



*Pycnandra acuminata*





¿Sabías que *Pycnandra acuminata* acumula hasta un 25% de níquel (en relación al peso seco) en la savia?

**Si quieres conocer más información de esta especie, avanza en el temario**





## Información general de la especie

***Pycnandra acuminata*** (antes llamada *Sebertia acuminata*) es un árbol de Nueva Caledonia adaptado a crecer en suelos con elevada concentración de níquel. No solamente soporta altos niveles tóxicos de Ni sino que acumula el metal en sus tejidos.

Las plantas que acumulan metales pesados pueden ser utilizadas para tratar suelos contaminados por metales, e incluso para obtener un retorno económico en fitominería sostenible cuando el metal extraído tiene un alto valor.

Las plantas que toleran los metales pueden ser empleadas en tecnologías de fitogestión para solucionar problemas en suelos degradados o contaminados mediante fitorremediación.

***Si quieres conocer los procesos fisiológicos que se esconden tras este record, avanza en el tema***

Mediante esta planta record se van a abordar los siguientes procesos fisiológicos:

1.

Elementos esenciales y tóxicos

2.

Fitorremediación de la contaminación

# 1. Elementos esenciales y tóxicos

1a.

Esencialidad de los elementos

1b.

Mecanismos celulares de protección

1c.

Estrategias de las plantas frente a los metales



1a.

# Esencialidad de los elementos

Periodo	Grupx																18	
1	1																	2
2	3	4															10	
3	11	12	13	14	15	16	17									18		
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	114	116	118			
	Lantánidos																	
	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71				
	Actínidos																	
	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103				

Las plantas necesitan sólo 17 elementos químicos (ver Tema 3), entre ellos se incluyen 9 metales esenciales, de los cuales algunos son considerados metales pesados.

Estos son por ejemplo el Ni, Cu, Zn, y Mn. Aunque sean nutrientes imprescindibles para que crezcan las plantas, cuando estos elementos químicos están biodisponibles en altas concentraciones resultan tóxicos para las plantas.

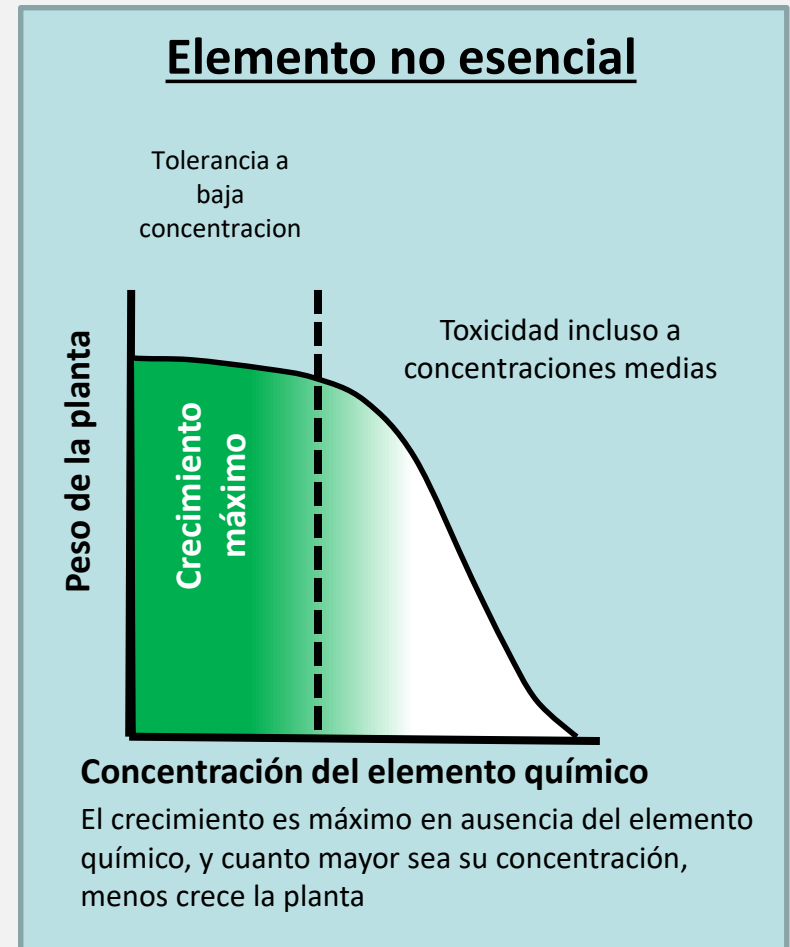
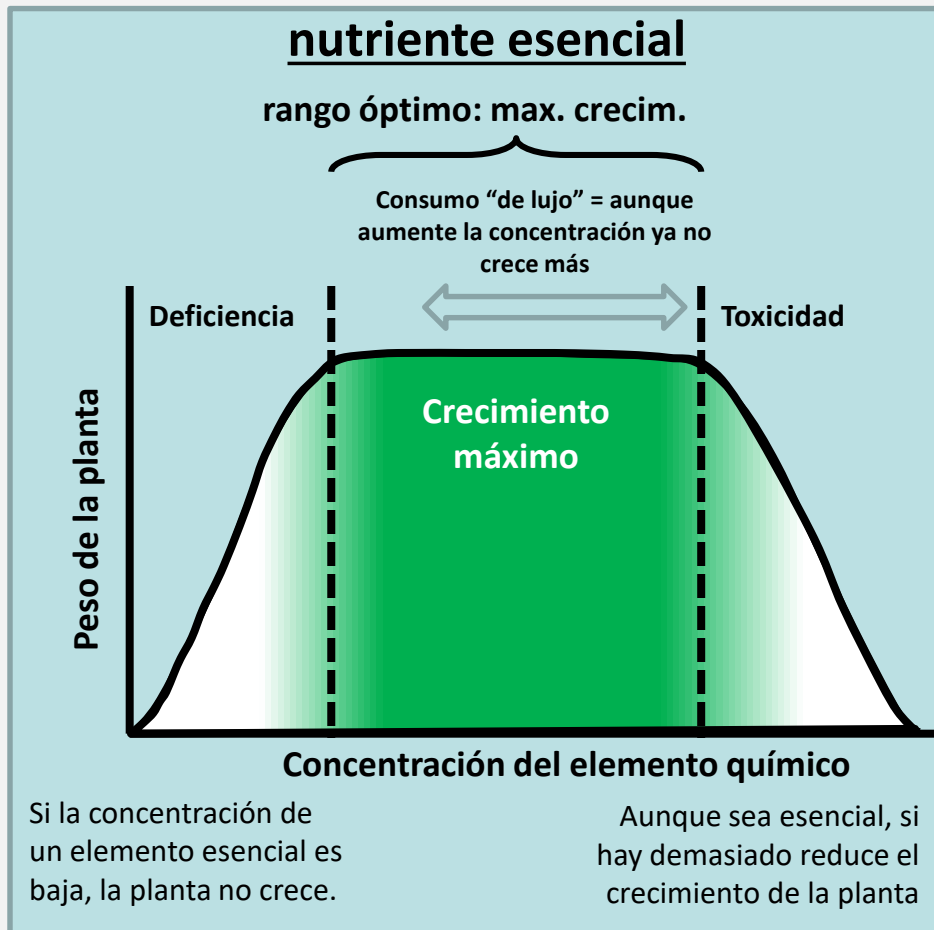
Imagen cedida amablemente por: J M<sup>a</sup> Becerril

Las plantas tienen transportadores en la membrana celular para poder meter o sacar de la célula estos elementos. Los transportadores son proteínas de membrana que transportan cada nutriente.

La selectividad de estos transportadores no es perfecta. A veces “se equivocan”, de manera que por ejemplo, si hay Cd en el exterior, un transportador de Ca además de meter Ca a la célula, de vez en cuando mete el tóxico Cd. Algunas especies vegetales tienen transportadores más selectivos, de manera que se equivocan menos que los de otras especies.



Además de captar nutrientes, las planta puede tomar elementos no esenciales, que cuando alcanzan una elevada concentración resultan tóxicos.

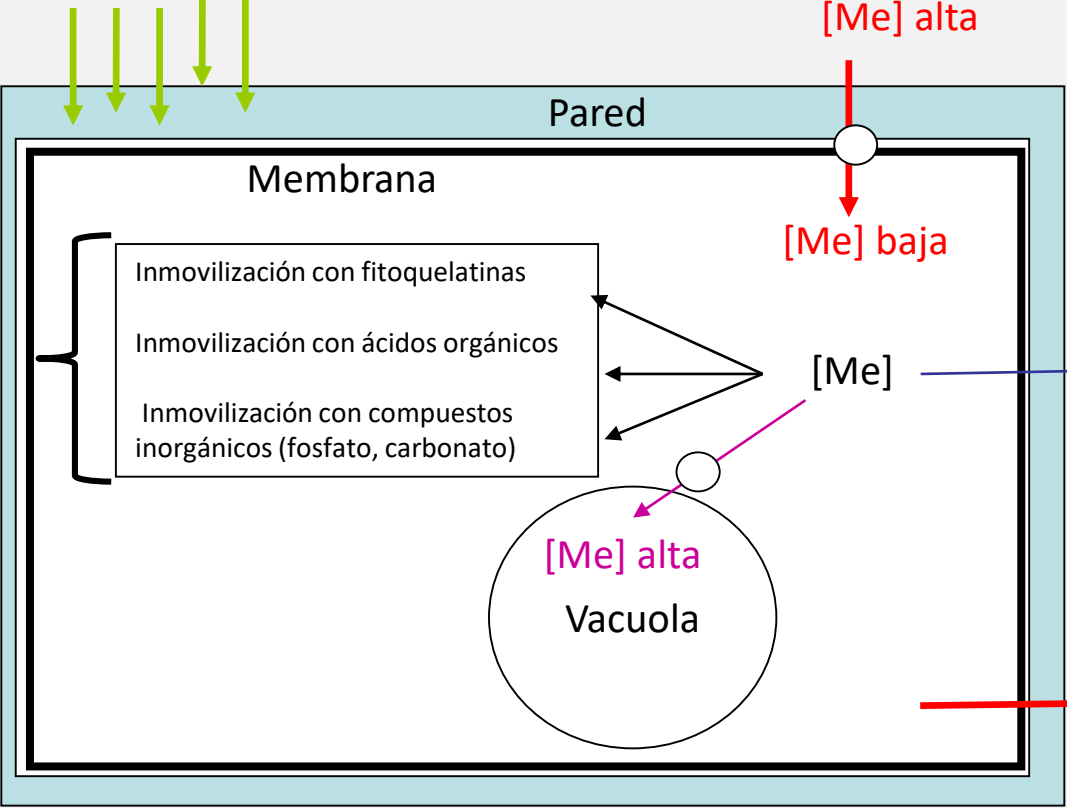


# 1b. Mecanismos celulares de protección

Las células de las plantas tienen distintos mecanismos para evitar que un elemento químico, como un metal pesado (Me), no les cause daño.

1. Unión de metales a la pared exterior

2. Transporte reducido a través de la membrana plasmática



5. Quelación en interior celular

- Inmovilización con fitoquelatinas
- Inmovilización con ácidos orgánicos
- Inmovilización con compuestos inorgánicos (fosfato, carbonato)

3. Salida activa [Me]

4. Inmovilización con ácidos orgánicos en el exterior

6. Compartimentación del Metal en la vacuola (orgánulo almacén, sin metabolismo)

ácidos orgánicos (oxalato)



Me biodisponible  $\rightarrow$  Me inmóvil

Pasa página para ver la explicación





## **Mecanismos a nivel celular para que evitar la toxicidad de un metal pesado.**

### **Mecanismos que sirven para mantener a los metales fuera de la célula:**

- 1- Mantener los metales fuera, inmovilizados, pegados a la pared celular, a la celulosa.
- 2- Reducir la entrada al interior celular por medio de transportadores selectivos, que no se “equivocan” o confunden cuando transportan al interior celular los nutrientes.
- 3- Expulsar los metales tóxicos al exterior celular.
- 4- Precipitar los metales en el exterior celular por medio de ácidos orgánicos (málico) que son expulsados al exterior celular.

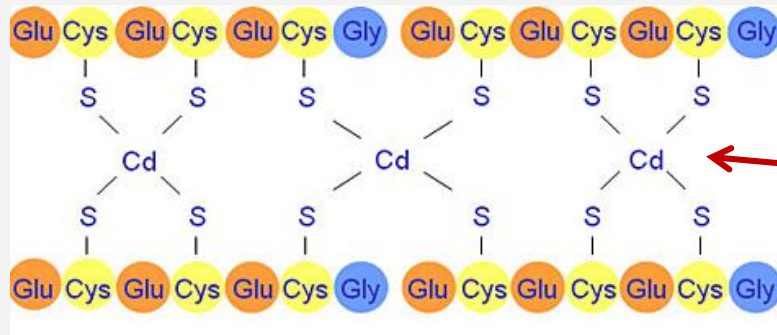
### **Mecanismos que sirven para que los metales, una vez dentro de la célula, pierdan su toxicidad y no causen daño.**

- 5- Precipitar, hacer insolubles, reducir la biodisponibilidad de los metales por medio de (i) fitoquelatinas, (ii) ácidos orgánicos, o (iii) compuestos inorgánicos (carbonato, fosfato).
- 6- Introducir los metales en la vacuola, incluso unidos a las fitoquelatinas. En la vacuola no resultan tóxicos, al no haber actividad metabólica.

Las plantas sintetizan fitoquelatinas y metalotioneinas como respuesta a los metales, ya que estos compuestos los inmovilizan mediante los grupos sulfhidrilo (-SH) que tiene el aminoácido cisteína (Cys), reduciendo la toxicidad de los metales.

- Fitoquelatinas. Péptidos, propias de plantas (40-50 % cisteína)

### FITOQUELATINAS: fórmula general $(\text{Glu-Cys})_n\text{-Gly}$ $n=2-7$



Cd atrapado (inmóvil): no es biodisponible y deja de ser tóxico

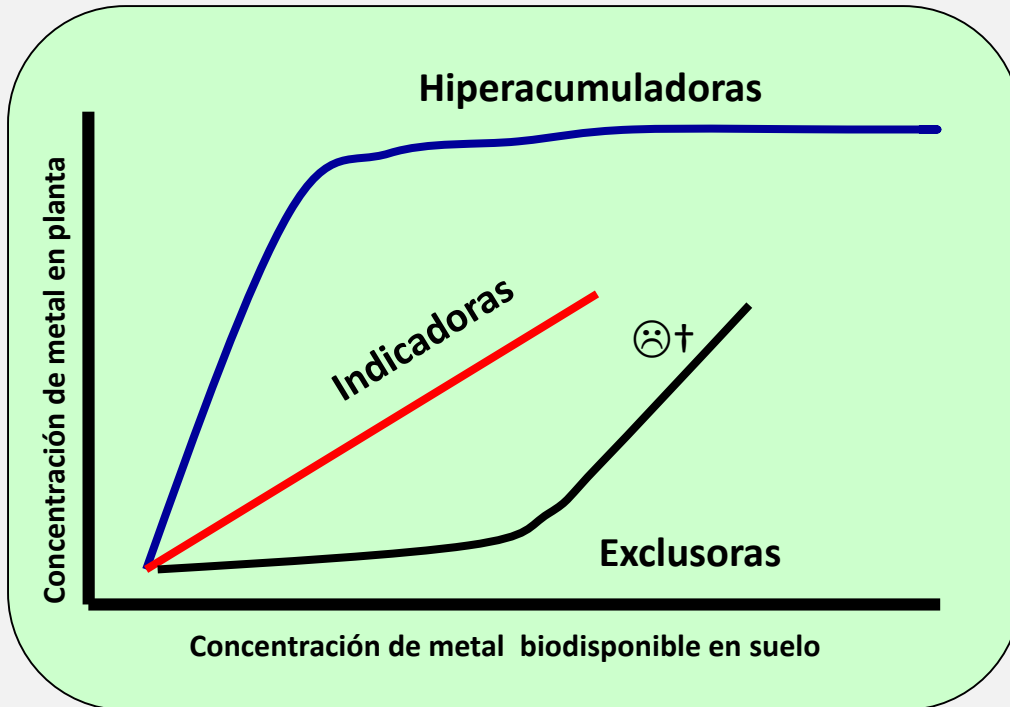
Representación de fitoquelatinas. Imagen propia: A. Hernández

- Metalotioneinas. Proteínas ricas en cisteína (30%). Existen en plantas, animales, hongos.

# 1c. Estrategias de las plantas frente a los metales

Los mecanismos celulares de protección frente a los metales pesados se expresan en los distintos órganos de la planta, de manera que las distintas especies de plantas se pueden agrupar en tres categorías según la estrategia que tengan.

- Reducir al máximo la absorción de metales, lo hacen las **plantas exclusoras**.
- Acumularlos e inmovilizarlos haciéndolos NO disponibles, son las **plantas (hiper)-acumuladoras**.
- La mayoría de especies son **indicadoras**, cuanto más metal hay, más metal toman.



Las plantas **hiperacumuladoras** acumulan metal activamente sin intoxicarse.

Las plantas **indicadoras** toman metal proporcionalmente a la concentración en el suelo.

Las **excluseras** restringen la entrada de metal en la planta cuando la concentración de metal en el suelo no es demasiado elevada.

Cuando las plantas indicadoras y excluseras toman demasiado metal mueren.

Tipos de plantas según la respuesta a los metales  
 Imagen cedida amablemente por: J M<sup>a</sup> Becerril

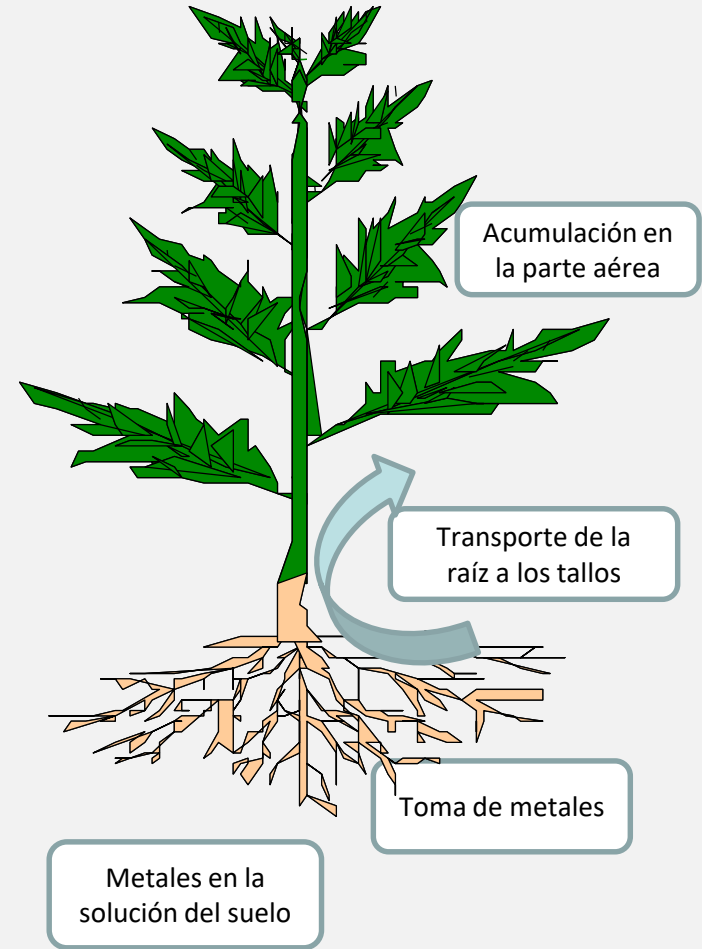


# 1c. Estrategias de las plantas frente a los metales

Las plantas **hiperacumuladoras** son una rareza botánica que necesitan acumular metales (usados como defensa frente a insectos o patógenos) por los que solo viven en sitios con elevadas concentraciones de metal, a donde dirigen sus raíces (ver Tema 3). Se han identificado unas 500 especies de angiospermas con la habilidad hiperacumuladora. También algunos helechos (*Pteris vittata*).

Plantas hiperacumuladoras:  
 > 3000-10.000 mg contaminante / kg planta.  
 (algunas se usan con fines extractivos en biominería (Ni, Cu))

Especie	Elemento	Concentración (mg/kg)
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Cd, Zn	3000, 10000
<i>Thlaspi calaminare</i>	Zn	10000
<i>Haumaniastrum robertii</i>	Co	10200
<i>Haumaniastrum katangense</i>	Cu	8356
<i>Ipomoea alpina</i>	Cu	12300
<i>Thlaspi rotundifolium</i> subsp.	Pb	8200
<i>Macadamia neutrophylla</i>	Mn	55000
<i>Alyssum bertolonii</i>	Ni	13400
<i>Berkheya coddii</i>	Ni	17000
<i>Psychotria douarrei</i>	Ni	47500
<i>Astragalus pattersoni</i>	Se	6000
<i>Iberis intermedia</i>	Tl	3070
<i>Pteris vittata</i>	As	22000



*Thlaspi* es nombre antiguo del género *Nocaea*



Imagen propia: A. Hernández



## 1c. Estrategias de las plantas frente a los metales

### Concepto de Biodisponibilidad

La presencia de un elemento químico en el suelo no significa que la planta lo pueda tomar. Para que las raíces de la planta lo tome debe estar biodisponible, en forma iónica y soluble y no formando precipitados o unidos fuertemente a otras sustancias.

Los metales en el suelo tienen una diferente biodisponibilidad:

**Alta:** Cd, Ni, Zn, As, Se, Cu

**Moderada:** Co, Mn, Fe

**Baja:** Pb, Cr, U

Una baja biodisponibilidad significa que aunque existan altas concentraciones de metal en el suelo, la planta no los toma ya que no están solubles.

Así, algunos suelos contaminados por Pb no resultan tóxicos para las plantas porque la gran mayoría del Pb está no biodisponible.

La extracción de metales se puede aumentar añadiendo al suelo quelantes como el EDTA o el ácido cítrico que solubilizan los metales incrementando la biodisponibilidad.

## 2.

## Fitorremediación de la contaminación

2a.

Generalidades de la fitorremediación

2b.

Técnicas de fitorremediación

2c.

Ventajas y desventajas de la fitorremediación

## ¿Qué es la fitorremediación?

- Es un conjunto de distintas tecnologías que emplean plantas para tratar problemas de contaminación.
- Se basa en el uso de plantas verdes (y microorganismos de la rizosfera) para eliminar los contaminantes del medio (suelo, agua) y/o reducir sus efectos tóxicos, por ejemplo impidiendo la dispersión del contaminante.
- Incluye técnicas que reducen la dispersión del contaminante o minimizan las vías de transmisión (ej. reduciendo la biodisponibilidad e impidiendo la entrada en la cadena trófica).
- Muchas plantas son capaces de soportar elevadas concentraciones de contaminantes en el suelo y por tanto resultan útiles para revegetación de zonas contaminadas. Algunas especies además son capaces de concentrar metales en sus tejidos y serían útiles para descontaminar el suelo. Otras especies son capaces de eliminar del suelo algunos contaminantes orgánicos al metabolizarlos y transformarlos.
- La fitorremediación está limitada por el tipo de contaminante (no sirve para todos) y además el suelo debe permitir el crecimiento de plantas (no serviría si el terreno solo contiene ladrillos, hormigón y escombros) ya que la planta solo puede remediar si sus raíces pueden crecer en el suelo, de manera que la fitorremediación está generalmente limitada a la zona de influencia de las raíces.

La fitorremediación incluye un abanico de tecnologías basadas en la utilización de plantas para eliminar los contaminantes o volverlos inócuos, ej. reduciendo la movilidad.

Tiene una **amplia aplicabilidad**, se pueden tratar tanto el suelo como las aguas subterráneas, y es aplicable para contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales pesados, nutrientes).



[CC BY](#)

### VENTAJAS

- Bajo coste
- Respetuoso con el medio ambiente
- Buena aceptación social

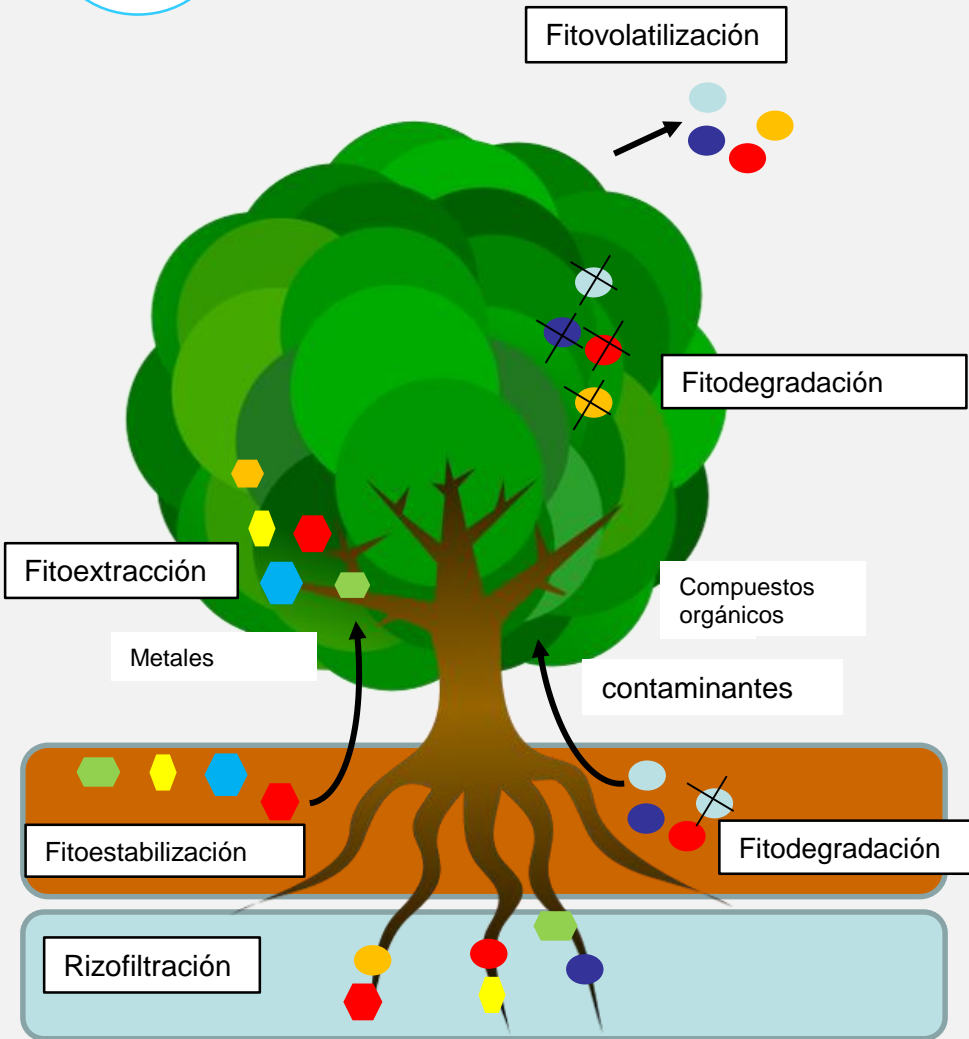


[CC BY](#)

### DESVENTAJAS

- Duración del proceso
- Efectividad relativa
- Poca experiencia probada





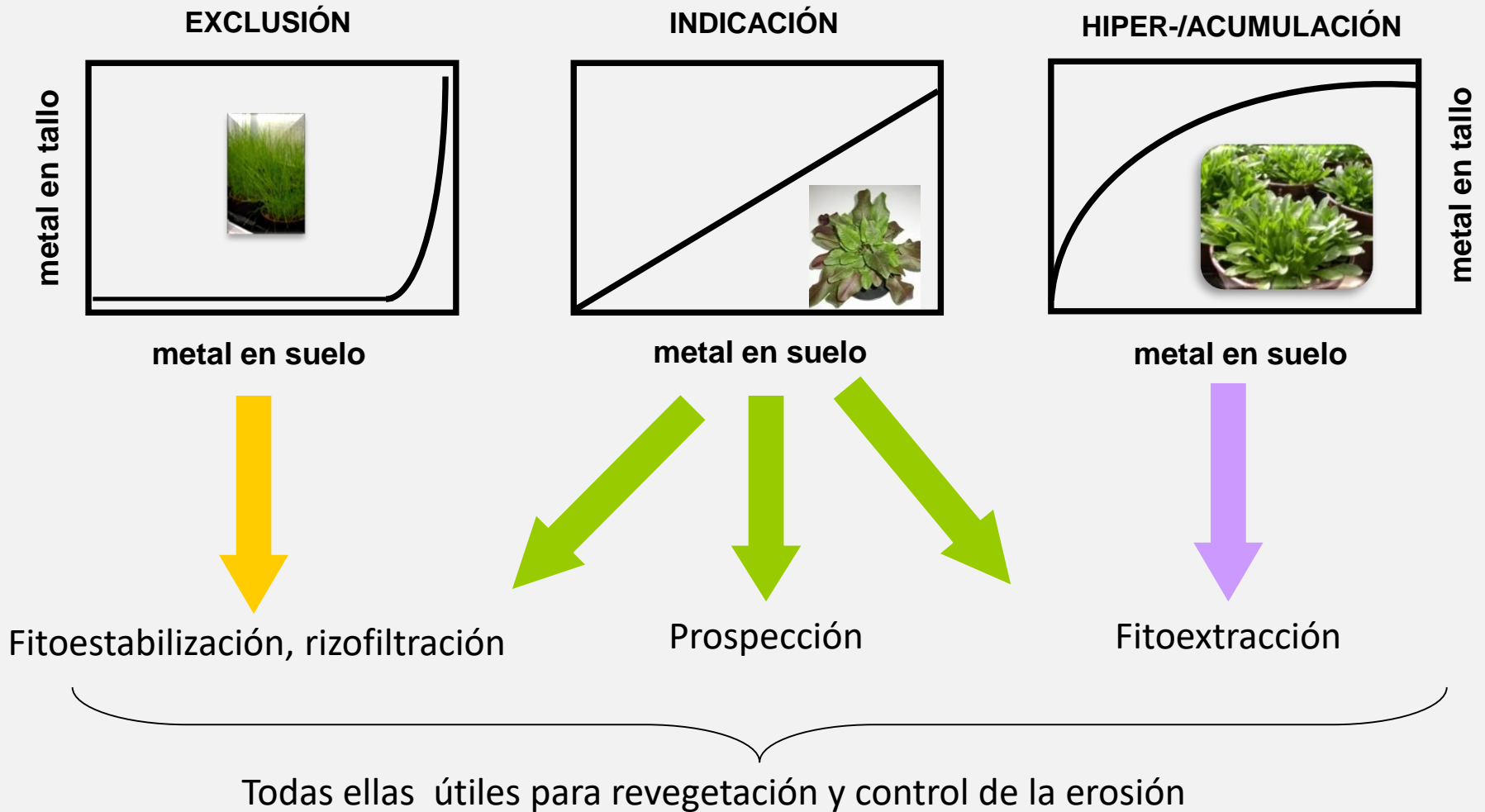
- 1. Fitoextracción:** Uso de plantas para extraer contaminantes (**metales**) del suelo acumulándolos en los tejidos.
- 2. Fitoestabilización:** Uso de plantas para impedir la movilización del contaminante del suelo. **Para metales y orgánicos.**
- 3. Rizofiltración:** Uso de las raíces de las plantas para retener contaminantes en las raíces sin degradarlos ni trasportarlos a la parte aérea. **Para metales y orgánicos.**
- 4. Fitovolatilización:** Uso de plantas para volatilizar a la atmósfera **contaminantes orgánicos** y otros como **Se** o **Hg**.
- 5. Fitodegradación:** Uso de plantas (y microorganismos asociados) para degradar **contaminantes orgánicos** del suelo (y nutrientes). Incluye: fitoestimulación, rizodegradación y fitotransformación.

**¿y qué plantas usamos?**

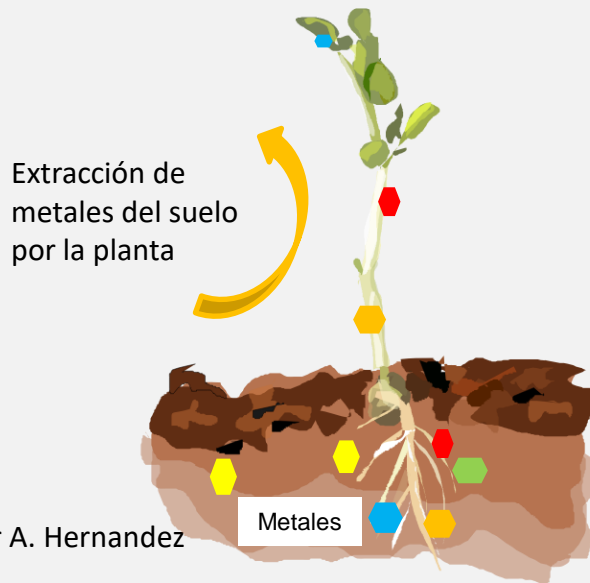
Pasa a la siguiente diapositiva

Esquema de técnicas de fitorremediación  
[CCO](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) transformado por A. Hernandez

En base a estrategia de tolerancia metálica en suelo, las plantas tolerantes a metales pueden llevar a cabo las siguientes fitotecnologías.



**1. Fitoextracción:** Eliminación de metales del suelo usando plantas, mediante la absorción de los contaminantes (inorgánicos o radionucléidos) por las raíces de las plantas y su traslocación (transporte) acumulándolos en raíz, tallo y/o hojas.



[CCO](#) transformado por A. Hernandez

Metal extraído = B x C = Biomasa x concentración

$$\text{g metal extraído} = \text{kg planta} \times \frac{\text{g metal}}{\text{kg planta}}$$

Cuanto mayor sea la biomasa de la planta (kg) y más alta la concentración de metal que acumula en sus tejidos (g metal / kg planta) mayor será la extracción del metal del suelo.

**¿Qué se hace con la cosecha?**

Finalmente se incineran las plantas. El residuo podría rentabilizarse económicamente si es un metal valioso: es lo que se conoce como **fitominería**.

**Limitaciones de la fitoextracción:**

1-La mayoría de hiperacumuladoras son de poca biomasa.

2-Los metales a veces no están biodisponibles y la planta no los toma

= Poco metal extraído

¿Solución?



*Thlaspi (Nocaea) caerulescens* hiperacumuladora de Cd y Zn

[Dominio público](#)

En el caso de metales de muy **baja disponibilidad** (Pb, Cr, U) se pueden usar sustancias químicas quelantes, como el EDTA, que aumentan la biodisponibilidad de los metales. En este caso la fitoextracción se hace en dos fases. En la primera se crece el cultivo hasta que alcanza la biomasa máxima. Se usan especies de plantas de alta biomasa (el maíz por ejemplo) y no es necesario que sean tolerantes al metal ya que el metal no está disponible y no lo toman en la fase de crecimiento. En la segunda fase se añade el quelante al suelo, se solubiliza el metal haciéndolo disponible para la planta, que lo toma del suelo hasta que se intoxica y muere completando así el proceso de fitoextracción. A esto se le llama **fitoextracción inducida por quelantes**.



Dos modalidades de fitoextracción según el metal y la planta

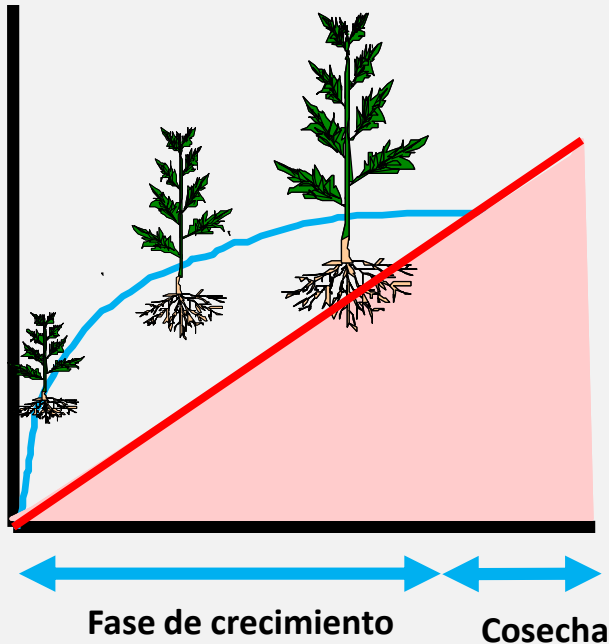
FITOEXTRACCIÓN CONTINUA

Plantas hiperacumuladoras (baja biomasa, tolerantes a metales)

- Alta concentración del metal y disponibilidad.

Ej. Cd

Crecimiento (línea azul)  
Absorción de metales (rojo)



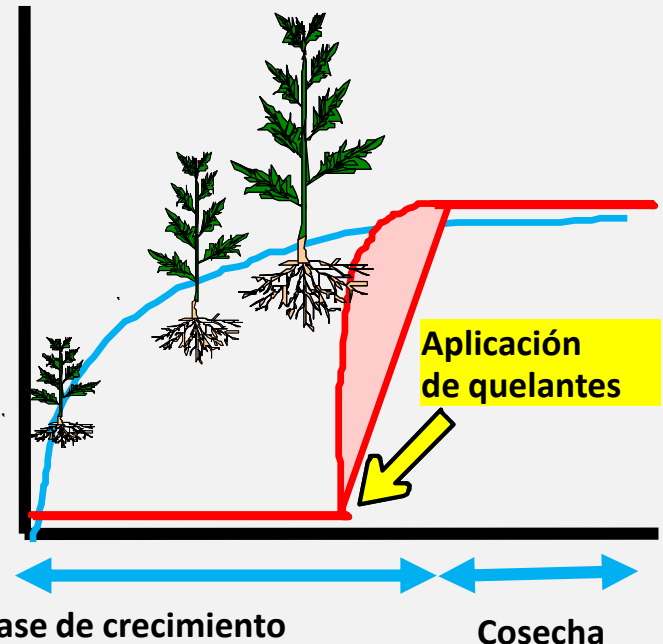
La plantas hiperacumuladoras absorben metales según crecen

FITOEXTRACCIÓN INDUCIDA

Plantas con gran producción de biomasa (indicadoras, sensibles a metales)

- Para metales con baja disponibilidad. Ej. Pb

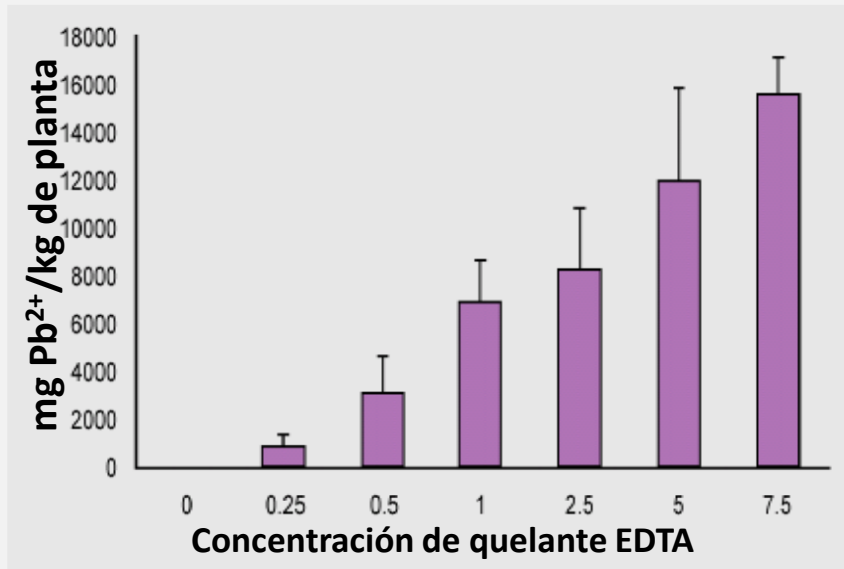
Crecimiento (línea verde)  
Absorción de metales (rojo)



La planta crece bien porque los metales no son solubles y no los toma

Los quelantes hacen disponibles los metales, la planta los toma, se intoxica y muere

Ejemplo de fitoextracción inducida. Incremento de la concentración de  $Pb^{2+}$  en tallos de *Brassica juncea* en un suelo contaminado con plomo tratado con EDTA.



Al ser el Pb un metal no biodisponible, la planta no lo toma a no ser que se añada un quelante para solubilizarlo y hacerlo disponible.

Imagen propia: A. Hernández

Para maximizar la extracción, (en particular en fitoextracción continua) la planta debe favorecer tanto la toma de metales (Factor de Bioconcentración alto) como como el transporte de metales (Factor de Transferencia alto).

### Factor de Bioconcentración

**[raíz] / [suelo]**. Relación de la concentración de metales en la raíz respecto al suelo. Muestra la capacidad que tienen las raíces de las plantas en asimilar el metal del suelo.

### Factor de Transferencia = Factor de traslocación

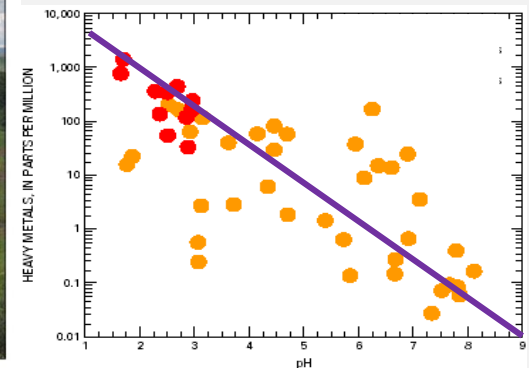
**[tallos] / [raíz]**, relación entre la concentración de metales en la parte aérea y los presentes en la raíz, que nos indica si el transporte entre la raíz y la parte aérea está favorecido.

## 2. Fitoestabilización: Uso de plantas para reducir la movilización del contaminante

- Para metales y contaminantes orgánicos (hidrofóbicos: PCB, PAH, dioxinas, DDT, asbesto = Silicato cálcico magnésico = amianto).
- Se busca **inmovilizar** el contaminante en el suelo, reduciendo la biodisponibilidad del contaminante, ó minimizando el riesgo de dispersión por erosión / entrada en la cadena trófica / lixiviado a aguas subterráneas.
- Para fitoestabilizar metales, se usan **plantas exclusoras**, que muestran una baja acumulación de metal en parte aérea evitando el paso a la cadena trófica. Deben tolerar los metales y/o inmovilizarlos transformándolos en formas no biodisponibles o de menor toxicidad (Ej.  $\text{Cr}^{\text{VI}} \rightarrow \text{Cr}^{\text{III}}$  que precipita).
- Se suelen usar enmiendas que ayuden a reducir la biodisponibilidad de los metales gracias a compuestos como fosfatos, carbonatos o materia orgánica que precipitan/inmovilizan los metales. Otras enmiendas que suben el pH (encalado) disminuyen asimismo la solubilidad de los metales (ver gráfica derecha).

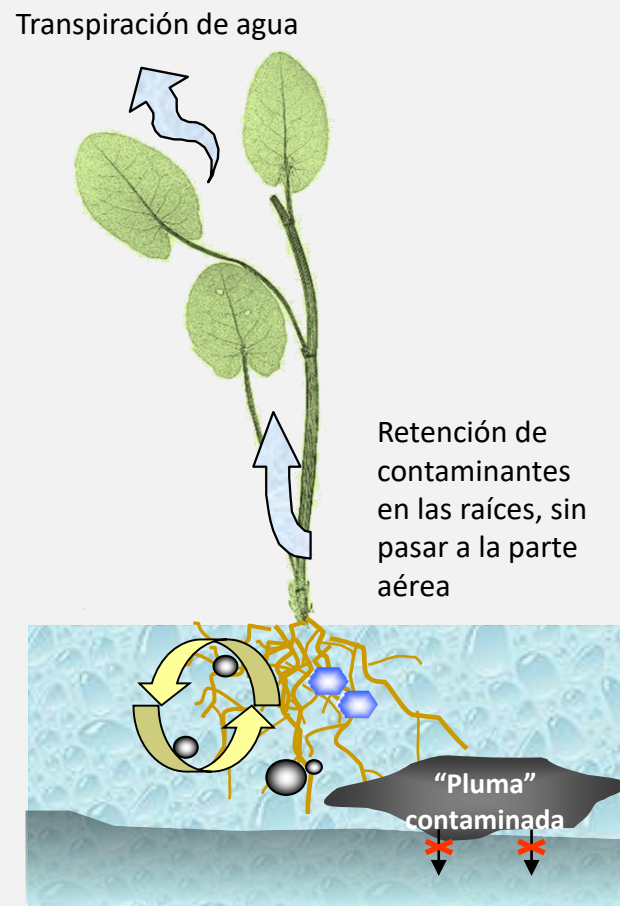


Relación inversa entre pH y biodisponibilidad



### 3- Rizofiltración. Uso de las raíces de las plantas para retener contaminantes en las raíces

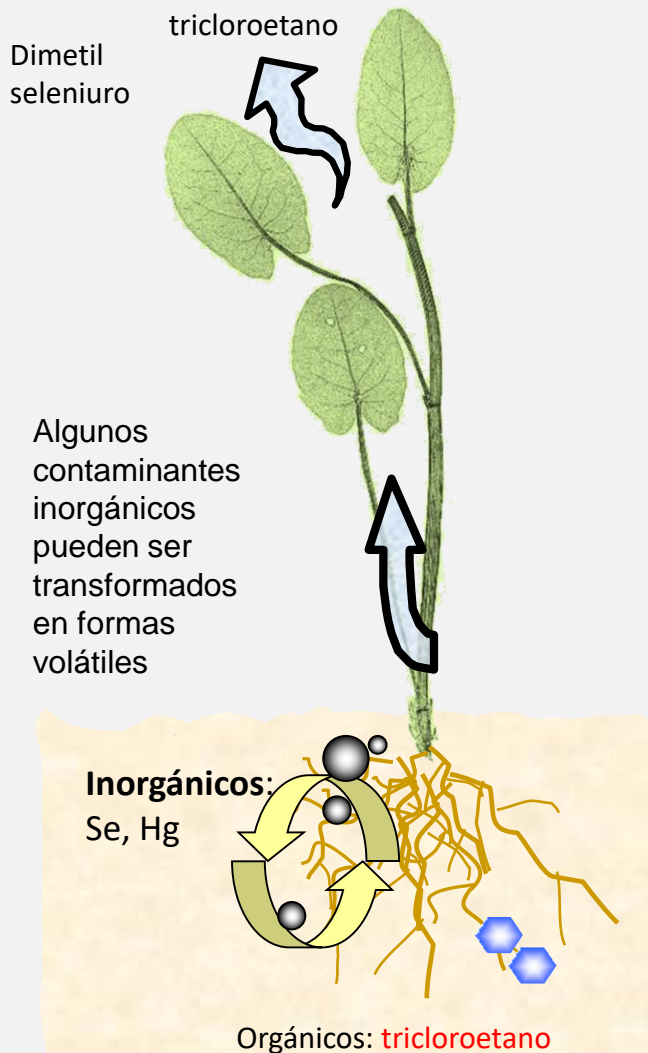
- Para aguas contaminadas
- Los contaminantes son retenidos por las raíces, y no pasan a la parte aérea.
- Se puede cosechar las raíces y continuar el proceso
- Útil para metales, compuestos radioactivos y compuestos orgánicos hidrofóbicos (gasolina, diésel)
- Especies vegetales: sauces, plantas acuáticas





## 4- Fitovolatilización de contaminantes volátiles

Transpiración de agua y elementos volátiles



Los contaminantes son absorbidos por las raíces, transportados a los tallos y hojas y liberados a través de la planta hacia la atmósfera.

Técnica aplicable solo a algunos contaminantes orgánicos e inorgánicos que puedan evaporarse (selenio, mercurio).

Ventajas: los contaminantes pueden ser transformados en formas menos tóxicas y después degradadas en la atmósfera (fotodegradación).

Especies vegetales: sauces (*Salix*), alfalfa (*Medicago sativa*), colza (*Brassica juncea*), *Arabidopsis thaliana*.

Imagen cedida amablemente por: O. Barrutia

## 5. Fitodegradación (rizorremediación) de contaminantes orgánicos por plantas y organismos de la rizosfera

Metabolización de algunos compuestos orgánicos como el TCE, TNT, nitroglicerina, fenoles policlorados PCB, PAH, desechos amoniacales y compuestos de hidrofobicidad intermedia. Las moléculas con extrema hidrofobicidad (PCBs, PAHs, hidrocarburos) se unen fuertemente a la materia orgánica y no se disuelven en el agua (contaminantes “recalcitrantes”), no son tomados por las plantas, aunque podrían ser degradados por las bacterias.

**No sirve para metales** ya que NO se pueden degradar, siempre serán metales.

Las plantas transportan los contaminantes orgánicos hasta el interior celular donde son metabolizados, mineralizados, o inmovilizados. Puede ser necesario añadir surfactantes para que los contaminantes entren en las células.

También pueden producir enzimas exocelulares (nitrilasas, peroxidasas, nitroreductasas).

El tipo y número de contaminantes orgánicos que las plantas pueden degradar es muy limitado. Las bacterias de la **rizosfera** (zona del suelo cercana a las raíces) son mucho más eficientes degradadoras de contaminantes orgánicos que las plantas. Por tanto bajo el término general de fitodegradación se incluye fitotransformación (por la planta) y fitoestimulación = rizodegradación (por los microorganismos).

**La fitodegradación puede ser realizada tanto por la planta como por los microorganismos de la rizosfera**

### PLANTA

Toma del **contaminante orgánico** del suelo y transferencia a la parte aérea

Degradación total del contaminante ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) o incompleta seguida de incorporación de los fragmentos degradados a los tejidos de la planta (ej. lignificación de compuestos fenólicos en madera)



### MICROORGANISMOS DE LA RIZOSFERA

Alta capacidad degradadora para diversidad de compuestos químicos



[CC BY-SA 4.0](#)

**FLORA MICROBIANA.** Los microorganismos que viven asociados con las plantas en la **rizosfera** (zona del suelo bajo la influencia de las raíces) son capaces de degradar más compuestos y más rápido que la plantas.

## 2b. Ventajas y desventajas de la fitorremediación

### Pros and contras de la fitorremediación

Fitoextracción  
Fitoestabilización  
Rizofiltración  
Fitovolatilización  
Fitodegradación

#### VENTAJAS

- Bajo coste.
- Preserva el suelo (no destruye su estructura ni fertilidad).
- Evita dispersión y lavado de contaminantes.
- Inmoviliza o degrada contaminantes (orgánicos).
- Efectiva para cont. Inorgánicos.
- Aceptación social (técnica ecológica).

#### INCONVENIENTES

- Lenta (años).
- Efecto limitado al alcance de las raíces
- No útil para todos los contaminantes
- Necesidad de tratamiento de las plantas
- Riesgo de entrada de metales a la cadena trófica.
- Es necesario que el suelo sea adecuado para cultivar plantas
- No siempre tiene efectividad alta

## Lista de verificación: ¿he alcanzado los resultados de aprendizaje?

Mediante la planta *Pycnandra acuminata* se ha abordado el tema de los elementos químicos esenciales para las plantas y su relación con los elementos tóxicos, además de las tecnologías de fitorremediación para reducir su toxicidad en el suelo. Comprueba la siguiente lista de verificación. Si eres capaz de contestar a las preguntas, puedes **comenzar con los ejercicios**. Si no eres capaz, **debes volver a repasar el temario**, antes de realizar los ejercicios propuestos:



[CC BY-NC-SA](#)

- ✓ Para una planta ¿cual es la diferencia entre un elemento esencial y uno tóxico? (sección 1a).
- ✓ Sabrías explicar los mecanismos celulares de protección a los metales? (sección 1b).
- ✓ ¿Conoces las estrategias de las plantas frente a los metales? (sección 1c).
- ✓ ¿Sabrías distinguir qué técnicas usar según quieras remediar un suelo con contaminantes orgánicos o metales? (sección 2a).
- ✓ ¿Sabrías distinguir entre fitoextracción continua y fitoextracción inducida por quelantes, que plantas se usan, para qué metales son apropiadas? (sección 2b).
- ✓ ¿Sabrías que técnica usar para aguas contaminadas? (sección 2b).
- ✓ ¿Podías decir qué técnica trata de reducir la biodisponibilidad de metales en el suelo? (sección 2b).
- ✓ ¿Qué tipo de contaminantes se usa la fitovolatilización (sección 2b).
- ✓ ¿Sabrías argumentar el por qué la fitodegradación no es útil para metales? (sección 2b).
- ✓ ¿Podrías decir ventajas y desventajas de la fitorremediación? (sección 2c).