

04-026

Time prediction model for projects of heavy metal phytoextraction

Miguel Ángel Vigil Berrocal¹; Manuel Francisco Marey Pérez²; José Manuel Mesa Fernández¹;
Henar Morán Palacios¹

¹Universidad de Oviedo. Área de Proyectos de Ingeniería; ²Universidad de Santiago de Compostela. Área de Proyectos de Ingeniería;

Phytoextraction is a technology that allows the remediation of heavy metal-polluted soils by taking advantage of some plants capacity of extracting and translocating the metals to their harvestable parts. In spite the fact that this technique has shown a great deal of interest from the scientific community since the 1990's, still has not reached the commercial domain for several reasons, especially due to the long periods required for remediation, and the difficulty to foresee such periods.

This communication shows a new methodology for predicting the evolution of heavy-metal content in soil during phytoextraction projects, that is based on a heuristic and qualitative model to establish the metal accumulation rate in plant, combined with a recursive algorithm that estimates metal concentration in soil to each harvest.

Keywords: phytoextraction; heavy-metal; prediction methodology

Modelo de predicción de plazos para proyectos de fitoextracción de metales pesados

La fitoextracción es una técnica que permite remediar suelos contaminados por metales pesados aprovechando la capacidad que tienen algunas plantas de extraer los metales del suelo y trasladarlos a sus partes cosechables. A pesar de que esta técnica lleva siendo objeto de interés por parte de la comunidad científica desde los años 90, aún no ha dado el salto a los circuitos comerciales por una serie de razones, entre las que destacan los largo periodos necesarios para la descontaminación, así como la dificultad para estimar el alcance de dichos plazos.

Esta comunicación muestra una nueva metodología de predicción de la evolución de los metales pesados en el suelo, que consta de un modelo heurístico cualitativo para la estimación de las tasas de acumulación de metales en la planta combinado con un algoritmo recursivo que determina la concentración del metal en el suelo para cada cosecha.

Palabras clave: fitoextracción; metales pesados; metodología de predicción

Correspondencia: José Manuel Mesa Fernández email: mesa@api.uniovi.es



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

1. Introducción

Uno de los efectos colaterales de la actividad industrial es la aparición de bolsas de suelo contaminado. Solamente en la Unión Europea, se estima que existen hasta 2,5 millones de parcelas contaminadas, de las cuales más de 340.000 están declaradas como emplazamientos contaminados confirmados y que representan un riesgo potencial para la salud humana, el agua o los ecosistemas (Joint Research Centre-European Commission [JRC EC], 2014). Es conocido que la mayor parte de estos suelos presentan cantidades de metales pesados que pueden considerarse como excesivas, originados principalmente por las actividades industriales y agrícolas. Al contrario que sucede con los contaminantes orgánicos que son biodegradables, los metales pesados son altamente persistentes y se acumulan en el ecosistema. Cuando superan un determinado umbral de concentración, constituyen un riesgo medioambiental y para la salud humana (Moreno-Jiménez et al., 2011).

El suelo es un recurso natural no renovable de gran valor, dado que es el substrato que sustenta la vida y que representa numerosas funciones esenciales tales como:

- Provisión de nutrientes, agua y soporte físico para el crecimiento vegetal y por lo tanto para la base de la cadena trófica.
- Constituye un agente regulador del ciclo hidrológico distribuyendo y almacenando el agua dulce continental.
- Sirve como hábitat de la biodiversidad edáfica.
- Proporciona materias primas y soporte para las actividades humanas.

Por lo tanto, la recuperación de estos suelos contaminados constituye un imperativo no solamente ambiental sino legal, que se refleja tanto en las diferentes legislaciones actuales, las cuales exigen la realización de acciones o trabajos destinados a extraer, controlar, contener o reducir los contaminantes en un área determinada.

Si bien las técnicas convencionales de remediación de suelos son eficaces como mecanismo para la reducción y eliminación del riesgo inherente a la presencia de contaminantes, tras la remediación los suelos pierden su estructura y los ecosistemas edáficos son destruidos. Como consecuencia pierden la capacidad de alojar vida salvaje o de servir para la producción agrícola.

Como contraposición a estas técnicas, en los años 90 aparece la fitorremediación como una tecnología de bajo impacto que aprovecha la capacidad de determinadas plantas para extraer los metales y acumularlos en sus tejidos cosechables, de forma que al retirarse se va disminuyendo la concentración de metal en el suelo de forma paulatina hasta reducirla a niveles tolerables. Es ya conocido que esta técnica comporta notables beneficios, principalmente derivados de sus menores impactos ambientales y costes económicos en comparación con las técnicas tradicionales de remediación de suelos. Sin embargo, esta técnica no está exenta de desventajas a la hora de su implementación. Las principales limitaciones que dificultan la utilización de esta tecnología son:

- Los largos plazos previstos para la descontaminación (Dickinson et al., 2009; Fumagalli et al., 2014).
- La incapacidad de la mayoría de las especies de plantas para la absorción de más de uno o dos metales (Doumsett et al., 2008).
- Precisa del aporte de inputs económicos de forma periódica para las labores de plantación y cosecha.

- Existencia de riesgo de que los metales se incorporen a la cadena trófica mediante el pastoreo de animales si no se evita su acceso a la parcela en remediación
- La incapacidad de las plantas de extraer aquellos metales alejados de la rizosfera.
- La gestión de la biomasa enriquecida en metales pesados después de la recolección.

Por otro lado, la fitorremediación es una tecnología que aún no ha penetrado en los circuitos comerciales. Una de las razones para que esta tecnología no haya salido aún del ámbito científico es la dificultad de su puesta en aplicación debida al desconocimiento de la misma por parte de los agentes implicados en la remediación de suelos, especialmente en materia de los resultados que se van a obtener o de qué fitotecnologías deben ser aplicadas para cada caso.

A este respecto, conocer el ritmo al que una fitotecnología va a retirar el contaminante del suelo es de gran importancia para el proceso de toma de decisiones. Sin embargo, actualmente se carece de metodologías de cálculo aceptadas por la comunidad científica que permitan realizar una estimación de la evolución temporal de los metales pesados en el suelo.

La tasa de fitoextracción de metales pesados es función tanto de la habilidad de la planta para absorber y acumular los metales como de la cantidad de biomasa producida. A parte de los factores que afectan al crecimiento de la planta, que coinciden con los de crecimiento vegetal para cualquier práctica agrícola, los siguientes parámetros locales afectan a la tasa de absorción de los metales por parte de sus raíces.

Factores climáticos: Las condiciones climáticas, principalmente temperatura y precipitación, juegan un rol directo en la producción de biomasa e indirecto en las concentraciones de metales.

Factores edáficos: Las características del suelo (principalmente pH, porcentaje de carbono, porcentaje de arcilla, disponibilidad de nutrientes, nivel freático y grado de compactación) son responsables de la fertilidad del suelo y por lo tanto tienen un alto impacto en el crecimiento vegetal. Además, el tipo de suelo influye en el desarrollo radicular. Por otro lado, las características del suelo también tienen influencia en la especiación de los metales presentes en el suelo, tanto en la matriz del suelo como en disolución, la cual influencia a la capacidad de la planta para extraer los metales.

Toxicidad de los contaminantes: Numerosos suelos contaminados no presentan elevadas concentraciones de un solo metal, sino que contienen altas cantidades de varios metales y otros compuestos orgánicos que son tóxicos para muchas plantas, y afectan negativamente la capacidad de éstas para extraer el metal objetivo.

Dada la relativa novedad que representan las tecnologías de fitorremediación y los largos periodos de descontaminación, la ausencia de experiencias de campo dificulta la predicción de los tiempos necesarios para la descontaminación de los suelos con esta técnica. Como consecuencia, se hace preciso acudir a modelos que presentan mayor o menor precisión para estimar cuánto tiempo llevará completar un ciclo completo de remediación de los suelos contaminados por metales pesados.

Las principales vías de modelización de la fitorremediación son las siguientes:

- La aplicación de modelos basados en la tasa de transpiración de la planta.
- Los modelos basados en datos bibliográficos (modelos heurísticos).

Los primeros constituyen modelos físicos que se basan en el principio de que los metales son absorbidos y se mueven a través de la planta impulsados por el mecanismo de la

traspiración, luego establece que la cantidad de metales (M) que una planta adquiere es proporcional a la tasa de transpiración (T) para un periodo de tiempo (t):

$$M \propto \int_0^t T dt \quad (1)$$

Al depender de numerosos factores, estos modelos presentan la desventaja de que precisan disponer de un gran número de variables para cada especie considerada, por lo que su aplicación en las fases de planificación de este tipo de proyectos, caracterizadas por valorar el mayor número de fitotecnologías posible, es poco práctica.

En contraposición, los modelos heurísticos, estiman los ritmos de fitoextracción a partir de experiencias pasadas. Estos modelos generalmente necesitan de la aplicación de técnicas de tratamiento de datos y son más fiables cuanto mayor es el número de casos con el que desarrollan los modelos.

Finalmente, otros modelos han sido desarrollados en numerosas publicaciones aunque en su mayoría o bien son modelos destinados a explicar el comportamiento de los fenómenos de captación y movilización de los metales en la planta a nivel microscópico como en los casos de (Brennan y Shelley, 1999) o son específicos para unas condiciones concretas, como los descritos en (Yadav y Mathur, 2006), (Japenga et al., 2007), (Maxted et al., 2007), (Verdillo y Homae, 2008), (Guala et al., 2011) y (Chen et al., 2012).

El objeto de esta comunicación es presentar una nueva metodología de predicción de los plazos de fitorremediación de suelos pesados susceptible de ser empleada en las fases de planificación de proyectos, momento en que se dispone de una amplia paleta de opciones que posteriormente se va refinando hasta encontrar la solución ideal.

2. Metodología propuesta

El modelo presentado en esta comunicación emplea una nueva metodología que se apoya en el modelo heurístico de (Liang et al., 2009) y que se describe a continuación.

La estimación de los plazos de fitorremediación de una especie dada se apoya en dos conceptos fundamentales:

- La tasa de acumulación del metal en la parte cosechable de la planta, que generalmente viene expresada en mg Metal/kg MS de la planta.
- La productividad en biomasa de la planta, que generalmente viene expresada en kg MS de la planta/Ha.

De forma que su producto define la cantidad (en valor absoluto) de metal que es extraída del suelo tras cada cosecha por cada hectárea cultivada tal y como se muestra a continuación:

$$Mm = C_{tejid\os cosechables} \times Mp \quad (2)$$

Donde:

- Mm es la masa de metal extraído en valor absoluto (mg Metal)
- $C_{tejid\os cosechables}$ es la tasa de acumulación de metal en las partes cosechables de la planta en mg Metal/kg MS planta
- Mp es la productividad en biomasa de la planta en kg MS/ha

2.1. Determinación de las tasas de acumulación

Para la determinación de las tasas de acumulación se selecciona el valor proveniente de bibliografía que puede considerarse como el más cercano al caso en cuestión.

La cercanía al valor considerado como más probable se establece mediante un criterio multidimensional que caracteriza la similitud entre las condiciones en que la tasa de fitoextracción tabulada (candidata) fue establecida, y las condiciones correspondientes al suelo que se pretende remediar, basándose en las siguientes variables:

- Concentración del metal en el suelo
- Clima
- Tipo del suelo

Diferencia entre concentraciones de metal en el suelo: La tasa de fitoextracción es dependiente de la concentración de metal en el suelo (Ali et al., 2013; H.-M. Liang et al., 2009; Sakakibara et al., 2011; Wu et al., 2010). Por lo tanto, es esperable que la tasa de fitoextracción de un caso tabulado será más parecida a la tasa correspondiente para el suelo candidato, cuanto más próximas sean las concentraciones de metal en el suelo. La distancia entre el caso en estudio y el valor tabulado se calcula según el valor absoluto de la diferencia relativa entre ambas, mediante la expresión:

$$Dif \text{ concentración metal } (\%) = ABS \frac{C_{estudio} - C_{candidata}}{C_{estudio}} * 100 \quad (3)$$

Donde:

- ABS (valor absoluto de)
- $C_{estudio}$ es la concentración de metal en el suelo en remediación en mg Metal/kg SS
- $C_{candidata}$ es la concentración de metal en el suelo del valor tabulado proveniente de bibliografía en mg Metal/kg SS

Diferencia entre tipos de clima: Con objeto de determinar la cercanía climatológica entre el caso en estudio y un valor tabulado, se evalúan las diferencias entre ambos grupos climáticos. La climatología imperante en la zona en estudio tiene una notable influencia en el desarrollo de la planta que, por lo tanto, condiciona tanto la productividad en biomasa de la especie como la tasa de extracción de metales del suelo. Los factores climatológicos son numerosos y se manifiestan tanto a nivel macroclimático (régimen pluviométrico, rango de temperaturas, etc.), como a nivel local (vientos dominantes o insolación). Este elevado número de variables hace que su valoración sea poco práctica durante las etapas de planificación de proyectos debido al alto esfuerzo y dificultad que requeriría su compilación y tratamiento de los datos, por lo que se hace necesario optar por caracterizar climáticamente tanto los casos tabulados como el caso en estudio a un nivel más grosero. Se ha optado por emplear la *Clasificación Climática de Köppen* cuyo uso es ampliamente aceptado entre la comunidad científica.

El sistema Köppen se fundamenta en la relación existente entre el clima y la vegetación natural presente en una determinada zona, y divide los diferentes climas del planeta en base a las temperaturas y precipitaciones medias anuales y mensuales junto con la estacionalidad de la precipitación.

Una descripción más detallada de los distintos tipos de clima clasificados según este sistema puede consultarse en (Kottek et al., 2006).

Para determinar la similitud climática entre las condiciones correspondientes al caso en estudio y las de cada valor tabulado, se considera que si el valor candidato ha sido hallado en una localización con la misma climatología la distancia será 0, mientras que si coinciden las 2 primeras letras y difieren en la tercera, la distancia será de 1 unidad. En caso de coincidir únicamente la primera letra (A,B,C,D o E), la distancia se considera de 2 unidades.

En caso de comparar valores obtenidos en diferentes macrogrupos climáticos, es decir, en caso de que la primera letra sea diferente, es posible encontrarse con múltiples opciones:

1. Los climas comparados son incompatibles. Los casos no son comparables y por lo tanto el valor tabulado se considera como no representativo y no podría ser tenido en cuenta en el análisis. Esto ocurre al comparar grupos climáticos demasiado dispares entre sí, como por ejemplo el polar y el tropical.
2. Las climatologías son comparables aunque lejanas. Ambos climas están muy alejados entre sí pero no se consideran incompatibles. En este caso caen situaciones típicas de comparación entre climas templados cuyas condiciones locales son próximas a pesar de presentar diferente letra Köppen. En este caso se aplica una distancia de valor 10.
3. Las climatologías son comparables y próximas. Éste es el caso en el que aunque los climas difieren entre sí, los subclimas a los que pertenecen están clasificados como pertenecientes al mismo grupo climático básico según (ISC-Audobon, 2016). En este caso se aplica una distancia de valor 7.

Diferencia entre tipos de suelo: Al igual que sucede para los parámetros climáticos, los factores edáficos son numerosos (principalmente pH, porcentaje de carbono, porcentaje de arcilla, disponibilidad de nutrientes, nivel freático y grado de compactación) y vienen recogidos en la bibliografía de forma muy heterogénea y generalmente incompleta, por lo que su aplicación para las fases de planificación de proyectos exige su simplificación.

Se ha optado por lo tanto, por caracterizar los suelos siguiendo el sistema de clasificación USDA (desarrollado por United States Department of Agriculture) basado en la textura del mismo, debido a que es un dato generalmente presente en las fuentes bibliográficas consultadas. Este sistema de sencilla y aceptada utilización se fundamenta en la granulometría del suelo.

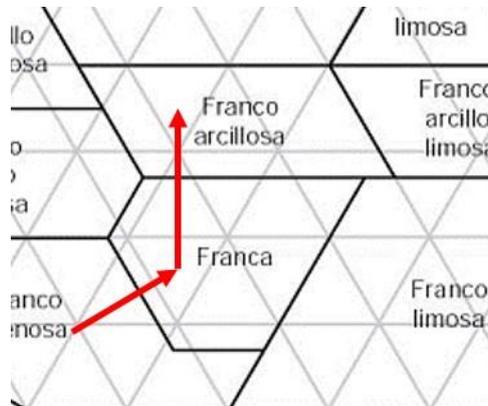
En función de los porcentajes de cada granulometría presentes, cada suelo es caracterizado empleando el conocido como “triángulo de textura de suelos” (USDA, 1987).

La cercanía entre el caso en estudio y los tabulados de la componente edáfica se establece a la vista del triángulo USDA, para el que se han fijado las distancias entre diferentes clasificaciones de suelo en función de los “saltos” precisos a realizar para pasar desde la textura objetivo hasta la textura correspondiente al valor evaluado de la BBDD. De ese modo por ejemplo, la distancia entre una textura Franco arenosa y una Franca sería de 1 unidad, mientras que entre las texturas Franco arenosa y Franco arcillosa habría 2 unidades (Figura 1).

Determinación del valor más cercano: Para determinar cuál es el valor más cercano o “ganador”, se categoriza la proximidad de cada caso candidato al caso en estudio aplicando un método cualitativo basado en los 3 parámetros anteriormente presentados. Este tipo de métodos ha sido ya satisfactoriamente empleado para numerosas herramientas de decisión

en materia de suelos, como los propuestos por la *American Water Works Association* y la *German Gas and Water Works Engineers Association*. Más concretamente, el método cualitativo aquí propuesto se basa en el conocido como **Método Alemán**, desarrollado por este último organismo para la caracterización de suelos corrosivos.

Figura 1: Captura ejemplo de caracterización de distancia edáfica entre suelo a estudio y caso candidato



Siguiendo las indicaciones de los apartados anteriores, se calcula la diferencia entre la situación en estudio y la situación en la que fue hallada la tasa de fitoextracción candidata aplicándole unas puntuaciones de acuerdo a la Tabla 1:

Tabla 1: Tabla de puntuaciones para la aplicación del método cualitativo de categorización de la proximidad entre los casos candidatos y el suelo en estudio

Parámetro	Valor medido	Puntuación
Distancia concentración suelo	0-100%	0
	100-200%	3
	200-500%	10
	>500%	15
Distancia Tipos de Clima	Mismo grupo climático	0
	Coincidencia de 2 primeras letras	1
	Coincidencia de la primera letra	2
	Climatologías comparables y próximas	7
	Climatologías comparables y lejanas	10
	Climatologías no comparables	Exclusión del análisis
Distancia textura suelo	Misma textura	0
	1 salto	1
	2 saltos	2
	3 saltos	3
	4 saltos	4
	5 saltos	5
	6 saltos	6

Una vez se calcula la suma total de todos aquellos casos candidatos que no han sido excluidos, se considera como caso ganador aquel de menor puntuación total y se caracteriza la fiabilidad de la elección según la Tabla 2.

Tabla 2: Tabla de caracterización de la fiabilidad de la elección del método cualitativo

Puntuación total	Caracterización
0-7	Fiable
8-12	Moderadamente fiable
13-20	Poco fiable
21-40	No fiable

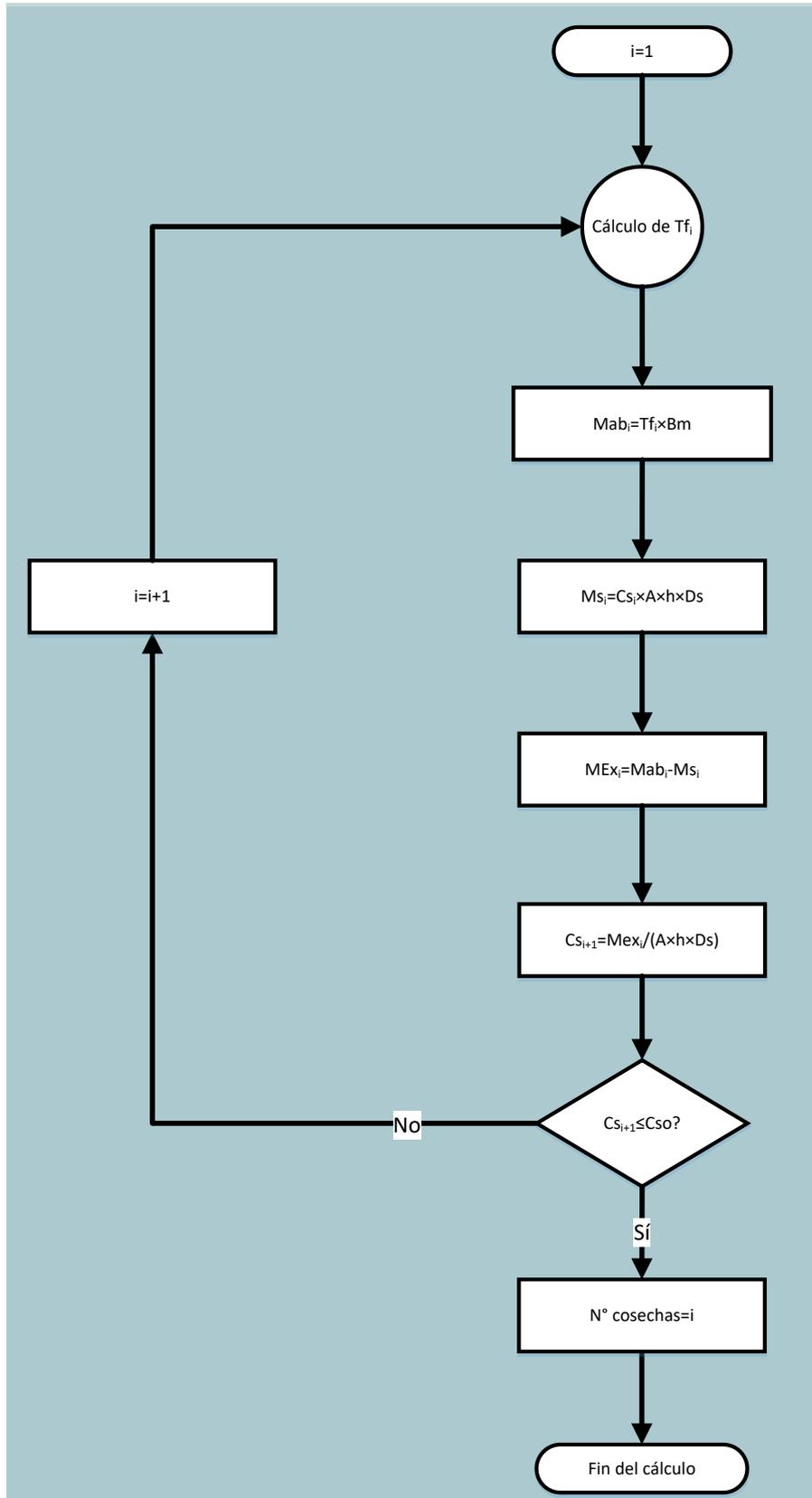
Una vez seleccionado el caso más cercano, se comprueba si la tasa de fitoextracción tabulada ha sido obtenida mediante el empleo de algún tipo de agente inductor de la fitorremediación, por lo que se considera que dicha predicción será únicamente fiable en caso de que la intervención se realice en las mismas condiciones. En el caso de que las especificaciones del proyecto no permitan utilizar el mismo tratamiento, se deberá proceder a buscar un nuevo caso. En caso de que no exista ningún valor tabulado que emplee las mismas condiciones que las propuestas para el proyecto, se empleará el valor de menor distancia, pero se le otorgará la caracterización de no fiable.

Finalmente, en base al principio de conservación de la materia, se parte de la premisa que en caso de que la concentración del metal en el suelo fuese 0, la tasa de fitoextracción sería 0 también, lo que permite trazar una recta a partir de los puntos (0,0) y ($C_{\text{suelo estudio}}$, Tasa fitoextracción), de la cual se extrae el valor esperado de la acumulación del metal en la planta, para la concentración de metal en el suelo en estudio.

2.2. Modelización temporal de la fitorremediación

La modelización de la evolución temporal de la concentración de metales pesados en el suelo se realiza a partir de la tasa de fitoextracción calculada en el apartado anterior. Para tal efecto, se emplea el algoritmo recurrente de (H.-M. Liang et al., 2009) que se describe en la Figura 2.

Figura 2: Algoritmo de cálculo para la estimación del nº de cosechas requeridas para alcanzar la remediación del suelo



Donde los datos de partida necesarios para la aplicación del algoritmo son

- i es el número de cosecha
- Tf_i Tasa de fitoextracción correspondiente a la cosecha i (mg Metal/kg MS de la planta)
- Bm_i ; Biomasa por cosecha en kg para la superficie de la parcela (A) en m^2
- Cs_i ; concentración de metal en el suelo en el momento de la cosecha i (mg Metal/kg SS)
- h ; profundidad a la que se encuentra el suelo en m
- Ds ; Densidad del suelo en kg/m^3
- Cso ; Concentración objetivo del metal en el suelo (mg Metal/kg SS)

Tras el cálculo de la tasa de fitoextracción (Tf_i) correspondiente a la cosecha i se calcula la cantidad de metal extraído en valor absoluto durante la cosecha i (Mab). Posteriormente se calcula Msi que constituye la cantidad del metal en valor absoluto previa a la cosecha i . Por diferencia se obtiene la cantidad de metal restante en el suelo tras la cosecha (ME_{xi}), dato con el que se calcula de nuevo la concentración de metal en el suelo tras la cosecha i (Cs_{i+1}). Si Cs_{i+1} es igual o inferior a la concentración objetivo (Cso), se da por terminado el cálculo e i se corresponde con el número de cosechas necesarias para alcanzar la remediación del suelo. En caso contrario, con la nueva concentración de metal en el suelo (Cs_{i+1}) se determina la nueva tasa de fitoextracción mediante el método cualitativo expuesto en el apartado anterior. Este ciclo se aplica de forma recurrente hasta alcanzar la concentración de metal objetivo Cso .

3. Caso de aplicación

Con objeto de testar la metodología presentada en esta comunicación, se ha aplicado el modelo de predicción de plazos a la especie *Melilotus officinalis* de la que se disponen de 4 casos tabulados recogidos en las publicaciones (Petriccione et al., 2013; Fernández et al., 2012).

El suelo a ser remediado se encuentra en Avilés, Asturias, con una climatología Cfb según la escala Köppen. La **Tabla 3** presenta sus características edáficas:

Tabla 3: Características edáficas del suelo en remediación

Tipo de suelo	Densidad (kg/m ³)	pH	Concentración inicial de Pb (mg/kg SS)	Concentración objetivo de Pb (mg/kg SS)
Franco	1200	6	153,33	70

Aplicando el método cualitativo anteriormente presentado, se obtiene el siguiente caso tabulado como el más próximo a la situación en estudio (**Tabla 4**):

Tabla 4: Caso ganador para *Melilotus officinalis*

Caso	Concentración Pb en suelo	Tasa de fitoextracción	Pendiente fitoextracción	Clasificación predicción
MOa1	200	724	3,62	Fiable

Posteriormente, estima que la productividad en biomasa seca de esta especie esperable será de 6.565 kg/ha, a partir de unos estudios realizados en la propia parcela (resultados no publicados), y se le aplica una variación de $\pm 30\%$ a modo de análisis de sensibilidad.

Finalmente, la Tabla 5 muestra la estimación resultante de cosechas necesarias para alcanzar la concentración objetivo:

Tabla 5: Estimación de cosechas para alcanzar la concentración objetivo

Nº cosechas más probables	Nº cosechas (valoración pesimista)	Nº cosechas (valoración optimista)
65	93	50

4. Conclusiones

A lo largo de esta comunicación se ha propuesto una nueva metodología de modelización heurística para la estimación de la evolución temporal de la concentración total de metales pesados en el suelo en los proyectos de fitorremediación. Esta metodología ha sido diseñada estableciendo un compromiso entre la precisión de los resultados y la minimización de los datos necesarios para su utilización, facilitando el proceso de selección de fitotecnologías para este tipo de proyectos.

4. Bibliografía

- Ali, H., Khan, E., Sajad, M.A., 2013. *Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications*. Chemosphere 91, 869–881. doi:10.1016/j.chemosphere.2013.01.075
- Brennan, M.A., Shelley, M.L., 1999. *A model of the uptake, translocation, and accumulation of lead (Pb) by maize for the purpose of phytoextraction*. Ecol. Eng. 12, 271–297. doi:10.1016/S0925-8574(98)00073-1
- Chen, B.-C., Lai, H.-Y., Juang, K.-W., 2012. *Model evaluation of plant metal content and biomass yield for the phytoextraction of heavy metals by switchgrass*. Ecotoxicol. Environ. Saf. 80, 393–400. doi:10.1016/j.ecoenv.2012.04.011
- Dickinson, N.M., Baker, A.J.M., Doronila, A., Laidlaw, S., Reeves, R.D., 2009. *Phytoremediation of Inorganics: Realism and Synergies*. Int. J. Phytoremediation 11, 97–114. doi:10.1080/15226510802378368
- Doumett, S., Lamperi, L., Checchini, L., Azzarello, E., Mugnai, S., Mancuso, S., Petruzzelli, G., Del Bubba, M., 2008. *Heavy metal distribution between contaminated soil and Paulownia tomentosa, in a pilot-scale assisted phytoremediation study: Influence of different complexing agents*. Chemosphere 72, 1481–1490. doi:10.1016/j.chemosphere.2008.04.083
- Fernández, R., Bertrand, A., García, J.I., Tamés, R.S., González, A., 2012. *Lead accumulation and synthesis of non-protein thiolic peptides in selected clones of Melilotus alba and Melilotus officinalis*. Environ. Exp. Bot. 78, 18–24. doi:10.1016/j.envexpbot.2011.12.016
- Fumagalli, P., Comolli, R., Ferrè, C., Ghiani, A., Gentili, R., Citterio, S., 2014. *The rotation of white lupin (Lupinus albus L.) with metal-accumulating plant crops: A strategy to increase the benefits of soil phytoremediation*. J. Environ. Manage. 145, 35–42. doi:10.1016/j.jenvman.2014.06.001
- Guala, S.D., Vega, F.A., Covelo, E.F., 2011. *Development of a model to select plants with optimum metal phytoextraction potential*. Environ. Sci. Pollut. Res. 18, 997–1003. doi:10.1007/s11356-011-0456-x

- ICS-Audobon [sitio web] *Köppen Climate Classification*. [consulta el 10/08/2016]. Disponible en: <http://www.thesustainabilitycouncil.org/resources/the-koppen-climate-classification-system/>
- Japenga, J., Koopmans, G.F., Song, J., Römkens, P.F.A.M., 2007. *A feasibility test to estimate the duration of phytoextraction of heavy metals from polluted soils*. Int. J. Phytoremediation 9, 115–132. doi:10.1080/15226510701232773
- JRC EC, Joint Research Center of the European Commission. Institute for Environmental Sustainability. 2014. *Progress in the management of contaminated sites in Europe*. <http://ies.jrc.ec.europa.eu>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. *World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated*. Meteorol. Z. 15, 259–263. doi:10.1127/0941-2948/2006/0130
- Liang, H.-M., Lin, T.-H., Chiou, J.-M., Yeh, K.-C., 2009. *Model evaluation of the phytoextraction potential of heavy metal hyperaccumulators and non-hyperaccumulators*. Environ. Pollut. 157, 1945–1952. doi:10.1016/j.envpol.2008.11.052
- Maxted, A.P., Black, C.R., West, H.M., Crout, N.M.J., McGrath, S.P., Young, S.D., 2007. *Phytoextraction of cadmium and zinc from arable soils amended with sewage sludge using *Thlaspi caerulescens*: Development of a predictive model*. Environ. Pollut. 150, 363–372. doi:10.1016/j.envpol.2007.01.021
- Moreno-Jiménez, E., Vázquez, S., Carpena-Ruiz, R.O., Esteban, E., Peñalosa, J.M., 2011. *Using Mediterranean shrubs for the phytoremediation of a soil impacted by pyritic wastes in Southern Spain: A field experiment*. J. Environ. Manage. 92, 1584–1590. doi:10.1016/j.jenvman.2011.01.022
- Petriccione, M., Patre, D.D., Ferrante, P., Papa, S., Bartoli, G., Fioretto, A., Scortichini, M., 2013. *Effects of *Pseudomonas fluorescens* Seed Bioinoculation on Heavy Metal Accumulation for *Mirabilis jalapa* Phytoextraction in Smelter-Contaminated Soil*. Water, Air, Soil Pollut. 224, 1–17. doi:10.1007/s11270-013-1645-7
- Sakakibara, M., Ohmori, Y., Ha, N.T.H., Sano, S., Sera, K., 2011. *Phytoremediation of heavy metal-contaminated water and sediment by *Eleocharis acicularis**. CLEAN – Soil Air Water 39, 735–741. doi:10.1002/clen.201000488
- United States Department of Agriculture-USDA. *Soil Mechanics Level I. Module 3 – USDA Textural Soil Classification. Study Guide*. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044818.pdf
- Verdillo, H.K., Homae, M., 2008. *Modeling of cadmium and lead phytoextraction from contaminated soils*. Pol. J. Soil Sci. 41, 149–162.
- Wu, G., Kang, H., Zhang, X., Shao, H., Chu, L., Ruan, C., 2010. *A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities*. J. Hazard. Mater. 174, 1–8. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.09.113
- Yadav, B.K., Mathur, S., 2006. *Modelling of environmental phytoextraction in vadose zone*. Indian J. Environ. Prot. 26, 593–598.