



**POLITÉCNICA**



E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA,  
ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA,**  
**ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS**  
**GRADO EN BIOTECNOLOGÍA**  
**DEPARTAMENTO DE BIOTECNOLOGÍA-BIOLOGÍA VEGETAL**

Estado actual de la contaminación del suelo en  
Europa: la fitorrecuperación como tecnología  
plausible para abordar el problema

**TRABAJO FIN DE GRADO**

Autor: **Ana Pérez Arriero**

Tutor: **José Juan Rodríguez Herva**

**Octubre de 2020**



**POLITÉCNICA**



**E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA,  
ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS**

**GRADO DE BIOTECNOLOGÍA**

**ESTADO ACTUAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO EN EUROPA: LA  
FITORRECUPERACIÓN COMO TECNOLOGÍA PLAUSIBLE PARA  
ABORDAR EL PROBLEMA**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**Ana Pérez Arriero**

**MADRID, 2020**

Director: José Juan Rodríguez Herva  
Dpto . de Biotecnología-Biología Vegetal



**POLITÉCNICA**



E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA,  
ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

**ESTADO ACTUAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO EN  
EUROPA: LA FITORRECUPERACIÓN COMO TECNOLOGÍA  
PLAUSIBLE PARA ABORDAR EL PROBLEMA**

**Memoria presentada por Ana Pérez Arriero para la obtención del título de  
Graduado en Biotecnología por la Universidad Politécnica de Madrid**

**Fdo: Ana Pérez Arriero**

**VºBº Tutor UPM y director TFG**

**D. José Juan Rodríguez Herva  
Dpto. de Biotecnología-Biología Vegetal  
ETSIAAB - Universidad Politécnica de Madrid**

**Madrid, 09, octubre, 2020**

A mis padres

## AGRADECIMIENTOS

No tenía pensado hacer una página de agradecimientos, pero, echando la vista atrás y viendo todo lo que he pasado y lo que me han tenido que “sufrir” algunas personas, creo que estas se merecen un breve reconocimiento. Así que, allá voy...

Papá, sin duda el primero de la lista. Gracias por ayudarme a superar cada piedra de este arduo camino. Tu sabiduría y entrega total hacia mí, tu hija, han hecho que no pierda la cabeza (del todo) durante este tiempo y me han ayudado a conseguir mi objetivo. Gracias, también, por enseñarme día a día a paladear los mil sabores de la vida. Gracias, gracias y mil gracias.

Mamá, eres cordura y sosiego. Gracias por encauzarme y llevarme siempre por el camino correcto; por enseñarme que la constancia y la perseverancia siempre dan sus frutos. Gracias por tus consejos, tus palabras de ánimo y tus mimos de madre. Has hecho que los guijarros de mi camino, que para mí parecían montañas, fueran tan solo pedruscos.

Bea, mi luz de guía. Porque sin ti esto no hubiera sido igual. Gracias por tu apoyo incondicional, por aguantar mis malos humos y mis bajones, por ofrecerme tu hombro para llorar y por sacarme las mayores sonrisas en los momentos más oscuros. Gracias por estar en las buenas y en las malas, por confiar en mí. Si he llegado hasta aquí es, en gran parte, gracias a ti.

Mis chicas del 5ºC. Más que compañeras de piso, hermanas. Un millón de gracias por aguantar mis dramas, por preguntarme una y otra vez qué tal lo llevaba, por animarme día a día. Gracias por hacerme reír y ayudarme a relativizar las cosas. Sin duda, mi vida es más bonita desde que formáis parte de ella.

Chechu, mi salvador. Sin ti hubiese sido un barco flotando a la deriva. Mil gracias, una y otra vez, por guiarme en este trabajo, por dedicarle tiempo y esfuerzo, por tu incesante amabilidad. Gracias por tu paciencia y comprensión. Has sido clave en este “último viaje” de mi carrera.

Y, por último, gracias a todos lxs profesorxs que, de forma consciente o no, han dejado huella en mí durante todos estos años y han hecho posible que llegase hasta donde estoy ahora.

## ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	i
PÁGINA DE TÍTULO .....	ii
CERTIFICACIÓN DE LOS TUTORES .....	iii
PÁGINA DE DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
ÍNDICE GENERAL .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS .....	ix
SUMMARY/RESUMEN .....	x
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.1. Introducción: la contaminación del suelo .....	1
1.2. Objetivos .....	2
CAPÍTULO 2. CONTAMINANTES MÁS IMPORTANTES Y TÉCNICAS DE DESCONTAMINACIÓN .....	3
2.1. Contaminantes más importantes .....	3
2.1.1. Compuestos inorgánicos: metales pesados y radioisótopos .....	4
2.1.2. Compuestos orgánicos: hidrocarburos alifáticos aromáticos y derivados .....	5
2.2. Técnicas de descontaminación de suelos .....	5
2.2.1. Tipos .....	5
2.2.2. Biorremediación .....	6
CAPÍTULO 3. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE FITORRECUPERACIÓN .....	9
3.1. Concepto .....	9
3.2. Metabolismo de los contaminantes .....	9
3.2.1. Metabolismo de contaminantes orgánicos .....	9
3.2.2. Metabolismo de contaminantes inorgánicos .....	11
3.3. Tecnologías de fitorremediación .....	11
3.4. Cultivos utilizables en fitorremediación .....	14
5.5. Ventajas e inconvenientes .....	15
CAPÍTULO 4. OPORTUNIDADES TECNOLÓGICAS, SOCIO-POLÍTICAS, LEGALES Y COMERCIALES DE LA FITORRECUPERACIÓN .....	17
4.1. Contexto tecnológico .....	17
4.1.1. Selección adecuada de las plantas .....	17
4.1.2. Utilización de microorganismos .....	18
4.1.3. Mejora mediante ingeniería genética .....	19
4.2. Contexto socio-político .....	20
4.3. Contexto económico .....	21
4.4. Contexto legal y regulatorio .....	22
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....	24
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA .....	25

ANEXOS .....	a
Anexo I: glosario de términos .....	a
Anexo II: datos sobre las actividades contaminantes del suelo .....	b
Anexo III: cultivos económicamente rentables en fitorremediación .....	d

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1 (Anexo II):</b> Desglose de las principales fuentes que causan contaminación en Europa .....	b
<b>Tabla 2 (Anexo III):</b> Lista de cultivos utilizados en <i>fitorremediación</i> con un alto valor económico en el negocio de esta tecnología .....	d

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Proporción de los distintos contaminantes que afectan al suelo y a las aguas subterráneas en Europa .....	4
<b>Figura 2:</b> Técnicas de biorremediación .....	6
<b>Figura 3:</b> Funcionamiento del metabolismo <i>green liver</i> en plantas utilizadas para la fitorrecuperación de suelos contaminados por contaminantes orgánicos .....	10
<b>Figura 4:</b> Representación de los posibles destinos de los contaminantes según la estrategia fitorremediadora empleada .....	12
<b>Figura 1 (Anexo II):</b> Desglose de las actividades que provocan contaminación del suelo por países .....	c

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

**ATP:** adenosín trifosfato (del inglés “adenosine triphosphate”)

**BTEX:** benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos

**COPs:** Contaminantes Orgánicos Persistentes

**EDTA:** ácido etilendiaminotetraacético

**MTBE:** metil *tert*-butil éter

**PAHs:** hidrocarburos aromático policíclico (del inglés “polycyclic aromatic hydrocarbons”)

**PCBs:** bifenilos policlorados (del inglés “polychlorinated biphenils”)

**PCPs:** plaguicidas policlorados (del inglés “polychlorinated pesticides”)

**PGPR:** rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (del inglés “plant growth promoting rhizobacteria”)

**PHCs:** hidrocarburos de petróleo (del inglés “petroleum hydrocarbons”)

**TCE:** tricloroetileno

**TNT:** 1-metil-2,4,6-trinitrobenceno o trinitrotolueno

**UE:** Unión Europea

**VOCs:** compuestos orgánicos volátiles (del inglés “volatile organic compounds”)

## SUMMARY

The growing technological and industrial development, the change in agricultural and livestock practices and the emergence of a society based on consumption have led to an increase in the production of waste and its subsequent accumulation in natural environments such as soil. Pollution of air, land and water is a big problem for the environment and for human and animal health. Therefore, it is necessary to join efforts at the social, political and business level to implement measures to clean and decontaminate these environments to allow their recovery in a sustainable manner. This work focuses on the land-related environmental problems, describing the main soil pollutants and reviewing the different techniques for soil recovery that are available as of today. It also analyzes how the problem of waste treatment and disposal can be addressed, emphasizing bioremediation strategies, specifically phytoremediation, exposing its main advantages as well as its possible limitations. In addition, a number of crops and plant species of proven utility for application in phytoremediation techniques are described in detail. Finally, the possibilities offered by this technology to become an efficient and reliable method of soil decontamination and ecosystem recovery are analyzed from different points of view.

El creciente desarrollo tecnológico e industrial, el cambio en las prácticas agropecuarias y la implantación de una sociedad basada en el consumo han provocado un aumento de la generación de residuos y su consiguiente acumulación en los medios naturales como el suelo. La contaminación del medio aéreo, terrestre y acuático supone un gran problema para el medioambiente y para la salud humana y animal. Por ello, es necesario aunar esfuerzos a nivel social, político y empresarial para implementar medidas de limpieza y descontaminación de estos ambientes que permitan su recuperación de forma sostenible. Este trabajo se centra en los problemas ambientales con relación al suelo, describiendo los principales contaminantes y revisando las diferentes técnicas de recuperación del suelo que se encuentran disponibles a día de hoy. Se analiza, además, cómo se puede abordar el problema del tratamiento y eliminación de residuos, haciendo hincapié en las estrategias de *biorremediación*, concretamente de fitorreparación o *fitorremediación*, exponiendo sus principales ventajas, así como sus posibles limitaciones. Finalmente, también se detallan una serie de cultivos y especies vegetales de utilidad demostrada para su aplicación en técnicas de *fitorremediación*. Además, se analizan, desde diferentes contextos, las posibilidades que ofrece esta tecnología para convertirse en un método eficiente y fiable de descontaminación de suelos y recuperación de ecosistemas que goce de un amplio uso.

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

### **1.1. Introducción: la contaminación del suelo**

La revolución industrial y el desarrollo de las industrias agrarias han permitido el aumento del poder adquisitivo de la población y esto, junto con la necesidad de la industria de mantener su nivel de beneficios de producción o de aumentarlos a un ritmo constante, ha contribuido a la generación de una sociedad basada en el consumo <sup>(1)</sup>. Un problema importante al que se enfrenta dicho modelo de sociedad es que cada día se generan toneladas de desechos domésticos (además de los desechos industriales asociados). Los cambios en las prácticas agropecuarias e industriales, la minería, la urbanización, el transporte y otras actividades humanas, así como una inadecuada gestión de los residuos, conducen a una degradación considerable de muchos ecosistemas del planeta y terminan por contaminar el agua, el aire y el suelo, debido, en gran medida, al incremento en el uso de nuevos compuestos nocivos para la biosfera. Muchos de estos contaminantes son compuestos orgánicos producidos de forma artificial por síntesis química, por lo que no se encuentran de forma natural en el medioambiente y reciben el nombre de xenobióticos <sup>(2)</sup>. Los xenobióticos pueden ser biodegradables, aunque, normalmente, son compuestos **persistentes** o **recalcitrantes\***, que se acumulan y perduran por largos periodos de tiempo en el medioambiente, suponiendo esto una gran amenaza contra la salud humana y de los ecosistemas <sup>(3)</sup>. Las principales fuentes de contaminación del suelo en Europa, son el inapropiado proceso de tratamiento y eliminación de residuos (38% del número total de fuentes identificadas) y las actividades industriales y comerciales (34%) mientras que, por ejemplo, las actividades agropecuarias suponen menos del 8% de las fuentes de contaminación <sup>(4)</sup> (para una información más detallada, consúltense Tabla 1 y Figura 1 del Anexo II).

El suelo es un sistema complejo y dinámico, aunque sus procesos de regeneración y formación son muy lentos. Esto hace que sea un recurso poco renovable y fácilmente degradable, además de convertirlo en un medio muy proclive a la contaminación. La contaminación del suelo deteriora sus propiedades y composición, provocando la disminución de su capacidad de retención de agua, la alteración de los ciclos de los nutrientes y la generación de una gran pérdida de biodiversidad y fertilidad <sup>(5)</sup>. Por otro lado, la contaminación del suelo tiene efectos importantes sobre la salud humana ya que, la exposición continuada, el contacto directo, la inhalación o la ingestión de estos contaminantes a través de los alimentos y las aguas subterráneas provoca numerosas afecciones, trastornos congénitos y enfermedades crónicas <sup>(6)</sup>.

Según el último informe global sobre el estado medioambiental de Europa de la Agencia Europea para el Medioambiente <sup>(7)</sup>, la contaminación de los suelos está muy extendida y los umbrales máximos establecidos para muchos contaminantes se han excedido en numerosos lugares. La densidad de sitios contaminados se expresa como el número de sitios donde se llevan (o se han llevado) a cabo actividades contaminantes por km<sup>2</sup> de **superficie artificial** por país <sup>(8)</sup>. Se estima en unos 2,8 millones el número de sitios contaminados en la UE pero solo un 24% de los mismos han sido inventariados y, de estos, tan solo un 28% se han investigado para decidir si necesitan, o no, ser recuperados. Además, tampoco se conocen con exactitud los posibles efectos sinérgicos de muchas sustancias y de nuevos contaminantes emergentes

*\* Las palabras marcadas en color naranja se describen detalladamente en el Anexo I.*

(como microplásticos, disruptores endocrinos, etc.), por lo que es necesario, también, monitorear e investigar estos contaminantes emergentes <sup>(7)</sup>.

Así pues, se pone de manifiesto la necesidad imperiosa de disponer de sistemas cada vez más eficientes para el procesamiento y la eliminación de contaminantes a fin de no dañar el suelo y, en general, el medioambiente, de manera irreversible <sup>(9)</sup>.

Desafortunadamente, la evaluación de la contaminación no es una prioridad en muchos países en vías de desarrollo y, por tanto, los datos sobre el área o número de sitios contaminados rara vez están disponibles <sup>(10)</sup>. Son muy pocos los países que invierten en la realización de mapeos de contaminación del suelo a nivel nacional. Es preciso disponer de un mapa global de la contaminación del suelo para, no solo identificar las fuentes y así controlar la contaminación y reducir el riesgo para la salud pública y del medioambiente, sino también para guiar en la formulación de políticas eficaces y eficientes para la protección de los suelos <sup>(11)</sup>.

## **1.2. Objetivos**

El objetivo general de este trabajo es presentar el estado actual de la contaminación del suelo en Europa y las diferentes técnicas de descontaminación existentes, así como plantear un breve análisis de la factibilidad del uso de la *fitorremediación* como tecnología recuperadora. Para ello, se llevan a cabo los siguientes objetivos específicos:

- 1) Enunciar y categorizar los contaminantes más importantes y las tecnologías principales utilizadas en la descontaminación de suelos, haciendo hincapié en las técnicas de *biorremediación*.
- 2) Profundizar en la tecnología de *fitorremediación*, describiendo los distintos tipos existentes, comentando los posibles cultivos utilizables en esta tecnología y analizando las ventajas y limitaciones de la misma.
- 3) Describir y analizar los diversos contextos tecnológicos, políticos, culturales, sociales y económicos que determinan la utilización o subutilización pública y privada de la *fitorremediación*.

## **CAPÍTULO 2. CONTAMINANTES MÁS IMPORTANTES Y TÉCNICAS DE DESCONTAMINACIÓN**

### **2.1. Compuestos más importantes**

Según la fuente de contaminación, Pandey y Bajpai <sup>(10)</sup> hablan de residuos de origen agrícola y residuos de origen no agrícola:

*Residuos domésticos e industriales (origen no agrícola).* Incluye las miles de toneladas de desechos (productos químicos, artículos electrónicos, medicamentos y fármacos, entre otros) vertidos a tierra o a las masas de agua y generados por las industrias y las unidades domésticas. También podríamos incluir en este grupo de contaminantes a los lodos de depuración, que son productos de las plantas de tratamiento de residuos domésticos e industriales, que están cargados de múltiples contaminantes orgánicos e inorgánicos y que, en ocasiones, se utilizan, de forma temeraria, como fertilizante <sup>(12, 13)</sup>.

*Residuos de origen agrícola.* Los desechos agrícolas se definen como los desechos no deseados producidos como resultado de las actividades agropecuarias (estiércol, plaguicidas y herbicidas, medicamentos veterinarios, etc.). Los plaguicidas y herbicidas, cuando se aplican de forma reiterada, dan lugar a su acumulación en el suelo, donde pueden ser perjudiciales para la microbiota e insectos beneficiosos. La mayoría de los plaguicidas y fertilizantes son solubles en agua y, por lixiviación, pueden incorporarse a las aguas subterráneas y ser arrastrados hacia ríos y reservorios superficiales para terminar entrando en la cadena alimenticia, pudiendo provocar graves enfermedades en los seres humanos. También pueden causar efectos adversos sobre especies no objetivo y tienen un impacto en la fertilidad y calidad del suelo. Los fertilizantes son una de las principales fuentes de desechos agrícolas y puede llevar a la **eutrofización** del medio acuático, un problema bastante importante <sup>(14)</sup>.

Atendiendo a la naturaleza química de los compuestos contaminantes estos se dividen en compuestos orgánicos e inorgánicos. Entre los contaminantes inorgánicos destacan los metales, en especial los metales pesados y sus sales <sup>(15)</sup> y, entre los compuestos orgánicos, sobresalen hidrocarburos de petróleo (PHCs), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), bifenilos policlorados (PCBs) y explosivos <sup>(16)</sup>. Según el Centro de Datos del Suelo Europeo (ESDAC) <sup>(4)</sup>, los contaminantes que más contribuyen a la contaminación del suelo son los metales pesados y los aceites minerales, suponiendo estos casi un 60% de los contaminantes totales (Figura 1).

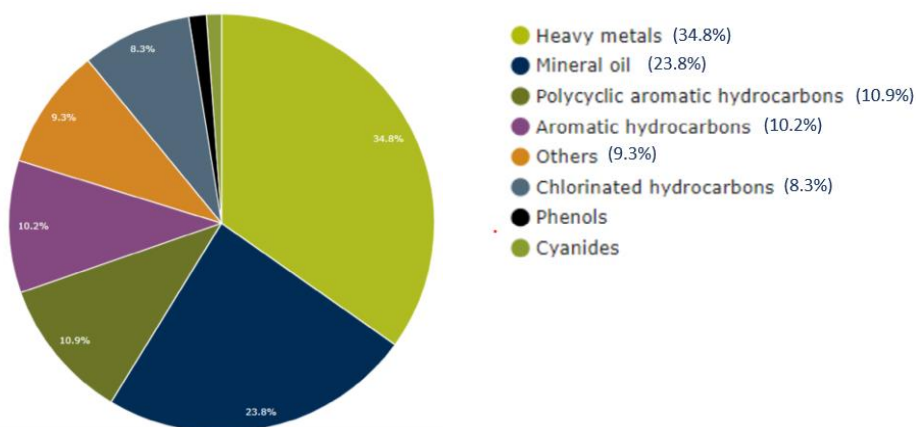


Figura 1. Proporción de los distintos contaminantes que afectan al suelo y las aguas subterráneas en Europa. Tomada de Rodríguez-Eugenio y colaboradores (2018) <sup>(6)</sup>.

### **2.1.1. Compuestos inorgánicos: metales pesados y radioisótopos**

La Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades (ATSDR) <sup>(17)</sup>, proporciona una lista prioritaria que clasifica a los compuestos y elementos por su repercusión en la salud pública (no según su toxicidad intrínseca), en la cual en arsénico (As), el plomo (Pb) y el mercurio (Hg) se encuentran en 1ª, 2ª y 3ª posición, respectivamente (la lista completa, se encuentra disponible en <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/index.html#2019spl>).

El uso de metales pesados está muy extendido en múltiples industrias, lo que supone una dificultad para rastrear su fuente original y controlar su liberación e impacto. Estos pueden entrar fácilmente en la cadena trófica y se **bioacumulan** en los tejidos animales. Algunos metales son volátiles y pueden evaporarse, propagándose por el aire. Una vez absorbidos por los organismos vivos, pueden interferir con la estructura y función de ciertas biomoléculas como el ADN, llegando incluso a provocar mutaciones. En seres humanos, los metales pesados pueden, además, causar daños físicos y/o neurológicos <sup>(18)</sup>.

Otros de los principales contaminantes inorgánicos son los radioisótopos. Estos son formas inestables de un elemento que sufre una desintegración radiactiva y emite radiación ionizante. Los radioisótopos pueden encontrarse en el medioambiente debido a causas naturales o por causas antropogénicas. Las principales actividades antropogénicas que liberan este tipo de contaminantes son la industria armamentística y eléctrica (energía nuclear), así como la Medicina. Su uso provoca graves riesgos ambientales y para la salud de la fauna silvestre e, incluso, pueden bioacumularse en los seres humanos <sup>(19)</sup>, llegando a causar efectos a largo plazo como cáncer y enfermedades cardiovasculares <sup>(20)</sup>.

### **2.1.2. Compuestos orgánicos: hidrocarburos alifáticos, aromáticos y derivados**

Algunos compuestos orgánicos hidrofóbicos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), donde se integran los bifenilos policlorados (PCBs), son compuestos recalcitrantes que se unen fuertemente a los sedimentos <sup>(21)</sup> y, al igual que ocurre con los metales pesados, la persistencia de estos en el medioambiente, con los efectos nocivos que esto acarrea, tiene consecuencias a largo plazo, incluso tras desaparecer la fuente original de contaminación. Es por esto que son conocidos como Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs) <sup>(5)</sup>.

Ciertos compuestos orgánicos volátiles (VOCs) como los hidrocarburos aromáticos monocíclicos, por ejemplo el benceno, el tolueno, el etilbenceno y los xilenos (conocidos colectivamente como BTEX) o el fenol, así como muchos hidrocarburos alifáticos de longitudes variables, también son compuestos orgánicos tóxicos incluidos en la lista de compuestos peligrosos de la ATSDR <sup>(17)</sup>. Estos compuestos son componentes comunes de herbicidas, insecticidas, productos farmacéuticos y otras soluciones industriales <sup>(22)</sup>.

Muchos de estos compuestos son de origen antropogénico, derivando principalmente de la industria petroquímica y se consideran xenobióticos tóxicos que tienen un fuerte impacto en el medioambiente. La exposición a este tipo de contaminantes es particularmente peligrosa para la salud humana, pudiendo provocar cáncer, efectos teratogénicos o disfunciones de los sistemas nervioso, inmune y reproductor <sup>(14)</sup>.

## **2.2. Técnicas de descontaminación de suelos**

### **2.2.1. Tipos**

La elección de las técnicas de descontaminación del suelo depende, en gran medida, de la naturaleza y grado de contaminación del mismo, de la función o uso previstos para el lugar una vez restaurado y del coste final. Algunas técnicas gestionan directamente el contaminante en el suelo, recibiendo el nombre de tecnologías *in situ* y, otras, son medidas de saneamiento *ex situ*, que pueden requerir de la excavación del medio antes de ser tratado para la eliminación del contaminante. Las técnicas *in situ* tienen la ventaja de ser menos costosas, pero requieren períodos de tiempo más largos para obtener una restauración completa del sitio contaminado <sup>(23)</sup>. La combinación de distintas tecnologías de *remediación* es una buena opción si se quieren solucionar posibles problemas derivados del uso de una única técnica y si se quiere aumentar la eficiencia del proceso, como han demostrado numerosos estudios <sup>(24, 25, 26)</sup>.

Por otro lado, según el proceso empleado para la *remediación*, las técnicas se dividen en físicas, químicas, biológicas, térmicas o combinadas <sup>(27)</sup>. Según el método de acción pueden clasificarse en tecnologías de contención, inmovilización o tratamiento <sup>(28)</sup>, las cuales son descritas a continuación:

- Tecnologías de contención: buscan el aislamiento físico del sitio contaminado, pero no actúan directamente sobre los contaminantes. Utilizan métodos convencionales de ingeniería civil (como barreras y cubiertas) que aíslan al medio contaminado del ambiente circundante, bloqueando las vías por las que los agentes contaminantes pueden alcanzar otros ambientes (como agua subterránea, atmósfera, etc.).
- Tecnologías de inmovilización: reducen la movilidad de los contaminantes en el suelo para evitar la migración a otros medios o el contacto con posibles receptores en la biosfera (plantas, animales, etc.). Suelen ser métodos físico-químicos y térmicos, como la solidificación, la estabilización y la vitrificación.
- Tecnologías de tratamiento: capaces de disminuir la concentración de los contaminantes en el medio, ya sea degradando, extrayendo o modificando dichos contaminantes. Estos pueden ser tratamientos físico-químicos (como el lavado del suelo o la electrocinética), tratamientos biológicos (biorrecuperación o *biorremediación*) o tratamientos térmicos (como la desorción térmica y la incineración).

### **2.2.2. Biorremediación**

Los métodos biológicos de descontaminación del suelo se utilizan como alternativa a los métodos físico-químicos equivalentes ya que tienen un coste bajo, son eficaces y, además de presentar un reducido impacto ambiental, también contribuyen a restaurar la calidad del suelo.

La *biorremediación* se basa en el uso de mecanismos biológicos (de microorganismos, plantas y hongos) para reducir, ya sea degradando, detoxificando, **mineralizando** o transformando, la concentración de contaminantes en el medioambiente hasta un nivel inocuo <sup>(29)</sup>. Esta tecnología se usa más comúnmente para detoxificar el suelo de contaminantes orgánicos, aunque también es utilizada para luchar contra la contaminación por metales pesados. Se suelen utilizar dos métodos generales: bioestimulación y bioaumentación. La estrategia más utilizada suele ser la bioestimulación, que consiste en promover el crecimiento y/o la actividad metabólica de los microorganismos que hay presentes de forma natural en la zona a descontaminar, mediante la optimización de las condiciones del entorno (modificación del pH o la

temperatura, mediante adición de nutrientes insuflado de oxígeno, etc.). Cuando la actividad microbiana en un ambiente determinado no es la esperada, puede abordarse una estrategia de bioaumento, en la que se añaden de forma exógena los microorganismos apropiados <sup>(30)</sup>. Ambas estrategias pueden llevarse a cabo *in situ* o *ex situ* y, según esto, se diferenciarían varias técnicas (Figura 2):

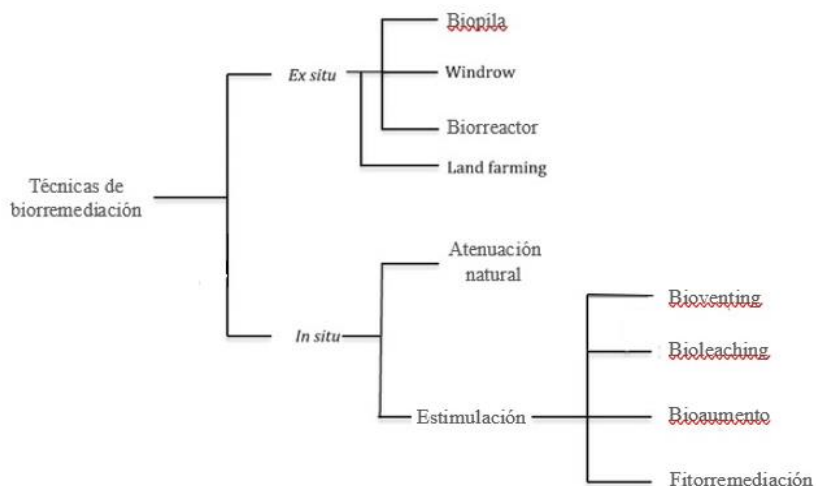


Figura 2. Técnicas de biorremediación. Adaptada de Azubuiké y colaboradores (2016) <sup>(29)</sup>.

*Técnicas de biorremediación ex situ*: Consisten en la remoción y el tratamiento del suelo contaminado fuera del área contaminada y pueden ser operadas de dos formas: *biorremediación* de fase sólida (como *land farming*, *biopila* y *windrows*) y *biorremediación* de lodo líquido (biorreactor).

- *Landfarming* (o laboreo): esta técnica se basa en la mezcla de suelo contaminado (normalmente mediante arado) con la capa más superficial del terreno para la estimulación de los procesos naturales (físico-químicos y biológicos) que conduzcan a una degradación efectiva. Cuando la profundidad de la contaminación es poca (< 1 m) se puede tratar sobre el mismo terreno y se considera una técnica *in situ*, o más apropiadamente "on site". Cuando la profundidad es mayor se precisa excavación y se considera una técnica *ex situ*. Para promover la biodegradación suele recurrirse a tratamientos de bioestimulación como los mencionados anteriormente, controlando especialmente, parámetros como el pH, la aireación y la humedad del suelo.. Normalmente se emplea para la *remediación* de PAHs <sup>(31,32)</sup>.

- *Biopilas*: se basa en el apilamiento del suelo contaminado para facilitar la actividad microbiana a través del aporte controlado de nutrientes, aireación e irrigación. Esta técnica puede prevenir la volatilización de contaminantes de bajo peso molecular y se puede emplear para suelos de regiones muy frías <sup>(33)</sup>.

- *Windrows* (hileras): esta es una modificación del método por biopilas, en el cual, al suelo, apilado en largas filas, se le da la vuelta constantemente para mejorar la aireación y liberación del exceso de calor y la liberación de los volátiles, mejorando el proceso de *biorremediación*. Este método, en comparación con las biopilas, asegura una mejor eliminación de los hidrocarburos <sup>(34)</sup>.

- *Biorreactor*: es un contenedor en el que la materia prima (en este caso, un sustrato contaminado), añadida como lodo o materia seca, es transformada en un producto menos contaminante. Sus tipos y modos de

operación son muy variados. La mayor ventaja de esta técnica con respecto a las anteriores es que los parámetros del bioproceso están perfectamente controlados (pH, temperatura, agitación, aireación, concentración del sustrato y del inóculo, en caso de que se utilicen técnicas de bioaumentación)<sup>(29)</sup>, lo que hace el proceso mucho más rápido y eficiente. Se emplea, principalmente, para tratar suelos contaminados con VOCs, con la ventaja adicional de que se facilita el control de las emisiones mediante sistemas de recolección o extracción de aire<sup>(35)</sup>.

*Técnicas de biorremediación in situ.* Consisten en el tratamiento del suelo contaminado en el mismo sitio donde ha ocurrido. Por lo general, estas técnicas son más baratas que las *ex situ* y se han usado de forma exitosa para descontaminar disolventes clorados, tintes, metales pesados e hidrocarburos. Pueden ser técnicas que mejoran el proceso de *biorremediación* por bioestimulación (como el *bioventing*, el bioaumentación y la fitorrecuperación o *fitorremediación*) o pueden ser procesos pasivos, de *biorremediación* intrínseca (atenuación natural), en los que no se realiza ninguna intervención humana ni modificación de las condiciones propias del suelo<sup>(29)</sup>.

- *Bioventing* (bioventilación): consiste en una bioestimulación mediante el aporte de un flujo de aire u oxígeno puro al suelo contaminado en la zona no saturada o vadosa del suelo (la localizada entre la superficie y el nivel superior de la capa freática) para promover la actividad degradadora de los microorganismos autóctonos del mismo. Esta técnica se utiliza, normalmente, para vertidos de productos petrolíferos ligeros<sup>(36)</sup>. Esta técnica no se puede aplicar en suelos con baja permeabilidad (por ej., arcillosos) y tiene la desventaja de que las concentraciones de oxígeno usadas pueden ser tóxicas para algunos microorganismos nativos. No obstante, la técnica de bioventilación también puede ser utilizada en procesos de *biorremediación* anaeróbica en el caso de que los contaminantes sean recalcitrantes en condiciones aeróbicas. En ese caso se suele inyectar una mezcla de N<sub>2</sub> y bajas concentraciones de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, actuando este último como donador de electrones en el proceso de reducción<sup>(29)</sup>. Existen técnicas alternativas, como el biosparging, en la que el aire se inyecta en la zona saturada con objeto de provocar subida de volátiles a la zona no saturada para promover su biodegradación.

- *Bioleaching* (biolixiviación): esta técnica se utiliza de forma generalizada para la movilización y extracción metales pesados como cobre, níquel o plomo, entre otros. Se basa en las propiedades de algunas bacterias quimiolitótrofas acidófilas, que son capaces de usar dos vías metabólicas diferentes para disolver sulfuros metálicos mediante reacciones de ataque protónico y de oxidación<sup>(37)</sup>.

- Bioaumentación: consiste en la adición de microorganismos (en cultivo puro o más frecuentemente como consorcios, previamente cultivados en laboratorio) a suelos contaminados que albergan una baja población de microorganismos autóctonos degradadores de los contaminantes concretos a eliminar<sup>(38)</sup>. Por ejemplo, se ha comprobado que, tras un vertido de petróleo crudo, las poblaciones nativas de microorganismos no son capaces de degradarlo, pero que su eliminación se acelera notablemente si se añaden microorganismos con suficiente capacidad degradadora<sup>(39,40)</sup>. El bioaumentación se ha utilizado de forma exitosa para recuperar suelos con vertidos industriales, agrícolas y domésticos, en los que se han utilizado diferentes especies de microorganismos con distintas capacidades degradativas según los tipos de contaminantes. Cabe destacar que en ocasiones el bioaumentación utiliza, para la selección de microorganismos degradadores, microbiota

aislada del mismo ambiente o muy parecidos, para posteriormente reintroducirlos en grandes cantidades en la zona a descontaminar, puesto que de esa forma las posibilidades de sobrevivir y propagarse son mayores. Mencionar, por último, que con frecuencia se combinan las técnicas de bioestimulación y bioaumentación para acelerar el proceso.

- Fitorrecuperación o *fitorremediación*: esta técnica se basa en el uso de plantas y microorganismos asociados para la descontaminación del suelo. Aunque con limitaciones, es una de las tecnologías más innovadoras y seguras para la eliminación de metales tóxicos evitando efectos secundarios importantes <sup>(41)</sup>. Esta técnica, que se puede emplear para la eliminación tanto de contaminantes orgánicos como inorgánicos, al ser el eje central del presente trabajo, se tratará con más profundidad en los siguientes capítulos.

## **CAPÍTULO 3. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE FITORRECUPERACIÓN**

### **3.1. Concepto**

La fitorrecuperación o *fitorremediación*, palabra proveniente del griego *phyto* (planta) y del latín *remedium* (restablecimiento del equilibrio) <sup>(42)</sup>, es el uso de plantas (silvestres o modificadas genéticamente) para extraer, inmovilizar, acumular y/o degradar contaminantes del suelo, agua o aire, como compuestos orgánicos derivados del petróleo, explosivos nitroaromáticos, metales pesados, minerales radiactivos y otros compuestos inorgánicos <sup>(14,16)</sup>. Además, el establecimiento de una cubierta vegetal adecuada disminuye notablemente la lixiviación de los contaminantes hacia la capa freática, previene la dispersión de polvo contaminado a través del viento y actúa como cubierta vegetal, estabilizando el suelo y previniendo la erosión en zonas antes desnudas o con poca vegetación <sup>(43)</sup>.

El aumento de los costos y la eficacia limitada de los tratamientos habituales han promovido el estudio y desarrollo de nuevas estrategias <sup>(44, 45)</sup>, como la *fitorremediación*. Dicha tecnología ofrece una serie de importantes ventajas en comparación con los métodos convencionales de restauración de suelos: es respetuosa con el medioambiente, rentable económicamente, se puede aplicar a grandes extensiones y permite una gestión sostenible del ambiente contaminado, especialmente cuando las plantas *remediadoras* utilizadas son autóctonas y poseen valor ecológico y/o socioeconómico (cuando se pueden obtener ingresos de los fitoproductos generados a partir de dichos cultivos) <sup>(46, 47)</sup>.

Muchas plantas poseen una capacidad inherente para neutralizar contaminantes orgánicos y/o inorgánicos a través de diferentes procesos, que varían en función de la naturaleza del contaminante: acumulación, degradación, estabilización o volatilización, entre otros.

### **3.2. Metabolismo de los contaminantes**

Las propiedades químicas del contaminante, las cualidades fisiológicas de la especie de planta y las características del medio determinan las interacciones específicas del contaminante con dicho medio (agua o suelo) y con la planta <sup>(44)</sup>. El crecimiento de la planta puede modificar las propiedades del suelo y facilitar así la *remediación* tanto de contaminantes orgánicos como inorgánicos. Además, las comunidades microbianas de la **rizosfera** exudan componentes que influyen en la composición química y las propiedades redox del suelo, afectando así a la movilidad, biodisponibilidad y, en último término, a la bio-degradación de los contaminantes del suelo <sup>(16)</sup>.

#### **3.2.1. Metabolismo de contaminantes orgánicos**

Las plantas son capaces de minimizar los daños producidos por los diferentes contaminantes orgánicos reduciendo, convirtiendo y catabolizando dichos compuestos tóxicos en las células, gracias a la presencia de múltiples enzimas. Sandermann <sup>(48)</sup> acuñó el término de *green-liver* (hígado verde) para referirse y describir el metabolismo de xenobióticos en las plantas. Tanto en un hígado como en una planta, los compuestos orgánicos, una vez adquiridos, son metabolizados en tres pasos o fases secuenciales similares (diferenciando en el tercero, en el cual la planta almacena en vacuolas y pared celular los compuestos

modificados, mientras que, el hígado, los excreta). Un esquema de este proceso metabólico se muestra a continuación en la Figura 3.

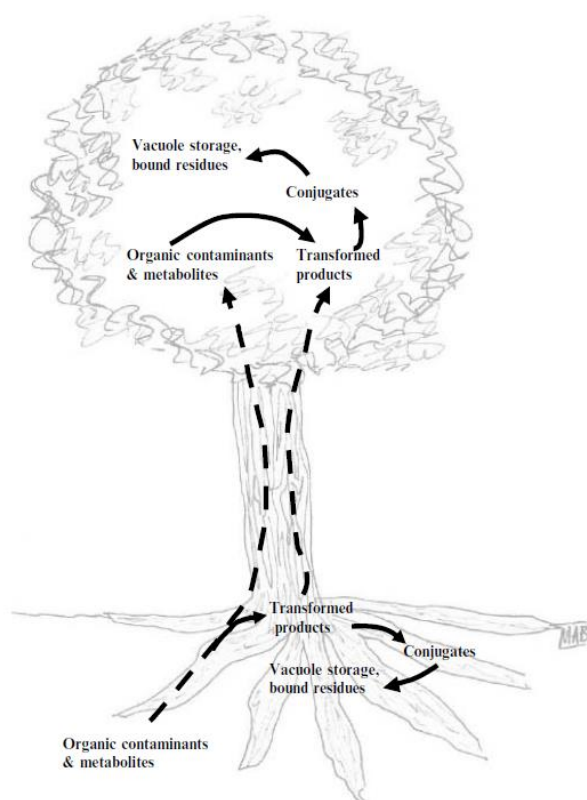


Figura 3. Funcionamiento del metabolismo "green-liver" en plantas utilizadas para la fitorrecuperación de suelos contaminados por contaminantes orgánicos. Las líneas discontinuas representan el transporte a través y hacia los distintos tejidos de la planta y las líneas continuas representan el metabolismo a nivel celular. Tomada de Burken (2003) <sup>(49)</sup>.

Además, se ha comprobado que las enzimas que catalizan la fase I y II (citocromo P450 monooxigenasas y glutatión transferasas, respectivamente) son muy similares a dos enzimas importantes del hígado <sup>(48)</sup>. Otras enzimas claves que participan en la tolerancia, estabilización y deposición de estos contaminantes son las catalasas, deshalogenasas, hidrolasas, lacasas, nitrógeno-reductasas, peroxidasas y polifenol peroxidasas <sup>(50, 51)</sup>.

A pesar de que este modelo de green-liver se ha demostrado, a día de hoy aún no se conocen todas las enzimas implicadas en dichas rutas metabólicas, cómo están reguladas y otros mecanismos de tolerancia, lo que limita nuestra capacidad de explotar todo su potencial para la eliminación de contaminantes xenobióticos <sup>(52, 53, 54)</sup>. De hecho, decodificando estos procesos moleculares y disponiendo de esta información, se podría mejorar la eficacia y estabilidad de los cultivos *fitorremediadores* a través de ingeniería genética. Existen ya numerosos estudios que describen en detalle los mecanismos *fitorremediadores* <sup>(55, 56, 57, 58)</sup> y señalan qué aspectos deben tenerse en cuenta para avanzar en el conocimiento y aplicación de esta tecnología.

### **3.2.2. Metabolismo de contaminantes inorgánicos**

La *remediación* de compuestos inorgánicos como los metales pesados se basa en mecanismos distintos, ya que estos no pueden ser degradados como en el caso de los compuestos orgánicos. Las plantas los inmovilizan o acumulan en sus raíces y tejidos y, luego, deben ser extraídos y tratados.

En suelos con pH alto, los metales se encuentran en formas insolubles por lo que, para aumentar la biodisponibilidad de los mismos, tanto las plantas como los microorganismos asociados a su rizosfera exudan ácidos orgánicos y protones, convirtiendo estos complejos insolubles en iones y compuestos solubles <sup>(56, 59)</sup>. De esta forma, los metales están más disponibles para unirse a biosurfactantes y quelantes, de tal manera que pueden ser transportados a la planta igual que un nutriente (vía apoplástica, simplástica o transmembrana) <sup>(59, 60, 61)</sup>. Los metales se almacenan, posteriormente, en las paredes celulares, las vacuolas y/o el aparato de Golgi <sup>(61)</sup>. Las plantas más comúnmente usadas para la *fitorremediación* de metales pesados son las denominadas hiperacumuladoras, las cuales son capaces de absorber concentraciones muy altas de contaminantes sin desarrollar síntomas de toxicidad. No obstante, también se utilizan plantas que producen gran cantidad de biomasa (mayoritariamente herbáceas) pero que acumulan menos concentraciones de contaminantes (se amplía información de estas plantas en el apartado 3.4).

### **3.3. Tecnologías de fitorremediación**

Las fitotecnologías se basan en los mecanismos fisiológicos básicos que ocurren en las plantas y los microorganismos asociados a ellas. La estrategia *fitorremediadora* a utilizar será diferente en función de las condiciones del sitio y el tipo de contaminante <sup>(62)</sup> y, a priori, puede aplicarse a contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos. Los contaminantes orgánicos, por ejemplo, pueden ser extraídos y degradados mientras que, como se ha mencionado anteriormente, los inorgánicos, no pueden degradarse, sino que se estabilizan en el suelo o son secuestrados por la planta. Además, cada ambiente contaminado es diferente (propiedades, climatología, emplazamiento, etc.). Por ello, no puede diseñarse una estrategia común o solución única, sino que en la *fitorremediación* deben emplearse distintas estrategias o tecnologías (Figura 4), que se adapten de la forma más adecuada posible a cada situación.

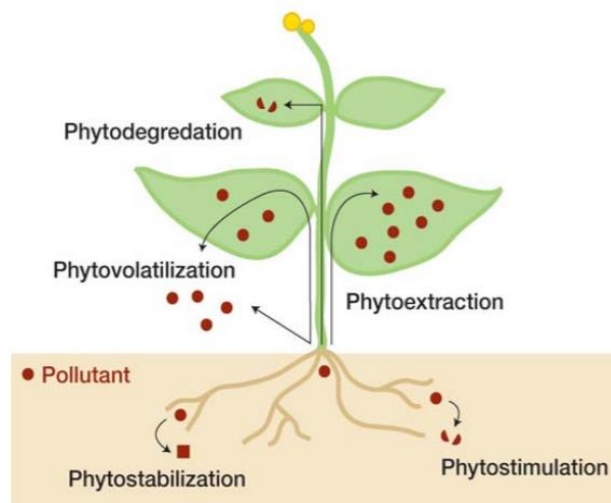


Figura 4. Representación de los posibles destinos de los contaminantes (representados por círculos rojos) según la estrategia fitorremediadora empleada. Los cuadrados representan el producto de una transformación biológica y los círculos partidos representan el producto de una biodegradación. Tomada de Pilon-Smits (2005) <sup>(63)</sup>.

Las estrategias más comúnmente empleadas son:

- Fitodegradación: consiste en la toma y degradación, total o parcial, de los contaminantes en los tejidos de la planta mediante enzimas intracelulares o su eliminación mediante enzimas secretadas. Esta degradación puede ocurrir tanto en las raíces como en el tejido apical <sup>(63)</sup>. La fitodegradación funciona bien para compuestos orgánicos móviles, como herbicidas, TNT (trinitrotolueno), aditivos de gasolina como el MTBE (metil *tert*-butil éter) o disolventes de uso común como el TCE (tricloroetileno) <sup>(49, 64, 65)</sup>. Entre las características más favorables de una especie vegetal para su uso en fitodegradación están que tenga un tamaño grande, que posea un sistema radicular denso y unos niveles altos de enzimas degradativas <sup>(66)</sup>.
- Fitoestimulación o rizodegradación: en este tipo de fitorremediación ocurre una degradación enzimática de los contaminantes, pero a través de la mejora de la actividad de la microbiota asociada a la rizosfera. La planta libera aminoácidos, carbohidratos, ácidos orgánicos y otros exudados que estimulan la actividad metabólica de los microorganismos <sup>(67)</sup>, los cuales, si disponen de las enzimas adecuadas, degradan las sustancias tóxicas pudiendo llegar a mineralizarlas (convertirlas en agua y CO<sub>2</sub>). La fitoestimulación ha demostrado ser efectiva en la degradación de hidrocarburos de petróleo, PCBs y PAHs <sup>(63)</sup>. Esta técnica también se ha denominado en ocasiones rizorrecuperación (*rhizoremediation*), aunque este término se suele usar más para resaltar la sinergia entre las plantas y los microorganismos de su rizosfera en la eliminación de contaminantes. La planta, mediante el aporte de exudados radiculares permite incrementar la biomasa microbiana de la rizosfera. Al reducir la concentración de contaminante de forma más eficiente, la microbiota protege a la planta de los posibles efectos fitotóxicos del mismo permitiendo, a su vez, que esta crezca mejor y elimine el contaminante más eficazmente. La planta, además, mediante su sistema radicular ayuda a los microorganismos a dispersarse a través del suelo y llegar a capas más profundas que de otro modo no estarían a su alcance.
- Fitoextracción: consiste en la eliminación de contaminantes del suelo mediante la absorción de los mismos a través de las raíces y su translocación a la biomasa vegetal <sup>(68)</sup>, generalmente la parte aérea, idealmente recolectable. Existen vegetales que pueden absorber grandes cantidades de contaminantes y que se

denominan hiperacumuladores <sup>(69)</sup>. También existen otras plantas que realizan fitoextracción absorbiendo niveles más bajos de contaminantes, aunque, debido a su alta tasa de crecimiento y producción de biomasa, compensan esa menor absorción pudiendo llegar a eliminar una cantidad considerable de contaminantes del suelo <sup>(70)</sup>. Uno de los rasgos más llamativos de muchas de las plantas utilizadas en fitoextracción es la evaporación extensiva de agua a través de los estomas, que previene o reduce de forma drástica la lixiviación de los contaminantes y retrasa la migración en el propio suelo. Además, esta corriente de evaporación también transporta los contaminantes orgánicos solubles hasta las partes aéreas de la planta <sup>(71)</sup> y, una vez allí, son metabolizados. Algunas plantas liberan contaminantes volátiles o sus metabolitos al ambiente mediante la evapotranspiración, lo que genera dudas sobre los méritos de la fitoextracción. Típicamente, la fitoextracción se usa para contaminantes tóxicos que no pueden ser biodegradados, como metales pesados y partículas radiactivas <sup>(63)</sup>. Cuando la planta completa su desarrollo vegetativo, se recolecta y se procede a su incineración y posterior confinamiento <sup>(66)</sup>, o reciclado, si es económica y técnicamente viable (fitominería). Después de la recolección, el suelo aún mantiene ciertos niveles, aunque bajos, de contaminante, por lo que el ciclo de crecimiento/cosecha, generalmente, se repite a través de varios cultivos hasta alcanzar una limpieza significativa. En esta técnica, a veces se añaden al suelo quelantes como el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), que aumentan considerablemente la biodisponibilidad de los metales y su captación por parte de la planta <sup>(72)</sup>.

- Fitoestabilización: técnica que reduce la movilidad de sustancias en el medioambiente limitando, por ejemplo, la lixiviación de sustancias del suelo <sup>(73)</sup>. Esta técnica se centra en la estabilización a largo plazo y la contención del contaminante (orgánico o inorgánico), mediante su acumulación en raíces o su precipitación en el suelo provocada por la excreción de exudados radiculares <sup>(75)</sup>. No debe entenderse como la solución final para descontaminar un sitio, sino que se debe usar como una medida temporal mientras se espera a una *remediación* más definitiva. La fitoestabilización es efectiva en suelos de textura fina con alto contenido de materia orgánica <sup>(59)</sup>. Como resultado, la fitoestabilización reduce la biodisponibilidad de los contaminantes <sup>(75, 76)</sup>.

- Fitovolatilización: consiste en la eliminación de sustancias del suelo a través de las raíces con posterior liberación al aire en forma gaseosa, mediante la transpiración de la planta. A veces, como resultado de la fitotransformación se liberan sustancias más volátiles y/o menos contaminantes <sup>(5)</sup>. Esta técnica puede usarse para VOCs, como el TCE o el MTBE <sup>(65)</sup>, y para algunos compuestos inorgánicos que pueden existir en formas volátiles, como el Se y el Hg <sup>(77,78)</sup>. La fitovolatilización es una técnica atractiva para aquellos casos en los que pueda utilizarse, ya que no requiere de recolección ni tratamiento posterior del material vegetal. Sin embargo, su uso está restringido debido a que el problema de contaminación no se corrige por completo, sino que solo se transfiere del suelo a la atmósfera, tras lo cual los contaminantes pueden volver a depositarse, por eso es importante realizar un seguimiento de su destino final, como parte de una evaluación de riesgos. Así pues, las investigaciones futuras deben dirigirse a conseguir la estabilización de los contaminantes volátiles de forma segura <sup>(14)</sup>.

A pesar de que todas estas técnicas tengan una base común, que es la utilización de plantas y el aprovechamiento de su metabolismo y fisiología para la gestión de los contaminantes, el potencial de

fitorreparación dependerá, como ya se mencionó, de la interacción entre el suelo, los contaminantes y las plantas. Así pues, dada la complejidad de estas interacciones, que tienen lugar bajo condiciones muy distintas según cada caso particular, se requiere un abordaje de la *fitorreparación* desde un planteamiento multidisciplinar <sup>(79)</sup>.

### **3.4. Cultivos utilizables y su aprovechamiento**

El hecho de que la eliminación de compuestos tóxicos y contaminantes del suelo mediante *fitorreparación* sea exitosa, o no, depende de varios factores, como el nivel de contaminación del suelo y la biodisponibilidad del contaminante, pero, sobre todo, de la selección adecuada de las especies de plantas a utilizar <sup>(80)</sup>. La mayoría de las plantas utilizadas en *fitorreparación*, son cultivos y hierbas seleccionadas con las prácticas agronómicas <sup>(43)</sup>, pero es interesante explorar y explotar las capacidades y el potencial de otras especies, como algunas plantas agrícolas, híbridos de chopos (*Populus* spp.) o sauces (*Salix* spp.) o plantas silvestres que crecen en áreas contaminadas <sup>(81)</sup>. Por ejemplo, *Populus* es la especie vegetal más utilizada para la fitovolatilización de VOCs, ya que su alta tasa de transpiración facilita la translocación del contaminante desde el suelo a la atmósfera <sup>(82)</sup>. Una opción bastante razonable para la descontaminación de un amplio rango de sitios contaminados sería la utilización de cultivos con potencial económico, como pueden ser los cultivos energéticos, cultivos aromáticos, cultivos para pulpa de papel, plantas ornamentales, etc. <sup>(83)</sup> (en el Anexo III, se adjunta una tabla que lista números cultivos utilizados con fines de *fitorreparación* con un alto valor comercial). No obstante, la elección de las especies a utilizar debe ser cuidadosa: la posición taxonómica y la fitoquímica de la especie deberían ser los primeros rasgos a tener en cuenta. También es necesario tener en cuenta otros aspectos, como la especificidad de sitio, las condiciones ambientales, las características edáficas o el nivel de polución <sup>(83)</sup>. Por otro lado, hay una amplia gama de plantas autóctonas ecológica y socio-económicamente valiosas que están en desuso para la *fitorreparación* y que deberían estudiarse para su posible inclusión como especies fitorreparadoras. Este es el caso de *Saccharum spontaneum* que se ha documentado como una hierba con potencial para programas de revegetación y restauración <sup>(84)</sup>.

En cuanto a la *remediación* de suelos contaminados por metales, se conocen numerosas plantas hiperacumuladoras, las cuales son capaces de crecer en suelos metalíferos y acumular altas concentraciones de metales pesados en sus partes aéreas sin sufrir efectos fitotóxicos. Estas plantas se diferencian de las no hiperacumuladoras, además, en que tienen una translocación raíz-parte aérea mucho más rápida y una gran capacidad de detoxificar y secuestrar metales pesados en las hojas. En 2011, Rascio y Navari-Izzo <sup>(69)</sup> señalaron que había alrededor de 450 especies de angiospermas identificadas como hiperacumuladoras de metales pesados (As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, Zn) y se predice que hay aún muchas especies sin identificar. Alrededor del 25% de los hiperacumuladores descubiertos pertenecen a la familia *Brassicaceae* y, en particular, al género *Thlaspi* y *Alyssum*. Estos géneros, además, incluyen a los mayores acumuladores de Ni <sup>(85)</sup>. Los hiperacumuladores de Zn, por ejemplo, son menos abundantes e incluyen *Arabidopsis halleri*, *Sedum alfredii* (*Crassulaceae*) y algunas especies del género *Thlaspi* <sup>(85, 86)</sup>, como *T. praecox* y *T. caerulescens*. Estas cuatro especies, junto con *Solanum nigrum*, son además conocidas por hiperacumular Cd <sup>(87)</sup>. También se utilizan algunas plantas para fines de fitoestabilización de metales,

como son: *Zygophyllum fabago* (Zn), *Hordeum vulgare*, *Lupinus angustifolius* y *Secale cereale* (As) y *Brassica juncea* (Cd, Zn, Cu, Mn, Fe, Pb) <sup>(89, 89, 90)</sup>.

Para la implementación exitosa de la *fitorremediación* en suelos contaminados por compuestos orgánicos, algunos de los factores críticos son una gran área de absorción radicular, una alta actividad enzimática y el incremento de la biodisponibilidad mediante la secreción de exudados <sup>(91)</sup>. En muchos programas de *fitorremediación* por rizofiltración y fitodegradación de contaminantes orgánicos se utilizan especies forestales, principalmente sauces y chopos. Por ejemplo, para la eliminación de benceno, tolueno o mezclas BTEX se han usado chopos híbridos <sup>(92)</sup>. Weyens y colaboradores <sup>(93)</sup> sugirieron el posible papel activo de los árboles de un bosque mixto de roble inglés (*Quercus robur*) y fresno común (*Fraxinus excelsior*), junto con su microbiota, en el proceso de recuperación de un suelo contaminado con TCE. Otros tipos de plantas aplicables a fines de *fitorremediación* incluyen el arroz, la caña de azúcar o la soja <sup>(94)</sup>. En el Anexo III, se adjunta una tabla

### **3.5. Ventajas y limitaciones de la *fitorremediación***

La *fitorremediación*, como cualquier otra tecnología, tiene tanto ventajas como ciertas limitaciones. Tal y como se ha descrito en numerosos estudios <sup>(16, 66, 92, 95, 96, 97)</sup>, las principales ventajas a considerar son:

- Bajo coste: gracias a la capacidad de las plantas para utilizar la radiación solar como fuente de energía. Por otro lado, esta tecnología requiere de poca mano de obra y el coste de las operaciones y el equipamiento también es bajo. Comparando el coste de las excavaciones del suelo (propias de cualquier otra técnica de *remediación* convencional) con el coste de la fitorrecuperación, se observa que esta última es significativamente más barata (en la mayoría de los casos, aproximadamente un 50% más barata). Sin embargo, no existe un análisis económico exhaustivo de este proceso ya que los datos de costos no suelen figurar en las publicaciones académicas y es difícil acceder a los mismos. Se estima que el rango de coste de la *fitorremediación* está entre 25-100\$/tonelada frente al rango de 150-300\$/tonelada de los métodos convencionales.
- Aprovechamiento y reciclaje de los contaminantes: a veces los metales extraídos como contaminantes de las plantas hiperacumuladoras también pueden reutilizarse en las respectivas industrias mineras, por ejemplo, el oro, el níquel, el talio, etc. (en fitominería). Esto permite el reciclaje de estos elementos y supone una ventaja económica adicional de esta tecnología.
- Respetuosa con el medioambiente: la *fitorremediación* puede funcionar sin perturbar el sitio de aplicación, lo cual es una gran ventaja para conseguir la aceptación pública y preservar el medioambiente. Además, la cubierta vegetal previene la erosión y las escorrentías y proporciona numerosos hábitats para las especies silvestres, lo cual incrementa la biodiversidad y ayuda a la restauración del ecosistema. Por otro lado, al tratarse de tratamientos con plantas, estas también sirven como sumidero de carbono. Por eso, la *fitorremediación* no es solo el proceso menos destructivo y dañino, sino que, también, en muchas ocasiones, posee un valor añadido.

- Además, las plantas funcionan como sistemas de bombeo "verdes" al atraer hacia el sistema radicular agua con xenobióticos disueltos, mejorando su biodisponibilidad y, a su vez, facilitando la dispersión de su microbiota, que logra alcanzar así mayores profundidades.

Por otro lado, entre las limitaciones más destacables de la *fitorremediación* se encuentran las siguientes:

- Es un proceso relativamente lento, debido a que el ciclo de crecimiento de las plantas, hasta alcanzar su madurez, requiere de toda la energía, retrasando así el proceso de toma de los contaminantes. Para un propósito práctico, el proceso fitorremediador no debería durar más de diez años <sup>(98)</sup>.

- La fitotoxicidad que producen en la planta los niveles extremadamente altos de contaminantes puede llevar al fracaso de esta fitotecnología. Por tanto, en la mayoría de los casos, solo puede utilizarse en suelos con baja o moderada concentración de contaminantes. En este sentido, el uso combinado de plantas y microorganismos puede aliviar ese estrés para la planta <sup>(99)</sup>.

- La aplicabilidad de esta tecnología está limitada a la capa superficial del suelo, donde están las raíces, de manera que tengan acceso a los contaminantes. Es decir, estos deben encontrarse lo suficientemente superficiales para que el proceso de toma de los mismos a través de las raíces pueda ocurrir; de otra forma, deberían ser atraídos hacia la rizosfera <sup>(100, 101)</sup>.

- La *fitorremediación* no es capaz de descontaminar completamente el suelo debido a que está limitada a la fracción de contaminantes bio-disponible para la planta. Sin embargo, esta limitación no es especialmente importante ya que esta tecnología es capaz de limpiar los suelos hasta niveles de contaminantes inferiores a los que estipulan los criterios legislativos de limpieza de cada país.

- En el caso concreto de la fitovolatilización, los contaminantes pasan de estar en el suelo a liberarse a la atmósfera, lo que lleva a un incremento de la contaminación de este compartimento <sup>(102)</sup>.

## **CAPÍTULO 4. OPORTUNIDADES TECNOLÓGICAS, SOCIO-POLÍTICAS, LEGALES Y COMERCIALES DE LA FITORRECUPERACIÓN**

La *fitorremediación* ha ganado popularidad en las últimas dos décadas, a pesar de que la noción de *fitorremediación* como una tecnología rentable no es una idea demasiado asentada. A favor del uso de esta tecnología, juega el hecho de que cada vez se conoce un mayor número de contaminantes susceptibles de ser tratados mediante *fitorremediación* <sup>(83)</sup>. Con el fin de analizar, a distintos niveles y contextos, las oportunidades existentes para superar las limitaciones y desafíos de la *fitorremediación* y plantear posibles estrategias potenciales que mejoren su expansión social y comercial (logrando que se afiance como una tecnología rentable y que se extienda su uso), se plantea a continuación un breve análisis SLEPT, el cual considera sistemáticamente factores Socioculturales, Legales, Económicos, Políticos y Tecnológicos.

### **4.1. Contexto tecnológico**

#### **4.1.1. Selección adecuada de las plantas**

Tal y como se comentó en el punto 2.4 de este trabajo, una opción interesante para aumentar la rentabilidad de la *fitorremediación* es la utilización de cultivos que tengan un alto potencial económico y/o valor añadido, como pueden ser los denominados cultivos energéticos (aquellos dedicados a la producción de energía), cultivos de plantas aromáticas o de plantas ornamentales, entre otros. A continuación, se destacan algunas de las oportunidades de mercado que puede encontrar la *fitorremediación* sostenible.

- Aceites esenciales aromáticos: los aceites esenciales de los cultivos aromáticos usados en *fitorremediación* pueden obtenerse libres de metales pesados mediante procesos como la destilación a vapor <sup>(103)</sup>. Algunos cultivos aromáticos, como el vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), la planta herbácea *Cymbopogon citratus*, la lavanda (*Lavandula vera o angustifolia*) o la menta negra (*Mentha piperita*), podrían proporcionar un ingreso adicional si, después de ser empleados para la descontaminación de suelos, se comercializan sus aceites esenciales <sup>(104, 105, 106, 107)</sup>. Investigaciones recientes han sugerido que la *fitorremediación* basada en cultivos aromáticos es una metodología sostenible y económica con un riesgo limitado <sup>(105, 108, 109)</sup>.

- Pulpa de papel y madera: existen muchas especies importantes de árboles que se utilizan para la producción de pulpa de papel, como, por ejemplo, el chopo (*Populus spp.*), el bambú (*Dendrocalamus strictus*) o el eucalipto (*Eucalyptus tereticornis*), que podrían ser explotados como especies de alto valor económico para *fitorremediación* comercial. Tanto los chopos como los sauces (*Salix spp.*) son especies de las que también se obtienen productos madereros y que pueden ser explotadas como plantas *fitorremediadoras* <sup>(110, 111)</sup>.

- Biochar (del inglés, bio- y *charcoal*): es un producto sólido resultante de la pirólisis de biomasa vegetal, que se usa como enmienda para el suelo y se compone de formas aromáticas de carbono, mayoritariamente estables, que prevalecen en el suelo durante mucho tiempo secuestrando el carbono en formas no biodisponibles <sup>(83)</sup>. Debido a su propiedad de mantener inaccesible el carbono en el suelo evitando que retorne a la atmósfera, se considera una “fuente negativa” de carbono y una buena opción para mitigar del cambio climático <sup>(112)</sup>. Por otro lado, el biochar se utiliza como enmienda para el suelo, mejorando sus propiedades, o como una forma sostenible de gestionar los residuos agrícolas y ganaderos <sup>(113)</sup>.

- **Biodiesel**: tras cosechar un cultivo utilizado en *fitorremediación*, su biomasa se puede convertir en energía. Se considera, pues, una fuente de energía limpia y con balance neutro de carbono, ya que la cantidad liberada durante la producción de energía es absorbida por el cultivo energético en crecimiento. Hay un número sustancial de cultivos valiosos utilizados en programas de *fitorremediación* que pueden ser utilizados para producción de biodiesel, como pueden ser *Miscanthus* spp., *Panicum virgatum*, *Helianthus annuus*, *Ricinus communis*, *Jatropha curcas* o *Populus* spp., entre otros <sup>(114)</sup>. Sin embargo, a pesar de los múltiples beneficios que conllevan los cultivos energéticos, su uso puede provocar diversos problemas: pérdidas de biodiversidad debido a que un monocultivo a gran escala conduciría a la desaparición del hábitat de numerosas especies; cambios en el uso de la tierra, pasando de cultivos agrícolas a energéticos, lo que podría provocar la escasez de alimentos y forrajes; interrupciones del ecosistema, influenciando la relación planta-polinizador y/o actuando como planta invasora; cambios en los ciclos y dinámicas del agua y los nutrientes si las raíces del cultivo utilizado son profundas, entre otros inconvenientes <sup>(47)</sup>.

- **Biofortificación**: se puede aprovechar la capacidad de absorción de muchos cultivos para remediar suelos contaminados con metales, como Fe, Zn y Se, a la vez que se aumenta la biofortificación de estos micronutrientes en el cultivo. Esto podría ayudar a suplir parte de la carencia en estos micronutrientes que sufre alrededor de la mitad de la población mundial <sup>(115)</sup>. Por tanto, la combinación de la *fitorremediación* con la biofortificación de cultivos, es una práctica que beneficia tanto al medioambiente como a la sociedad <sup>(116)</sup>. Sin embargo, si se quisiera utilizar estos cultivos crecidos en lugares contaminados como fuente de alimento, sería imprescindible realizar una evaluación detallada y cuidadosa de los riesgos.

- **Ornamentales**: la floricultura es otra opción interesante para la *fitorremediación* sostenible, limpiando sitios contaminados a la vez que se obtienen unos ingresos estables. Se han llevado a cabo numerosos estudios que demuestran la eficacia de algunas plantas ornamentales para descontaminar metales pesados. Se ha demostrado, por ejemplo, que *Jasminum* spp. presenta una alta tolerancia a Cr <sup>(117)</sup>. Ramana y colaboradores <sup>(118)</sup> exploraron la posibilidad de *fitorremediación* de Cr utilizando cuatro plantas ornamentales y concluyeron que, a bajas concentraciones, *Calendula officinalis* es apta para la *remediación* de suelos contaminados con Cr; Lal y colaboradores <sup>(119)</sup> examinaron el potencial de tres cultivos ornamentales (*Tagetes erecta*, *Chrysanthemum indicum* y *Glandiulus grandiflorus*) para remediar Cd, encontrando que *G. grandiflorus* era la que mayor tolerancia presentaba a este metal. También se ha mostrado que la semilla de caléndula tiene el potencial de crecer satisfactoriamente en sitios contaminados con As <sup>(120)</sup>.

Otras oportunidades de mercado para la *fitorremediación* dignas de destacar serían la fitominería, que aprovecha y reutiliza los minerales extraídos por las plantas fitorremediadoras y los denominados “techos verdes”, que mitigan la polución del aire (especialmente interesante en zonas urbanas).

#### **4.1.2. Utilización de microorganismos**

Las comunidades microbianas desempeñan un papel fundamental en el establecimiento de las plantas. Se sabe que los exudados de las raíces de las plantas actúan como fuentes nutritivas de carbono para la microbiota de la rizosfera, aumentando así la actividad metabólica de la misma, lo que crea una retroalimentación positiva que estimula el crecimiento de las plantas. Entre las bacterias de la rizosfera destacan las llamadas PGPR (rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal), algunas de las cuales se han llegado a utilizar como inóculo para potenciar el crecimiento de las plantas, al promover la degradación

de los contaminantes orgánicos y/o inorgánicos y reducir así el estrés ambiental provocado por estos <sup>(121)</sup>. Las rizobacterias, ectomicorrizas y microorganismos endófitos (bacterias y hongos) pueden usarse para facilitar la degradación de PAHs, PHC, pesticidas, PCBs y otros aromáticos clorados, TCE y TNT <sup>(55, 58, 122)</sup>. Asimismo, también pueden aumentar la biodisponibilidad y toma de numerosos metales, así como favorecer su inmovilización y volatilización por parte de las plantas <sup>(56, 123, 124)</sup>. Los microorganismos utilizados en *fitorremediación* asistida por PGPRs deben ser tolerantes a altos niveles de contaminantes, no patogénicos y no deben suponer ningún riesgo para el medioambiente. Así pues, la necesidad de mejorar el potencial fitorreparador natural de algunas plantas se ve cubierta con el uso de PGPR que asistan el proceso de *fitorremediación*.

#### **4.1.3. Mejora mediante ingeniería genética**

Uno de los retos de la *fitorremediación* es mejorar el comportamiento y rendimiento de las plantas para eliminar los contaminantes del suelo, lo cual requiere de investigaciones que permitan ampliar nuestro conocimiento sobre los mecanismos naturales implicados en dicha detoxificación. La aparición de las técnicas de ingeniería genética ha hecho posible mejorar el potencial de *fitorremediador* de las mismas, optimizando su capacidad de acumulación e incrementando su tolerancia a la toxicidad frente a contaminantes <sup>(14)</sup>. Se han desarrollado tres estrategias principales: 1) transformación con genes de otros organismos (mamíferos, bacterias, etc.), 2) transformación con genes de otras especies de plantas y 3) sobreexpresión de genes de la propia planta <sup>(125)</sup>. A continuación, se presentan algunos ejemplos de investigaciones llevadas a cabo en materia de ingeniería genética de plantas con aplicación en la *fitorremediación* de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

- Sobreexpresión del gen de una ATP sulfurilasa de *Arabidopsis* en alfalfa (*Medicago sativa*). Esto incrementa la tolerancia al estrés al Cd y mejora la eficiencia de la *fitorremediación* <sup>(126)</sup>.
- Transferencia del receptor glucocorticoide (GR) basado en ratas y el gen *rolC* a *Nicotiana langsdorffii*. Se obtuvieron resultados prometedores para el aumento del potencial de *fitorremediación* del Cr(VI), lo que se atribuyó al correspondiente aumento del contenido fenólico/ de azúcar <sup>(127)</sup>.
- Inserción en *Nicotiana tabacum* del gen de una permeasa de Ni-Co de la bacteria *Rhodopseudomonas palustris* para su expresión como transportador heterólogo de Co. Aumentó el potencial de *remediación* del Co (en 5 veces) de la planta de tabaco. En esta manipulación genética, la *fitorremediación* del Ni también aumentó 2 veces en comparación con la planta silvestre <sup>(128)</sup>.
- Sobreexpresión, en tabaco, de CsGSTU (glutación S-transferasa de clase tau derivada de *Citrus sinensis*). Aumentó el potencial de *fitorremediación* del herbicida fluorodifeno y la tolerancia a estreses abióticos como la salinidad y la sequía <sup>(129)</sup>. Benekos y colaboradores <sup>(130)</sup> también descubrieron que la expresión de la proteína GmGSTU4 (una isoenzima de la familia de la glutación transferasa multifuncional) de cultivos alimentarios, como la soja (*Glycine max*), aumentaba su potencial de *fitorremediación* frente a determinados herbicidas, como cloroacetanilida y difenilo.
- Co-expresión de genes de glutación S-transferasa (GST) y de CYP2E1 (una citocromo P450 monooxigenasa humana) en alfalfa para la *fitorremediación* de suelos contaminados mixtos de

Hg-TCE. Aumentó la resistencia a los efectos tóxicos de los contaminantes a la vez que mejoraba la capacidad de acumulación de estos en los tejidos de la planta. Esto indicaba que estas plantas de alfalfa transgénicas tenían potencial para ser utilizadas para la *fitorremediación* de suelos contaminados con contaminantes orgánicos e inorgánicos <sup>(131)</sup>.

Estos son solo algunos ejemplos de las numerosas investigaciones que se han llevado a cabo con éxito en el laboratorio (y en ocasiones también en pruebas de campo) y que ponen de manifiesto que el potencial natural de las plantas para remediar los contaminantes del suelo puede ser mejorado mediante la ingeniería genética, superando algunas de las limitaciones que presenta esta tecnología restauradora. A pesar de esto, existe cierto riesgo ecológico a la biodiversidad si la adaptabilidad de estas plantas transgénicas resulta en su expansión e invasión de la vegetación silvestre, convirtiéndose en competidoras y reemplazando a dichas especies silvestres, o si se produce un flujo de transgenes por polinización cruzada <sup>(132)</sup>. Además, podrían suponer un riesgo indirecto para otras especies de plantas y animales, para la estructura natural de las comunidades o el funcionamiento del ecosistema, en general <sup>(133)</sup>. A fin de poder incluir estos sistemas genéticos sintéticos dentro las posibilidades y oportunidades de la estrategia fitorremediadora, es necesario concebir y probar nuevos sistemas sintéticos capaces de autodestruirse o no ser transferidos horizontalmente, lo cual tiene perspectivas esperanzadoras gracias a los recientes avances en las herramientas de edición de genomas, como CRISPR-Cas9 <sup>(14)</sup>.

#### **4.2. Contexto socio-político**

Debido a los efectos nocivos directos e indirectos de los contaminantes sobre las plantas, el ganado y la salud humana, durante los últimos años, se ha observado un aumento significativo del interés de la opinión pública hacia metodologías alternativas para *remediar* sitios contaminados.

La *fitorremediación* sostenible (en términos generales "fitomanejo" o *fitomanagement*), es un posible enfoque que podría ayudar a impulsar el negocio de la *fitorremediación* y la recuperación del medioambiente. Se precisa, para ello, de la participación de los diferentes sectores interesados, como investigadores, administración, propietarios de tierras, profesionales y empresas de *fitorremediación*, con el fin de fortalecer los conocimientos sobre *fitorremediación* con miras al futuro desarrollo de las empresas de *remediación* de los suelos. Además de su efectividad para reducir la contaminación ambiental, existen otras muchas razones que podrían impulsar la aceptación por parte de la opinión pública de la *fitorremediación* como una práctica sostenible, por ejemplo, su potencial de restauración del hábitat, la creación de lugares más verdes, los valores de paisajismo y el aumento de la flora y la biodiversidad de la fauna. Además, la conservación de la fertilidad del sustrato y los costos reducidos también son otras ventajas de la aplicación de la *fitorremediación* en comparación con los métodos convencionales <sup>(134)</sup>.

A pesar de los múltiples avances y estudios exitosos sobre esta tecnología, la confianza con relación a su aplicabilidad real y rentabilidad entre las partes interesadas (no científicas), como agricultores o propietarios de tierras, aún es baja <sup>(83)</sup>. Esto puede deberse a múltiples factores limitantes de la *fitorremediación*, como: 1) restricciones de tiempo, 2) presupuestos escasos, 3) ausencia general de

perspectivas a largo plazo o 4) a otros factores, como la falta de preocupación social y de información <sup>(98)</sup>. Superar todos esos obstáculos es mucho más fácil desde la política, por lo que podría ser útil una coalición de actores que pudieran ejercer un efecto *lobby* de forma coordinada. En regiones altamente desarrolladas como Europa, se dispone de mucha información sobre la efectividad de los proyectos de *fitorremediación* <sup>(135)</sup>. Como consecuencia, existe una presión creciente para diseñar políticas adecuadas basadas en plantas económicamente valiosas que puedan aplicarse inmediatamente para la recuperación progresiva de sitios contaminados. La información sobre las consecuencias ecológicas y sociales de la contaminación y su posible *remediación* debería facilitar la consecución de inversiones públicas (o privadas). Según un estudio publicado por Koelmel y colaboradores <sup>(134)</sup> es digno de mención que los países en desarrollo, especialmente los del sudeste asiático, estén mostrando un creciente interés en la investigación sobre *fitorremediación*, destacando el caso de India, que lidera el número de artículos, patentes, libros y tráfico de Google en campo de la *fitorremediación*.

Desde el punto de vista de la dimensión social, la *fitorremediación* sostenible debe construirse de abajo hacia arriba: las decisiones de las partes interesadas, políticas o de la empresa deberían aceptarse o surgir de demandas sociales. En general, se reconoce que las acciones de gestión para la recuperación o restauración del suelo, al igual que en otros campos, se implementan y se aceptan mejor con la participación de la sociedad <sup>(136)</sup>. La colaboración y participación basada en el conocimiento son clave para lograr una sostenibilidad en la innovación, el consumo, la producción y el mantenimiento de la *remediación* ambiental <sup>(83)</sup>. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de introducir el concepto de *fitorremediación* desde las primeras etapas del desarrollo educativo.

Finalmente, Licht e Isebrands <sup>(137)</sup> indicaron que hay una idea clave que todos los que trabajan en la *fitorremediación* deben tener en cuenta: la justicia ambiental. Esta se entiende como el trato justo de las personas de todas las razas, culturas e ingresos con respecto al desarrollo, implementación y cumplimiento de leyes, regulaciones, programas y políticas ambientales. El trato justo significa que ningún grupo racial, étnico o socioeconómico debe sufrir una parte desproporcionada de las consecuencias ambientales negativas resultantes de las operaciones de empresas industriales, municipales y comerciales <sup>(137)</sup>. Desafortunadamente, las personas que sufren las consecuencias directas de los contaminantes, por lo general, no se benefician de los productos de esas actividades que son las responsables primarias de la contaminación.

#### **4.3. Contexto económico**

Antes de la implementación de cualquier programa de *fitorremediación* (independientemente del objetivo final deseado), es fundamental proporcionar un marco económico sólido que incluya el capital (inicial) y los costos operativos de dicho programa <sup>(97)</sup>. Existen numerosas variables (por ejemplo, la lejanía del sitio contaminado, el tipo de contaminante, el tipo y calidad del suelo) que motivan que los costos del proceso puedan variar mucho de un sitio a otro <sup>(92)</sup>. Wan y colaboradores <sup>(97)</sup> señalaron la carencia sistemática de análisis económicos exhaustivos de este tipo de procesos. Los datos económicos no suelen figurar en las publicaciones académicas y, debido a cuestiones de confidencialidad, no es fácil acceder a los informes comerciales que contienen dicha información. Sin embargo, la *fitorremediación* del suelo se considera

generalmente rentable cuando se la compara con métodos más convencionales de eliminación y tratamiento de residuos. Se ha estimado que los costos de *fitorremediación*, en la mayoría de los casos, son un 50% más bajos que los costos de excavación <sup>(93)</sup>. Solo unos pocos estudios hacen públicos esos datos, como es el caso de un proyecto chino de *fitorremediación* publicado por Wan *et al.* <sup>(97)</sup>. Estos autores indicaron que el tratamiento de limpieza de un suelo contaminado por múltiples metales a lo largo de un periodo de dos años, hasta lograr disminuir la concentración de los mismos por debajo de los umbrales legalmente permitidos, costó unos 38 dólares americanos por metro cúbico (38\$/m<sup>3</sup>), cifra inferior a la del coste de la mayoría de las tecnologías registradas en la literatura hasta el momento. El coste económico hoy es el factor más determinante del sistema de *fitorremediación* utilizado. Las acciones *in situ*, normalmente, se consideran menos demandantes de capital, aunque más lentas, que los métodos *ex situ* (que generalmente implican excavación, transporte y tratamiento físico) <sup>(138)</sup> siendo, por tanto, las primeras, más adecuadas para economías en desarrollo.

La *fitorremediación* comercial de sitios contaminados debe centrarse, en consecuencia, en tres objetivos principales: 1) inversión asumible, 2) rendimiento económico y no solo ambiental, y 3) riesgo económico mínimo para desarrollar oportunidades de mercado <sup>(83)</sup>. Es por esto que un paso más en las estrategias futuras de *fitorremediación* sería la inclusión de cultivos de alto valor añadido con aplicaciones comerciales para desarrollar oportunidades de mercado, ampliando así las fronteras de la *fitorremediación* convencional que está meramente destinada a restaurar sitios contaminados <sup>(139)</sup>. Como se detalló en apartados anteriores, las oportunidades del mercado de *fitorremediación* sostenible podrían ser numerosas.

#### **4.4. Contexto legal y regulatorio**

La combinación de cambios en la economía, el medioambiente y la sociedad, junto con una percepción pública más informada, han obligado a los reguladores a introducir progresivamente legislación, monitoreo y controles más restrictivos con respecto a la contaminación a nivel nacional e internacional. En la Carta Mundial del Suelo revisada <sup>(140)</sup>, entre las directrices para las medidas adoptadas por los gobiernos, encontramos el establecimiento y la aplicación de reglamentos para limitar la acumulación de contaminantes por encima de los umbrales establecidos para salvaguardar la salud humana y del ecosistema y para facilitar el saneamiento de los suelos que superan estos niveles de contaminación. Los países deben contar con leyes eficaces que proporcionen una base jurídica para prevenir y gestionar la contaminación del suelo. Según Boyd <sup>(141)</sup>, hasta 2012, las constituciones de 177 de los 193 países de la ONU reconocían el derecho a un medioambiente sano y a la existencia de una legislación ambiental. En 1976 y 1978, Portugal y España fueron, respectivamente, los primeros países en incluir el derecho a un medioambiente sano en sus constituciones <sup>(141)</sup>. Países de todo el mundo han comenzado a promulgar leyes, siguiendo las disposiciones de la UE, tanto para proteger los suelos limpios como para limpiar los sitios ya contaminados <sup>(142)</sup>. En España, el Estado tiene la competencia exclusiva sobre la legislación básica de protección del medioambiente, sin perjuicio de las competencias de las Comunidades Autónomas españolas, que pueden tomar medidas de protección adicionales. La legislación española define claramente el concepto de suelo contaminado en la Ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados, que establece

las partes responsables de *remediar* suelos contaminados debido a actividades industriales y comerciales, determinando que la reparación debe llevarse a cabo aplicando las mejores técnicas disponibles y permitiendo llegar a acuerdos entre esos responsables y los autorizados por la Autoridad Regional para la descontaminación y restauración del suelo. Dichos acuerdos pueden establecer que los fondos públicos ofrezcan incentivos económicos para ayudar a cubrir costos de limpieza y reparación del suelo contaminado, a cambio de que las posibles ganancias de capital del suelo reviertan en la Administración pública financiadora <sup>(143)</sup>. Esto puede suponer una gran oportunidad para implantar la *fitorremediación* como práctica habitual para remediar sitios contaminados ya que, al ser una tecnología de bajo coste, respetuosa con el medioambiente y con grandes oportunidades de mercado, puede resultar muy atractiva a la administración pública de cara a financiar un proyecto de *remediación*.

Se puede afirmar que los países europeos, y España en concreto, tienen un sistema de regulación que incluye medidas para prevenir la contaminación del suelo, para gestionar suelos contaminados, y desarrollar un sistema de responsabilidad ambiental. Sin embargo, todavía hay algunos elementos que pueden enriquecer aún más el sistema de reglamentación y que suponen una oportunidad para que la *fitorremediación* se convierta en una tecnología ampliamente aceptada y utilizada. Un punto clave consiste en apoyar estrategias de *remediación* verde sostenible y apoyar la reutilización de la tierra en el sitio porque reportaría beneficios ambientales. Para esto, es necesario introducir medidas que desincentiven la utilización de técnicas de *remediación* convencionales no sostenibles, como sería, por ejemplo, la de aumentar los impuestos sobre los vertederos <sup>(143)</sup>. Por otro lado, aún sigue siendo necesario establecer unas directrices de reglamentación para saber cuándo se podría considerar la posibilidad de utilizar plantas modificadas genéticamente en tratamientos de descontaminación <sup>(14)</sup>.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES**

El presente trabajo permite extraer las siguientes conclusiones:

1. La contaminación del suelo supone un riesgo para el medioambiente y por ende para la salud del ser humano, considerándose uno de los grandes problemas y retos de nuestro tiempo. Por ello, se hace evidente la necesidad urgente de encontrar alternativas viables para el tratamiento de desechos que, además de respetuosas con el medioambiente, resulten a la vez rentables desde el punto de vista económico.

2. Queda patente que no existe un único método que sea la panacea para remediar la contaminación de cualquier ambiente, ni para restaurar completamente un entorno dado, sino que se deben implementar diferentes estrategias de tratamiento, físicas, químicas y/o biológicas, de manera integrada. En este escenario, la *fitorremediación* se presenta como una tecnología emergente, no destructiva, de alto valor estético y bajo coste que utiliza el potencial de las plantas para eliminar una gran variedad de contaminantes del ecosistema.

3. Esta tecnología, sin embargo, aún muestra ciertas limitaciones que deben ser superadas. Los avances en biotecnología vegetal, y en particular en el campo de la ingeniería genética, tienen el potencial de mejorar los rasgos genéticos de las plantas, proporcionándoles una mayor resistencia frente a la toxicidad de los metales y un aumento de sus capacidades fitorremediadoras. Es necesario seguir investigando para comprender mejor los mecanismos de *fitorremediación* y conseguir aumentar la eficiencia del proceso.

4. En relación al punto anterior sobre el uso de organismos modificados genéticamente (tanto plantas como rizobacterias), el mayor obstáculo a la progresión de la *fitorremediación* podría ser la oposición de la opinión pública al uso de los mismos. Por este motivo, es especialmente importante incentivar la educación científica para mejorar la comprensión y percepción pública de la ciencia, a la vez que se elaboran programas de divulgación que popularicen la *fitorremediación* como una estrategia sostenible. Así pues, definir una adecuada estrategia de comunicación es una tarea pendiente para los actores involucrados en fomentar el uso de la *fitorremediación*.

5. Las prioridades de la *fitorremediación* en el futuro deberían centrarse en el establecimiento de la *fitorremediación* a nivel comercial mediante el desarrollo biotecnológico de especies más eficientes, así como en el uso de variedades de cultivos con un alto valor añadido (como, por ejemplo, plantas ornamentales, cultivos aromáticos, cultivos energéticos o especies forestales productoras de papel y madera), tolerantes a los contaminantes. Asimismo, se debe explotar el microambiente del suelo y los microorganismos de la rizosfera para su aplicación como mejora de la eficacia de la *fitorremediación* en la práctica real.

6. La *fitorremediación* basada en cultivos de alto valor económico está ganando gradualmente interés en todo el mundo, y se está creando una oportunidad de mercado mundial para el negocio de la *fitorremediación*. Esto es particularmente pertinente para los países en desarrollo, ya que la *fitorremediación* sostenible también es asequible en términos económicos.

## **CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA**

1. Goodwin, N., Nelson, J.A., Ackerman, F., Weisskopf, T. Consumption and the Consumer Society. Medford, MA. Tufts University Global Development and Environment Institute. 2008.
2. Glazer AN, Nikaido H. Microbial biotechnology: fundamentals of applied microbiology. 2ª ed. Cambridge University Press. 2007.
3. Kang JW. Removing environmental organic pollutants with bioremediation and phytoremediation. *Biotechnol Lett.* 2014; 36(6):1129–39.
4. European Environment Agency (EEA). Avances en la gestión de sitios contaminados [internet]. Fecha de publicación: 02 de mayo de 2014 [actualizado 17 de enero de 2019; consultado 25 de septiembre]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/progress-in-management-of-contaminated-sites-3/assessment>
5. Campos del Pozo VM. *Fitorremediación de contaminantes persistentes: una aproximación biotecnológica utilizando chopo (Populus spp.) como sistema modelo.* [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid; 2010.
6. Rodríguez-Eugenio N, McLaughlin M y Pennock D. Soil Pollution: a hidden reality. Roma, Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). 2018. p. 142-142.
7. European Environment Agency (EEA). The European environment-State and Outlook 2020-Land and Soil. [Internet]. Fecha de publicación: 04 de diciembre de 2019 [consultado 5 de junio de 2020]. Luxemburgo. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/soer>
8. Payá Pérez A, Rodríguez Eugenio N. Status of local soil contamination in Europe: revision of the indicator Progress in the management contaminated sites in Europe. Publications Office of the European Union, Luxembourg; 2018.
9. Abdel-Shafy HI, Mansour MSM. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egypt. J. Pet.* 2018;27(4):1275-90.
10. Pandey VC, Bajpai O. Chapter 1 - Phytoremediation: From Theory Toward Practice. En: Pandey VC, Baudh K, eds. Phytomanagement of Polluted Sites (Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation). Elsevier; 2019. p. 1-49.
11. Hou D, Ok YS. Speed up mapping of soil pollution. *Nature.* 2019; 266:455.
12. Havugimana E, Bhople BS, Kumar A, Byiringiro E, Mugabo JP, Kumar A. Soil pollution—major sources and types of soil pollutants. *Environmental Sci. & Eng.* 2015; 11:53–86.
13. Singh RP, Agrawal M. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *J Wasted Manag.* 2008;28(2):347–58.
14. Ramírez-García R, Gohil N, Singh V. Chapter 21 - Recent Advances, Challenges, and Opportunities in Bioremediation of Hazardous Materials. En: Pandey VC, Baudh K, eds. Phytomanagement of Polluted Sites (Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation). Elsevier; 2019. p. 517-568.
15. Mirsal, IA. Major Types of Soil Pollutants. *Soil Pollution.* Heidelberg, Berlín. Springer; 2008; p. 117-136
16. Gerhardt KE., Gerwing PD, Greenberg BM. Opinion: Taking phytoremediation from proven technology to accepted practice. *Plant Sci.* 2017;256:170–85.
17. Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSDR). ATSDR's Substance Priority List. [Internet]. Fecha de publicación: 2019 [actualizado 17 de enero de 2020; citado 3 de agosto de 2020]. Disponible en : <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/index.html>
18. Farina M, Rocha JB, Aschner M. Mechanisms of methylmercury-induced neurotoxicity: evidence from experimental studies. *Life Sci.* 2011; 89:555-563.
19. Sharma S, Singh B, Manchanda VK. Phytoremediation: role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclides and heavy metal contaminated soil and water. *Environ Sci Pollut Res.* 2015;22(2):946–62.
20. Environment Protection Agency (EPA). Radiation Health Effects. [Internet]. Fecha de publicación: 19 de enero de 2017 [actualizado 02 de agosto de 2019; citado 25 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://www.epa.gov/radiation/radiation-health-effects>

21. Luthy RG. Organic Contaminants in the Environment: Challenges for the Water/Environmental Engineering Community. En: Norling P, Wood-Black F, Masciangioli TM, editors. Water and Sustainable Development: Opportunities for the Chemical Sciences: A Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable. Washington (DC): National Academies Press (US); 2004.
22. Puhakka JA, Herwig RP, Koro PM, Wolfe GV, Ferguson JF. Biodegradation of chlorophenols by mixed and pure cultures from a fluidized-bed reactor. *Appl Microbiol Biotechnol*. 1995;42(6):951–7.
23. Song B, Zeng G, Gong J, Liang J, Xu P, Liu Z, et al. Evaluation methods for assessing effectiveness of in situ remediation of soil and sediment contaminated with organic pollutants and heavy metals. *Environ Int*. 2017;105:43–55.
24. Gong X, Xu X, Gong Z, Li X, Jia C, Guo M, et al. Remediation of PAH-contaminated soil at a gas manufacturing plant by a combined two-phase partition system washing and microbial degradation process. *Environ Sci Pollut Res*. 2015;22(16):12001–10.
25. Chen X, Li H, Liu X, Zhang X, Liang X, He C, et al. Combined remediation of pyrene-contaminated soil with a coupled system of persulfate oxidation and phytoremediation with ryegrass. *Environ Sci Pollut Res*. 2016;23(20):20672–9.
26. Lin W, Guo C, Zhang H, Liang X, Wei Y, Lu G, et al. Electrokinetic-enhanced remediation of phenanthrene-contaminated soil combined with *Sphingomonas* sp. GY2B and biosurfactant. *Appl Biochem Biotechnol*. 2016;178(7):1325–38.
27. Thomé A, Reginatto C, Vanzetto G, Braun AB. Remediation Technologies Applied in Polluted Soils: New Perspectives in This Field. En: Zhan L, Chen Y, Bouazza A, editores. Singapur: Springer Singapur; 2019. p. 186–203.
28. Fernández Rodríguez MD, García Gómez MC, Alonso Blazquez N, Tarazona JV. Soil Pollution Remediation. En: Wexler P, editor. Encyclopedia of Toxicology. 3ª ed. Oxford: Academic Press; 2014. p. 344–355.
29. Azubuike CC, Chikere CB, Okpokwasili GC. Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World J Microbiol Biotechnol*. 2016;32(11):180.
30. Adams GO, Fufeyin PT, Okoro SE, Ehinomen I. Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: a review. *Int J Environ Bioremediat Biodegrad*. 2015; 3(1):28–39.
31. Silva-Castro G, Uad I, González-López J, Fandiño CG, Toledo FL, Calvo C. Application of selected microbial consortia combined with inorganic and oleophilic fertilizers to recuperate oil-polluted soil using land farming technology. *Clean Techn Environ Policy*. 2012;14(4):719–26.
32. Cerqueira VS, Peralba M do CR, Camargo FAO, Bento FM. Comparison of bioremediation strategies for soil impacted with petrochemical oily sludge. *Int Biodeterior Biodegradation*. 2014;95:338–45.
33. Whelan MJ, Coulon F, Hince G, Rayner J, McWatters R, Spedding T, et al. Fate and transport of petroleum hydrocarbons in engineered biopiles in polar regions. *Chemosphere*. 2015;131:232–40.
34. Coulon F, Al Awadi M, Cowie W, Mardlin D, Pollard S, Cunningham C, et al. When is a soil remediated? Comparison of biopiled and windrowed soils contaminated with bunker-fuel in a full-scale trial. *Environ Pollut*. 2010;158(10):3032–40.
35. Koul B, Taak P. Ex situ Soil Remediation Strategies. Biotechnological Strategies for Effective Remediation of Polluted Soils. 2018. p. 39–57.
36. Höhener P, Ponsin V. In situ vadose zone bioremediation. *Curr Opin Biotech*. 2014;27:1–7.
37. Koul B, Taak P. Ex situ Soil Remediation Strategies. Biotechnological Strategies for Effective Remediation of Polluted Soils. 2018. p. 39–57.
38. Ruffini Castiglione M, Giorgetti L, Becarelli S, Siracusa G, Lorenzi R, Di Gregorio S. Polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soils: bioaugmentation of autochthonous bacteria and toxicological assessment of the bioremediation process by means of *Vicia faba* L. *Environ Sci Pollut Res*. 2016;23(8):7930–41.
39. Isaac P, Bourguignon N, Maizel D, Ferrero MA. Indigenous PAH-degrading bacteria in oil-polluted marine sediments from Patagonia: diversity and biotechnological properties. En: Olivera N., Libkind D., Donati E. eds. Biology and biotechnology of Patagonian microorganisms. Springer, Cham; 2016. p. 31–42.
40. Kuppusamy S, Thavamani P, Megharaj M, Venkateswarlu K, Lee YB, Naidu R. Pyrosequencing analysis of bacterial diversity in soils contaminated long-term with PAHs and heavy metals: Implications to bioremediation. *J. Hazard. Mater*. 2016;317:169–79.

41. Atma W, Larouci M, Meddah B, Benabdeli K, Sonnet P. Evaluation of the phytoremediation potential of *Arundo donax* L. for nickel-contaminated soil. *Int. J. Phytoremediation*. 2017;19(4):377–86.
42. Cunningham SD, Shann JR, Crowley DE, Anderson TA. Chapter 1- Phytoremediation of Contaminated Water and Soil. En: American Chemical Society. *Phytoremediation of Soil and Water Contaminants*. Vol. 664. 1997. p. 2-17.
43. Vangronsveld J, Van Assche F, Clijsters H. Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: In situ metal immobilization and revegetation. *Environ Pollut*. 1995;87(1):51–9.
44. Singh OV, Jain RK. Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2003;63(2):128–35.
45. Reichenauer TG, Germida JJ. Phytoremediation of Organic Contaminants in Soil and Groundwater. *ChemSusChem*. 2008;1(8):708–17.
46. Pandey VC, Pandey DN, Singh N. Sustainable phytoremediation based on naturally colonizing and economically valuable plants. *J. Clean Prod*. 2015;86:37–9.
47. Pandey VC, Bajpai O, Singh N. Energy crops in sustainable phytoremediation. *Renew Sust Energ Rev*. 2016;54:58–73.
48. Sandermann H, Diesperger H, Scheel D. Metabolism of Xenobiotics by Plant Cell Cultures. En: Barz W., Reinhard E., Zenk M.H. eds. *Plant Tissue Culture and Its Bio-technological Application. Proceedings in Life Sciences*. 1977. p. 178-196.
49. Burken JG. Uptake and Metabolism of Organic Compounds: Green-Liver Model. En: Schnoor JL, Zehnder A. eds. *Phytoremediation 2003*. p. 59–84.
50. Yu Q, Powles S. Metabolism-Based Herbicide Resistance and Cross-Resistance in Crop Weeds: A Threat to Herbicide Sustainability and Global Crop Production. *Plant Physiol*. 2014;166(3):1106.
51. Schwitzguébel J-P. Phytoremediation of soils contaminated by organic compounds: hype, hope and facts. *J Soil Sediment*. 2017;17(5):1492–502.
52. Glick BR. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. *Biotechnol. Adv*. 2010;28(3):367–74.
53. Sun J, Wu X, Gan J. Uptake and Metabolism of Phthalate Esters by Edible Plants. *Environ. Sci. Technol*. 2015;49(14):8471–8.
54. Vergani L, Mapelli F, Zanardini E, Terzaghi E, Di Guardo A, Morosini C, et al. Phyto-rhizoremediation of polychlorinated biphenyl contaminated soils: An outlook on plant-microbe beneficial interactions. *Sci. Total Environ*. 2017;575:1395–406.
55. Gerhardt KE, Gerwing PD, Huang X-D, Greenberg BM. Microbe-Assisted Phytoremediation of Petroleum Impacted Soil. En: Fingas M. ed. *Handbook of Oil Spill Science and Technology*. Edmonton, Alberta, Canada: 2014. p. 407–27.
56. Stephenson C, Black CR. One step forward, two steps back: the evolution of phytoremediation into commercial technologies. *Bioscience Horizons*. 2014;7.
57. Fester T, Giebler J, Wick LY, Schlosser D, Kästner M. Plant–microbe interactions as drivers of ecosystem functions relevant for the biodegradation of organic contaminants. *Curr Opin Biotechnol*. 2014;27:168–75.
58. Yavari S, Malakahmad A, Sapari NB. A Review on Phytoremediation of Crude Oil Spills. *Water Air Soil Pollut*. 2015;226(8):279.
59. Padmavathiamma PK, Li LY. Rhizosphere Influence and Seasonal Impact on Phytostabilisation of Metals—A Field Study. *Water Air Soil Pollut*. 2012;223(1):107–24.
60. Robinson BH, Bañuelos G, Conesa HM, Evangelou MWH, Schulin R. The Phytomanagement of Trace Elements in Soil. *Crit. Rev. Plant Sci*. 2009;28(4):240–66.
61. Singh BR, Gupta SK, Azaizeh H, Shilev S, Sudre D, Song WY, et al. Safety of food crops on land contaminated with trace elements. *J. Sci. Food Agric*. 2011;91(8):1349–66.
62. Thangavel, P., Subhuram, C. V., 2004. Phytoextraction – Role of hyper accumulators in metal contaminated soils. *Proc. Indian Natl. Sci. Acad. Part B*. 2004;70(1):109-130.
63. Pilon-Smits E. PHYTOREMEDIATION. *Annu. Rev. Plant Biol* 2005;56(1):15–39.
64. McCutcheon SC, Schnoor JL. Overview of Phytotransformation and Control of Wastes. En: McCutcheon SC, Schnoor JL eds. *Phytoremediation 2003*. p. 1–58.

65. Winnike-McMillan S, Zhang Q, Davis LC, Erickson LE, Schnoor JL. Phytoremediation of Methyl Tertiary-Butyl Ether. Lehr JH y Keeley J eds. *Water Encyclopedia*. 2005. p. 385–97.
66. Delgadillo-López AE, González-Ramírez CA, Prieto-García F, Villagomez-Ibarra J, Acevedo-Sandoval O. Phytoremediation: an alternative to eliminate pollution. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 2011;14(2):597–612.
67. Dzantor EK. Phytoremediation: the state of rhizosphere ‘engineering’ for accelerated rhizodegradation of xenobiotic contaminants. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2007;82(3):228–32.
68. Ali H, Khan E, Sajad MA. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosfere*. 2013;91(7):869–81.
69. Rascio N, Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Sci*. 2011;180(2):169–81.
70. Guidi Nissim W, Palm E, Mancuso S, Azzarello E. Trace element phytoextraction from contaminated soil: a case study under Mediterranean climate. *Environ Sci Pollut Res*. 2018;25(9):9114–31.
71. Cunningham SD, Anderson TA, Schwab AP, Hsu FC. Phytoremediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants. Vol. 56. 1996.
72. Salt DE, Smith RD, Raskin I. PHYTOREMEDIATION. *Annu. Rev. Plant Physiol*. 1998;49(1):643–68.
73. Lone MI, He Z, Stoffella PJ, Yang X. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives. *J. Zhejiang Univ. Sci*. 2008;9(3):210–20.
74. Gatheru Waigi M, Sun K, Gao Y. Sphingomonads in Microbe-Assisted Phytoremediation: Tackling Soil Pollution. *Trends Biotechnol*. 2017;35(9):883–99.
75. Barton CD, Marx DH, Adriano DC, Koo BJ, Newman L, Czapka SJ, et al. Phytostabilization of a landfill containing coal combustion waste. *Environ. Geosci*. 2005;12(4):251–65.
76. Mendez Monica O, Maier Raina M. Phytostabilization of Mine Tailings in Arid and Semiarid Environments—An Emerging Remediation Technology. *Environ. Health Perspect*. 2008;116(3):278–83.
77. Hansen D, Duda PJ, Zayed A, Terry N. Selenium Removal by Constructed Wetlands: Role of Biological Volatilization. *Environ. Sci. Technol*. 1998;32(5):591–7.
78. Rugh CL, Wilde HD, Stack NM, Thompson DM, Summers AO, Meagher RB. Mercuric ion reduction and resistance in transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing a modified bacterial *merA* gene. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1996;93(8):3182–7.
79. Lasat MM. Phytoextraction of Toxic Metals. *J. Environ. Qual*. 2002;31(1):109–20.
80. Ernst WHO. Evolution of metal hyperaccumulation and phytoremediation hype. *New Phytol*. 2000;146(3):357–8.
81. Olson PÉ, Flechter JS, Philp PR. Natural attenuation/phytoremediation in the vadose zone of a former industrial sludge basin. *Environ Sci & Pollut Res*. 2001;8(4):243–9.
82. Terry N, Carlson C, Raab TK, Zayed AM. Rates of Selenium Volatilization among Crop Species. *J. Environ. Qual*. 1992;21(3):341–4.
83. Pandey VC, Souza-Alonso P. Chapter 2 - Market Opportunities: in Sustainable Phytoremediation. Pandey VC, Baudh K, eds. *Phytomanagement of Polluted Sites (Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation)*. Elsevier; 2019. p. 51-82.
84. Pandey VC, Bajpai O, Pandey DN, Singh N. *Saccharum spontaneum*: an underutilized tall grass for revegetation and restoration programs. *Genet Resour Crop Evol*. 2015;62(3):443–50.
85. Baker AJM, Brooks RR. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—a review of their distribution, ecology and phytochemistr. *Biorecovery*. 1989;1: 81–126.
86. Yang XE, Long XX, Ye HB, He ZL, Calvert DV, Stoffella PJ. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance). *Plant and Soil*. 2004;259(1):181–9.
87. Sun R, Zhou Q, Jin C. Cadmium accumulation in relation to organic acids in leaves of *Solanum nigrum* L. as a newly found cadmium hyperaccumulator. *Plant and Soil*. 2006;285(1):125–34.
88. Clemente R, Walker DJ, Roig A, Pilar Bernal M. Heavy metal bioavailability in a soil affected by mineral sulphides contamination following the mine spillage at Aznalcóllar (Spain). *Biodegradation*. 2003;14(3):199–205.

89. Mains D, Craw D, Rufaut CG, Smith CMS. Phytostabilization of Gold Mine Tailings, New Zealand. Part 1: Plant Establishment in Alkaline Saline Substrate. *Int. J. Phytoremediation*. 2006;8(2):131–47.
90. Conesa HM, Faz Á, Arnaldos R. Initial studies for the phytostabilization of a mine tailing from the Cartagena-La Union Mining District (SE Spain). *Chemosphere*. 2007;66(1):38–44.
91. Schwitzguébel J-P, van der Lelie D, Baker A, Glass DJ, Vangronsveld J. Phytoremediation: European and American trends: Successes, obstacles and needs. *J. Soil Sediment*. 2002;2(2):91–9.
92. Vangronsveld J, Herzig R, Weyens N, Boulet J, Adriaensen K, Ruttens A, et al. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environ Sci Pollut Res*. 2009;16(7):765–94.
93. Weyens N, van der Lelie D, Taghavi S, Vangronsveld J. Phytoremediation: plant–endophyte partnerships take the challenge. *Curr. Opin. Biotechnol*. 2009;20(2):248–54.
94. Rock S, Pivetz B, Madalinski K, Adams N, Wilson T. Introduction to Phytoremediation. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, D.C., EPA/600/R-99/107 (NTIS PB2000-106690), 2000.
95. Surriya O, Sarah Saleem S, Waqar K, Gul Kazi A. Chapter 1 - Phytoremediation of Soils: Prospects and Challenges. Hakeem KR, Sabir M, Öztürk M, Mermut AR, eds. *Soil Remediation and Plants*. San Diego: Academic Press; 2015. p. 1-33.
96. Chaney RL, Baklanov IA. Chapter Five - Phytoremediation and Phytomining: Status and Promise. Cuyper A, Vangronsveld J, eds. *Advances in Botanical Research*. 2017;83:189–221.
97. Wan X, Lei M, Chen T. Cost–benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil. *Sci. Total Environ*. 2016;796–802.
98. Robinson B, Fernández J-E, Madejón P, Marañón T, Murillo JM, Green S, et al. Phytoextraction: an assessment of biogeochemical and economic viability. *Plant and Soil*. 2003;249(1):117–25.
99. Kuiper I, Lagendijk EL, Bloemberg GV, Ben JJJ. Rhizoremediation: A Beneficial Plant-Microbe Interaction. *Mol. Plant Microbe Interact*. 2004;17(1):6–15.
100. Ghavzan NJ, Trivedy R. Environmental pollution control by using phytoremediation technology. *Pollut. Res*. 2005;24(4):875-884.
101. Russell, K. The use and effectiveness of phytoremediation to treat persistent organic pollutants. *Environ. Careers Organ*. 2005.
102. Kozdrój J, van Elsas JD. Structural diversity of microbial communities in arable soils of a heavily industrialised area determined by PCR-DGGE fingerprinting and FAME profiling. *Appl. Soil Ecol*. 2001;17(1):31–42.
103. Lal K, Yadav RK, Kaur R, Bundela DS, Khan MI, Chaudhary M, et al. Productivity, essential oil yield, and heavy metal accumulation in lemon grass (*Cymbopogon flexuosus*) under varied wastewater–groundwater irrigation regimes. *Ind Crops Prod*. 2013;45:270–8.
104. Kumar KV, Patra DD. Alteration in yield and chemical composition of essential oil of *Mentha piperita* L. plant: Effect of fly ash amendments and organic wastes. *Ecol. Eng*. 2012;47:237–41.
105. Verma SK, Singh K, Gupta AK, Pandey VC, Trivedi P, Verma RK, et al. Aromatic grasses for phytomanagement of coal fly ash hazards. *Ecol. Eng*. 2014;73:425–8.
106. Angelova AR, Grekov DF, Kisyov VK, Ivanov IK. Potential of Lavender (*Lavandula vera* L.) for Phytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals. *Int J Biol Biomol Agric*. 2015;9(5):465-72.
107. Kumar A, Maiti SK. Effect of Organic Manures on the Growth of *Cymbopogon citratus* and *Chrysopogon zizanioides* for the Phytoremediation of Chromite-Asbestos Mine Waste: A Pot Scale Experiment. *Int. J. Phytoremediation*. 2015;17(5):437–47.
108. Pandey VC, Singh N. Aromatic plants versus arsenic hazards in soils. *J. Geochem. Explor*. 2015;157:77–80.
109. Pandey VC, Pandey DN, Singh N. Sustainable phytoremediation based on naturally colonizing and economically valuable plants. *J. Clean. Prod*. 2015;86:37–9.
110. Shukla OP, Juwarkar AA, Singh SK, Khan S, Rai UN. Growth responses and metal accumulation capabilities of woody plants during the phytoremediation of tannery sludge. *J. Waste Manag*. 2011;31(1):115–23.
111. Konlechner C, Türkün M, Langer I, Vaculík M, Wenzel WW, Puschenreiter M, et al. Expression of zinc and cadmium responsive genes in leaves of willow (*Salix caprea* L.) genotypes with different accumulation characteristics. *Environ. Poll*. 2013;178:121–7.

112. Nanda S, Dalai AK, Berruti F, Kozinski JA. Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials. *Waste Biomass Valori*. 2016;7(2):201–35.
113. Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: an introduction. J. Lehmann, S. Joseph, eds. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London. 2009. pp. 1-12.
114. Tripathi V, Edrisi SA, Abhilash PC. Towards the coupling of phytoremediation with bioenergy production. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2016;57:1386–9.
115. Zhao F-J, McGrath SP. Biofortification and phytoremediation. *Curr. Plant Biol.* 2009;12(3):373–80.
116. Yin X, Yuan L, Liu Y, Lin Z. Phytoremediation and Biofortification: Two Sides of One Coin. En: Yin X, Yuan L, eds. *Phytoremediation and Biofortification*. SpringerBriefs in Molecular Science. Springer, Dordrecht. 2012. p. 1-6.
117. Mahimairaja S, Shenbagavalli S, Naidu R. Remediation of Chromium-Contaminated Soil due to Tannery Waste Disposal : Potential for Phyto- and Bioremediation. 2011;54(3):175–81.
118. Ramana S, Biswas AK, Singh AB, Ajay, Ahirwar NK, Subba Rao A. Phytoremediation ability of some floricultural plant species. *Ind J Plant Physiol.* 2013;18(2):187–90.
119. Lal K, Minhas PS, Shipra, Chaturvedi RK, Yadav RK. Extraction of cadmium and tolerance of three annual cut flowers on Cd-contaminated soils. *Bioresour. Technol.* 2008;99(5):1006–11.
120. Chintakovid W, Visoottiviseth P, Khokiattiwong S, Lauengsuchonkul S. Potential of the hybrid marigolds for arsenic phytoremediation and income generation of remediators in Ron Phibun District, Thailand. *Chemosphere.* 2008;70(8):1532–7.
121. Khan S, Afzal M, Iqbal S, Khan QM. Plant–bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils. *Chemosphere.* 2013;90(4):1317–32.
122. Hou J, Liu W, Wang B, Wang Q, Luo Y, Franks AE. PGPR enhanced phytoremediation of petroleum contaminated soil and rhizosphere microbial community response. *Chemosphere.* 2015;138:592–8.
123. Cabral L, Soares CRFS, Giachini AJ, Siqueira JO. Arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of contaminated areas by trace elements: mechanisms and major benefits of their applications. *World J Microbiol Biotechnol.* 2015;31(11):1655–64.
124. Wu Y, Ma L, Liu Q, Vestergård M, Topalovic O, Wang Q, et al. The plant-growth promoting bacteria promote cadmium uptake by inducing a hormonal crosstalk and lateral root formation in a hyperaccumulator plant *Sedum alfredii*. *J. Hazard. Mater.* 2020;39(5):1226-61.
125. Maestri E, Marmiroli N. Transgenic Plants for Phytoremediation. *Int. J. Phytoremediation.* 2011;13:264–79.
126. Kumar V, AlMomin S, Al-Shatti A, Al-Aqeel H, Al-Salameen F, Shajan AB, et al. Enhancement of heavy metal tolerance and accumulation efficiency by expressing *Arabidopsis* ATP sulfurylase gene in alfalfa. *Int. J. Phytoremediation.* 2019;21(11):1112–21.
127. Del Bubba M, Ancillotti C, Checchini L, Ciofi L, Fibbi D, Gonnelli C, et al. Chromium accumulation and changes in plant growth, selected phenolics and sugars of wild type and genetically modified *Nicotiana glauca*. *J. Hazard. Mater.* 2013;262:394–403.
128. Nair S, Joshi-Saha A, Singh S, V. R, Singh S, Thorat V, et al. Evaluation of transgenic tobacco plants expressing a bacterial Co–Ni transporter for acquisition of cobalt. *J. Biotechnol.* 2012;161(4):422–8.
129. Lo Cicero L, Madesis P, Tsiftaris A, Lo Piero AR. Tobacco plants over-expressing the sweet orange tau glutathione transferases (CsGSTUs) acquire tolerance to the diphenyl ether herbicide fluorodifen and to salt and drought stresses. *Phytochemistry.* 2015;116:69–77.
130. Benekos K, Kissoudis C, Naniou-Obeidat I, Labrou N, Madesis P, Kalamaki M, et al. Overexpression of a specific soybean GmGSTU4 isoenzyme improves diphenyl ether and chloroacetanilide herbicide tolerance of transgenic tobacco plants. *J. Biotechnol.* 2010;150(1):195–201.
131. Zhang Y, Liu J, Zhou Y, Gong T, Wang J, Ge Y. Enhanced phytoremediation of mixed heavy metal (mercury)–organic pollutants (trichloroethylene) with transgenic alfalfa co-expressing glutathione S-transferase and human P450 2E1. *J. Hazard. Mater.* 2013;260:1100–7.
132. Gunarathne V, Mayakaduwa S, Ashiq A, Weerakoon SR, Biswas JK, Vithanage M. Chapter 5 - Transgenic Plants: Benefits, Applications, and Potential Risks in Phytoremediation. Prasad MNV, ed. *Transgenic Plant Technology for Remediation of Toxic Metals and Metalloids*. Academic Press; 2019. p. 89-102.

133. Wilkinson MJ, Sweet J, Poppy GM. Risk assessment of GM plants: avoiding gridlock? *Trends Plant Sci.* 2003;8(5):208–12.
134. Koelmel J, Prasad MNV, Pershell K. Bibliometric Analysis of Phytotechnologies for Remediation: Global Scenario of Research and Applications. *Int. J. Phytoremediation.* 2015;17(2):145–53.
135. Panagos P, Van Liedekerke M, Yigini Y, Montanarella L. Contaminated Sites in Europe: Review of the Current Situation Based on Data Collected through a European Network. Martin-Olmedo P, editor. *Int J Environ Res Public Health.* 2013. 11 p.
136. Le Maitre DC, Gaertner M, Marchante E, Ens E-J, Holmes PM, Pauchard A, et al. Impacts of invasive Australian acacias: implications for management and restoration. *Divers. Distrib.* 2011;17(5):1015–29.
137. Licht LA, Isebrands JG. Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities. *Biomass and Bioenergy.* 2005;28(2):203–18.
138. Caliman FA, Robu BM, Smaranda C, Pavel VL, Gavrilesco M. Soil and groundwater cleanup: benefits and limits of emerging technologies. *Clean Technol Environ Policy.* 2011;13(2):241–68.
139. Pandey VC, Baudh K. Phytomanagement of Polluted Sites: Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation. 2018. p. 1–626.
140. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). Global Soil Partnership - World Soil Charter. 39ª Conferencia, Roma. Doc. C 2015/31 de abril 2015, 1. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i4965e.pdf>.
141. Boyd DR. The Constitutional Right to a Healthy Environment. *Environ Sci Policy.* 2012;54(4):3–15.
142. China Council for International Cooperation on Environment and Development (CCICED). Special Policy Study on Soil Pollution Management. 2015. Disponible en: <https://environmental-partnership.org/wp-content/uploads/2016/01/SPS-on-Soil-Pollution-Management.pdf>
143. Ramón F, Lull C. Legal measures to prevent and manage soil contamination and to increase food safety for consumer health: The case of Spain. *Environ. Poll.* 2019;250:883–91.
144. Wang W-X. Chapter 4 - Bioaccumulation and Biomonitoring [Internet]. Blasco J, Chapman PM, Campana O, Hampel M, eds. *Marine Ecotoxicology.* Academic Press.; 2016. p. 99-119.
145. Borgå K. Ecotoxicology: Bioaccumulation. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier; 2013.
146. Blowes DW, Ptacek CJ, Jambor JL, Weisener CG. 9.05 - The Geochemistry of Acid Mine Drainage [Internet]. Holland HD, Turekian KK, eds. *Treatise on Geochemistry.* Oxford: Pergamon; 2003. p. 149-204.
147. Adriaens P, Gruden C, McCormick ML. 9.14 - Biogeochemistry of Halogenated Hydrocarbons. Holland HD, Turekian KK, editors. *Treatise on Geochemistry.* Oxford: Pergamon; 2007. p. 1-35.
148. Schindler DW. Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnol Oceanogr.* 2006;51(1):356–63.
149. Carpenter SR. Submersed Vegetation: An Internal Factor in Lake Ecosystem Succession. *Amer. Naturalist.* 1981;118(3):372–83.
150. Arend, K. K. et al. Seasonal and interannual effects of hypoxia on fish habitat quality in central Lake Erie. *Freshw. Biol.* 2011;56:366-383.
151. Lynch JM, Brimecombe MJ, Frans, A.A.M. DL. Rhizosphere. 2001.
152. CIPD. PESTLE analysis. Fecha de publicación: 26 de febrero de 2020 [citado 25 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://www.cipd.co.uk/knowledge/strategy/organisational-development/pestle-analysis-factsheet>

## ANEXOS

### Anexo I. Glosario de términos

**Bioacumulación:** se define como el incremento de las concentraciones de un contaminante en los tejidos de un organismo como consecuencia de la incorporación de este contaminante a la cadena alimentaria desde el medioambiente <sup>(144, 145)</sup>. Un proceso específico de bioacumulación es la bioconcentración, en el cual la concentración del contaminante en el organismo es mayor que la concentración del contaminante en el medio circundante <sup>(146)</sup>. La bioamplificación consiste en un proceso de bioacumulación en el que la concentración del contaminante aumenta a medida que se asciende en la cadena trófica, por lo que dicha concentración es mayor en un organismo dado que en los que constituyen su alimento y mayor que si dicho organismo solo hubiera estado expuesto al medioambiente contaminado <sup>(147)</sup>.

**Biodegradable:** compuesto orgánico susceptible de sufrir transformación biológica. A veces, la biodegradación puede convertir un compuesto inocuo en uno tóxico o alterar uno que ya es tóxico de por sí y generar otro aún más tóxico o tóxico para un espectro más amplio de organismos. Por sí mismo, el concepto “biodegradable” no hace referencia a un tipo concreto de degradación del compuesto, aunque suele utilizarse, en el lenguaje común, para referirse a que dicho compuesto puede mineralizarse <sup>(2)</sup>.

**Eutrofización:** es una palabra proveniente del griego *eutros*, que significa “bien nutrido”. Consiste en el crecimiento excesivo de plantas y algas, en masas de agua dulce y en zonas costeras, debido al incremento de la biodisponibilidad de uno o más factores limitantes de la fotosíntesis (dióxido de carbono, nutrientes y luz solar) <sup>(148)</sup>. Es un proceso que ocurre de forma natural pero que las actividades antropogénicas aceleran <sup>(149)</sup>. La consecuencia de la eutrofización es el desarrollo de densas floraciones de cianobacterias nocivas que reducen la claridad del agua y perjudican su calidad. Además, la cubierta vegetal formada limita la penetración de la luz, reduciendo el crecimiento de otras plantas y perjudicando a los depredadores acuáticos que necesitan luz para atrapar a sus presas. Cuando estas plantas y algas mueren, la descomposición microbiana agota el oxígeno disponible en el agua, creando una condición de anoxia que provoca la muerte de los organismos aeróbicos <sup>(150)</sup>.

**Mineralización:** proceso de degradación completa de un compuesto orgánico hasta sus productos finales: CO<sub>2</sub>, agua y otros compuestos inorgánicos (cloro, fluor u otros derivados minerales). Requiere condiciones aeróbicas <sup>(2)</sup>.

**Persistente:** compuesto no susceptible de transformarse o degradarse biológicamente en ciertos ambientes, por lo que, en general, se degrada muy lentamente <sup>(2)</sup>.

**Recalcitrante:** compuesto incapaz de transformarse o degradarse biológicamente en una amplia variedad de ambientes, por lo que, prácticamente, no se degrada y permanece intacto en el medioambiente. La recalcitrancia podría definirse como una persistencia “extrema”. No obstante, algunos compuestos pueden ser recalcitrantes en condiciones aeróbicas pero biodegradables en condiciones de anaerobiosis <sup>(2)</sup>.

**Rizosfera:** proviene de la palabra griega *rhiza*, que significa “raíz”. Se puede definir como la zona de suelo alrededor de la raíz de una planta e influenciada por esta y donde dichas raíces, la microbiota asociada a estas y el suelo interactúan <sup>(151)</sup>.

**SLEPT:** un análisis SLEPT supone un marco para analizar factores macroambientales (Sociales, Legales, Económicos, Políticos y Tecnológicos) que influyen a un negocio, empresa u organización. Normalmente se lleva a cabo para entender los factores externos a tener en cuenta, como parte de un plan estratégico o de investigación de mercado. El análisis SLEPT deriva del análisis PEST (factores Políticos, Económicos, Sociales y Tecnológicos), al que se le agrega el factor Legal <sup>(152)</sup>.

**Superficie artificial:** la superficie que alberga actividades industriales, comerciales y de transporte, zonas urbanas y emplazamientos de minas, vertederos y construcciones, en los que es más probable que se produzca contaminación <sup>(8)</sup>.

## Anexo II. Datos sobre las actividades contaminantes del suelo.

La fuente de los datos que se muestran a continuación (Tabla 1 y Figura 1) es [Eionet NCR Soil data collection on contaminated sites](#), suministrados por el [JRC \(Joint Research Centre\)](#) a la EEA (*European Environment Agency*).

*Tabla 1. Desglose de las principales fuentes que causan la contaminación en Europa expresadas como porcentaje de fuentes sobre el número total de fuentes identificadas. Las cuotas europeas se han calculado como media en 22 países/regiones del EEE (Espacio Económico Europeo) <sup>(4)</sup>. La eliminación y el tratamiento de residuos, junto con las actividades industriales y comerciales, han causado casi dos tercios de la contaminación local que hay que afrontar ahora y en el futuro. Las operaciones nucleares solo contribuyen en un 0,1% a los niveles de contaminación notificados, pero existen lagunas en los datos de este sector, por ejemplo, en Francia y el Reino Unido.*

Fuentes clave de contaminación del suelo local	Promedio (basado en 22 países / regiones)
Eliminación y tratamiento de residuos	38,1
Actividades industriales y comerciales <sup>a</sup>	34
Almacenamiento <sup>b</sup>	10,7
Otros <sup>c</sup>	8,1
Derrames de transporte en tierra <sup>d</sup>	7,9
Militar <sup>e</sup>	3,4
Operaciones nucleares	0,1

*a) Actividades industriales y comerciales, servicios industriales y comerciales, minería, extracción y producción de petróleo y centrales eléctricas; b) Almacenamiento, almacenamiento de aceite y sitios de extracción, almacenamiento de productos químicos obsoletos, de estiércol u otros almacenamientos; c) Otros, otras fuentes (campos de tiro, etc.), sitios agrícolas (almacenes de pesticidas y fertilizantes minerales, granjas, etc.) e instalaciones de tratamiento de aguas residuales; d) Derrames de transporte en tierra, derrames de petróleo y de otras sustancias peligrosas; e) Militar, operaciones militares y zonas afectadas por la guerra.*

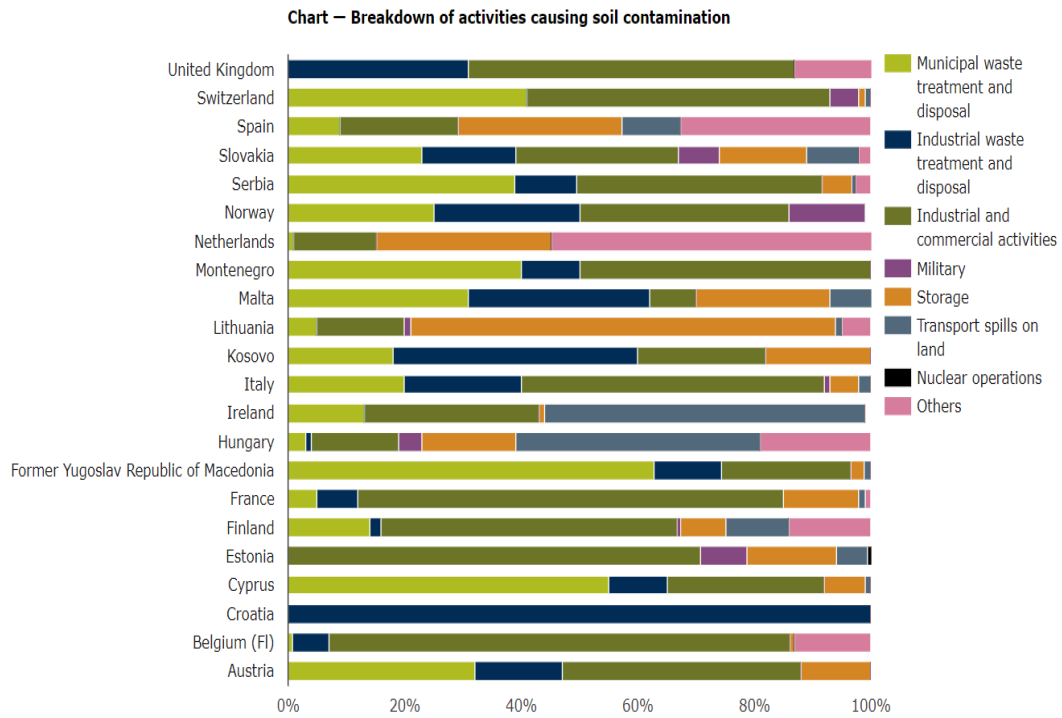


Figura 1. Desglose de las actividades que provocan contaminación del suelo por países <sup>(4)</sup>. ARYM, Antigua República Yugoslava de Macedonia; Bélgica (FI), Bélgica (Flandes); Kosovo, Kosovo según la RCSNU 1244/99.

### Anexo III. Cultivos económicamente rentables en *fitorremediación*

Tabla 2. Lista de cultivos utilizadas en *fitorremediación* con un alto valor económico en el negocio de esta tecnología. Tomada de Pandey y Souza-Alonso <sup>(83)</sup>.

Name of Crop	Family	Tolerance	Economic Use	Type of Contaminated Sites	References
<i>Vetiveria zizanioides</i>	Poaceae	Most tolerant	Essential oil	Pb/Zn mine tailings; Fly ash dumps; Pb, Cu, and Zn sites; chromite-asbestos mine waste dumps	Wu et al. (2010), Chakraborty and Mukherjee (2010), Danh et al. (2010), Verma et al. (2014), Srivastava et al. (2014), Das et al. (2013) and Kumar and Maiti (2015)
<i>Cymbopogon citratus</i>	Poaceae	Tolerant	Essential oil	Chromite-Asbestos mine waste dumps	Kumar and Maiti (2015)
<i>Chrysopogon zizanioides</i>	Poaceae	Tolerant	Essential oil	Chromite-asbestos mine waste dumps	Kumar and Maiti (2015) Srivastava et al. (2014)
<i>Mentha arvensis</i>	Lamiaceae	Tolerant	Essential oil	Fly ash dumps, heavy metals (i.e., Cd, Pb, Cu, Mn, and Zn)	Das et al. (2013) and Zhejzakov and Nielsen (1996b)
<i>Mentha piperita</i> L.	Lamiaceae	Tolerant	Essential oil	Fly ash and organic waste, heavy metals (i.e., Cd, Pb, Cu, Mn, and Zn)	Kumar and Patra (2012), Zhejzakov and Nielsen (1996b) and Zhejzakov et al. (2006)
<i>Anethum graveolens</i> L.		Tolerant	Essential oil	Heavy metals (i.e., Cd, Cu, and Pb) contaminated soil	Zhejzakov et al. (2006)
<i>Lavandula angustifolia</i> Mill.	Lamiaceae	Tolerant	Essential oil	Heavy metals (i.e., Cd, Pb, Cu, Mn, Zn, and Fe) contaminated soil	Zhejzakov and Nielsen (1996a)
<i>Lavandula vera</i> L.	Lamiaceae	Tolerant	Essential oil	Pb, Cd, and Zn contaminated soil	Angelova et al. (2015)
<i>Ocimum basilicum</i> L.	Lamiaceae	Tolerant	Essential oil	Heavy metals (i.e., Cd, Cu, and Pb) contaminated soil	Zhejzakov and Nielsen (1996a,b); Zhejzakov et al. (2006)
<i>Ricinus communis</i>	Euphorbiaceae	Most tolerant	Biodiesel	Fly ash contaminated sites; mine tailings; DDTs and cadmium (Cd) co-contaminated soil; Cadmium contaminated soil; heavy metal contaminated soil	Pandey (2013), Olivares et al. (2013), Huang et al. (2011), Baudh and Singh (2012), Rajkumar and Freitas (2008) and Pandey and Prakash (2014)
<i>Jatropha curcas</i>	Euphorbiaceae	Most tolerant	Biodiesel	Heavy metal contaminated soil; arsenic, chromium, and zinc polluted soil; soil contaminated with used lubricating oil; lead, and cadmium polluted soil; hexavalent chromium polluted soil	Juwarkar et al. (2008), Yadav et al. (2009), Kumar et al. (2008), Agamuthu et al. (2010), Mangkoedihardjo and Surahmida (2008) and Mangkoedihardjo et al. (2008)
<i>Miscanthus</i>	Poaceae	Most tolerant	Biodiesel	PAH polluted soils; fly ash dumps	Didier et al. (2012) and Técher et al. (2012)

(continúa)

Tabla 1. (Continuación)

Name of Crop	Family	Tolerance	Economic Use	Type of Contaminated Sites	References
<i>Dendrocalamus strictus</i>	Poaceae	Tolerant	Pulpwood	Tannery sludge dumps	Shukla et al. (2011) and Pandey and Prakash (2014)
<i>Populus</i> spp.	Salicaceae	Tolerant	Pulpwood	Tannery sludge dumps; boron contaminated sites; fly ash dumps	Shukla et al. (2011), Robinson et al. (2007) and Das et al. (2013)
<i>Leucaena leucocephala</i>	Fabaceae	Tolerant	Pulpwood	Fly ash amended soil; dye contaminated site	Rai et al. (2004), Pandey and Kumar (2013) and Jayanthi et al. (2014)
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	Myrtaceae	Tolerant	Eucalyptus oil, Timber-wood	Tannery sludge dumps; fly ash dumps	Shukla et al. (2011), Juwarkar and Jambhulkar (2008) and Ram et al. (2008)
<i>Tectona grandis</i>	Lamiaceae	Tolerant	Timber-wood	Crude oil sites, iron (Fe) ore tailings	Yenn et al. (2014) and Maiti et al. (2005)
<i>Gmelina arborea</i>	Verbenaceae	Tolerant	Timber-wood	Crude oil sites, heavy metal sites	Agbogidi et al. (2007) and Ogbonna and Ukiwe (2010)
<i>Holoptelia integrifolia</i>	Ulmaceae	Tolerant	Timber-wood	Sewage, filth drainage systems	Pandey and Prakash (2014)
<i>Azadirachta indica</i>	Meliaceae	Tolerant	Timber-wood	Sewage, filth drainage systems	Pandey and Prakash (2014)
<i>Salix</i> spp.	Salicaceae	Tolerant	Timber-wood	Cadmium contaminate soil; zinc, and cadmium contaminated soil	Lewandowski et al. (2006) and Konlechner et al. (2013)
<i>Jasminum auriculatum</i>	Oleaceae	Most tolerant	Floriculture	Cr contaminated soil	Ramasamy (1997)
<i>Jasminum grandiflorum</i>	Oleaceae	Most tolerant	Floriculture	Cr contaminated soil	Anandhkumar (1998) and Mahimairaja et al. (2011)
<i>Jasminum sambac</i>	Oleaceae	Tolerant	Floriculture	Cr contaminated soil, tannery effluent irrigation	Ramasamy (1997), Anandhkumar (1998) and Mahimairaja et al. (2011)
<i>Nerium oleander</i>	Apocynaceae	Tolerant	Floriculture	Tannery effluent irrigation	Anandhkumar (1998)
<i>Tagetes erecta</i>	Asteraceae	Tolerant	Floriculture	Cd contaminated soil	Lal et al. (2008)
<i>Chrysanthemum indicum</i>	Asteraceae	Tolerant	Floriculture	Cd contaminated soil	Lal et al. (2008)
<i>Gladiolus grandiflorus</i>	Iridaceae	Most tolerant	Floriculture	Cd contaminated soil	Lal et al. (2008)
<i>Calendula officinalis</i>	Asteraceae	Tolerant	Floriculture	Cr contaminated soil	Ramana et al. (2013)
<i>Nelumbo nucifera</i>	Nelumbonaceae	Hyper-tolerant	Floriculture	domestic wastewater treatment, ex-mining area, mined out shallow pond	Kanabkaew and Puetpaiboon (2004) and Ashraf et al. (2011)