaciones pueden entonces mezclar los sedimentos con los suelos de las tierras bajas. Por ejemplo, los sedimentos del lecho del Río Ibrahim (Líbano), y los suelos de las llanuras de inundación adyacentes muestran mayores niveles de cadmio, cromo, cobre, hierro, manganeso, níquel, plomo y zinc, que se acumulan de forma creciente desde la fuente aguas arriba hasta la salida al mar.

Los suelos agrícolas a lo largo del Río Orontos en Siria tienen niveles elevados de oligoelementos en la capa superior del suelo debido a prácticas agrícolas intensivas, la aplicación de sustancias agroquímicas, y el riego con aguas residuales no tratadas en una zona semiárida densamente poblada al sudoeste de Siria con expansión urbana e industrial. Los suelos agrícolas revelaron niveles aceptables de concentración de plomo, pero las áreas localizadas a lo largo y en los alrededores de la ribera mostraron altos valores de plomo que exceden las normas sirias.

Los fertilizantes fosfatados pueden contener oligoelementos como impurezas, principalmente cadmio, zinc, plomo, cobre, antimonio, plata, paladio, niobio y molibdeno. Con base en las prácticas agrícolas y la aplicación excesiva de fertilizantes que prevalecen en los países del Mediterráneo oriental, se espera que la carga promedio anual de zinc, cobre, plomo y cadmio alcance niveles que pueden ser tolerables a corto plazo, pero que podrían llevar a una acumulación de oligoelementos en el suelo a largo plazo.

Los países de la región NENA se caracterizan por un alto uso de plaguicidas en los suelos agrícolas, aunque hay variaciones importantes entre países. Palestina (9 kilogramos/ha por año) y Líbano (7 kilogramos/ha por año) aplican las tasas más altas, mientras que Iraq, Sudán, el Yemen o Mauritania aplican dosis mucho más bajas (<0,2 kilogramos/ha por año).

Un problema emergente para la región NENA es la gestión de plaguicidas obsoletos, que ascienden a varios miles de toneladas, almacenadas en lugares inapropiados de manera peligrosa. Los productos químicos tóxicos, a menudo almacenados al aire libre donde las fugas son habituales, se filtran al suelo y al agua, y aumentan el riesgo de intoxicación.

## América del Norte

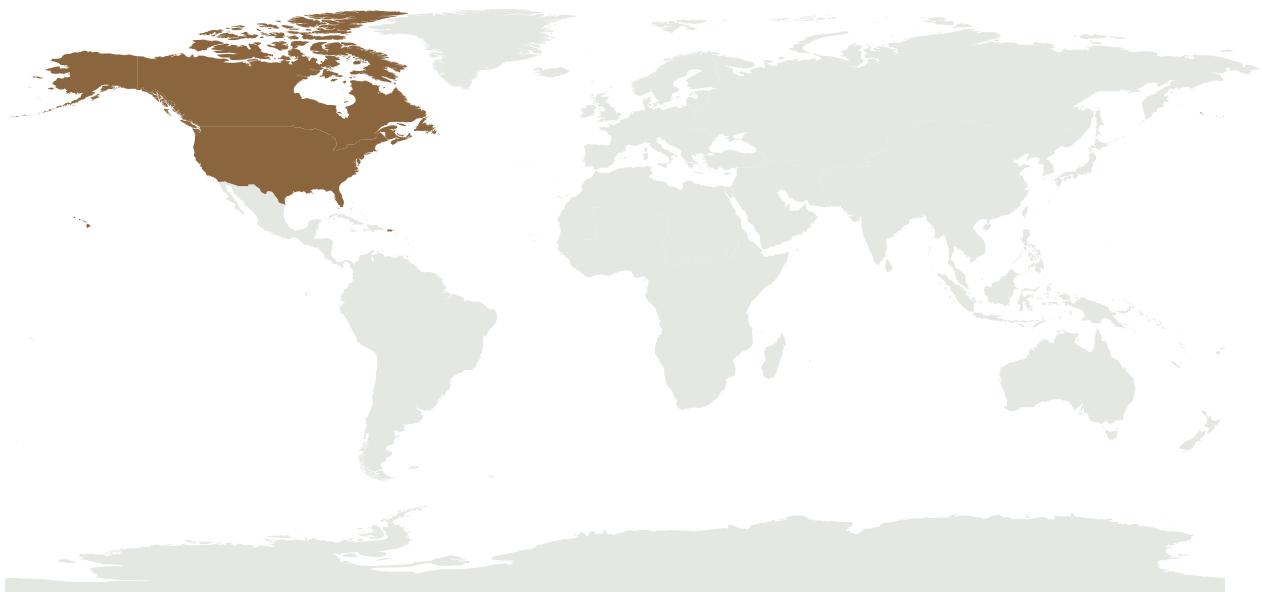
La región de América del Norte incluye a los Estados Unidos de América y a Canadá. Los Estados Unidos de América y Canadá son países grandes (9,83 y 9,98 millones de kilómetros cuadrados, respectivamente) con economías muy desarrolladas y diversificadas con grandes sectores de extracción de recursos, agrícola y manufacturero. Las economías y los niveles de desarrollo similares han dado lugar a que las fuentes y extensión de la contaminación del suelo sean similares. Existen miles de emplazamientos contaminados en ambos países, de tamaño e importancia variados, en entornos que van desde edificios abandonados en centros urbanos hasta grandes áreas contaminadas con materiales tóxicos procedentes de anteriores actividades industriales o mineras.

En 2017, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de América y sus socios estatales informaron sobre la vigilancia de entre 640 000 y 1 319 100 instalaciones para impedir los vertidos a las comunidades. El programa de vigilancia solo cubre emplazamientos que actualmente producen contaminantes potenciales y no emplazamientos históricos ni áreas contaminadas por fuentes no puntuales. En julio de 2019, había 23 663 emplazamientos federales incluidos en el Inventario Federal de Emplazamientos Contaminados de Canadá, con 16 845 emplazamientos listados como cerrados debido a que su remediación no es posible. A continuación, se muestran algunos detalles de las principales fuentes de contaminación del suelo en América del Norte y su distribución en la región (Figura 16).



Figura 16. Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en América del Norte

Los cuadros representan una estimación de la importancia relativa de cada fuente según la percepción de los expertos regionales, y su tamaño está relacionado con su importancia relativa. Cuanto mayor es el tamaño, mayor es la importancia relativa.



Fuente del mapa: ONU, 2020, modificado de acuerdo con la organización de la Alianza Regional por el Suelo de la AMS



## Actividades industriales

Las agencias de protección ambiental de ambos países reciben un informe anual de las industrias sobre la cantidad de sustancias tóxicas liberadas en los tres compartimentos ambientales: agua, aire y tierra. El conjunto de datos se encuentra disponible públicamente en forma de inventarios denominados Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes de Canadá (NPRI, por sus siglas en inglés) y el Inventario de Liberación de Sustancias Tóxicas de los Estados Unidos de América (TRI, por siglas en inglés).

El registro del NPRI de 2018, contiene información sobre emisiones de unas 7 699 instalaciones, las cuales liberaron aproximadamente 2,8 millones de toneladas de contaminantes directamente al medio ambiente (aire, agua y tierra), mientras que 1,37 millones de toneladas fueron eliminadas en vertederos sanitarios, aplicadas al suelo o inyectadas al subsuelo, *in situ* o *ex situ*.

En Canadá, durante 2017, las instalaciones responsables de la liberación de las cantidades más grandes de contaminantes a la tierra eran aquellas que apoyaban actividades de transporte aéreo, seguidas de la fabricación de hardware, transporte aéreo programado, sistemas de distribución de aguas residuales y alcantarillado. En el caso de la tierra y el suelo, el etilenglicol, utilizado como agente anticongelante y descongelante para automóviles y aeroplanos, fue el contaminante con los niveles más altos registrados.

En 2017, el TRI de la EPA de los Estados Unidos de América informó que aproximadamente 1 720 millones de kilogramos de contaminantes fueron liberados a todos los compartimentos ambientales (suelo, aire y agua) por las actividades industriales. Los principales contaminantes fueron el plomo (35%), seguido por el zinc (23%), arsénico, manganeso, bario, cobre y otros. El suelo representa el más grande receptor de estos contaminantes (70% de la cantidad total de contaminantes liberados al medio ambiente), procedentes en su mayor parte de la extracción de metales (72%), seguidos por las industrias químicas, las compañías energéticas, la minería y procesamiento de metales primarios, los residuos peligrosos y otros.

Un asunto de creciente preocupación en los Estados Unidos de América, al igual que en otros países desarrollados en el planeta, es la vasta contaminación de agua potable y los suelos por sustancias per- y polifluoroalquilo o PFAS que incluyen una familia de miles de sustancias químicas, incluidos el ácido perfluorooctanoico (PFOA, por sus siglas en inglés) y el ácido perfluorooctanosulfónico (PFOS, por sus siglas en inglés), entre otros. Estas sustancias químicas se usan por sus propiedades impermeables, anti-grasa y antiadherente en muchos productos para el consumidor y en las instalaciones de fabricación y procesamiento de PFAS, aeropuertos e instalaciones militares que utilizan espumas contra incendios. Son persistentes en el medio ambiente y tienden a acumularse en los tejidos vivos, causando graves problemas de salud.

A la fecha, se ha detectado la contaminación con PFAS en el agua del grifo de 1 400 comunidades a lo largo de los Estados Unidos de América, incluyendo 300

emplazamientos militares. Los dos PFAS más utilizados y más estudiados, el PFOA y el PFOS, ya no se fabrican en los Estados Unidos de América. Sin embargo, la mayor parte de los PFOS y PFOA se utilizó en alfombras, textiles, mobiliario y papel de contacto para alimentos como envolturas para comida rápida y las cajas de pizza entre los años 1970 y 2000, y se han depositado en su mayoría en vertederos sanitarios durante las últimas cuatro décadas. La liberación de PFAS proveniente de vertederos sanitarios de residuos urbanos en los Estados Unidos de América se estima en 500 kg por año. Considerando que se eliminaron decenas de miles de toneladas de PFAS en vertederos sanitarios, esta liberación probablemente continuará durante siglos ya que las PFAS son más persistentes que los sistemas de contención de los vertederos sanitarios.

## Actividades mineras y extractivas

Canadá tiene muchas fuentes de contaminación ambiental relacionadas con sus grandes industrias de extracción de recursos (metales, radionúclidos, petróleo, gas natural, bitumen, carbón), y con un desarrollado sector industrial y manufacturero. Canadá es el líder mundial en la producción de potasa y se clasifica entre los mayores productores de cadmio, cobalto, diamantes, piedras preciosas, oro, grafito, indio, níquel, niobio, metales del grupo del platino, sal, titanio y uranio. Canadá también representa una importante proporción de la producción mundial de aluminio primario a partir de bauxita y alúmina importadas. Aunque la mayoría de las minas están reguladas para evitar la contaminación proveniente de efluentes y residuos mineros por las Regulaciones de Efluentes de Minería Metálica, el sector de la minería metálica ha reportado excedencias esporádicas de los límites prescritos para arsénico, cobre, cianuro, níquel, zinc, radio 226 y pH.

Un importante componente de la extracción de petróleo de Canadá proviene de las arenas bituminosas en Alberta, la tercera mayor reserva de petróleo del mundo, la cual contribuye considerablemente a la economía canadiense. El sector de petróleo y gas, además de ser una fuente de muchos contaminantes peligrosos, incluidas las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y sustancias químicas, también ha estado provocando la destrucción y fragmentación de hábitats y el consumo de recursos hídricos. Las vastas balsas de lodos asociadas a las arenas bituminosas, constituyen una preocupación considerable para los recursos hídricos de la región; sin embargo, no se encontraron estudios sobre su impacto en los suelos. Las emisiones y deposición de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) del sector del petróleo y el gas en Alberta han sido uno de los principales focos de investigación sobre sus efectos en la salud humana y el medio ambiente; sin embargo, existen pocos datos sobre la contaminación del suelo con HAPs y oligoelementos, los cuales corresponden solamente a emplazamientos ubicados cerca de las operaciones de extracción de arenas bituminosas. Existe preocupación sobre la presencia, notificación y remediación de derrames de combustible en emplazamientos de exploración en áreas lejanas que tienen poca o nula vigilancia regulatoria, y el impacto que esto puede tener en los suelos y el medio ambiente.

En 2019, las producciones en los Estados Unidos de América de piedra triturada, cemento, arena y grava para construcción, oro, cobre, arena y grava industriales, mineral de hierro, cal, sal, zinc, ceniza de sosa, roca fosfórica y molibdeno fueron valoradas cada una en más de 1 000 millones de USD. La industria minera elimina la mayor cantidad de residuos principalmente en el suelo *in situ*. El plomo y el zinc son los principales contaminantes liberados de las actividades mineras en los Estados Unidos de América. Además de las minas activas, las minas abandonadas constituyen también un problema importante de contaminación del suelo en los Estados Unidos de América. Tan solo en el estado de Colorado, existen unas 23 000 minas abandonadas que necesitan rehabilitación.

La mayoría de los residuos de la minería metálica se acumulan en vertederos no reglamentados y depósitos superficiales, aumentando en un 35% entre 2007 y 2017 (de 900 millones de toneladas a 1,2 miles de millones de toneladas). Tan solo el sector minero es responsable del 96% del plomo y el 87% de zinc vertidos al suelo, mientras que 42% de los gramos totales de dioxinas liberados proceden de la extracción de minerales. Las dioxinas son subproductos de muchas formas de procesos químicos industriales y de combustión. Desde 2010, la liberación de dioxinas aumentó en un 102%, y en 2017 aproximadamente el 52% de dioxinas se liberaron al suelo.

## Agricultura

La agricultura también ha sido identificada como una fuente importante de contaminación que causa contaminación de fuentes hídricas. En muchos casos, las principales fuentes puntuales de contaminación como los vertederos de residuos industriales, actuales o históricos, no controlados, son similares a lo largo del país, mientras que otras fuentes difusas y puntuales son específicas de la región, como los diferentes tipos de minería o la extracción y procesamiento de combustibles fósiles.

El Departamento de Agricultura y Agroalimentación de Canadá (AAFC, por sus siglas en inglés) calcula una serie de indicadores agroambientales como medidas clave de las condiciones, riesgos y cambios resultantes de la agricultura y de las prácticas de gestión que utilizan los productores para mitigar estos riesgos. Los datos del AAFC sugirieron que después de 100 años de aportes sostenidos provenientes de la aplicación de fertilizantes, estiércol y biosólidos urbanos en los suelos agrícolas, se estima que las concentraciones de algunos oligoelementos (arsénico, cadmio, cobre, plomo, selenio y zinc) son tres veces más altas que los niveles de fondo naturales.

Los Estados Unidos de América tienen el 44% de su tierra dedicada al uso agrícola, por lo que las prácticas de gestión tienen un gran impacto sobre la tasa nacional de contaminación del suelo. El uso de fertilizantes ha alcanzado su punto máximo en las últimas décadas, con un incremento de un 215% desde 1960. En contraste, el uso de plaguicidas ha disminuido debido al creciente uso de semillas genéticamente modificadas y prácticas de conservación agrícola. Además de los plaguicidas actualmente registrados para su uso, los

plaguicidas prohibidos que ahora se sabe tienen impactos ambientales duraderos, pueden encontrarse en el suelo décadas después de su aplicación y pueden seguir siendo peligrosos.

La aplicación de biosólidos como fertilizantes está regulada tanto en Canadá como en los Estados Unidos de América; sin embargo, se permiten ciertas cantidades de contaminantes potencialmente tóxicos dentro de las directrices regulatorias. Más de 400 compuestos contaminantes, incluidos oligoelementos, han sido identificados como potencialmente presentes en los biosólidos. Como los oligoelementos tienden a permanecer en el lugar en el que son aplicados, con el tiempo su contenido en los suelos aumenta. Los PFAS también son reconocidos como potencialmente presentes en los biosólidos, pero aún no se han fijado los límites permitidos.

Los plásticos también representan un riesgo preocupante para los suelos agrícolas de América del Norte. Usados como mantillo para cultivos, en tubos de plástico para riego, bolsas para alimentos y frutas y plástico para invernaderos, los plásticos juegan un papel esencial en la producción de frutas y vegetales; sin embargo, si no son gestionados correctamente, constituyen una fuente de contaminación del suelo. Canadá ha incluido el uso de plásticos en la agricultura en su Plan de Acción sobre Cero Residuos Plásticos. Las organizaciones agrícolas canadienses también han identificado que los agroplásticos necesitan ser gestionados en forma más efectiva y han asumido iniciativas de reciclaje y caracterización de residuos.

Los agricultores en los Estados Unidos de América actualmente utilizan 57 millones de kilogramos de mantillo plástico y 191 millones de kilogramos de contenedores de plástico anualmente. Sin embargo, no existen políticas para exigir o alentar el reciclaje de plásticos agrícolas en los Estados Unidos de América, y resulta escaso el conocimiento sobre los efectos a largo plazo de los residuos plásticos en los agroecosistemas.

## Desastres naturales

En los Estados Unidos de América y Canadá han existido casos de movilización de contaminantes causados por desastres naturales. La vulnerabilidad de las personas depende de su proximidad a las fuentes de contaminación. Hasta la fecha, pueden enumerarse muchos casos posteriores a huracanes e inundaciones. El huracán Katrina que azotó la ciudad de Nueva Orleans en 2005, provocó la ruptura del sistema de alcantarillado y los contaminantes se esparcieron por toda la ciudad. Se midieron altas concentraciones de plomo en el suelo en el centro de Nueva Orleans en comparación con el área circundante. Durante las inundaciones del año 2011 en el estado de Colorado, los relaves de la mina de Jamestown se mezclaron con sedimentos y agua. Además, la inundación barrió los dispositivos de almacenamiento de petróleo, distribuyendo el petróleo y otros productos en las aguas de crecida. En 2015, un error en la restauración de los relaves de la mina causó la descarga de cadmio, arsénico, plomo y aluminio en el Río Colorado, volviéndolo color naranja a lo largo de 100 millas.



## África subsahariana

El África subsahariana incluye 48 países africanos que están ubicados al sur del desierto del Sahara o incluyen una parte del desierto en las zonas más septentrionales de estos países.

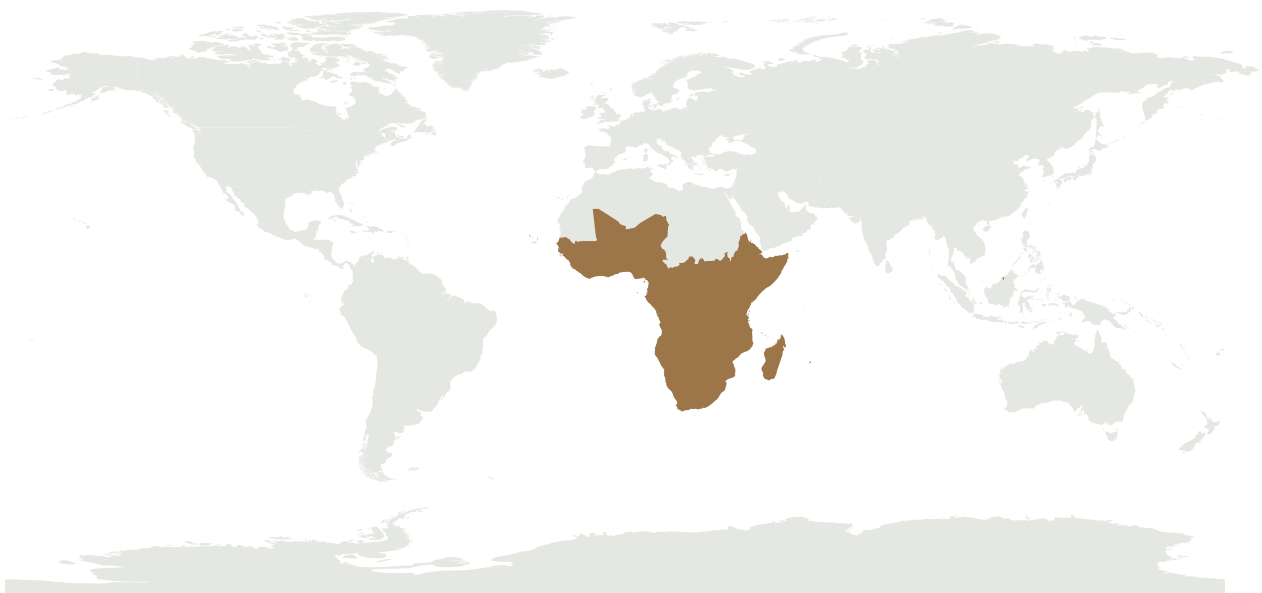
La región ha experimentado un dramático crecimiento de población, desde unos 227 millones en 1960 a 1 080 millones de personas en 2018. La población urbana de África aumentó un 2 000% entre 1950 y 2015. En contraste con los países desarrollados y varios países en desarrollo, la rápida urbanización en el África subsahariana ha provocado la ausencia de un enfoque de zonificación convencional del uso del suelo, y las personas se han asentado en zonas directamente próximas a las áreas industriales, minas o instalaciones de procesamiento agrícola para estar muy cerca de las áreas con oportunidades de empleo. Esto plantea amenazas importantes para la salud humana en las zonas con suelos contaminados. Un factor de riesgo particular en el África subsahariana es la práctica de la geofagia (ingesta deliberada de tierra).

Todavía no se ha realizado ninguna evaluación regional a gran escala de la contaminación del suelo en la región. Los informes sobre contaminación por oligoelementos dominan la información disponible sobre contaminantes conocidos y emergentes y otros contaminantes importantes incluyen plaguicidas, hidrocarburos y BPCs. A continuación, se muestran algunos detalles de las principales fuentes de contaminación del suelo en el África subsahariana y su distribución en la región. (Figura 17).



Figura 17. Gráfico jerárquico de las principales fuentes de contaminación del suelo en África subsahariana

Los cuadros representan una estimación de la importancia relativa de cada fuente según la percepción de los expertos regionales, y su tamaño está relacionado con su importancia relativa. Cuanto mayor es el tamaño, mayor es la importancia relativa.



Fuente del mapa: ONU, 2020, modificado de acuerdo con la organización de la Alianza Regional por el Suelo de la AMS

## Minería

El África subsahariana cuenta con importantes recursos minerales y depósitos de petróleo cuya extracción y procesamiento pueden estimular la actividad económica y proveer medios de vida para la población. Sin embargo, la extracción y procesamiento de los yacimientos minerales, tanto en las operaciones a gran escala como en las artesanales y a pequeña escala, han causado grandes daños ambientales y contaminación del suelo en la región. La minería y la explotación de canteras son importantes fuentes de contaminación por oligoelementos en el África subsahariana.

La deposición de polvo de las minas y fundiciones de minerales puede causar contaminación del suelo en áreas cercanas, incluyendo zonas residenciales y agrícolas, con casos documentados en los que se ha detectado que los niveles de oligoelementos plantean un riesgo para el medio ambiente y la salud humana en toda la región. Los oligoelementos en los emplazamientos mineros suelen estar acompañados de otros contaminantes orgánicos, lo que da lugar a combinaciones más complejas que requieren técnicas avanzadas de remediación. La supresión del polvo es una práctica aplicada en el sector minero a gran escala para reducir el impacto negativo de las emisiones de polvo de los caminos de tierra sin revestimiento que se utilizan para el transporte del mineral desde la mina. Sin embargo, esta práctica también puede introducir contaminantes al suelo en donde se aplica. El drenaje ácido de minas en instalaciones de almacenamiento de relaves es una de las principales causas de acidificación del suelo en las zonas mineras. La reducción de los niveles de pH tanto del suelo como de los relaves aumenta la movilidad de los oligoelementos y los radionúclidos.

La minería artesanal y a pequeña escala depende en gran medida del trabajo humano y de tecnologías de extracción primitivas para extraer el mineral de la mena. Aunque no se ha podido calcular el número exacto de personas que dependen de este tipo de minería en el África subsahariana, se considera un factor clave para al menos 23 de las economías regionales. Entre los países de la región en los que la minería artesanal y a pequeña escala brindan medios de vida rurales están Burkina Faso, Malí, la República Unida de Tanzania, Sierra Leona y la República del Congo.

Los dos principales contaminantes de interés asociados a la minería artesanal y a pequeña escala del oro son el mercurio y el cianuro. El mercurio elemental se utiliza para extraer el oro del limo mediante la formación de una amalgama de mercurio y oro que es fundida nuevamente para retirar el oro. El proceso de lavado deja atrás el mercurio en los relaves y lo agrega al suelo o a los recursos acuíferos cercanos. Actualmente para recuperar el oro, los mineros artesanales utilizan cianuro en Mozambique, la República Unida de Tanzania, Burkina Faso y Zimbabwe. Se ha afirmado que la minería artesanal y de pequeña escala es, a nivel mundial, el mayor emisor de mercurio, y Burkina Faso contribuye con 35 toneladas de las 1 400 toneladas estimadas por año. Con respecto a los emplazamientos contaminados registrados por Pure Earth, el Instituto Internacional para el Medio Ambiente y el Desarrollo, informó que 75 emplazamientos en África

subsahariana han sido registrados como contaminados con mercurio. Se estima que estos emplazamientos afectan a 2,4 millones de personas. Los emplazamientos contaminados con mercurio elemental han sido identificados en siete países de la región (Ghana, Guinea, Kenya, Mozambique, Senegal, la República Unida de Tanzania y Uganda).

Además de la explotación de minerales, la extracción y procesamiento de combustibles fósiles también está contribuyendo a la contaminación del suelo en la región. La mayor incidencia de contaminación del suelo por oligoelementos e hidrocarburos, como resultado de las industrias petroleras, fue reportada para Nigeria y Angola. Nigeria ha sufrido más de 4 000 derrames petroleros entre 1960 y 2010, cuyos volúmenes se estiman en más de 2 millones de barriles (320 000 m<sup>3</sup>) siendo el sabotaje la causa principal. En Angola, la industria del petróleo y el gas es responsable de las fugas y los derrames de petróleo que han sido reportados desde el año 2009 en las provincias de Cabinda y Zaire, lo que ha provocado la contaminación del sedimento costero y fluvial con al menos 15 HAPs.

## Gestión y transporte de residuos

En 2012, se generaron alrededor de 81 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) en el África subsahariana. Se proyecta que para 2025, el volumen de RSU crecerá hasta 244 millones de toneladas. Una creciente demanda de equipo eléctrico y electrónico (a menudo con una vida útil corta), como son teléfonos móviles y computadoras usados, provoca un aumento de residuos electrónicos. Nigeria es uno de los principales receptores de residuos electrónicos de Asia y Europa. Además de los residuos generados, la región recibe vehículos al final de su vida útil, neumáticos usados y residuos electrónicos de países en otras regiones. La tasa de reciclaje promedio de los RSU en África es de alrededor del 4%.

Además de la generación de residuos dentro de la región, el envío de residuos desde otras regiones se suma a la pesada carga de contaminación asociada a los residuos en el África subsahariana.

Las implicaciones negativas para la salud humana de los residuos electrónicos se han ilustrado en un estudio que relaciona la concentración de contaminantes presentes en los niveles de sangre de 245 personas con la importación y procesamiento de residuos electrónicos en 16 países africanos. La mayoría de los participantes del África subsahariana procedían de África Occidental y África Central. Se descubrió que las personas, principalmente los niños, de los lugares en los que el procesamiento de residuos electrónicos constituye una actividad principal, se encuentran expuestos a niveles de oligoelementos como aluminio, arsénico, vanadio, cromo, mercurio y plomo que presentan un alto riesgo para su salud. Las áreas en las que se procesan los residuos electrónicos a través de la quema a cielo abierto, como el vertedero de residuos de Agbogbloshe en Ghana, han sido identificadas como fuentes de contaminación del suelo a gran escala.



Históricamente, una de las mayores fuentes de contaminación del suelo asociadas al transporte, fue la contaminación del suelo con plomo al borde de las carreteras por el uso de combustible con plomo. Aunque la reducción progresiva de los combustibles con plomo empezó hace casi cuarenta años, el progreso en el África subsahariana fue lento en comparación con el logrado en Europa, los Estados Unidos de América e incluso otros países en desarrollo.

Aunque ninguno de los países en África subsahariana utiliza ya combustibles con plomo, las emisiones vehiculares de zonas con alta densidad de tráfico se han relacionado con elevadas concentraciones de oligoelementos en los suelos urbanos, especialmente antimonio y cadmio.

### Actividades industriales

A través del Programa de identificación de emplazamientos tóxicos (TSIP, por sus siglas en inglés), el Instituto Pure Earth/Blacksmith ha identificado emplazamientos en el África subsahariana que están contaminados con oligoelementos. Estos incluyen arsénico, cadmio, cromo (tanto hexavalente como total), plomo, mercurio y uranio. Los emplazamientos con concentraciones tóxicas de plomo son los más frecuentes entre los lugares contaminados por oligoelementos. Los países en los que el TSIP ha detectado contaminación por plomo incluyen a Senegal, Kenya, la República Unida de Tanzania, Ghana, Ruanda, Madagascar, Uganda y Nigeria. Las altas concentraciones de plomo en el suelo tienen su origen en una amplia gama de actividades. Estas actividades incluyen reciclaje de baterías de plomo, transporte, fabricación de armas, curtidurías, plantas de tratamiento de aguas residuales, plantas de energía que utilizan carbón o petróleo, minería y procesamiento de minerales, fundidoras, talleres de reparación de automóviles y residuos médicos.

Dentro de las zonas residenciales puede encontrarse una plétora de pequeñas operaciones industriales, que van desde la limpieza en seco, el reciclaje de baterías de plomo y los talleres de mecánica de automóviles. Altos niveles de oligoelementos han sido documentados en el suelo y en la biota en torno a las fundiciones de metales. Aunque cada operación individual puede ser pequeña, en conjunto representan una fuente importante de contaminación del suelo.

El reciclaje informal de baterías usadas de plomo ácido constituye una fuente importante de plomo en el suelo. En una recicladora informal típica, la caja de plástico que sostiene los componentes de la batería se abre con un hacha de mano o un machete, y la solución de ácido sulfúrico que está dentro es vaciada al suelo o a un desagüe pluvial. Las placas de plomo se retiran y se colocan en un agujero en el suelo, que luego se llena de carbón y se enciende. El plomo fundido es posteriormente vaciado en lingoteras, se enfría y se vende de nuevo a los fabricantes de baterías. El proceso suele llevarse a cabo sin equipos de control de la contaminación ni supervisión reglamentaria.

### Agricultura

Las actividades agrícolas en la región también han sido una fuente de contaminación del suelo. Las sustancias químicas como los plaguicidas peligrosos, los contaminantes orgánicos persistentes y los productos que contienen oligoelementos como el plomo y el mercurio, todavía se usan en la región, en detrimento tanto de la salud ambiental como de la salud humana. Aunque el uso de estos productos químicos tóxicos está prohibido o controlado en los países desarrollados, su vertido ilegal en África supone un importante reto para la gestión de la contaminación ambiental.

El uso de plaguicidas por parte del sector agrícola se considera el factor que más contribuye a la contaminación del suelo. Se detectaron niveles significativos de endosulfán y DDT, ambos insecticidas organoclorados, en los suelos de las granjas estatales del valle de Awash en Etiopía y se atribuyen a las prácticas agrícolas históricas en la zona. En Burkina Faso, el endosulfán y el profenofos, un insecticida organofosforado, están presentes en el suelo de los campos agrícolas antiguos y recientemente utilizados para la producción de algodón.

Aunque el DDT ha sido prohibido para fines agrícolas en la región, se han otorgado exenciones a algunos países en virtud del Convenio de Estocolmo para continuar usando el DDT para el control del vector de la malaria. Desafortunadamente, a veces los suministros de DDT se escapan de la lucha contra la malaria y se venden a través de los mercados locales hacia el sector agrícola.

El enterramiento en el pasado de plaguicidas obsoletos es otra fuente de contaminación del suelo que también puede ser una fuente difusa de contaminación de las aguas subterráneas por infiltración. El Banco Mundial ha informado que, en el año 2013, se identificaron alrededor de 50 000 toneladas de plaguicidas obsoletos a lo largo del continente africano. El alcance de la contaminación por plaguicidas en África, incluidos los clasificados como POP, fue determinado por el Programa de Reservas de África de la FAO. Los países que tienen más de 1 000 toneladas de plaguicidas obsoletos incluyen a Túnez, la República Unida de Tanzania y Malí. Cuatro de los países de la región cuentan con reservas de estos plaguicidas superiores a 400 toneladas. Estos países son Rwanda, Côte d'Ivoire, el Congo y Benin. Los suelos contaminados con plaguicidas también han sido identificados por el TSIP. Los países en donde estos emplazamientos han sido identificados son Benin, Camerún, Etiopía, Ghana, Kenya, Senegal, Somalia y la República Unida de Tanzania.



# Acciones para confrontar la contaminación del suelo

## Gobernanza y marcos legales para confrontar la contaminación del suelo

### Convenios internacionales que regulan los contaminantes orgánicos persistentes y otras sustancias peligrosas

Aunque actualmente no existe ningún acuerdo internacional vinculante centrado específicamente en la prevención, el control y la remediación de la contaminación del suelo, una serie de convenios vinculantes apoyan parcialmente este objetivo.

El *Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación* se adoptó en 1989 y entró en vigor en mayo de 1992 (Convenio de Basilea, 2011). Los principales objetivos del Convenio son la disminución de la generación de desechos peligrosos y la promoción de la gestión ambientalmente racional de los desechos peligrosos, independientemente del lugar de eliminación; la restricción de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos, excepto cuando se considere que está en consonancia con los principios de la gestión ambientalmente racional; y la aplicación de un sistema regulatorio para los movimientos transfronterizos permisibles. Actualmente hay 188 partes en el Convenio de Basilea.

El *Convenio de Rotterdam para la Aplicación del Procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo a Ciertos Plaguicidas y Productos Químicos Peligrosos Objeto de Comercio Internacional* es un tratado multilateral para promover responsabilidades compartidas con respecto a la importación de productos químicos peligrosos (Convenio de Rotterdam, 2010). Los objetivos del Convenio son promover la responsabilidad compartida y los esfuerzos conjuntos de las Partes en la esfera del comercio internacional de ciertos productos químicos peligrosos a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente frente a posibles daños y contribuir a su utilización ambientalmente racional, facilitando el intercambio de información acerca de sus características, estableciendo un proceso nacional de adopción de decisiones sobre su importación y exportación y difundiendo esas decisiones a las Partes. El Convenio se adoptó en 1998 y entró en vigor en febrero de 2004. Actualmente hay 164 partes en el Convenio.

El *Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes* (firmado en 2001, y con efectos a partir de 2004) tiene como objetivo eliminar o reducir la producción y utilización de contaminantes orgánicos persistentes (POPs), que se caracterizan por

su persistencia en el medio ambiente, su resistencia a la degradación y su alta toxicidad (Convenio de Estocolmo, 2008). Así como prohibir la producción y utilización de los POPs establecidos, el Convenio también garantiza la gestión ambientalmente racional de reservas y desechos que consistan de, o estén contaminados por, POPs. El almacenamiento y eliminación inadecuados de POPs constituye una fuente importante de contaminación mundial del suelo. Actualmente hay 184 partes en el Convenio.

El *Convenio de Minamata sobre el Mercurio* es un tratado internacional para proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos adversos del mercurio (Convenio de Minamata sobre el Mercurio, 2019). El Convenio fue adoptado en 2013 y entró en vigor en agosto de 2017. Los aspectos más destacados del Convenio de Minamata incluyen una prohibición sobre nuevas minas de mercurio, la eliminación de las existentes, la reducción y eliminación progresiva del uso de mercurio en una serie de productos y procesos, medidas de control sobre emisiones al aire y vertidos al suelo y agua, y la reglamentación del sector informal de extracción artesanal y a pequeña escala del oro. El Convenio también aborda medidas para el almacenamiento provisional del mercurio y su eliminación una vez que se transforma en desecho, los emplazamientos contaminados por mercurio, así como temas de salud. Actualmente existen 129 partes en el Convenio.

El estado de adopción de estos convenios se resume en los capítulos regionales junto con cualquier otro acuerdo regional existente.

### Acuerdos internacionales voluntarios para confrontar la contaminación del suelo

La *Alianza Mundial por el Suelo* (AMS) se estableció en 2012 como un mecanismo para desarrollar una fuerte alianza interactiva, y una mejorada colaboración y sinergia de esfuerzos entre las partes interesadas (AMS, 2019). La AMS tiene el mandato de mejorar la gobernanza de los limitados recursos del suelo del planeta para garantizar suelos saludables y productivos para un mundo con seguridad alimentaria, así como apoyar otros servicios ecosistémicos esenciales, de acuerdo con el derecho soberano de cada Estado sobre sus recursos naturales. La AMS aborda todas las amenazas al suelo y busca, por un lado, mejorar el conocimiento y los datos e información disponibles para una toma de decisiones informada y, por otro, aumentar la concienciación de todas las partes interesadas, con el objetivo final de llevar a cabo acciones sobre el territorio dirigidas a la gestión sostenible del suelo y a su restauración y protección.

Las *Directrices voluntarias para la gestión sostenible de los suelos* (VGSSM, por sus siglas en inglés) aprobadas por el Consejo de la FAO en 2016 proporcionan recomendaciones técnicas y políticas para lograr una gestión sostenible del suelo (FAO, 2017). Las VGSSM identifican diez amenazas al funcionamiento y salud de suelo, incluida la contaminación del suelo, y proponen una serie de principios para minimizar y controlar estas amenazas. Se alienta a los países a que apliquen o refuercen reglamentos inclusivos que favorezcan la



gestión sostenible del suelo a fin de prevenir y minimizar la acumulación de contaminantes en el suelo, así como promover la información sobre el suelo mediante la realización de pruebas, la vigilancia y la evaluación de suelos potencialmente contaminados con el fin de reducir riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

El *Código Internacional de Conducta para el Uso y Manejo Sostenibles de los Fertilizantes* (Código para Fertilizantes) fue avalado por la Conferencia de la FAO en 2019, y proporciona un conjunto voluntario de prácticas que promueven el uso racional de los fertilizantes sintéticos y orgánicos (FAO, 2019a). El Código para Fertilizantes define roles, responsabilidades y acciones para evitar el uso inadecuado de los fertilizantes y sus posibles impactos en la salud humana y el medio ambiente. Alienta a los Miembros de la FAO a establecer normas, límites y directrices sobre contenidos nocivos de los contaminantes en los productos fertilizantes. También incluye disposiciones sobre el seguimiento, la capacitación, la investigación, el desarrollo y el acceso público a la información.

El *Código Internacional de Conducta para la Gestión de Plaguicidas* (Código para Plaguicidas) aprobado por los Miembros de la FAO en 2013, establece normas voluntarias de conducta para todas las partes interesadas que participan en el uso de plaguicidas para garantizar el uso racional de los plaguicidas (FAO y OMS, 2014). El Código para Plaguicidas tiene por objeto servir como base para los países que actualmente carecen de una legislación o tienen una legislación débil para regular o controlar la calidad e idoneidad de los productos plaguicidas. Las normas establecidas en el Código para Plaguicidas tienen como objetivo garantizar que los plaguicidas sean utilizados efectiva y eficientemente de una manera sostenible para minimizar los efectos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente, contribuyendo al mismo tiempo a la mejora sostenible de la agricultura.

El *Plan de Acción Mundial sobre la Resistencia a los Antimicrobianos* tiene como objetivo impedir y combatir la resistencia a los antimicrobianos, que socava la salud humana y animal, y obstaculiza los avances médicos para tratar efectivamente enfermedades infecciosas (OMS, 2015). Avalado en 2015 por la Asamblea de la OMS, el Plan de Acción establece cinco metas para combatir la resistencia a los antimicrobianos: aumentar la concienciación, incrementar la comprensión y el conocimiento de la resistencia a los antimicrobianos, reducir la incidencia de infecciones, optimizar el uso de medicinas antimicrobianas e incrementar la inversión en nuevos medicamentos. Al promover el uso racional de antibióticos y otros medicamentos veterinarios y con ello controlar el surgimiento de bacterias resistentes a los antimicrobianos en el ganado, se reduce significativamente la carga de residuos antibióticos y de las bacterias y genes con resistencia antimicrobiana liberados en el suelo a través de heces y orina, lo que contribuye a prevenir la contaminación del suelo proveniente de esas fuentes.

Fundado en 1963, el *Codex Alimentarius* establece normas directrices y códigos de prácticas alimentarios internacionales para contribuir a la seguridad y calidad

del comercio alimentario internacional (OMS y FAO, 2018). Aunque las normas del *Codex* y los textos relacionados son voluntarios y, para ser aplicables, deben ser transpuestos a las legislaciones nacionales, las normas del *Codex* a menudo sirven como fundamento para la legislación nacional. Actualmente, la Comisión del *Codex Alimentarius* tiene 189 Miembros, 188 Estados Miembros y una Organización Miembro, la Unión Europea. San Marino y Timor-Leste son los últimos países en unirse a la Comisión del *Codex Alimentarius*, en 2016 y 2018 respectivamente. La relevancia del *Codex* para la prevención de la contaminación del suelo radica principalmente en sus disposiciones sobre aditivos alimenticios, residuos de plaguicidas, y residuos de medicamentos veterinarios, contaminación de productos alimenticios, métodos de análisis y muestreo de contaminantes, y la inspección y certificación de importaciones y exportaciones.

Establecida en 2003, la *Iniciativa Internacional del Nitrógeno* (INI, por sus siglas en inglés) es una plataforma científico-política para responder a la creciente preocupación por la contaminación por nitrógeno (INI, 2017). La INI pretende “optimizar el papel beneficioso del nitrógeno en la producción sostenible de alimentos y minimizar los efectos negativos del nitrógeno en la salud humana y el medio ambiente derivados de la producción de alimentos y energía”. Para lograr esto, la iniciativa coordina esfuerzos regionales para mejorar y aumentar la concienciación en la gestión del nitrógeno. La INI no es una iniciativa oficial de las Naciones Unidas, pero está formada por científicos y expertos internacionales en la gestión de fertilizantes de nitrógeno.

### Marcos legales regionales que abordan la contaminación del suelo

Además de los acuerdos internacionales, existen otros acuerdos a nivel regional que merecen ser considerados. Aunque no se refieren específicamente a la contaminación del suelo, pretenden incidir en la prevención y el control de algunas de las más importantes fuentes de contaminantes.

Dentro del marco de la Asociación de Naciones del Asia Sudoriental (ASEAN, por sus siglas en inglés), se ha promovido la cooperación y coordinación medioambiental entre sus diez Estados miembros (Brunei Darussalam, Camboya, Indonesia, República Democrática Popular Lao, Malasia, Myanmar, Filipinas, Singapur, Tailandia y Viet Nam). La coordinación se centra en siete prioridades: sustancias químicas y residuos, ciudades sostenibles, conservación de la naturaleza, gestión del agua, medio ambiente costero, cambio climático y educación ambiental. Aunque ninguna de esas prioridades se enfoca específicamente en la contaminación del suelo, la mayoría de ellas pueden apoyar la prevención de la contaminación del suelo y ayudar a armonizar la respuesta de los países mediante el intercambio del conocimiento y la experiencia.

También existe colaboración regional de los países de Asia y el Pacífico para mitigar la contaminación del suelo impulsada por la Administración de Protección Ambiental de Taiwán (EPA Taiwán). El Grupo de trabajo Asia-Pacífico sobre remediación de la contaminación



de suelos y aguas subterráneas establecido en 2011 y que cuenta con los representantes de los Ministerios de Protección Ambiental de 12 países (Taiwán, China, República de Corea, Japón, Filipinas, Malasia, Tailandia, Viet Nam, Indonesia, Sri Lanka, India, Australia y Nueva Zelanda) tiene como objetivo sensibilizar y fomentar la cooperación bilateral entre los países para prevenir la contaminación de los suelos y aguas subterráneas.

Los Estados miembros de la Unión Económica Euroasiática, es decir la República de Armenia, la República de Belarús, la República de Kazajistán, la República Kirguisa y la Federación de Rusia, tienen varios acuerdos para controlar el movimiento de residuos peligrosos entre los países y garantizar la seguridad de los productos químicos que se van a importar.

La Comisión Europea ha lanzado recientemente el Pacto Verde de la Unión Europea, un ambicioso plan para impulsar el uso eficiente de los recursos mediante el paso a una economía limpia y circular, restaurar la biodiversidad y reducir la contaminación. Dentro del marco del Pacto Verde, deberá adoptarse para el año 2021, el plan de acción “Hacia una Contaminación Cero del aire, el agua y el suelo - construir un planeta sano para personas sanas”. Este Plan de Acción pretende mejorar la gobernanza de las políticas sobre contaminación, incluso a nivel internacional, centrándose especialmente en la mejora de la disponibilidad de datos y de los modelos existentes y en las nuevas tecnologías que permitirán obtener más datos. El Plan de Acción también abordará los aspectos internacionales del Plan de Contaminación Cero de la Unión Europea, como la diplomacia, la política comercial y el apoyo al desarrollo. El recién adoptado Pacto Verde complementará el conjunto de directivas existentes que regulan las principales fuentes de contaminación.

También se está desarrollando una agenda para extender el Pacto Verde a los Balcanes Occidentales. El Plan Económico y de Inversión de los Balcanes Occidentales tiene como objetivo estimular las economías de los estados de los Balcanes Occidentales y, al mismo tiempo, hacer que la región cumpla con las normas medioambientales y los objetivos climáticos de la Unión Europea.

El Convenio de Cartagena, adoptado por 21 países de América Latina y el Caribe, impone obligaciones para prevenir, reducir y controlar la contaminación. Aunque el Convenio se centra en gran medida en el medio ambiente marino, abarca muchas fuentes de contaminación marina, incluida la contaminación procedente de fuentes terrestres, al prohibir el vertido o la descarga de desechos y la eliminación o descargas costeras que causen contaminación. Otra contaminación procedente de fuentes terrestres incluye las aguas residuales, los plaguicidas, los metales pesados, las sustancias radiactivas, y los residuos sólidos, entre otros, que también pueden afectar a la conservación del suelo. El Protocolo relativo a la Contaminación Procedente de Fuentes y Actividades Terrestres incluye limitaciones regionales a los efluentes de aguas residuales nacionales y exige el desarrollo de planes para prevenir, reducir y controlar las fuentes agrícolas de contaminantes no puntuales.

Se han adoptado acuerdos regionales entre Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá, y México, para prevenir la importación y el tránsito de desechos peligrosos a Centroamérica desde terceros estados.

Los Estados Unidos de América y Canadá tienen una de las alianzas medioambientales más antiguas y eficaces del mundo. El Plan Conjunto de Canadá y los Estados Unidos de América de Contingencia contra la Contaminación en el Interior se centra en la aplicación de medidas para hacer frente a la contaminación del suelo y reducir los riesgos para la salud humana y el medio ambiente cuando se produce entre las fronteras de los dos países. Otros acuerdos importantes que se centran más en la calidad del agua abordan implícitamente la contaminación del suelo al exigir que se considere la contaminación del agua derivada de aportaciones provenientes de cuencas hidrográficas en tierras altas.

El Convenio de Bamako sobre la prohibición de la importación a África, la fiscalización de los movimientos transfronterizos y la gestión dentro de África de desechos peligrosos fue adoptado dentro del marco del Convenio de Basilea. Los principales objetivos del Convenio de Bamako son prohibir la importación de desechos potencialmente peligrosos, incluidos los radiactivos, de otras partes del mundo, y la gestión de los desechos que ya se encuentren en África. Sin embargo, su aceptación y aplicación fueron escasas, lo que dio lugar a la Declaración de Libreville sobre Salud y Medio Ambiente en África en 2008, promovida por la OMS. Esta declaración incluía el establecimiento de diferentes niveles de marco legislativo, la creación de capacidades para abordar los problemas, el inicio y la coordinación de la investigación aplicada. También se compromete a la aplicación efectiva y al establecimiento de un seguimiento y evaluación a nivel nacional.

### **Marcos legales nacionales que abordan la contaminación del suelo**

La existencia de marcos legales y la distribución de responsabilidades difieren de un país a otro. Pocos países tienen legislaciones específicas para prevenir, gestionar y remediar la contaminación del suelo. Muchos países, por el contrario, incluyen los aspectos de la gestión del suelo en la legislación ambiental, que suele ser muy general y no proporciona un marco adecuado para abordar las diferentes fuentes de contaminación del suelo.

Para la mayoría de los países, la prevención de la contaminación del suelo es prioritaria en la legislación y en la formulación de políticas. Sin embargo, como las fuentes de contaminación son variadas, la contaminación del suelo en sí misma no está definida ni reconocida legalmente y, en cambio, la mayoría de los países tienen una legislación relacionada con la gestión de los residuos urbanos e industriales y con los insumos y las prácticas agrícolas. Estas medidas parecen ser insuficientes para prevenir y controlar la contaminación del suelo ya que siguen siendo las principales fuentes de contaminantes.

Al no estar claramente definidas las actividades que contaminan el suelo, las oportunidades de desarrollar estrategias de gestión, planes de vigilancia, actividades de cumplimiento y ejecución son limitadas.

## Mejora de los conocimientos, la vigilancia y la presentación de informes

A pesar de la gran cantidad de información existente, todavía hay numerosas lagunas en el conocimiento por aclarar. Se necesita más investigación y recopilación de datos armonizados sobre la cantidad de emisiones contaminantes en el medio ambiente, su destino en el suelo y más allá, y la distribución espacial de los emplazamientos contaminados, con especial atención a los emplazamientos críticos que constituyen el mayor peligro para la salud humana y ambiental.

Es necesario mejorar los mecanismos para comunicar las causas, riesgos y acciones preventivas de la contaminación del suelo entre todas las partes interesadas, pero especialmente entre el público en general. Las acciones de la Alianza Mundial por el Suelo posteriores al Simposio Mundial sobre Contaminación del Suelo, y con motivo de la celebración del Día Mundial del Suelo en 2018, demostraron que hay un gran interés en este tema.

## Gestión de la contaminación del suelo

El enfoque de la gestión de los emplazamientos con suelos contaminados (que suponen un riesgo para la salud humana y el medio ambiente) es muy diferente del enfoque de los emplazamientos contaminados que no suponen un riesgo para la salud y el medio ambiente. Los emplazamientos contaminados deben aislarse del contacto humano y animal, y luego los niveles de los contaminantes deben reducirse por debajo del punto en el que causan daño a los organismos no objetivo. Esta reducción de niveles se llama remediación del suelo. Los emplazamientos contaminados que no suponen un riesgo para la salud y el medio ambiente se someterán a la remediación solo en contadas ocasiones; en cambio, puede ser necesario modificar la gestión del emplazamiento para minimizar el riesgo de daño a los organismos (Cachada, Rocha-Santos y Duarte, 2018).

Los costos de salvaguardar y eliminar un contaminante concentrado antes de que se haya filtrado son órdenes de magnitud menores que el costo de remediar el suelo después. El costo de la inacción para eliminar las existencias mundiales de contaminantes de suelos es inaceptable. Si se consideran la posibilidad de una degradación permanente del suelo, los riesgos para la salud pública y el medio ambiente, y el gasto y la complejidad de la remediación, evitar la contaminación de los suelos es una prioridad obvia.

### Identificación y evaluación de riesgos

La etapa inicial de la evaluación de los emplazamientos consiste en identificar los sitios en los que puede existir contaminación. Los emplazamientos pueden seleccionarse en función de un análisis histórico (para actividades pasadas) o en función del conocimiento sobre el emplazamiento de los accidentes. Después

de la investigación preliminar sobre el uso histórico del emplazamiento, se realiza una evaluación inicial para definir si los contaminantes están presentes y si representan un riesgo para el ambiente y la salud humana, es decir, distinguir entre contaminación del emplazamiento (presencia de contaminantes) y la polución (*pollution*, la cual supone un riesgo) del emplazamiento. En muchos casos se utilizan los valores guía de la contaminación del suelo. Se trata de normas genéricas de calidad del suelo en función de las vías y escenarios de exposición, y se han adoptado en muchos países para permitir la identificación de suelos contaminados (Carlson *et al.*, 2007).

La determinación del grado de contaminación y su potencial de daño se lleva a cabo en un marco de evaluación de riesgos. Las decisiones de gestión de riesgos para los suelos o sedimentos se centran en la identificación de las vías de exposición relevantes que suponen un riesgo para la salud humana o el medio ambiente y en el desarrollo de medidas correctivas adecuadas. Estas podrían incluir el tratamiento o la eliminación de las fuentes, o bien la interrupción de las vías de exposición, o ambas medidas. Los enfoques de evaluación de riesgos son herramientas para tomar decisiones políticas y técnicas con base científica y son similares en todo el mundo. Permiten distinguir los emplazamientos contaminados (*polluted*, los cuales suponen un riesgo) de los emplazamientos contaminados (que no suponen un riesgo), y de esta forma facilitar la selección de técnicas de gestión apropiadas.

### Gestión de emplazamientos contaminados

La contaminación del suelo suele ser el resultado de la propagación de contaminantes desde emplazamientos contaminados por erosión eólica o hídrica, el riego de suelos con aguas subterráneas o superficiales contaminadas, o el esparcimiento por la tierra de estiércoles o lodos de depuradora contaminados; todos estos se considerarían fuentes difusas de contaminación. También puede producirse por la dispersión de contaminantes por el viento desde una fuente puntual, como una fundición o una incineradora de residuos cerca de la fuente, el suelo puede estar contaminado, pero más lejos a favor del viento el suelo tiene niveles de contaminantes por debajo de los que se sabe causan daño a los organismos no objetivo.

La gestión de esos emplazamientos usualmente consiste en la adaptación a la presencia de los contaminantes y sigue los principios generales de la gestión sostenible de los suelos (GSS); los enfoques específicos se resumen en la sección 3.5 de las Directrices Voluntarias para la Gestión Sostenible del Suelo (FAO, 2017). Estos enfoques a menudo implican un cambio en el uso de la tierra en el emplazamiento contaminado, incluido un cambio en la selección de cultivo, por ejemplo, un cambio a los cultivos que no bioacumulan y biomagnifican el contaminante particular que ha sido detectado. Otro enfoque de gestión clave es reducir o eliminar la dispersión de contaminantes por erosión eólica o hídrica mediante la aplicación de medidas de conservación del suelo en el emplazamiento contaminado. Se pueden utilizar enfoques similares para reducir o eliminar la lixiviación de contaminantes a las aguas subterráneas, por ejemplo, cultivando plantas de raíces profundas con elevado uso de agua.



## Gestión de suelos contaminados

En general, cuando se detecta que el suelo está contaminado (es decir, cuando el nivel de contaminantes puede causar daño a los organismos no objetivo), debe aislarse para que no cause daños a las personas, los organismos o los sistemas acuáticos. La remediación del suelo (reduciendo la concentración del contaminante en el suelo) es un enfoque permanente para gestionar la contaminación. La remediación de los emplazamientos contaminados es un enfoque específico del emplazamiento que incluye la identificación, caracterización, evaluación de riesgos, y selección de tecnologías de remediación, y se centra principalmente en la contaminación de fuentes puntuales (Figura 18).

Si se confirma la contaminación (*pollution*) y las medidas de remediación son necesarias, el primer paso de la gestión será excluir a las personas y a los animales del emplazamiento usando cercado u otras barreras físicas y señalizaciones de alerta. Este paso debe ser apoyado con programas de comunicación para sensibilizar a la población sobre los peligros para ellos y sus animales de entrar al emplazamiento.

A continuación, debe realizarse una investigación detallada para determinar el alcance y las posibles medidas de remediación. Posteriormente, se definen y aplican las estrategias de gestión de riesgos y/o remediación (Aven, 2016).

Las técnicas de remediación pueden dividirse en dos grupos principales: remediación *in situ* (en el sitio) y *ex situ* (retirada del suelo contaminado para su tratamiento fuera del emplazamiento).

Las opciones disponibles de remediación incluyen tratamientos físicos, químicos y biológicos (por ejemplo, fitoremediación, Figura 19), y estas opciones ofrecen posibles soluciones técnicas para gran parte de la contaminación de suelos. Para ambas medidas, *in situ* y *ex situ*, el efecto neto sobre los contaminantes puede clasificarse como a) reducción de la concentración, b) reducción de la biodisponibilidad sin reducir la concentración, c) encapsulación del suelo contaminado en una matriz inerte, d) contención y e) eliminación. Después de la limpieza, es esencial tomar medidas para confirmar que se ha reducido el riesgo y que se ha controlado la fuente de contaminación.

En los casos donde no se eligió la remediación (por razones logísticas, económicas o políticas), la gestión de riesgos puede practicarse usando algunas estrategias. Recubrir el suelo contaminado con suelo limpio, una superficie dura u otro material de contención es una opción cuando el riesgo de contaminación de agua subterránea es muy bajo. Cuando el riesgo de contaminación de agua subterránea es más alto, se puede necesitar la instalación de una barrera impermeable por debajo del suelo contaminado.





## Etapas de la remediación de la contaminación de un emplazamiento

## Directrices del Marco Nacional de Recuperación

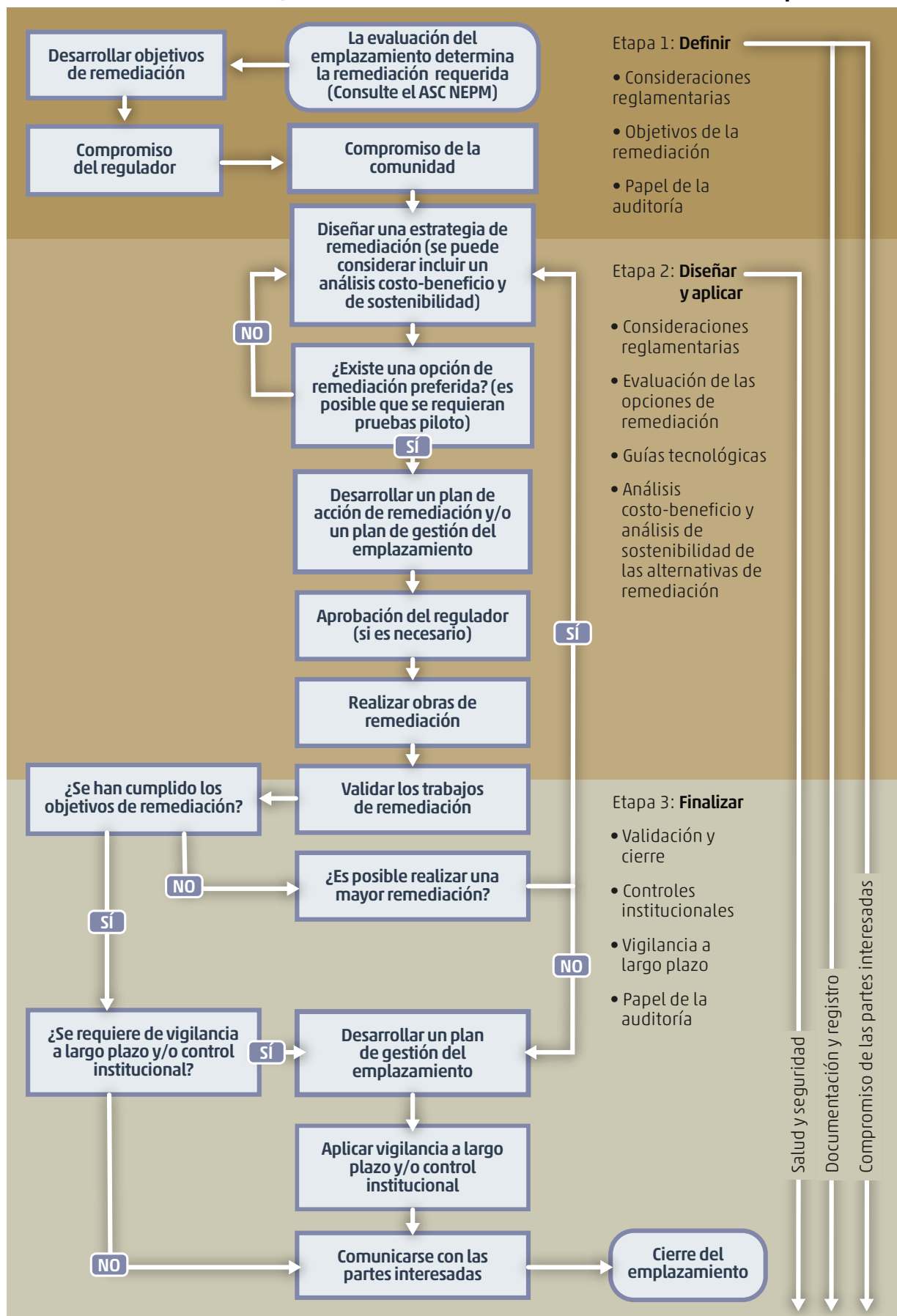


Figura 18. Etapas de la remediación de la contaminación de un emplazamiento según las directrices del Marco Nacional de Recuperación

Fuente: CRC CARE, 2018.

## Gestión de los suelos como fuente de contaminación

Un último aspecto de la gestión de la contaminación es reducir o eliminar la contaminación del agua que se produce como resultado de los productos químicos, principalmente agroquímicos, que pasan del suelo a las aguas superficiales y subterráneas. Este transporte de productos agroquímicos es una de las principales causas de contaminación del agua en todo el mundo, y afecta tanto al agua dulce como al medio ambiente marino. Tanto las *Directrices Voluntarias para la Gestión Sostenible de los Suelos* (FAO, 2017) como el *Código Internacional de Conducta para el Uso y Manejo de Fertilizantes* (FAO, 2019) esbozan técnicas específicas que pueden utilizarse para garantizar que los productos agroquímicos se agreguen al sistema del suelo de forma segura y sostenible, a fin de evitar la contaminación fuera del emplazamiento.

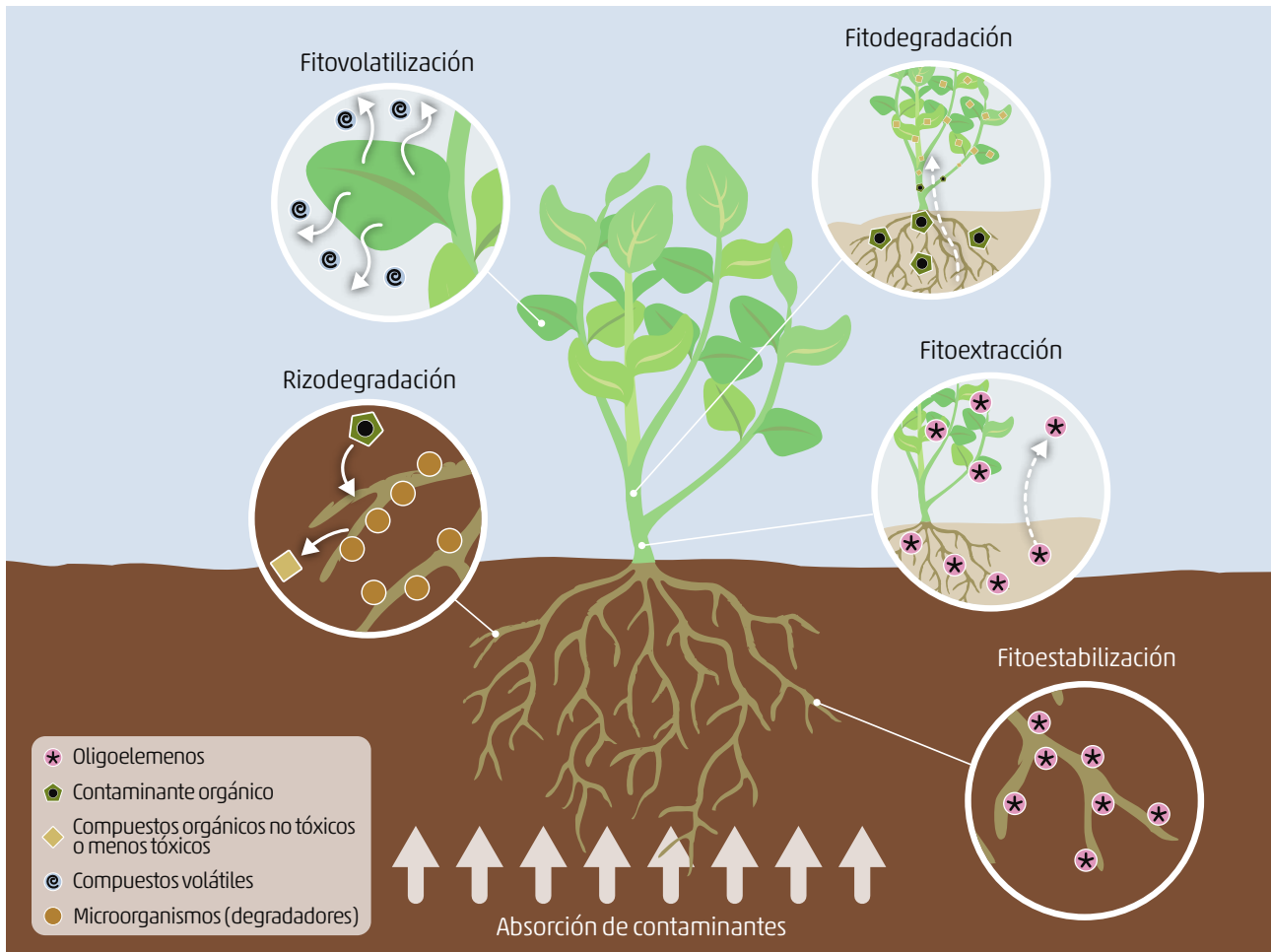


Figura 19. Mecanismos de las plantas para la absorción y estabilización de contaminantes orgánicos e inorgánicos

Fuente: adaptado de Gómez-Sagasti *et al.*, 2012; ITRC, 2009; Tangahu *et al.*, 2011.





# Acciones prioritarias para prevenir y detener la contaminación del suelo y para remediar los suelos contaminados

Sobre la base de las pruebas científicas reunidas para este informe, así como de los comentarios y debates de las múltiples partes interesadas que han participado en diferentes foros de la Alianza Mundial por el Suelo y del PNUMA, se definen a continuación una serie de recomendaciones clave para confrontar, de forma inminente y eficaz, la contaminación del suelo.

La primera y más importante acción contra la contaminación del suelo es la prevención. Todas las partes interesadas deben tomar medidas decisivas en la prevención de la contaminación del suelo, empezando por pequeñas acciones en las decisiones de consumo de las personas, y extendiéndose al desarrollo de políticas rigurosas e incentivos que fomenten la innovación industrial y la adopción de tecnologías ambientalmente racionales.

## Lagunas en el conocimiento

### De la evaluación a la vigilancia

- Armonizar los procedimientos operativos estándar para los métodos de laboratorio de análisis de los contaminantes del suelo y desarrollar niveles umbral de contaminación del suelo normalizados.
- Promover la inclusión de la contaminación del suelo en los datos y la información de los estudios edafológicos convencionales en los sistemas nacionales y mundiales de información sobre el suelo.
- Incrementar la inversión en investigación específica sobre contaminantes emergentes: detección, destino en el ambiente, evaluación de riesgos y remediación.
- Desarrollar y fortalecer el inventario y vigilancia de la contaminación puntual y difusa del suelo a nivel nacional, regional y mundial.
- Establecer y fortalecer los sistemas nacionales de biovigilancia y vigilancia epidemiológica para identificar, evaluar y controlar los daños y las enfermedades atribuibles a la contaminación del suelo y apoyar acciones preventivas.
- Promover la creación del Sistema Mundial de Información y Vigilancia de la Contaminación del Suelo.

### De la política a las acciones técnicas

- Hacer cumplir los acuerdos internacionales sobre productos químicos, contaminantes orgánicos persistentes, residuos y gestión del suelo sostenible (incluidas las Directrices Voluntarias para la Gestión Sostenible de los Suelos y los Códigos Internacionales de Conducta para el Uso y Manejo Sostenible de Fertilizantes y Plaguicidas).
- Establecer un sistema de incentivos y reconocimiento a los esfuerzos para detener la contaminación del suelo, incluido el etiquetado ecológico o el cumplimiento de esquemas como las Directrices voluntarias para

la gestión sostenible de los suelos, proporcionando un etiquetado a los productos agrícolas que apliquen esas herramientas/esquemas.

- Abogar por un compromiso mundial para prevenir, detener y remediar la contaminación del suelo en el marco de los planes de Contaminación Cero/Hacia un Planeta Libre de Contaminación, utilizando como base los esfuerzos y objetivos regionales como el Pacto Verde Europeo.
- Mejorar los reglamentos nacionales e internacionales sobre las emisiones de la industria y la minería, y promover procesos industriales respetuosos con el medio ambiente.
- Desarrollar y promover políticas sobre el “derecho a la reparación” y desincentivar la obsolescencia programada de materiales fabricados para reducir los residuos, incluidos los electrónicos.
- Desincentivar y reducir los artículos de un solo uso, especialmente en los envases de materiales y alimentos.
- Aplicar políticas adecuadas de recolección de desechos y gestión verde que promuevan el reciclaje y garanticen el tratamiento adecuado de diferentes tipos de residuos dentro y entre los países.
- Promover e incentivar el uso del transporte sostenible.
- Aplicar políticas destinadas a la gestión sostenible de los suelos agrícolas con énfasis especial en la reducción de la dependencia de los productos agroquímicos y el control de la calidad del agua de riego y de los residuos orgánicos.
- Desarrollar e incluir en los mecanismos nacionales de presentación de informes, los objetivos e indicadores de contaminación del suelo relacionados con el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- Ampliar las tecnologías sostenibles de gestión y remediación basadas en la naturaleza y ambientalmente racionales (por ejemplo, biorremediación).

## Concienciación y comunicación

- Lanzar una campaña mundial de concienciación sobre la contaminación del suelo dirigida al público en general para que entienda por qué la contaminación del suelo es importante para todos y cómo cada individuo puede ser parte de la solución.
- Fomentar las actividades de ciencia ciudadana y los observatorios ciudadanos para mejorar los sistemas de alerta temprana y la vigilancia comunitaria de la contaminación del suelo.
- Promover la concienciación pública sobre el consumo responsable y respetuoso con el medio ambiente y fomentar la separación en origen y la jerarquía de residuos, en particular el enfoque de las 4R (reducir, reutilizar, reciclar y recuperar) (Figura 20).
- Abogar por la inclusión de temas de salud del suelo y contaminación del suelo en las escuelas.

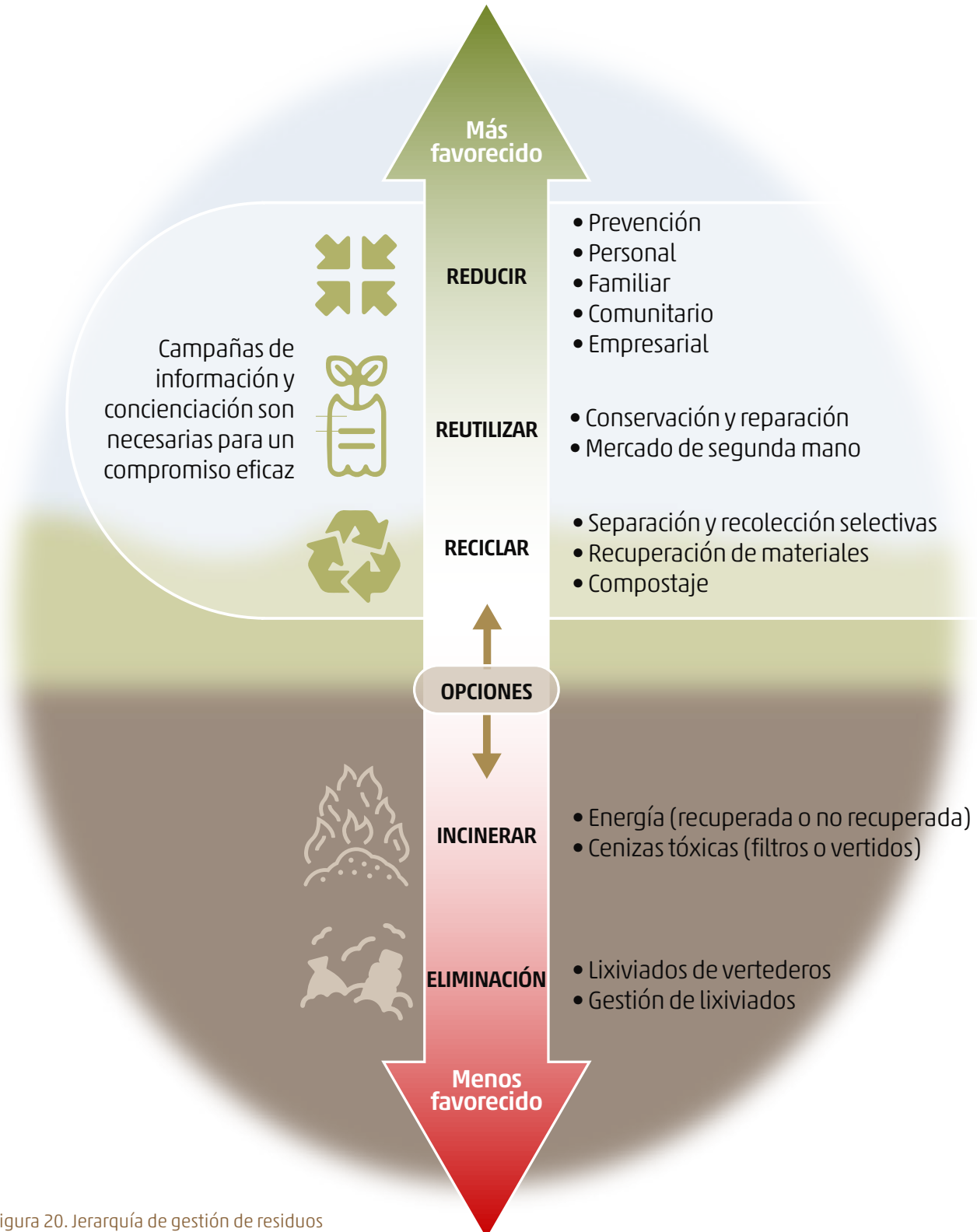


Figura 20. Jerarquía de gestión de residuos  
Fuente: adaptado de March y Vidal Rodrigo, 2017.



## Cooperación regional

- Facilitar la transferencia de conocimientos científicos a través de eventos internacionales y promover la publicación de información en fuentes de acceso público.
- Abogar por la transferencia de tecnología y la creación de capacidades cruzadas para todo el ciclo de la contaminación del suelo, desde la prevención hasta la detección, el seguimiento, la gestión y la remediación, desde las regiones y los países con grandes conocimientos y experiencia en contaminación del suelo hasta los países con menos o ninguna experiencia en el tema (Figura 21).
- Construir y reforzar las redes de vigilancia transfronteriza para prevenir, gestionar, y remediar la contaminación difusa.
- Establecer un programa mundial de formación para desarrollar capacidades sobre el ciclo completo de la contaminación del suelo.

### Obstáculos técnicos que impiden reducir la contaminación del suelo

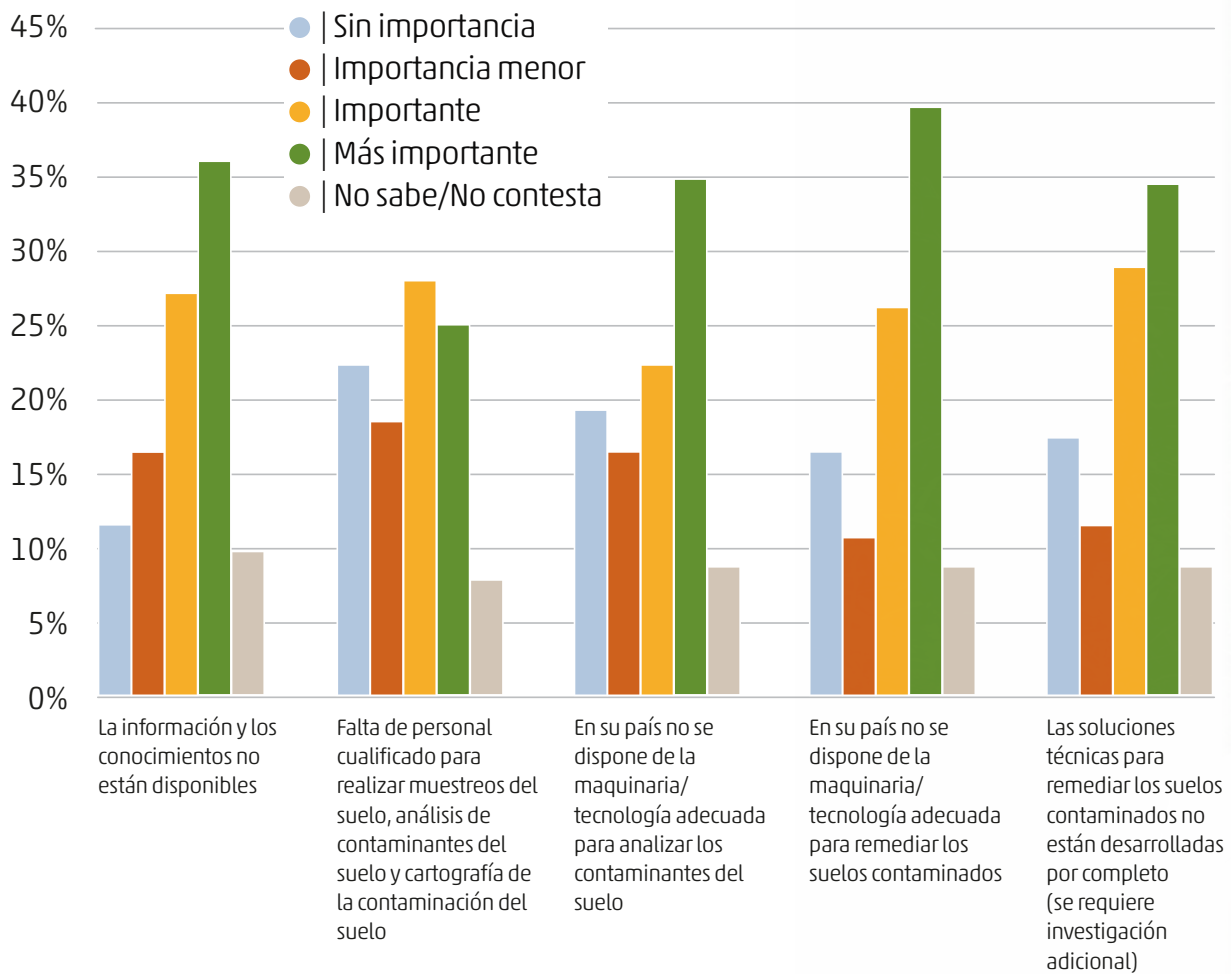


Figura 21. Dificultades técnicas para la reducción de la contaminación del suelo según la percepción de los expertos que han contribuido a la elaboración de este informe











# Referencias

- Al-Farsi, R., Ahmed, M., Al-Busaidi, A. y Choudri, B.S.** 2018. Assessing the presence of pharmaceuticals in soil and plants irrigated with treated wastewater in Oman. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 7(2): 165–172. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0202-1>
- Alimi, O.S., Farner Budarz, J., Hernandez, L.M. y Tufenkji, N.** 2018. Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport. *Environmental Science & Technology*, 52(4): 1704–1724. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05559>
- Alloway, B.J.** 2012. *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. Springer Science & Business Media.
- AMS.** 2019. Why the partnership? | Global Soil Partnership | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. En: *Global Soil Partnership* [en línea]. [Citada: 16 de abril de 2019]. <http://www.fao.org/global-soil-partnership/about/why-the-partnership/en/>
- ATSDR.** 2004. Interaction profile for Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylenes (BTEX), p. 154. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (disponible también en <https://www.atsdr.cdc.gov/interactionprofiles/ip-btex/ip05.pdf>).
- ATSDR.** 2018. ATSDR Toxic Substances Portal. En: *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* [en línea]. [Citada 22 septiembre 2020]. <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/index.asp>
- ATSDR.** 2020. Toxicological Profile for Chlorobenzene. p.132. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Department of Health & Human Services. (disponible también en <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp131.pdf>).
- Attina, T.M. y Trasande, L.** 2013. Economic Costs of Childhood Lead Exposure in Low- and Middle-Income Countries. *Environmental Health Perspectives*, 121(9): 1097–1102. <https://doi.org/10.1289/ehp.1206424>
- Aven, T.** 2016. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1): 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
- Banco Mundial.** 2020. Vulnerable employment, female (% of female employment) (modeled ILO estimate). En: *The World Bank Data* [en línea]. [Citada: 7 de febrero de 2021]. <https://data.worldbank.org/indicator/SL.EMP.VULN.FE.ZS?view=map>
- Baudrot, V., Fritsch, C., Perasso, A., Banerjee, M. y Raoul, F.** 2018. Effects of contaminants and trophic cascade regulation on food chain stability: Application to cadmium soil pollution on small mammals – Raptor systems. *Ecological Modelling*, 382: 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.05.002>
- Benjamin, S., Masai, E., Kamimura, N., Takahashi, K., Anderson, R.C. y Faisal, P.A.** 2017. Phthalates impact human health: Epidemiological evidences and plausible mechanism of action. *Journal of Hazardous Materials*, 340: 360–383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.036>
- Besis, A. y Samara, C.** 2012. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the indoor and outdoor environments – A review on occurrence and human exposure. *Environmental Pollution*, 169: 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.04.009>
- Bonner, M.R. y Alavanja, M.C.R.** 2017. Pesticides, human health, and food security. *Food and Energy Security*, 6(3): 89–93. <https://doi.org/10.1002/fes3.112>
- Borgå, K.** 2013. Ecotoxicology: Bioaccumulation. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, p. B978012409548900765X. Elsevier. (disponible también en <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012409548900765X>).
- Boxall, A.B.A., Rudd, M.A., Brooks, B.W., Caldwell, D.J., Choi, Hickmann Silke, Innes Elizabeth, Ostapuk Kim, Staveley Jane P., Verslycke Tim, Ankley Gerald T., Beazley Karen F., Belanger Scott E., Berninger Jason P., Carriquiriborde Pedro, Coors Anja, DeLeo Paul C., Dyer Scott D., Ericson Jon F., Gagné François, Giesy John P., Gouin Todd, Hallstrom Lars, Karlsson Maja V., Larsson D. G. Joakim, Lazorchak James M., Mastrocco Frank, McLaughlin Alison, McMaster Mark E., Meyerhoff Roger D., Moore Roberta, Parrott Joanne L., Snape Jason R., Murray-Smith Richard, Servos Mark R., Sibley Paul K., Straub Jürg Oliver, Szabo Nora D., Topp Edward, Tetreault Gerald R., Trudeau Vance L., y Van Der Kraak Glen.** 2012. Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Environment: What Are the Big Questions? *Environmental Health Perspectives*, 120(9): 1221–1229. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104477>
- Brusseau, M.L., Anderson, R.H. y Guo, B.** 2020. PFAS concentrations in soils: Background levels versus contaminated sites. *Science of The Total Environment*, 740: 140017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140017>
- Cachada, A., Rocha-Santos, T. y Duarte, A.C.** 2018. Soil and Pollution: An introduction to the Main Issues. En A.C. Duarte, A. Cachada y T. Rocha-Santos, dirs. *Soil pollution: from monitoring to remediation*, pp. 1–23. Londres, Reino Unido. Academic Press, una impresión de Elsevier.
- Campanale, Massarelli, Savino, Locaputo, y Uricchio.** 2020. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4): 1212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Carlou, C., Swartjes, F., European Commission, Joint Research Centre, e Institute for Environment and Sustainability.** 2007. *Derivation methods of soil screening values in Europe a review of national procedures towards harmonisation*. M. D'Alessandro, dir. Luxembourg, Publications Office.
- Carpenter, D.O.** 2015. Exposure to and health effects of volatile PCBs. *Reviews on Environmental Health*, 30(2): 81–92. <https://doi.org/10.1515/revh-2014-0074>
- Carré, F., Caudeville, J., Bonnard, R., Bert, V., Boucard, P. y Ramel, M.** 2017. Soil Contamination and Human Health: A Major Challenge for Global Soil Security. In D.J. Field, C.L.S. Morgan & A.B. McBratney, dirs. *Global Soil Security*, pp. 275–295. Progress in Soil Science. Cham, Springer International Publishing. (disponible también en [https://doi.org/10.1007/978-3-319-43394-3\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-43394-3_25)).

- CEPAL. 2018. Estado de la situación de la minería en América Latina y el Caribe: desafíos y oportunidades para un desarrollo más sostenible. Ponencia presentada en la IX Conferencia Anual de Ministerios de Minería de las Américas CAMMA, 20 de noviembre de 2018, Lima, Perú. [https://www.cepal.org/sites/default/files/presentation/files/181116\\_extendidadfinalconferencia\\_a\\_los\\_ministros\\_mineria\\_lima.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/presentation/files/181116_extendidadfinalconferencia_a_los_ministros_mineria_lima.pdf)
- Chapman, P.M. 2007. Determining when contamination is pollution – Weight of evidence determinations for sediments and effluents. *Environment International*, 33(4): 492–501. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.09.001>
- Chatterjee, S., Deb, U., Datta, S., Walther, C. y Gupta, D.K. 2017. Common explosives (TNT, RDX, HMX) and their fate in the environment: Emphasizing bioremediation. *Chemosphere*, 184: 438–451. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.008>
- Cicin-Sain, B., Balgos, M., Appiott, J., Wowk, K. y Hamon, G. 2011. Oceans at Rio+20: how well are we doing on the major ocean commitments from the 1992 earth summit and the 2002 world summit on sustainable development? p. 60. Global Ocean Forum. (disponible también en <https://www.undp.org/content/dam/undp/library/Environment%20and%20Energy/Water%20and%20Ocean%20Governance/OceansatRio+20ReportSummaryforDecisionMakersOct102011.pdf>).
- Cipullo, S., Prpich, G., Campo, P. y Coulon, F. 2018. Assessing bioavailability of complex chemical mixtures in contaminated soils: Progress made and research needs. *The Science of the Total Environment*, 615: 708–723. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.321>
- Convenio de Basilea. 2011. *Basel Convention > The Convention > Overview* [en línea]. [Citada: 26 de diciembre de 2019]. <http://www.basel.int/TheConvention/Overview/tabid/1271/Default.aspx>
- Convenio de Estocolmo. 2008. The Stockholm Convention Overview. En: *Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants* [en línea]. [Citada: 7 de noviembre de 2019]. <http://chm.pops.int/TheConvention/Overview/History/Overview/tabid/3549/Default.aspx>
- Convenio de Minamata sobre el Mercurio. 2019. *Minamata Convention on Mercury. Text and Annexes* [en línea]. [Citada: 26 de diciembre de 2019]. <http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/Booklets/COP3-version/Minamata-Convention-booklet-Sep2019-EN.pdf>
- Convenio de Rotterdam. 2010. *Rotterdam Convention* [en línea]. [Citada: 26 de diciembre de 2019]. <http://www.pic.int/TheConvention/Overview/tabid/1044/language/en-US/Default.aspx>
- Cosme, N., Mayorga, E. y Hauschild, M.Z. 2018. Spatially explicit fate factors of waterborne nitrogen emissions at the global scale. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(6): 1286–1296. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1349-0>
- CRC CARE. 2018. Guideline on performing remediation options assessment. [Citada: 10 de junio de 2020]. [https://www.crcare.com/files/dmfile/GuidelineonconductingROA\\_Rev2.pdf](https://www.crcare.com/files/dmfile/GuidelineonconductingROA_Rev2.pdf)
- Darmendrail, D., Cerdan, O., Gobin, A., Bouzit, M., Blanchard, F. y Siegele, B. 2004. Assessing the Economic Impacts of Soil Degradation
- Death, C.E., Griffiths, S.R. y Story, P.G. 2019. Terrestrial vertebrate toxicology in Australia: An overview of wildlife research. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 11: 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.07.001>
- Ding, Y. 2019. Heavy metal pollution and transboundary issues in ASEAN countries. *Water Policy*, 21(5): 1096–1106. <https://doi.org/10.2166/wp.2019.003>
- Drouillard, K.G. 2008. Biomagnification. En S.E. Jørgensen & B. Fath, dirs. *Encyclopedia of Ecology | ScienceDirect*, pp. 441–448. Elsevier. (disponible también en <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780080454054/encyclopedia-of-ecology>).
- Drwal, E., Rak, A. y Gregoraszczyk, E.L. 2019. Review: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)—Action on placental function and health risks in future life of newborns. *Toxicology*, 411: 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2018.10.003>
- ECB-JRC. 2006. European Union Risk Assessment Report: phenol. p. 240. No. EUR 22522 EN/1. European Chemical Bureau – Joint Research Centre. (disponible también en <https://echa.europa.eu/documents/10162/1ca68f98-878f-4cf6-914a-9f21e9ad2234>).
- Enciclopedia Británica. 2020. The nitrogen cycle. Definition & Steps. En: *Encyclopedia Britannica* [en línea]. [Citada: 1 de abril de 2020]. <https://www.britannica.com/science/nitrogen-cycle>
- Eunomia. 2016. Plastics in the Marine Environment. p.13. United Kingdom, Eunomia Research & Consulting. (disponible también en <https://www.eunomia.co.uk/reports-tools/plastics-in-the-marine-environment/>).
- FAO. 2017. Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [Citada: 16 de enero de 2019]. <http://www.fao.org/3/i6874en/i6874EN.pdf>
- FAO. 2018a. Be the solution to soil pollution. Outcome document of the Global Symposium on Soil Pollution. p. 32. Roma, Italia, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (disponible también en <http://www.fao.org/3/ca0362en/CA0362EN.pdf>).
- FAO. 2018b. *Proceedings of the Global Symposium on Soil Pollution 2018*. Roma, Italia, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 977 pp. (disponible también en <http://www.fao.org/3/CA1087EN/ca1087en.pdf>).
- FAO. 2019a. The International Code of Conduct for the Sustainable Use and Management of Fertilizers. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/mz476en/mz476en.pdf>
- FAO. 2019b. The International Code of Conduct for the Sustainable Use and Management of Fertilizers. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/mz476en/mz476en.pdf>
- FAO y GTIS. 2015. *Status of the world's soil resources (SWSR): Main Report*. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Grupo técnico intergubernamental del suelo.
- FAO y GTIS. 2017. Global assessment of the impact of plant protection products on soil functions and soil ecosystems. p. 40. Roma, Italia, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (disponible también en <http://www.fao.org/3/i8168en/i8168EN.pdf>).



- FAO y OMS. 2014. *The international code of conduct on pesticide management*. Roma, Inter-Organization Programme for the Sound Management of Chemicals: Organización Mundial de la Salud y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 37 pp.
- Galbraith, D., Gross, S.A. y Paustenbach, D. 2010. Benzene and human health: A historical review and appraisal of associations with various diseases. *Critical Reviews in Toxicology*, 40(sup2): 1–46. <https://doi.org/10.3109/10408444.2010.508162>
- Ge, J., Cui, K., Yan, H., Li, Y., Chai, Y., Liu, X., Cheng, J. y Yu, X. 2017. Uptake and translocation of imidacloprid, thiamethoxam and difenoconazole in rice plants. *Environmental Pollution*, 226: 479–485. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.043>
- Gómez-Sagasti, M.T., Alkorta, I., Becerril, J.M., Epelde, L., Anza, M. y Garbisu, C. 2012. Microbial Monitoring of the Recovery of Soil Quality During Heavy Metal Phytoremediation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(6): 3249–3262. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1106-8>
- Gupta, N., Yadav, K.K., Kumar, V., Kumar, S., Chadd, R.P. y Kumar, A. 2019. Trace elements in soil-vegetables interface: Translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration - A review. *Science of The Total Environment*, 651: 2927–2942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.047>
- Gupta, P.K. 2016. Chapter 13 - Genotoxicity. En P.K. Gupta, dir. *Fundamentals of Toxicology*, pp. 151–164. Academic Press. (disponible también en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128054260000135>).
- Harmsen, J. 2007. Measuring bioavailability: from a scientific approach to standard methods. *Journal of Environmental Quality*, 36(5): 1420–1428. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0492>
- Hilton, F.G. 2006. Poverty and pollution abatement: Evidence from lead phase-out. *Ecological Economics*, 56(1): 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.01.020>
- Huerta-Lwanga, E., Vega, J.M., Quej, V.K., de los Angeles Chi, J., del Cid, L.S., Chi, C., Segura, G.E., Gertsen, H., Salánki, T. y van der Ploeg, M. 2017. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports*, 7(1): 14071.
- Hurley, R.R. y Nizzetto, L. 2018. Fate and occurrence of micro(nano)plastics in soils: Knowledge gaps and possible risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1: 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.006>
- Hwang, J.-I., Zimmerman, A.R. y Kim, J.-E. 2018. Bio-concentration factor-based management of soil pesticide residues: Endosulfan uptake by carrot and potato plants. *Science of The Total Environment*, 627: 514–522. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.208>
- INI. 2017. The International Nitrogen Initiative. [en línea]. [Citada: 9 de junio de 2020]. <https://initrogen.org/content/about-ini>
- IPCC. 2014. *Climate change 2014: synthesis report*. Core Writing Team, R.K. Pachauri & L. Mayer, dirs. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza, IPCC. 151 pp. (disponible también en [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf)).
- IPCC. 2019. Special Report on Climate Change and Land. Suiza, United Nations' Intergovernmental Panel on Climate Change. (disponible también en <https://www.ipcc.ch/srcl/chapter/chapter-4/>).
- IPCS. 2002. *Global assessment of the state-of-the-science of endocrine disruptors*. No. WHO/PCS/EDC/02.2. International Programme on Chemical Safety, Organización Mundial de la Salud. 180 pp. (disponible también en [https://www.who.int/ipcs/publications/new\\_issues/endocrine\\_disruptors/en/](https://www.who.int/ipcs/publications/new_issues/endocrine_disruptors/en/)).
- ISO. 2008. ISO/TS 27687:2008. Nanotechnologies- Terminology and definitions for nano-objects-Nanoparticle, nanofibre and nanoplate. Organización Internacional de Normalización. [Citada: 28 de diciembre de 2020]. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/04/42/44278.html>
- ISO. 2015. ISO 11074:2015. [Citada: 14 de octubre de 2019]. <http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/05/92/59259.html>
- ISO. 2016. ISO 18311:2016. [Citada: 14 de octubre de 2019]. <http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/21/62102.html>
- ITRC. 2009. Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance and Decision Trees, Revised. p. 204. Technical/ Regulatory Guidance. The Interstate Technology & Regulatory Council. (disponible también en <https://itrcweb.org/GuidanceDocuments/PHYTO-3.pdf>).
- ITRC. 2020. History and Use of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). Interstate Technology Regulatory Council (ITRC). [Citada: 11 de septiembre de 2020]. [https://pfas-1.itrcweb.org/fact\\_sheets\\_page/PFAS\\_Fact\\_Sheet\\_History\\_and\\_Use\\_April2020.pdf](https://pfas-1.itrcweb.org/fact_sheets_page/PFAS_Fact_Sheet_History_and_Use_April2020.pdf)
- Kabata-Pendias, A. y Pendias, H. 2001. *Trace elements in soils and plants*. 3rd ed edition. Boca Raton, Fla, CRC Press. 413 pp.
- Kazan-Allen, L. 2019. Current Asbestos Bans. En: *International Ban Asbestos Secretariat* [en línea]. [Citada: 27 de octubre de 2020]. [http://www.ibasecretariat.org/alpha\\_ban\\_list.php](http://www.ibasecretariat.org/alpha_ban_list.php)
- Kim, K.-H., Kabir, E. y Jahan, S.A. 2017. Exposure to pesticides and the associated human health effects. *Science of The Total Environment*, 575: 525–535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.009>
- Kim, R.-Y., Yoon, J.-K., Kim, T.-S., Yang, J.E., Owens, G. y Kim, K.-R. 2015. Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation—a critical review. *Environmental Geochemistry and Health*, 37(6): 1041–1061. <https://doi.org/10.1007/s10653-015-9695-y>
- Klaassen, C.D., Casarett, L.J. y Doull, J., dirs. 2013. *Casarett and Doull's toxicology: the basic science of poisons*. 8th ed edition. Nueva York, McGraw-Hill Education. 1454 pp.
- Klocke, C. y Lein, P.J. 2020. Evidence Implicating Non-Dioxin-Like Congeners as the Key Mediators of Polychlorinated Biphenyl (PCB) Developmental Neurotoxicity. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(3). <https://doi.org/10.3390/ijms21031013>
- Knutsen, H.K., Alexander, J., Barregård, L., Bignami, M., Brüschweiler, B., Ceccatelli, S., Cottrill, B., Dinovi, M., Edler, L., Grasl-Kraupp, B., Hogstrand, C., Nebbia, C.S., Oswald, I.P., Petersen, A., Rose, M., Roudot, A.-C., Schwerdtle, T., Vleminckx, C., Vollmer, G., Wallace, H., Fürst, P., Håkansson, H., Halldorsson, T., Lundebye,

- A.- K., Pohjanvirta, R., Rylander, L., Smith, A., Loveren, H. van, Waalkens-Berendsen, I., Zeilmaker, M., Binaglia, M., Ruiz, J.Á.G., Horváth, Z., Christoph, E., Ciccolallo, L., Bordajandi, L.R., Steinkellner, H. y Hoogenboom, L. (Ron). 2018. Risk for animal and human health related to the presence of dioxins and dioxin-like PCBs in feed and food. *EFSA Journal*, 16(11): e05333. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5333>
- Kok, H., Papendick, R.I. y Saxton, K.E. 2009. STEEP: Impact of long-term conservation farming research and education in Pacific Northwest wheatlands. *Journal of Soil and Water Conservation*, 64(4): 253–264. <https://doi.org/10.2489/jswc.64.4.253>
- Korkina, I.N. y Vorobeichik, E.L. 2018. Humus Index as an indicator of the topsoil response to the impacts of industrial pollution. *Applied Soil Ecology*, 123: 455–463. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.025>
- Kowalczyk, J., Numata, J., Zimmermann, B., Klinger, R., Habedank, F., Just, P., Schafft, H. y Lahrssen-Wiederholt, M. 2018. Suitability of Wild Boar (*Sus scrofa*) as a Bioindicator for Environmental Pollution with Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorooctanesulfonic Acid (PFOS). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 75(4): 594–606. <https://doi.org/10.1007/s00244-018-0552-8>
- Kozlov, M.V. y Zvereva, E.L. 2011. A second life for old data: Global patterns in pollution ecology revealed from published observational studies. *Environmental Pollution*, 159(5): 1067–1075. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.028>
- Kozlov, M.V. y Zvereva, E.L. 2015. Decomposition of birch leaves in heavily polluted industrial barrens: relative importance of leaf quality and site of exposure. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(13): 9943–9950. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4165-8>
- Kuennen, J., Pomar-Portillo, V., Vilchez, A., Visschedijk, A., Gon, H.D. van der, Vázquez-Campos, S., Nowack, B. y Adam, V. 2020. Inventory of country-specific emissions of engineered nanomaterials throughout the life cycle. *Environmental Science: Nano*, 7(12): 3824–3839. <https://doi.org/10.1039/D0EN00422G>
- Landrigan, P.J., Fuller, R., Acosta, N.J.R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N. (Nil), Baldé, A.B., Bertollini, R., Bose-O'Reilly, S., Boufford, J.I., Breyse, P.N., Chiles, T., Mahidol, C., Coll-Seck, A.M., Cropper, M.L., Fobil, J., Fuster, V., Greenstone, M., Haines, A., Hanrahan, D., Hunter, D., Khare, M., Krupnick, A., Lanphear, B., Lohani, B., Martin, K., Mathiasen, K.V., McTeer, M.A., Murray, C.J.L., Ndahimananjara, J.D., Perera, F., Potočnik, J., Preker, A.S., Ramesh, J., Rockström, J., Salinas, C., Samson, L.D., Sandilya, K., Sly, P.D., Smith, K.R., Steiner, A., Stewart, R.B., Suk, W.A., Schayck, O.C.P. van, Yadama, G.N., Yumkella, K. y Zhong, M. 2018. The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, 391(10119): 462–512. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0)
- Lehnert, N., Coruzzi, G., Hegg, E., Seefeldt, L. y Stein, L. 2015. Feeding the world in the 21st Century: Grand challenges in the nitrogen cycle. p. 40. Arlington, VA, National Science Foundation. (disponible también en [https://www.nsf.gov/mps/che/workshops/nsf\\_nitrogen\\_report\\_int.pdf](https://www.nsf.gov/mps/che/workshops/nsf_nitrogen_report_int.pdf)).
- Li, W.C., Tse, H.F. y Fok, L. 2016. Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. *Science of The Total Environment*, 566–567: 333–349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.084>
- Lima, D.R.S., Bezerra, M.L.S., Neves, E.B. y Moreira, F.R. 2011. Impact of ammunition and military explosives on human health and the environment. *Reviews on Environmental Health*, 26(2): 101–110. <https://doi.org/10.1515/reveh.2011.014>
- Mackie, A. y Hašič, I. 2019. The distributional aspects of environmental quality and environmental policies: Opportunities for individuals and households. p. 34. OECD Green Growth Papers No. 2019/02. Environment Directorate, OECD. (disponible también en [https://www.oecd-ilibrary.org/environment/the-distributional-aspects-of-environmental-quality-and-environmental-policies\\_e0939b52-en](https://www.oecd-ilibrary.org/environment/the-distributional-aspects-of-environmental-quality-and-environmental-policies_e0939b52-en)).
- March, J. y Vidal Rodrigo, N. 2017. Waste hierarchy. Wikipedia. [Citada 11 de septiembre de 2020]. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Waste\\_hierarchy&oldid=946221573](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Waste_hierarchy&oldid=946221573)
- Miranda, C.D., Godoy, F.A. y Lee, M.R. 2018. Current status of the use of antibiotics and the antimicrobial resistance in the Chilean salmon farms. *Frontiers in Microbiology*, 9(JUN): 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01284>
- Ng, E.-L., Huerta Lwanga, E., Eldridge, S.M., Johnston, P., Hu, H.-W., Geissen, V. y Chen, D. 2018. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment*, 627: 1377–1388. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>
- Ng, J.C., Juhasz, A., Smith, E. y Naidu, R. 2015. Assessing the bioavailability and bioaccessibility of metals and metalloids. *Environmental Science and Pollution Research International*, 22(12): 8802–8825. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1820-9>
- Nič, M., Jirát, J., Košata, B., Jenkins, A. y McNaught, A., dirs. 2009. *IUPAC Compendium of Chemical Terminology: Gold Book*. 2.1.0 edition. Research Triangle Park, NC, IUPAC. (disponible también en <http://goldbook.iupac.org>).
- Nizzetto, L., Futter, M. y Langaas, S. 2016. Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin? *Environmental Science & Technology*, 50(20): 10777–10779. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140>
- OMS. 2015. Global Action Plan on Antimicrobial Resistance. Organización Mundial de la Salud. [Citada: 9 de junio de 2020]. [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/193736/9789241509763\\_eng.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/193736/9789241509763_eng.pdf?sequence=1)
- OMS. 2016. Dioxins and their effects on human health. En: *WHO Factsheets* [en línea]. [Citada: 17 de diciembre de 2020]. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/dioxins-and-their-effects-on-human-health>
- OMS. 2017. Mercury and health. En: *Organización Mundial de la Salud* [en línea]. [Citada 22 septiembre 2020]. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
- OMS. 2019. Asbestos. En: *International Programme on Chemical Safety* [en línea]. [Citada: 1 de diciembre de 2020]. [http://www.who.int/ipcs/assessment/public\\_health/asbestos/en/](http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/asbestos/en/)
- OMS. 2020. *Water-related diseases: Arsenicosis* [en línea]. [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/diseases-risks/diseases/arsenicosis/en/](https://www.who.int/water_sanitation_health/diseases-risks/diseases/arsenicosis/en/)



- OMS y FAO.** 2018. *Codex Alimentarius: understanding Codex*. 5th edition. Roma, Italia, Organización Mundial de la Salud y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 52 pp. (disponible también en <http://www.fao.org/3/ca1176en/CA1176EN.pdf>).
- ONU.** 2020. Map of the World. Naciones Unidas. [Citada: 27 de marzo de 2021]. <https://www.un.org/geospatial/file/3420/download>
- Naciones Unidas, dir.** 2011. *Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals: GHS*. 4th rev. ed edition. Naciones Unidas, Nueva York, Naciones Unidas. 561 pp. (disponible también en [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/publi/ghs/ghs\\_rev04/English/ST-SG-AC10-30-Rev4c.pdf](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/publi/ghs/ghs_rev04/English/ST-SG-AC10-30-Rev4c.pdf)).
- Pasetto, R., Mattioli, B. y Marsili, D.** 2019. Environmental Justice in Industrially Contaminated Sites. A Review of Scientific Evidence in the WHO European Region. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/ijerph16060998>
- Pereira, L.C., de Souza, A.O., Bernardes, M.F.F., Pazin, M., Tasso, M.J., Pereira, P.H. y Dorta, D.J.** 2015. A perspective on the potential risks of emerging contaminants to human and environmental health. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(18): 13800–13823. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4896-6>
- Pietrojusti, A., Stockmann-Juvala, H., Lucaroni, F. y Savolainen, K.** 2018. Nanomaterial exposure, toxicity, and impact on human health. *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 10(5): e1513. <https://doi.org/10.1002/wnan.1513>
- PNUMA.** 2017. Resolution 3/6. Managing soil pollution to achieve sustainable development. [Citada: 5 de abril de 2019]. <https://papersmart.unon.org/resolution/uploads/k1800204.english.pdf>
- Prata, J.C., da Costa, J.P., Lopes, I., Duarte, A.C. y Rocha-Santos, T.** 2020. Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of The Total Environment*, 702: 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- Prüss-Ustün, A., Wolf, J., Corvalán, C., Bos, R. y Neira, M.** 2016. Preventing disease through healthy environments. A global assessment of the burden disease from environmental risk. p. 176. Ginebra, Suiza, Organización Mundial de la Salud. (disponible también en [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/204585/9789241565196\\_eng.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/204585/9789241565196_eng.pdf?sequence=1)).
- Pure Earth.** 2020. Toxic Sites Identification Program (TSIP). En: *Pure Earth* [en línea]. [Citada 7 de septiembre de 2020]. <https://www.pureearth.org/projects/toxic-sites-identification-program-tsip/>
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Nottarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M.C.A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M. y Giorgini, E.** 2021. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146: 106274. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Reimann, C. y Garrett, R.G.** 2005. Geochemical background—concept and reality. *Science of The Total Environment*, 350(1–3): 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.047>
- Rodríguez Eugenio, N., McLaughlin, M.J. y Pennock, D.** 2018. *Soil pollution: a hidden reality*. Roma, Italia, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 156 pp.
- Semple, K.T., Doick, K.J., Jones, K.C., Burauel, P., Craven, A. y Harms, H.** 2004. Defining bioavailability and bioaccessibility of contaminated soil and sediment is complicated. *Environmental Science & Technology*, 38(12): 228A–231A. (disponible también en <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es040548w>).
- Shi, P. y Schulin, R.** 2018. Erosion-induced losses of carbon, nitrogen, phosphorus and heavy metals from agricultural soils of contrasting organic matter management. *Science of The Total Environment*, 618: 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.060>
- Sinche, F.L., Nutile, S.A., Hartz, K.E.H., Landrum, P.F. y Lydy, M.J.** 2018. Effects of type and quantity of organic carbon on the bioaccessibility of polychlorinated biphenyls in contaminated sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 37(5): 1280–1290. <https://doi.org/10.1002/etc.4073>
- Sparling, D.W., Linder, G., Bishop, C.A. y Krest, S.** 2010. *Ecotoxicology of Amphibians and Reptiles*. CRC Press. 946 pp.
- Spencer, P.S. y Lein, P.J.** 2014. Neurotoxicity. En P. Wexler, dir. *Encyclopedia of Toxicology (Third Edition)*, pp. 489–500. Oxford, Academic Press. (disponible también en <http://www.science-direct.com/science/article/pii/B978012386454300169X>).
- Sunderland, E.M., Hu, X.C., Dassuncao, C., Tokranov, A.K., Wagner, C.C. y Allen, J.G.** 2019. A review of the pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 29(2): 131–147. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0094-1>
- Swartjes, F.A., dir.** 2011. *Dealing with Contaminated Sites*. Dordrecht, Springer Países Bajos. (disponible también en <http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-9757-6>).
- Tangahu, B.V., Sheikh Abdullah, S.R., Basri, H., Idris, M., Anuar, N. y Mukhlisin, M.** 2011. A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation. En: *International Journal of Chemical Engineering* [en línea]. [Citada: 2 de marzo de 2020]. <https://www.hindawi.com/journals/ijce/2011/939161/>
- Tian, D. y Niu, S.** 2015. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 10(2): 024019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024019>
- Tian, K., Huang, B., Xing, Z. y Hu, W.** 2017. Geochemical baseline establishment and ecological risk evaluation of heavy metals in greenhouse soils from Dongtai, China. *Ecological Indicators*, 72: 510–520. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.037>
- UNSCEAR.** 2011. *Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2008 report to the General Assembly, with scientific indexes Vol. 2, Vol. 2*. Nueva York, Naciones Unidas.
- Wang, L., Liu, M., Tao, W., Zhang, W., Wang, L., Shi, X., Lu, X. y Li, X.** 2018. Pollution characteristics and health risk assessment of phthalate esters in urban soil in the typical semi-arid city of Xi'an, Northwest China. *Chemosphere*, 191: 467–476. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.066>

**Wilkinson, J.L., Hooda, P.S., Barker, J., Barton, S. y Swinden, J.** 2016. Ecotoxic pharmaceuticals, personal care products, and other emerging contaminants: A review of environmental, receptor-mediated, developmental, and epigenetic toxicity with discussion of proposed toxicity to humans. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(4): 336–381. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1096876>

**Wilson, M.A., Burt, R., Indorante, S.J., Jenkins, A.B., Chiaretti, J.V., Ulmer, M.G. y Scheyer, J.M.** 2008. Geochemistry in the modern soil survey program. *Environmental Monitoring and Assessment*, 139(1–3): 151–171. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9822-z>

**Wu, Z., He, C., Han, W., Song, J., Li, H., Zhang, Y., Jing, X. y Wu, W.** 2020. Exposure pathways, levels and toxicity of polybrominated diphenyl ethers in humans: A review. *Environmental Research*, 187: 109531. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109531>

**Zeng, S., Ma, J., Ren, Y., Liu, G.J., Zhang, Q. y Chen, F.** 2019. Assessing the spatial distribution of soil PAHs and their relationship with anthropogenic activities at a national scale. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(24). <https://doi.org/10.3390/ijerph16244928>



©FAO/Matteo Sala



# Glosario

**Bioacumulación.** El resultado neto de todos los procesos de absorción y pérdida, como la absorción respiratoria y a través de la ingesta de alimentos, y la pérdida por egestión, difusión pasiva, metabolismo, transferencia a la descendencia y crecimiento (Borgå, 2013). Comprende los procesos específicos de *bioconcentración* y *biomagnificación*.

**Biodisponibilidad.** La porción de la cantidad total de un químico/sustancia que se encuentra “libremente disponible” para atravesar la membrana celular de un organismo desde el medio en el que éste habita en un momento determinado (Semple *et al.*, 2004), y que puede ser metabólicamente activa en un organismo vivo (Klaassen, Casarett y Doull, 2013). El término ‘libremente disponible’ se define operacionalmente con distintos métodos. Los bioensayos en plantas o animales (Ng *et al.*, 2015) a menudo consumen tiempo y recursos, y pueden plantear cuestiones éticas. También se emplean extracciones químicas indirectas de un solo paso o secuenciales utilizando reactivo(s) que simulan la interacción de fluidos/exudados vegetales o humanos con el/los contaminante(s) de interés (Cipullo *et al.*, 2018). Algunas de estas extracciones han sido normalizadas y tomadas en consideración en la legislación de algunos países. Otras extracciones están en proceso de estandarización, un proceso necesario para hacer de la biodisponibilidad un concepto que pueda ser incluido en la legislación y las políticas de protección del suelo, y como herramienta para la evaluación de riesgos (Harmsen, 2007; Kim *et al.*, 2015). En el suelo, la biodisponibilidad de los contaminantes puede verse afectada por las propiedades del suelo (por ejemplo, pH, potencial redox, contenido de arcilla, contenido de materia orgánica, etc.) (Gupta *et al.*, 2019; Sinche *et al.*, 2018), las propiedades químicas de los contaminantes (por ejemplo, polaridad, estados de oxidación, acidez, etc.), y/o factores ambientales (por ejemplo, contenido de humedad, temperatura, etc.). Estas propiedades no son estáticas en el tiempo o en el lugar; por lo tanto, es importante comprender las limitaciones de las determinaciones de biodisponibilidad definidas operacionalmente cuando se evalúa la biodisponibilidad real en un sitio determinado temporal y espacialmente.

**Biomagnificación.** El enriquecimiento de un químico/sustancia en un organismo en relación con el químico/sustancia en el alimento del organismo, cuando la principal vía de exposición se produce a partir de la dieta del organismo (Drouillard, 2008). La biomagnificación conduce a un aumento de la concentración de un químico/sustancia con una posición trófica más alta en la red alimentaria (Borgå, 2013).

**Biovigilancia.** El uso de organismos vivos para evaluar la contaminación ambiental midiendo la acumulación de sustancias químicas en los tejidos del organismo o evaluando los biomarcadores de exposición en organismos indicadores.

**Carcinogenicidad.** La capacidad de un fenómeno físico (por ejemplo, la radiación), o de un agente químico o biológico para causar cáncer o aumentar su incidencia (Naciones Unidas, 2011).

**Concentración de fondo natural (geoquímica).** La concentración natural (dada en un rango o en valor absoluto) (Reimann y Garrett, 2005) de un elemento o compuesto en el suelo debido a procesos geológicos y pedológicos, en un lugar y tiempo determinados, cuyo origen y presencia no tiene influencia antrópica (adaptado de ISO, 2015a; Tian *et al.*, 2017). Las concentraciones de fondo natural del suelo son variables en función de la composición mineralógica del material parental del suelo y de los procesos pedogenéticos (formadores de suelo) (Kabata-Pendias y Pendias, 2001; Wilson *et al.*, 2008).

**Contaminante.** Sustancia, compuesto o elemento químico en una concentración que excede las concentraciones naturales (Chapman, 2007) (valor natural de fondo) (ISO, 2016). La presencia de un contaminante no indica necesariamente efectos nocivos o perjudiciales.

**Contaminación del suelo.** La contaminación del suelo ocurre cuando la concentración de un químico o sustancia es superior a la que ocurriría en forma natural, pero no alcanza un nivel conocido por causar daños a los organismos no objetivo. Cuando la contaminación tiene un efecto adverso sobre cualquier organismo no objetivo se utiliza un término diferente en la lengua inglesa (*pollution*) que no tiene traducción al español. La especificación de los organismos no objetivo en estas definiciones reconoce que algunos químicos y sustancias son agregados a plantas y suelos específicamente para suprimir organismos objetivo como los plaguicidas. En la lengua española, no es correcto el uso del término *polución* (*pollution* en inglés) y, por tanto, se usa únicamente el término contaminación indistintamente para traducir *pollution* y *contamination*. Para facilitar la comprensión del lector, se mantiene la palabra correspondiente en inglés en paréntesis en el texto para permitir esta diferenciación.

**Contaminación difusa del suelo.** Contaminación que se extiende en amplias áreas y que se acumula en el suelo. La contaminación difusa con frecuencia es más difícil de atribuir a una sola fuente. Existen dos tipos principales de contaminación difusa: 1. Propagación involuntaria de un químico o de partículas contaminadas de un sitio



puntual o una actividad contaminante (por ejemplo, emisiones industriales) hacia un entorno más extenso. Esta propagación puede ocurrir por el transporte, por el viento o el agua, de químicos y partículas de la superficie del suelo, por el transporte atmosférico y la deposición de productos químicos volátiles o por lixiviación de productos químicos del suelo a aguas subterráneas; 2. La contaminación difusa ocurre a través de la aplicación intencional de un contaminante o una fuente de contaminantes; por ejemplo, el riego con aguas subterráneas contaminadas o aguas residuales no tratadas, la aplicación en suelos de lodos de depuradora o el uso agrícola de plaguicidas o contaminantes no rápidamente degradables o contaminantes introducidos con los fertilizantes.

**Contaminación puntual del suelo.** La contaminación puntual del suelo se produce en un área limitada y, en la mayoría de los casos, la fuente y la identidad de la contaminación son fácilmente identificables. La causa de la contaminación puntual puede ser accidental (por ejemplo, a través de derrames de contaminantes o fugas de contenedores de almacenamiento) o puede producirse como subproducto de una actividad intencional (por ejemplo, antiguos emplazamientos de fábricas, vertederos sanitarios, lugares de reciclaje de baterías de plomo o de residuos electrónicos y relaves de minas). Lo ideal es contar con una gobernanza adecuada que regule y prevenga la contaminación del suelo. Sin embargo, en este informe se incluyen muchos ejemplos de falta de regulación, o de aplicación deficiente de la regulación existente, en materia de contaminación del suelo.

**Disruptor endocrino.** Sustancia o mezcla exógena que altera la(s) función(es) del sistema endocrino y, en consecuencia, causa efectos adversos en la salud de un organismo intacto o en su progenie o (sub)poblaciones (IPCS, 2002).

**Eutrofización.** El enriquecimiento excesivo de las aguas superficiales con nutrientes vegetales, principalmente N y P (FAO, 2019b).

**Mutagenicidad.** La capacidad de cualquier contaminante para dañar la información genética de una célula, produciendo alteraciones genéticas transmisibles a otras células y a la progenie (Gupta, 2016).

**Neurotoxicidad.** Cualquier efecto adverso sobre la estructura y/o la actividad normal del sistema nervioso después de la exposición a contaminantes (neurotoxinas) (Spencer y Lein, 2014).

















La Alianza Mundial por el Suelo (AMS) se estableció en 2012 como un mecanismo reconocido mundialmente para posicionar los suelos en la Agenda Global a través de la acción colectiva. Nuestros objetivos clave son promover la Gestión Sostenible del Suelo y mejorar la gobernanza del suelo para garantizar suelos saludables y productivos y apoyar la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para la seguridad alimentaria y la mejora en la nutrición, la adaptación y mitigación del cambio climático y el desarrollo sostenible.

Gracias al apoyo financiero de



Ministerio de Finanzas de la  
Federación de Rusia



Comisión  
Europea



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Swiss Confederation



Ministry of Agriculture, Nature and  
Food Quality of the Netherlands



MINISTÈRE  
DE L'EUROPE  
ET DES AFFAIRES  
ÉTRANGÈRES

Liberté  
Égalité  
Fraternité

ISBN 978-92-5-135794-1



9 789251 357941

CB4827ES/1/02.22