

USE OF SENSIBILITY ANALYSIS FOR ENVIRONMENTAL DECISION MAKING IN THE LAND CONTAMINATION REMEDIATION CONTEXT

Vigil Berrocal, Miguel Angel ¹; Martínez Huerta, Genma Marta ¹; Rey Díaz, Angel ¹;
Marey Pérez, Manuel Francisco ²

¹ Universidad de Oviedo, ² Universidad de Santiago de Compostela

Life Cycle Assessment (LCA) has become the most robust available technique for the environmental evaluation of land remediation projects. However, its results are highly dependent on local conditions and then hard to be extrapolated to other situations. On the other hand, sensitivity analysis, used to check the influence of the system's uncertainties, is a common stage of this kind of analysis. This paper is devoted to show how sensibility analysis can be used to establish general conclusions from the results of a particular LCA study, and so using them for different situations in the land remediation context, becoming the bases of a new environmental Decision Support System.

Keywords: LCA; Phytoremediation; DSS

EMPLEO DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA TOMA DE DECISIONES AMBIENTALES SOBRE ESTRATEGIAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se ha impuesto como la herramienta más rigurosa

actualmente disponible para la evaluación del rendimiento ambiental de los proyectos de
de
remediación de suelos contaminados. Sin embargo, su aplicación es altamente dependiente de las condiciones para las que se haya realizado el análisis y por lo tanto no extrapolable a otras situaciones. Una fase habitual en los ACV es el análisis de sensibilidad, que es utilizado para considerar en las modelizaciones todas las incertidumbres del sistema. El objeto de esta comunicación es mostrar cómo utilizar el análisis de sensibilidad para generalizar los resultados obtenidos a partir de un caso concreto que pueda así servir como base para un Sistema de Ayuda a la Decisión ambiental.

Palabras clave: ACV; Fitorremediación; SAD

1. Introducción

La actividad industrial ha generado una gran bolsa de suelos contaminados causando serios perjuicios al medio ambiente. Estimaciones de la Unión Europea, arrojan la presencia hasta de 3.6 millones de suelos contaminados en el territorio de sus países miembros (European Commission [EC], 2006). La mayor parte de éstos presentan cantidades variables de metales pesados y están principalmente originados por las actividades industriales y agrícolas.

Los suelos contaminados por metales pesados pueden ser remediados por medio de diversas técnicas entre las que se encuentran las biológicas, que utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos...) para extraer los contaminantes, degradarlos o transformarlos en productos inocuos. Entre estas técnicas se destaca la conocida como fitoextracción, que emplea la capacidad que tienen determinadas especies y variedades de extraer grandes cantidades de metales del suelo y acumularlos en sus tejidos, permitiendo tras sucesivas cosechas la remoción de contaminantes (Rascio y Navari-Izzo, 2011). Por otro lado, se pueden emplear tratamientos fisicoquímicos que utilizan propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación. Estas tecnologías comúnmente son conocidas como tecnologías convencionales y pueden remediar el suelo en un periodo limitado de tiempo, pero conllevan notables perjuicios ambientales como por ejemplo la degradación irreversible de la calidad edáfica del suelo impidiendo el posterior uso agrícola de éste (Vangronsveld y Cunningham, 1998).

Aunque la fitoextracción, al igual que el resto de técnicas denominadas "*gentle remediation*", se percibe generalmente como una tecnología sostenible, como toda actividad agrícola puede causar numerosos impactos ambientales, principalmente debido a la cosecha (von Blottnitz y Curran, 2007), la aplicación de fertilizantes y pesticidas, las emisiones directas (Suer y Andersson-Sköld, 2011), y la gestión de la biomasa (Vigil et al., 2015). Por lo tanto, desde un punto de vista medioambiental, antes de optar por una técnica u otra es muy importante comprobar de una forma rigurosa que la tecnología que se proyecta emplear para un caso concreto sea lo más respetuosa posible con el medio, independientemente de la percepción que se tenga de la misma.

Para la valoración de la sostenibilidad ambiental de cualquier actividad, producto o servicio se destaca entre todas las técnicas de análisis de impacto ambiental el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), dado que trata los aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (Finnveden et al., 2009). El ACV cuantifica los recursos consumidos así como las emisiones atribuidas al producto o servicio. Además, también proporciona indicadores de la contribución del producto a un amplio espectro de problemas medioambientales como pueden ser el cambio climático, emisiones tóxicas y agotamiento de recursos.

Si bien el empleo del ACV está actualmente considerado como la mejor práctica a la hora de evaluar las consecuencias ambientales de una actividad, producto o servicio, es importante destacar que el análisis de sistemas de remediación de suelos está sujeto a numerosos parámetros locales que determinan el resultado final de la evaluación tales como la distancia desde donde se trae la maquinaria a emplear, la gestión de los residuos producidos o el origen de las materias primas utilizadas. Dicho motivo impide normalmente generalizar los resultados obtenidos mediante un análisis a otras situaciones, lo que obliga para cada caso concreto a tener que realizar un análisis específico con sus consiguientes costes temporales y económicos, lo que dificulta la utilización de la metodología ACV como herramienta para la toma de decisiones.

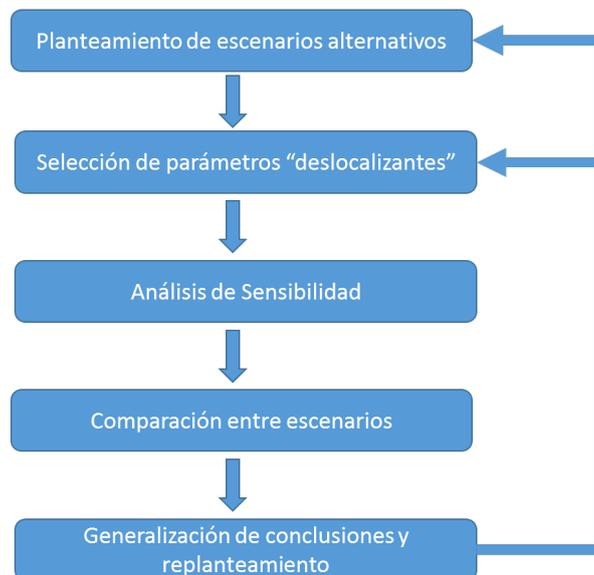
Esta comunicación pretende facilitar el uso del ACV como herramienta en la toma de decisiones para la recuperación de suelos contaminados, mediante la propuesta de una metodología que aprovecha el empleo de una fase habitual en este tipo de estudios, el análisis de sensibilidad, para generalizar las conclusiones obtenidas para un caso concreto.

2. Descripción de la metodología

1. Con objeto de establecer en qué condiciones es medioambientalmente más adecuado emplear una técnica u otra para la remediación de suelos contaminados por metales pesados, inicialmente se debe plantear una serie de escenarios alternativos que sean viables técnicamente para resolver la situación a estudio.
2. A continuación se establecen para cada escenario propuesto aquellos parámetros que permitan generalizar los resultados obtenidos para un escenario concreto, como por ejemplo distancias, productividades y tecnologías aplicadas.
3. Seguidamente se realiza un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para cada escenario empleando preferentemente un método de Análisis de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) con un solo indicador sintético final, o en su defecto un método que exprese los resultados mediante un número muy limitado de indicadores con objeto de permitir una clara comparación entre ellos
4. Posteriormente se realiza un análisis de sensibilidad para los parámetros propuestos en la fase 2.
5. Finalmente se comparan entre sí todos los escenarios, se establecen las generalizaciones y se analiza si nuevos parámetros o cambios en los escenarios deben ser incluidos siguiendo una filosofía PDCA de Deming.

En la **Figura 1** se muestra de forma sintética la metodología propuesta:

Figura 1: Metodología propuesta



3. Aplicación de la metodología

Se partirá del mismo suelo contaminado y se realizará un ACV a varios escenarios alternativos que contemplan su recuperación empleando distintas técnicas de remediación de suelos. La modelización se realiza procurando en todo momento que los escenarios sean comparables entre sí.

De entre las numerosas tecnologías in situ de remediación de suelos, se estudian las opciones más adecuadas para este tipo de suelos contaminados, excluyéndose las más agresivas y las que no están dirigidas hacia metales pesados. Por otro lado, la técnica electrocinética, si bien podría ser incluida en este grupo, es excluida también debido a su carácter innovador, que tiene como consecuencia una mayor dificultad para obtener datos fiables y el presentar severas incertidumbres sobre sus resultados, lo que amenazaría la validez del estudio.

Finalmente, las técnicas seleccionadas son las siguientes:

- Fitorremediación con *Melilotus alba* con aprovechamiento con biogás
- Fitorremediación con *Melilotus alba* con disposición en vertedero de la biomasa generada
- Excavación y transporte a vertedero
- Estabilización con caliza (encalado)
- Estabilización/solidificación con cemento portland

A pesar de tratarse de una técnica *ex situ*, el escenario Excavación y transporte a vertedero se ha incluido en la comparativa para resaltar las implicaciones ambientales de las técnicas *in situ*, y debido a que es la técnica más habitual en la remediación de suelos contaminados.

Por otro lado, se incluye la opción No Acción con objeto de comparar todos los escenarios con la posibilidad de no intervención, ya que el mantener excesivos niveles de metales pesados en el suelo, ya ocasiona por sí mismo perjuicios ambientales.

3.1 Descripción del caso

El suelo está localizado en una parcela adyacente a una industria siderúrgica localizada en Avilés (Asturias). Si bien se trata de un suelo real, el caso se ha modificado ligeramente para poder realizar la comparativa de una manera más generalizable que permita lanzar conclusiones aplicables a un gran rango de situaciones. Por ejemplo, se cuenta con una hipotética superficie de 10.000m² con objeto de tomar ésta como unidad funcional y poder facilitar los cálculos y su linealización a otras superficies.

3.1.1 Características del suelo

El suelo se encuentra ligeramente contaminado por metales pesados en su perfil más superficial, más concretamente en los primeros 30cm, como consecuencia de las continuas emisiones difusas desde la industria adyacente. Los resultados de los análisis de suelo, comparados con los niveles superiores aceptables para admitir el cultivo de alimento en el Principado de Asturias según los Niveles Genéricos de Referencia (NGR) vigentes, se pueden ver en la **Tabla 1**:

Tabla 1: Concentraciones de metales en suelo y NGR del Principado de Asturias

Metal	Concentración de metal en suelo (mg/kg suelo seco)	NGR para la producción de (mg/kg suelo seco)
Cd	0.88	2
Co	6.13	25
Cu	34.24	55
Ni	7.7	65
Pb	153.33	70
Zn	231.01	455

Como se comprueba, el plomo es el único metal que supera el umbral de referencia, por lo que la remediación irá dirigida a reducir su concentración desde los 153.33 a 70 mg/kg suelo seco.

La textura del suelo es franca, y su porcentaje en arena, limo y arcilla, datos de densidad y pH se muestran en la **Tabla 2**:

Tabla 2: Propiedades edáficas

	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Densidad (kg/m ³)	pH
Suelo franco	23-52	28-50	7-27	1200	5

3.2 Descripción de los escenarios

Escenario 1: Fitorremediación con aprovechamiento mediante co-digestión anaerobia

Este escenario considera que la remediación del suelo se realiza mediante el empleo de la herbácea para pasto *Melilotus alba*. Las tasas de acumulación de Pb en la planta han sido tomadas de (Fernández et al., 2012) y la productividad en biomasa del sitio se asume que será de 20,860 kg de masa seca por hectárea según unos estudios realizados en la misma finca por la propiedad (no publicados). El análisis incluye la preparación del suelo, el cultivo por siembra a voleo, la fertilización, cosechado y transporte en camión hasta un digestor anaeróbico localizado a 16,7km de distancia. Este digestor es habitualmente empleado para la gestión de residuos de origen animal, pero se asume que una vez al año se ajusta el proceso para codigerir la biomasa procedente de fitorremediación. El inventario del digestor ha sido tomado de (Álvarez et al., 2015). La productividad de biogás correspondiente al *Melilotus* se ha calculado a partir del potencial metánico de dicha herbácea según (Raposo et al., 2012). Los productos de la codigestión anaerobia son biogás (con un 60% en metano) y digerido. Parte del digerido se emplea para aportar a la finca en estudio todo el nitrógeno para el siguiente ciclo de fitorremediación y el sobrante se considera que es vendido como fertilizante. El biogás producido se considera que es reformado criogénicamente para permitir su inyección a la red nacional de Gas Natural. El inventario para el reformado criogénico también es tomado de (Álvarez et al., 2015).

El producto final obtenido es Gas Natural Sintético (GNS), y se estima que su producción permite evitar la producción de un volumen equivalente de Gas Natural convencional y consiguientemente su impacto ambiental.

Siguiendo la metodología de cálculo recurrente por (Liang et al., 2009) se estima que se tardan 32 años en reducir la concentración del Pb en el suelo hasta la concentración objetivo.

Análisis de sensibilidad del Escenario 1

Con objeto de reflejar productividades subóptimas en el digestor, se prueban los resultados con reducciones de la productividad de biogás hasta en un 100%, caso en para el que se consideraría que la co-digestión se emplea únicamente como método de gestión del residuo.

Por otro lado, para comprobar el efecto de las posibles reducciones en la productividad de la biomasa debido a condiciones meteorológicas adversas, se ha comprobado la posibilidad de que ésta se reduzca hasta en un 50% mientras que se mantiene la productividad del digestor en el valor original.

Finalmente se testea la influencia de la distancia entre el suelo en remediación y el centro de aprovechamiento, incrementando la distancia original de 16,7km hasta 500km.

Escenario 2: Fitorremediación con *Melilotus alba* con disposición en vertedero de la biomasa fitorremediada

Este escenario se diferencia del anterior en que en lugar de enviar la biomasa de fitorremediación a un digestor, ésta es dispuesta en vertedero. Al no realizarse co-digestión anaerobia no se aplica ningún digerido al suelo. Como consecuencia, la fertilización se realiza exclusivamente en forma mineral y no se reintroduce metal al suelo, lo que reduce el tiempo de remediación a 23 años.

Dado que la concentración de metal en la biomasa producida no es excesivamente alta, se asume que ésta será aceptada en un vertedero de residuos inertes cercano tal y como se asume en (Suer and Andersson-Sköld, 2011).

Análisis de sensibilidad del Escenario 2

Al igual que en el caso anterior, se comprueba la influencia de la reducción en productividad de biomasa hasta un 50% y se analiza la importancia de la distancia a vertedero incrementando la misma hasta los 500km.

Escenario 3: Excavación y transporte a vertedero

Se estima que los 30cm del perfil superior del suelo son excavados y transportados por camión hasta el mismo vertedero inerte que para el escenario anterior. El volumen de suelo excavado se considera que es reemplazado por una cantidad equivalente de suelo fértil no contaminado procedente de una obra civil a 5 km de distancia.

Análisis de sensibilidad del Escenario 3

En este escenario, el único factor variable con previsible influencia significativa en los impactos ambientales es la distancia entre el suelo en remediación y el vertedero. Al igual que para el caso anterior se aumenta dicha distancia desde los 16,7 hasta los 500km.

Escenario 4: Estabilización con caliza (encalado)

Esta técnica considera la adición de caliza con objeto de elevar el pH del suelo desde 5 hasta 7, momento en que se estima que los metales presentes en el suelo son inmovilizados. En este escenario se considera que el terreno es preparado mediante un labrado manual. Después se realizan 2 encalados con un año de diferencia para no elevar el pH del suelo en más de 1 punto al año para evitar problemas de bloqueo de nutrientes. También, para compensar los procesos naturales de acidificación de suelo se establece un encalado de mantenimiento 25 años después.

Análisis de sensibilidad del Escenario 4

En este escenario el único factor cambiante sería la distancia al centro de almacenamiento de la caliza, factor que no se espera que genere modificaciones significativas en el resultado, por lo que para este escenario no se realiza análisis de sensibilidad.

Escenario 5: Estabilización/solidificación con cemento portland

Esta técnica tiene como objeto el solidificar parte del suelo mediante la adición de cemento portland con objeto de que los metales pesados queden inmovilizados y no puedan migrar en el perfil del suelo. Dicha solidificación conlleva una excesiva compactación del terreno que excluye su utilización posterior como suelo agrícola o bosque.

El modelo contempla una labor superficial del terreno igual que para el caso anterior, la aplicación del cemento líquido mediante un cargador hidráulico y esparcidor y la inclusión de una capa de suelo fértil como la empleada en el escenario "Excavación y transporte a vertedero".

Análisis de sensibilidad del Escenario 5

En este escenario se prueban variaciones de la cantidad de cemento a añadir entre un -20 y un +20%, así como diferentes distancias entre el suelo en remediación y la cementera donde es producido. Dichas distancias se estima que van entre los 47.8 km del escenario base y los 300km.

No acción

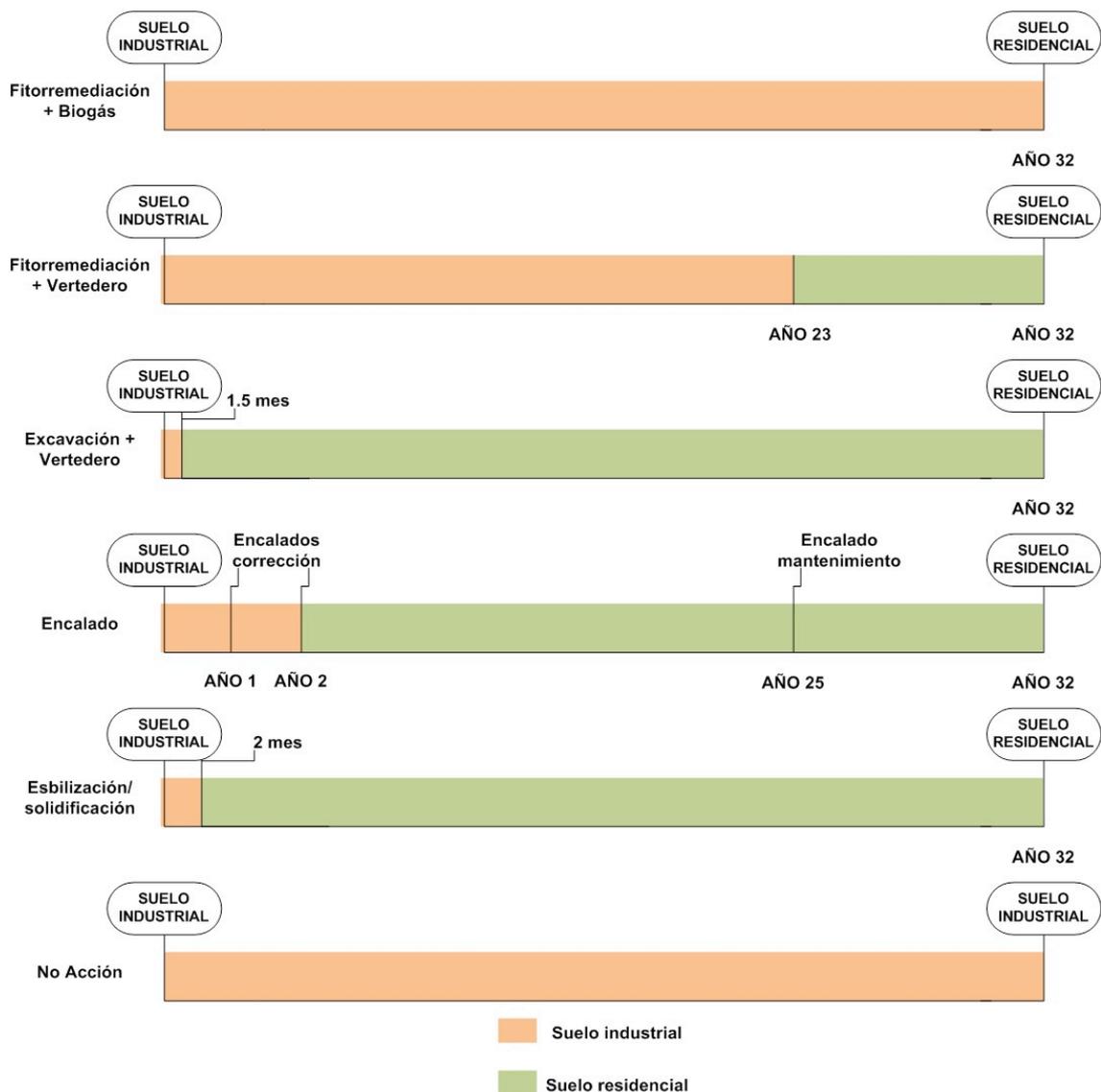
Este escenario es añadido para mostrar las consecuencias ambientales de dejar el suelo en el estado actual. Se modela como una ocupación del suelo como suelo industrial durante 32 años. Dada la escasa o nula movilidad de los metales pesados en suelos se estima que tras este periodo el Pb tiene la misma concentración.

3.3 Alcance

Dada la diversidad de horizontes temporales que presentan entre sí las diferentes técnicas, con ciclos muy largos para los escenarios de fitorremediación de varias décadas, y otros más inmediatos que pueden limitarse a unos pocos meses, se hace necesario adoptar una perspectiva temporal común que haga a todas las técnicas comparables.

De las técnicas seleccionadas, se toma la más restrictiva en términos temporales, es decir, la de mayor duración, y se le aplica su horizonte al resto de técnicas. Dado que la que menor velocidad de remediación presenta es la fitorremediación con aprovechamiento de la biomasa en el digestor, se toma como horizonte temporal común su duración, que ha sido estimada en 32 años.

Figura 2: Conceptualización del alcance



Tal y como se establece en (Vigil et al, 2012), el impacto del uso del suelo tiene gran influencia en la evaluación global de la intervención, por lo que la perspectiva comparativa de este estudio exige que todos los escenarios partan desde las mismas condiciones y lleguen a la misma situación, con el mismo uso del suelo. Similarmente a como se ha definido el horizonte temporal común, se toma la técnica más restrictiva en cuanto a usos

posibles del suelo una vez éste haya sido remediado, en este caso la Estabilización/Solidificación, ya que esta técnica emplea un aglutinante que compacta en exceso el terreno e impide su uso para fines agrícolas o forestales.

Por lo tanto, el suelo de partida se clasifica como Suelo Industrial 121 según el sistema Corine Land Cover y tras la remediación, sea por la vía que sea, se consigue que cumpla los requisitos necesarios para poder ser clasificado como suelo de tipo urbano discontinuo (clasificación 112 de Corine Land Cover), con capacidad física para alojar una zona ajardinada.

3.4 Metodología de Análisis de Impacto de Ciclo de Vida

Para este caso la metodología de AICV elegida ha sido ReCiPe aplicando la perspectiva jerárquica con los valores europeos para la normalización y la ponderación debido a:

1. Considera el uso del suelo
2. Los modelos que incluyen son ampliamente aceptados
3. La integración de todos los daños al medioambiente en un único indicador agregado que permite una fácil interpretación y comparación (Hou et al., 2014).

Un análisis más exhaustivo en el que se establece a ReCiPe como la metodología más idónea para la valoración de los impactos ambientales en proyectos de remediación de suelos ligeramente contaminados mediante técnicas poco intrusivas puede consultarse en (Vigil et al., 2012) (Vigil et al, 2015).

4. Resultados

La **Figura 3** a continuación muestra en orden de impacto creciente la puntuación del indicador agregado ReCiPe para todas las opciones planteadas a través del análisis de sensibilidad, con objeto de facilitar para cada contexto qué tecnología implica menores cargas ambientales.

En color gris se muestran todas las variantes del Escenario 1 (*Fito+BG*), en azul las del escenario 2 (*Fito+Vert*), en verde las del Escenario 3 (*Ex+Vert*), en magenta el Escenario 4 (*Encalado*) y en amarillo el escenario 5 (*SS*).

Para cada barra el sufijo *Ref* representa el escenario de referencia tal y como es descrito en el apartado 3.2.

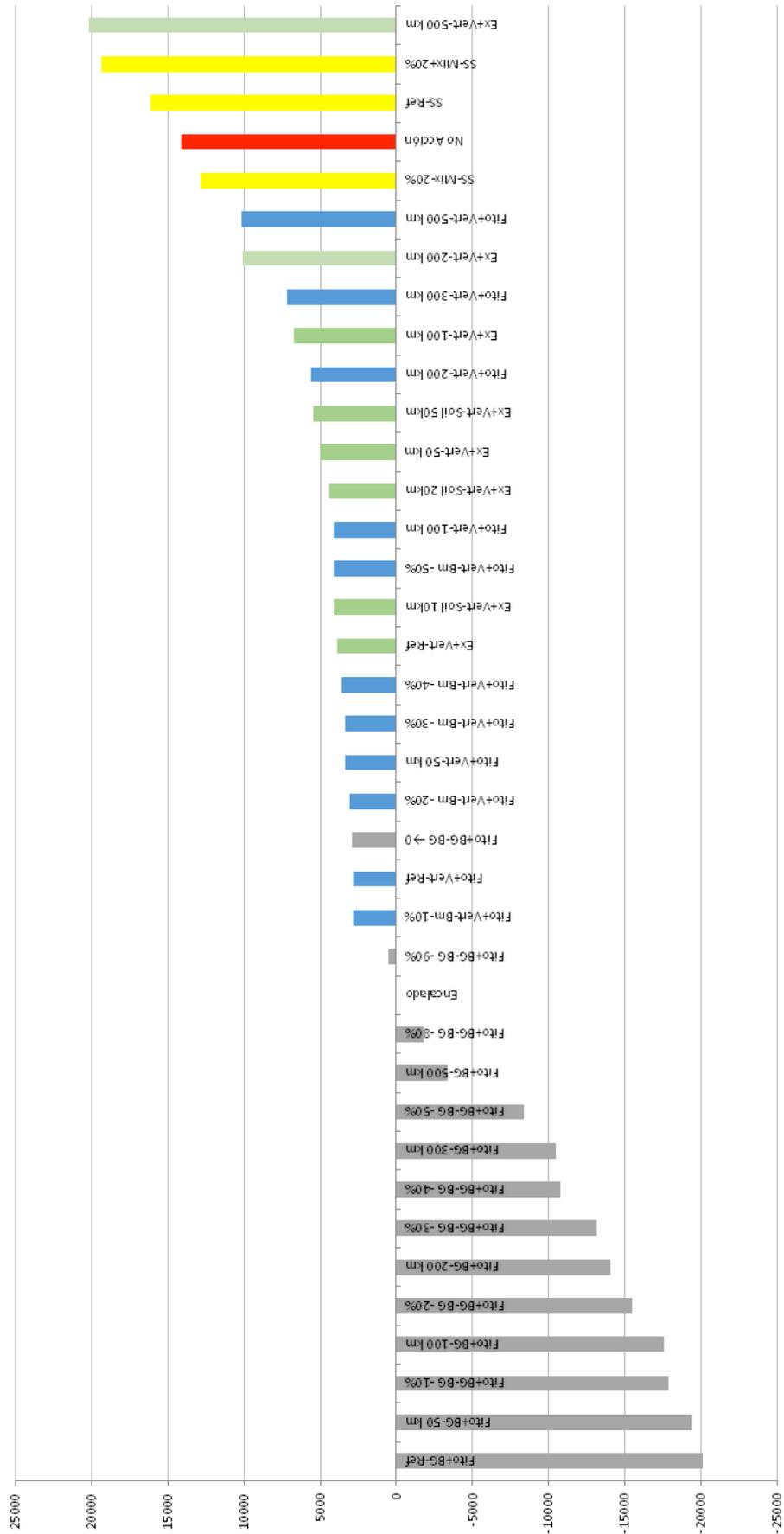
Para los resultados del Escenario 1 los sufijos *50 km*, *100 km*, etc., describen la distancia desde el suelo en remediación y el digestor anaeróbico. Por otro lado, los sufijos *BG-10%*, *BG-20%*, etc., muestran los casos en los que se modelizaron reducciones en productividad de biogás.

Análogamente, para el Escenario 2 los sufijos *Bm: -10%*, *-Bm -20%*, etc., representan reducciones en la productividad de biomasa.

Para el Escenario 3, los sufijos *Soil 10km*, *Soil 20km*, representan la distancia desde la que se trae el nuevo suelo vegetal, mientras que los sufijos *50km*, *100km*, etc., muestra la distancia entre el suelo en remediación y el vertedero al que se envía la fracción contaminada.

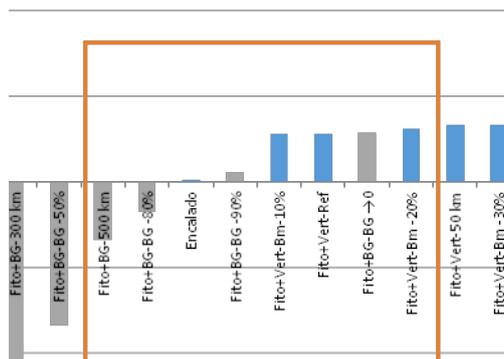
Finalmente, para el Escenario 5 los sufijos *Mix -20%* y *Mix +20%* responden a reducciones en la cantidad de cemento añadido.

Figura 3: Resultados agrupados



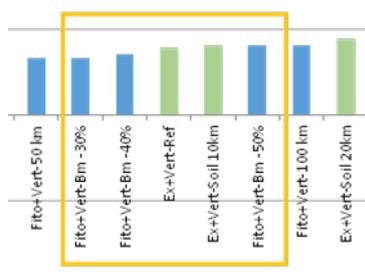
De la **Figura 3** se puede extraer que la fitorremediación con aprovechamiento es siempre la opción medioambientalmente más favorable salvo en el caso de que el rendimiento de biogás sea prácticamente nulo, y se considere la co-digestión anaerobia como un mero sistema de gestión de la biomasa. En ese caso la opción del encalado es la más adecuada medioambientalmente y la fitorremediación con disposición en vertedero resulta más favorable siempre y cuando se mantenga la productividad en biomasa y el vertedero esté cercano (**Figura 4**).

Figura 4: Zona de sostenibilidad límite opción Fito+BG



Por otro lado, la fitorremediación sin valorización es en general una técnica ambientalmente más favorable que la técnica convencional de excavación y envío a vertedero, siempre y cuando la producción de biomasa del *Melilotus* no se reduzca en más de un 40%, momento en que el aumento de cosechas necesarias para alcanzar las concentraciones objetivo hace que el impacto ambiental supere al de la excavación y disposición del suelo contaminado en un vertedero cercano (**Figura 5**).

Figura 5: Zona de sostenibilidad límite Fito+Vert

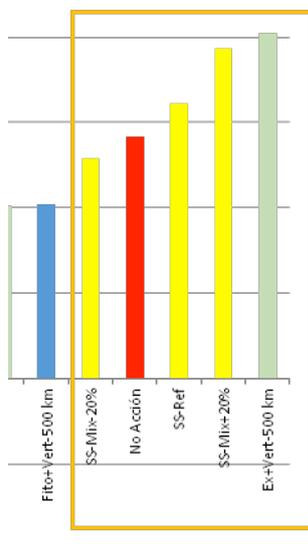


La solidificación y estabilización con cemento Portland se confirma en general como la técnica más perjudicial para el medioambiente siempre y cuando no se transporte el suelo contaminado a vertederos muy lejanos. Distancias de transporte del suelo superiores a 200 o 300 km hacen que la opción de excavación y disposición en vertedero resulte la más desfavorable medioambientalmente (**Figura 6**).

Cabe destacar que la no intervención, representada por el escenario de referencia No acción, también implica notables impactos ambientales, de tal modo que solamente las opciones de solidificación y estabilización, o la Excavación con envío del suelo a un vertedero muy lejano (500km) resultan más desfavorables que dejar el suelo tal y como

está. Finalmente, tal y como muestra la **Figura 6**, en caso de optimizarse la adición de cemento Portland hasta reducir su aplicación en un 20% la técnica resultaría medioambientalmente más adecuada que la No acción.

Figura 6: Zona de sostenibilidad de No Acción



5. Conclusiones

A lo largo de esta comunicación se ha planteado una metodología de ampliación de los Análisis de Ciclo de Vida que permite aplicar los resultados obtenidos a partir de un caso concreto de remediación de suelos a otros casos análogos.

A partir de los resultados obtenidos se puede prever a partir del caso de aplicación que:

- La fitoextracción con aprovechamiento como biogás será con mayor probabilidad una opción medioambientalmente favorable.
- Que la inmovilización mediante encalado será una técnica de nulo o muy bajo impacto ambiental
- Que la fitoextracción sin ningún tipo de aprovechamiento no es una opción más sostenible que otras como la Excavación y envío a vertedero salvo que la biomasa de fitorremediación se disponga en un vertedero cercano o adyacente.
- Que la solidificación/estabilización es la técnica *insitu* con mayores cargas ambientales.
- Que prácticamente en todos los casos, la no remediación de un suelo contaminado por metales pesados presenta mayores impactos que su descontaminación mediante cualquier método.

6. Referencias

European Commission staff working document: Document accompanying the Communication from the Commission to the Council, The European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions e

Thematic Strategy for Soil Protection e Impact assessment of the thematic strategy
on soil protection. European Union; 2006

- Álvarez, J.V., Luiña, R., Ortega, F., Lobo, P., 2015. Synergy as Strategy for the Energetic Valorisation of Waste Focused in Transport. Springer International Publishing.
- 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
- Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S., 2009. Recent developments in Life Cycle Assessment. *J. Environ. Manage.* 91, 1–21. doi:10.1016/j.jenvman.2009.06.018
- Hou, D., Al-Tabbaa, A., Guthrie, P., Hellings, J., Gu, Q., 2014. Using a hybrid LCA method to evaluate the sustainability of sediment remediation at the London Olympic Park. *J. Clean. Prod.* 83, 87–95. doi:10.1016/j.jclepro.2014.07.062
- 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
- Rascio, N., Navari-Izzo, F., 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Sci.* 180, 169–181. doi:10.1016/j.plantsci.2010.08.016
- Suer, P., Andersson-Sköld, Y., 2011. Biofuel or excavation? - Life cycle assessment (LCA) of soil remediation options. *Biomass Bioenergy* 35, 969–981. doi:10.1016/j.biombioe.2010.11.022
- Vangronsveld, J., Cunningham, S.D., 1998. Metal-contaminated soils: In situ inactivation and phytoremediation. Springer.
- Vigil, M., Marey-Pérez, M.F., Martínez Huerta, G., Álvarez Cabal, V., 2015. Is phytoremediation without biomass valorization sustainable? — Comparative LCA of landfilling vs. anaerobic co-digestion. *Sci. Total Environ.* 505, 844–850. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.10.047
- von Blottnitz, H., Curran, M.A., 2007. A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective. *J. Clean. Prod.* 15, 607–619. doi:10.1016/j.jclepro.2006.03.002