

## **SISTEMA DE APOYO A LA DECISIÓN (SAD) PARA LA FITORREMEDIACIÓN EN LA SIDERURGIA MEDIANTE ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV)**

Manuel Fco. Marey Pérez<sup>1</sup>, Rocio Luiña Fernández<sup>2</sup>, Sara Rodríguez Sousa<sup>2</sup>, Genma Martínez Huerta<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Grupo de Investigación de Proyectos y Planificación. EPS Lugo*

*Universidad de Santiago de Compostela*

<sup>2</sup> *Área de Proyectos de Ingeniería. ETSIMinas*

*Universidad de Oviedo*

### **Abstract**

Phytoremediation supports the goal of sustainable development and is one of the options for the recovery and use of areas contaminated by heavy metals from the steel mills. The techniques of life cycle assessment (LCA) have proven a useful tool to assess fully the different recovery options for different types of spaces. This paper presents a flowchart model that structures the development of a software tool type system of decision support (DSS) that evaluates the different options for recovery of degraded areas with similar characteristics as to the origin of the activity caused the pollution, but located in different geographical regions worldwide.

The system is implemented using a database with information on the main plants used in phytoremediation and environmental needs for the development of productive program of each species. Through five stages: the first one that determines the viability depending on weather conditions, soil and pollutant load or not to use phytoremediation as a recovery technique. In subsequent stages, we analyze the territorial boundary conditions, technical, social and economic development so that by comparing the different potential options and according to the LCA techniques allow the user to access arguments for selecting the best option.

**Keywords:** *DSS, LCA, phytoremediation, steel industry.*

### **Resumen**

La fitorremediación apoya el desarrollo sostenible la recuperación y aprovechamiento de áreas contaminadas por metales pesados procedentes de siderurgias. Las técnicas de análisis del ciclo de vida (ACV) han demostrado ser una herramienta útil para evaluar las diferentes opciones de recuperación en diferentes espacios. En este trabajo se presenta un modelo que estructura el desarrollo de una herramienta informática de tipo sistema de apoyo a la decisión (SAD) para evaluar las diferentes opciones de recuperación de espacios degradados de similares características en el origen de actividad que ocasionaron la contaminación ubicadas en diferentes regiones del mundo.

El sistema se instrumenta mediante una base de datos con información de las especies utilizadas en fitorremediación y las necesidades ambientales para el desarrollo de cada especie. Mediante cinco etapas, la primera de ellas la que determina la viabilidad en función de las condiciones de clima, suelo y carga de contaminante de utilizar o no fitorremediación

como técnica de recuperación. En las etapas siguientes se analizan condiciones de contorno territorial, técnico, social y económico de forma que mediante la comparación de las diferentes opciones potenciales y de acuerdo a las técnicas de ACV permita al utilizador disponer de argumentos para seleccionar la mejor opción.

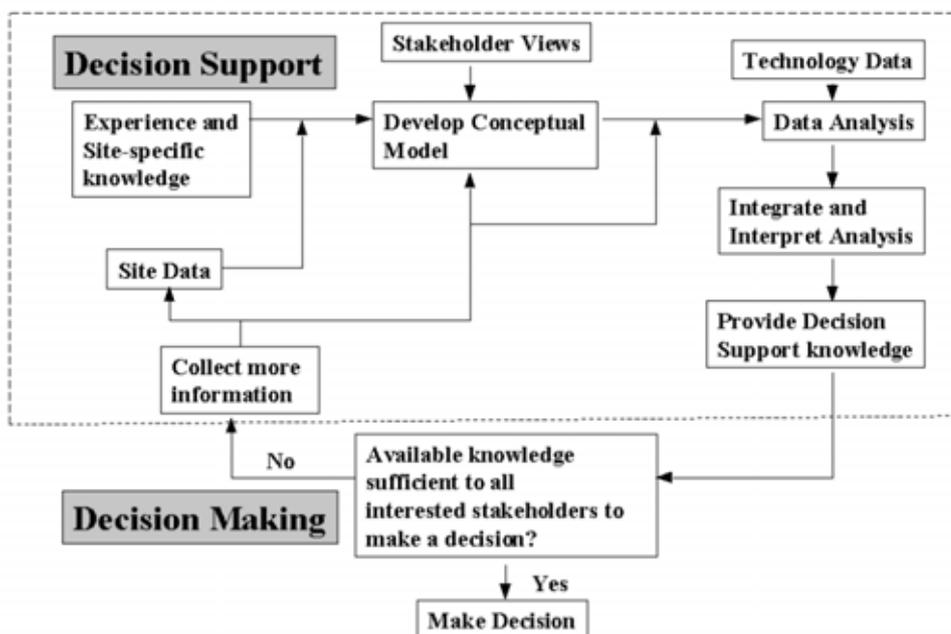
**Palabras clave:** SAD, ACV , fitorremediación, siderurgia.

## 1. Introducción

En la actualidad, cantidades importantes de suelo se encuentran contaminadas por metales pesados en todo el mundo. En nuestro país, esto se debe principalmente a la existencia de antiguos vertederos de residuos, la adición de lodos con exceso de metales a suelos agrícolas, las diferentes actividades industriales y explotaciones mineras actuales y abandonadas e incluso a causas naturales como el afloramiento en superficie de rocas que contienen metales pesados que posteriormente pasan al suelo por la acción de la erosión. Dichos suelos necesitan ser recuperados, acción que se puede realizar por diferentes medios.

Las actividades de remediación de los terrenos contaminados apoyan el objetivo del desarrollo sostenible, sin embargo, estas actividades tienen sus propios impactos económicos, sociales y ambientales. Un servicio de rehabilitación para ser realmente considerado como "sostenible", sus impactos no debe superar los beneficios de descontaminación. La iniciativa CLARINET "Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies" de la Unión Europea (Bardos et al., 2002). Se establece una estructura general para la toma de decisiones en la que se fundamentan los Sistemas de Apoyo a la Decisión (SAD) para este tipo de problemas que por lo general incluye: 1) Fase de identificación del problema. 2) Fase de desarrollo en la que las posibles soluciones son identificadas y desarrolladas. 3) Fase de selección en el que la solución implementada es elegida. 4) Fase de seguimiento para comprobar / refutar que la opción elegida o un conjunto de opciones se han aplicado. En la **figura 1** se muestra la estructura completa del proceso.

Figura 1: Diagrama de flujo del proceso del SAD para remediación de suelos contaminados



Fuente  
: Environment Agency, 2001

Bradshaw (1997) muestra como la fitorremediación no es más que una aplicación específica, objetiva y mejorada de la capacidad que tienen las plantas de forma natural de mejorar los suelos alterados por la actividad humana. Las técnicas de fitorremediación han sido comúnmente utilizadas, en el trabajo titulado *Phytoremediation Resource Guide* elaborado por la Agencia Medioambiental de los Estados Unidos (EPA, 2000) muestra una serie de trabajos, documentos y páginas web catalogadas y clasificadas en función de las técnicas y los destinos del proceso de fitorremediación. Destacar los trabajos de los mismos autores (EPA, 2000 y 2002) enfocado el primero a conocer el status de la tecnología de fitorremediación y el segundo a explicar este tipo de técnicas a la población civil. Otro trabajo destacado es el titulado *Introduction to phytoremediation* (EPA, 2000b) en la que se muestran los procesos a llevar a cabo en este tipo de actividades. En la década final del siglo XX se consolidan este tipo de técnicas y es en estos momentos cuando aparecen trabajos destacables como el de (Glass, 1998) en el que se lleva a cabo una recopilación de las diferentes técnicas utilizadas y se analiza su efectividad en términos técnicos y económicos en los Estados Unidos. Un trabajo similar es llevado a cabo por (McIntyre and Lewis, 1997) para Canadá. Como toda disciplina o técnica que se está desarrollando es necesario establecer el significado de los términos a utilizar. El trabajo de Bentjen (2000) muestra un glosario de términos común e internacionalmente utilizados.

Dentro del conjunto de las técnicas de fitorremediación, al igual que en este caso, ha suscitado especial interés la eliminación de metales pesados. En la obra (Hossner, et al. 1998) se muestra como se integra la fitorremediación con la fisiología, la química y la microbiología tanto en la planta como en el suelo. (Azadpour and Matthews, 1996) compara los resultados alcanzados por las técnicas tradicionales de extracción y depuración de suelos por métodos físicos y químicos con la realizada por medio de la fitorremediación destacando esta técnica como más adecuada para la posterior utilización de los terrenos.

Trabajos como el elaborado por el Work Group del ITRC Metals in Soils y que dió como resultado el documento titulado *Emerging Technologies for the Remediation of Metals in*

*Soils: Phytoremediation* (ITRC, 1998) en el que se muestra la diferente tecnología a utilizar para la retirada de contaminantes del suelo. Numerosos trabajos muestran ejemplos de aplicaciones específicas de la técnica de fitorremediar suelos contaminados por diferentes metales pesados. En la tabla 1 tabla con metales, plantas y autores en la que se muestran los diferentes trabajos realizados para fitorremediar la contaminación procedente de diferentes metales pesados y que tipo de plantas se han utilizado. Destaca como son el caso del cadmio (Cd), zinc (Zn) y plomo (Pb) los metales pesados en los que se han realizado la mayor parte de los trabajos. En el ámbito de las especies fitorremediasoras, las brassicas, en especial la *Brassica juncea* ha sido la especie más utilizada para el tratamiento de terrenos contaminados.

El Análisis del ciclo de vida (ACV) aplicado a la fitorremediación tienen por objetivo apoyar el desarrollo sostenible, sin embargo, estas actividades tienen sus propios impactos económicos, sociales y ambientales. La evaluación del ciclo de vida (LCA-ACV) está ganando una amplia aceptación para apoyar toma de decisiones ambientales. LCA permite el inventario y cuantificación de las intervenciones ambientales y los impactos relacionados con el ciclo de vida de un producto, proceso o actividad. El desarrollo de métodos de cuantificación del impacto del ACV puede ayudar en elegir la mejor tecnología disponible para reducir el impacto ambiental la carga del servicio de reparación o para mejorar el desempeño medioambiental de una determinada tecnología. Se han desarrollado numerosos trabajos caracterizados por aplicar esta técnica en recuperación de terrenos contaminados (Godin et al., 2004; Ribbenhed et al., 2002; Toffoletto, et al., 2005; Cadotte et al., 2007). A pesar de ello esta herramienta sigue siendo bastante nueva y la metodología está todavía en desarrollo y por lo tanto el ACV, aunque científicamente válidos, todavía tiene que depender de varios supuestos técnicos.

Los componentes estructurales y de procedimiento del ACV se determinan por la serie de normas internacionales (ISO/TS 14048:2002; ISO/TR 14047:2003; ISO 14040-43:2006). La elaboración del ACV cuenta de las siguientes etapas: 1º La definición de objetivos y alcance, 2º elección de la unidad funcional y los límites del sistema, 3º análisis de inventario, 4º evaluación del impacto y 5º interpretación. El análisis de ciclo de vida de inventario (LCI) examina y recoge todas las intervenciones ambientales pertinentes, es decir, la transformación del suelo y la ocupación y la energía y materiales entradas y salidas, de los procesos durante el ciclo de vida de un bien o servicio, en lo sucesivo denominado producto. La evaluación del impacto del ciclo de vida (LCIA) se lleva a cabo para convertir las emisiones conseguidas y consumos en los efectos ambientales y/o la salud y es comúnmente expresado por la categoría de impacto a través de indicadores. Por último, dentro de la fase de interpretación, los resultados de análisis de inventario y evaluación de impacto tratan de extraer los puntos calientes del medio ambiente y derivar recomendaciones (Godin et al., 2004).

Dada la complejidad del proceso en muchos casos se debe llevar a cabo asunciones metodológicas también conocidas como "supuestos" y pueden presentar un gran impacto en los resultados del trabajo (Bare, 2006).

## 2. Objetivo

Desarrollo de los requerimientos técnicos y el esquema de funcionamiento de un Sistema de Apoyo a la Decisión (SAD) desarrollado siguiendo la metodología ACV para su implantación a nivel mundial destinado a la recuperación de suelos industriales degradados por actividades de tipo siderúrgico.

## 3. Metodología

El primer paso de un ACV es establecer claramente el objetivo del estudio. Una vez que el objetivo se define, el alcance y los límites para la estudio se pueden extraer de una manera consistente, lo que implica, en análisis comparativos, la identificación y reconocimiento de todas las condiciones de contorno en las que se está desarrollando el proceso. Normalmente no existen directrices detalladas para definir el objetivo del ACV, por lo que debe ser el equipo responsable el que lo lleve a cabo (Curran, 2008). En lo que hace referencia al alcance este se va a ver muy condicionado por la existencia de información relevante para el análisis, de esta forma el alcance va a quedar establecido en un equilibrio entre el necesario rigor científico del trabajo y la existencia de información y el coste y/o posibilidad de obtención de la misma.

La literatura de revisión actual de los tipos de ACV (Rebitzer, et al. 2004, Godin et al., 2004, Blanc, et al., 2004, Toffoletto, et al., 2005; Bayer and Finkel, 2006; Harbottle, 2007; Cadotte, 2007; Payet, 2008) muestra la existencia de dos tipos de ACV. Una primera categoría que estaría formada por aquellos trabajos que van encaminados a mostrar un trabajo o un ciclo de vida “emergente” y un segundo tipo que estaría formado por aquellos trabajos que muestran cambios en los ciclos de vida de procesos que ya se están llevando a cabo.

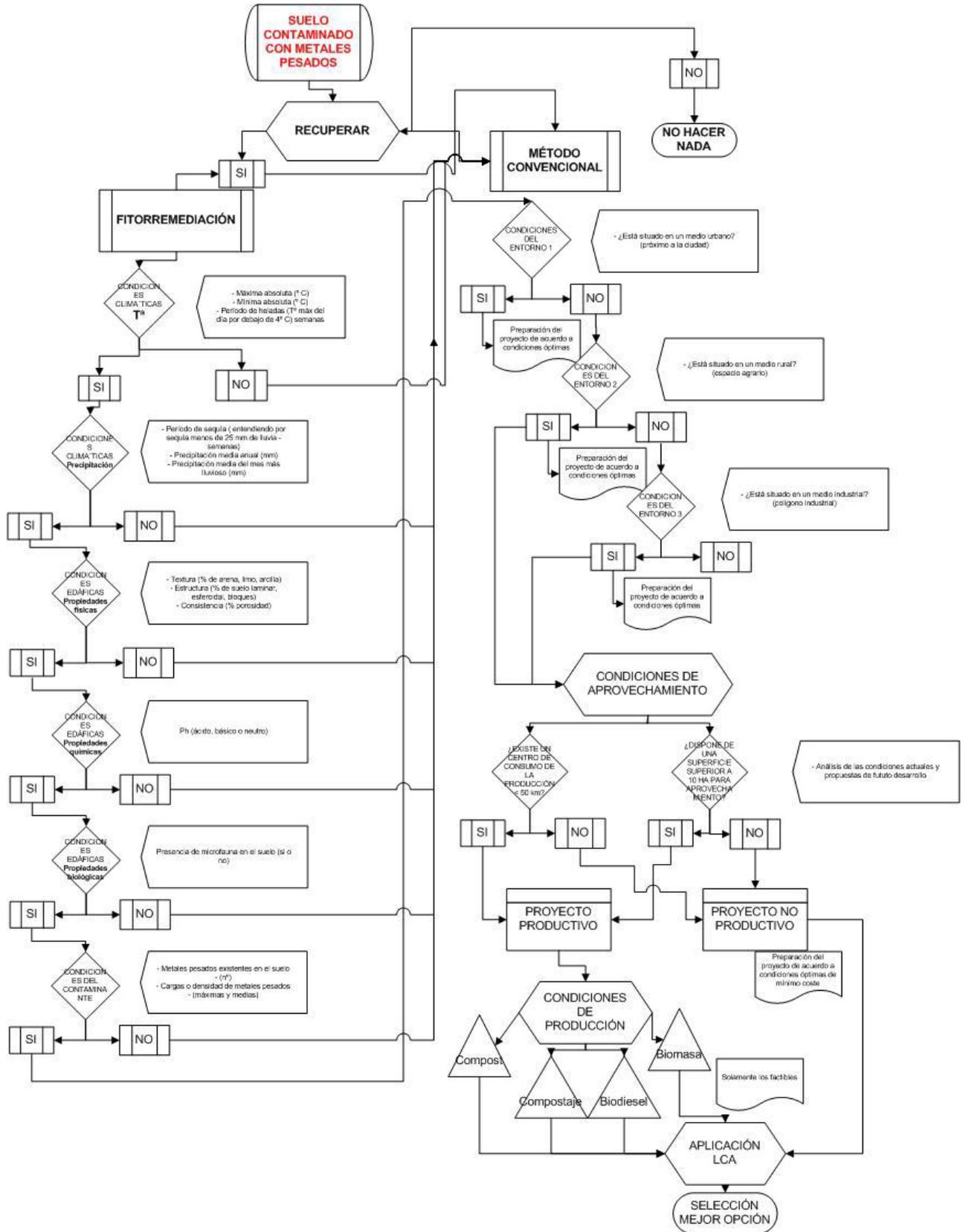
Un segundo aspecto interesante a la hora de llevar a cabo la definición de los objetivos es la consideración exclusivamente de los impactos “primarios” entendiendo por estos aquellos que se producen exclusivamente en la zona de estudio, o si por el contrario se consideran el conjunto de impactos “secundarios” es decir aquellos que se producen en otros ámbitos territoriales como consecuencia del impacto primario. Recientemente se ha incorporado como elemento a tener en cuenta los impactos “terciarios”, formados por aquellos consecuencia de la recuperación final de la zona.

Como tercer aspecto a considerar en la definición de los objetivos lo constituye el especial significado que debe tener la existencia de relación de exclusión de las opciones entre si. Por ejemplo, la meta de limpieza del suelo contaminado desplazan a otras opciones de gestión del territorio como el aprovechamiento agrícola o ganadero. Es decir, la contaminación residual puede llevar a la suspensión de la actividad por tiempo indefinido del sitio con la exposición minimizada o puede permitir el desarrollo agrario del lugar. En este caso, el ACV debe proporcionar información sobre las consecuencias ambientales, es decir, superiores impactos, del sistema de servicios de remediación. Los procesos donde las consecuencias más importantes se producen, por tanto, incluidos en los límites del sistema del ACV. Como aporta Lassage et al., (2007a y b) la superposición de objetivos obliga a su integración para lo cual es necesario el desarrollo de sistemas de apoyo a la decisión que tengan en cuenta las opiniones de los diferentes actores y la simulación de los impactos ocasionados teniendo en cuenta diferentes objetivos y perspectivas.

## 4. Resultados

En la **figura 2** se muestra el esquema completo del proceso de elaboración del SAD.

Figura 2. Fluxograma de desarrollo del SAD



La **1ª etapa** en la toma de decisiones será la valoración de utilizar diferentes técnicas para remediar los suelos que irán desde la no realización de la recuperación, el desarrollo de un método convencional basado en la extracción del suelo contaminado y su recuperación por diferentes técnicas pero ex situ del lugar contaminado y por último la tercera opción que es la que se desarrolla fundamentada en la utilización de las plantas fitorremediadoras siguiendo la metodología LCA.

En la **2ª etapa** se analizan las posibilidades que ofrece el área a remediar para la implantación del material vegetal, Esta valoración se basa en la determinación de la existencia de especies adecuadas para su implantación en el entorno de aplicación, teniendo en cuenta su tolerancia al clima, en lo que hace mención a las restricciones para su existencia y que vienen marcados por la temperatura y dentro de esta por los valores máximo y mínimo absoluto y por el período de heladas para cada año. Del mismo modo que para la temperatura se analiza la precipitación de la zona, en este caso las variables a tener en cuenta son, el período de sequía, siendo esta las semanas en las que se producen menos de 25 mm de lluvia de forma ininterrumpida, la precipitación media anual y la precipitación media del mes más lluvioso. En el supuesto de que el estudio climatológico de cómo resultado que la zona no reúne las condiciones mínimas de temperatura y precipitación que permitan una viabilidad mínima para las especies clásicas utilizadas en la fitorremediación esta será descartada y se comenzará de nuevo el proceso.

La **3ª etapa** hace referencia a la capacidad del suelo para albergar el estrato vegetal encargado de retener los metales contaminantes. En este caso los parámetros a analizar serán la textura del suelo, la estructura y la consistencia. Por último dentro de esta etapa se analiza el pH del suelo lo que permite conocer su viabilidad. A partir de la relación de estos parámetros y teniendo en cuenta que la climatología permite mantener la capa vegetal, de igual forma que en todo el proceso, el no cumplimiento de las condiciones hace que el flujo de decisiones se detenga y se retorne a las etapas iniciales.

En la **4ª etapa** se consideran las condiciones biológicas del suelo potencialmente receptor de las plantas fitorremediadoras. La presencia de microfauna en el suelo en cantidades adecuadas actúa como un bioindicador muy interesante para determinar la capacidad de acogida de este suelo para especies vegetales y el grado de frugalidad que deben presentar éstas. En esta cuarta etapa se dará por finalizado el proceso de análisis del medio físico para conocer la capacidad o no de utilizar vegetación para su depuración y a su vez conocer las características que debe presentar esta (herbácea, arbustiva o arbórea). Indicar que independientemente de las características que presente el medio también se realizará una revisión del marco legislativo con el objetivo de conocer la presencia o no de alguna especie, potencialmente fitorremediadora, pero que legalmente no se pudiera utilizar.

La **5ª etapa** está centrada en las condiciones que presenta el elemento contaminante, como cabe esperar la densidad y característica que presente en el suelo el contaminante tiene una gran importancia para el proceso de corrección. De esta forma los parámetros a evaluar son los tipos de metales pesados y la cantidad de cada uno de ellos y del conjunto. Como se ha indicado en la introducción existen grandes diferencias en el proceso de depuración de suelos contaminados al igual que en los rendimientos que presenta la utilización de material vegetal para la fitorremediación dependiendo del tipo de contaminante y carga del mismo.

La **6ª etapa** del proceso entra dentro de un conjunto de subdecisiones que están relacionadas con las características socioeconómicas del entorno próximo al centro a

descontaminar. Algunas de las subetapas obligarán al decisor no sólo a basarse en datos estadísticos publicados o obtenidos en otras fases del proyecto de implantación y recuperación del suelo u otros proyectos realizados en la zona. La primera de las decisiones hace referencia a las condiciones de localización actual de la instalación. Señalar que muchas de las actuales y futuras instalaciones a recuperar se encuentran en entornos próximos a ámbitos urbanos, bien porque en el momento de su instalación ya fuese así y porque el crecimiento de núcleos residenciales próximos a estas zonas industriales hiciesen que estas se encuentren en el entorno de núcleos habitados. El decisor tendrá que indicar si la zona a restaurar se encuentra en un ámbito urbano o no. Para tomar la decisión se puede apoyar, en caso de necesitarlo, de la clasificación actual desde el punto de vista urbanístico que presente el suelo. La siguiente secuencia de decisiones hacen mención a si nos encontramos en un suelo rural o industrial del mismo modo que se hacía la pregunta para el suelo urbano. Este análisis social posterior a la viabilidad técnica y legal de las especies estudiadas, debe considerarse que la clasificación del suelo según el ordenamiento territorial con el fin de perfilar si existen especies más “urbanitas” que otras e incluso la aceptación social de las mismas dependiendo de la cercanía de los núcleos de población.

La **7ª etapa** del proceso hace mención a la viabilidad técnica del aprovechamiento, lo cual depende de la distancia a que se encuentre el lugar de recuperación y consecuentemente de producción de materia vegetal y los potenciales lugares de transformación del material para su aprovechamiento comercial. También en esta etapa se evalúa la superficie mínima necesaria que viabilice económicamente el proyecto de recuperación desde el punto de la rentabilidad del aprovechamiento. En esta etapa se consideran los diferentes destinos del material producido, de acuerdo a la existencia o no de centros de transformación y como esto hace que el proyecto sea considerado como productivo o no productivo.

Por último la **8ª etapa** se refiere al ACV de la fitorremediación con el fin de valorar si finalmente, la consecución de la misma se desarrolla dentro de un escenario sostenible y poder valorar en el caso de contemplar diversas alternativas, cuál de ellas es la más beneficiosa desde el punto de vista de la sostenibilidad.

Indicar que una vez comentado el esquema del proceso el sistema deberá ir acompañado por un esfuerzo exhaustivo de recopilación de información sobre los caracteres culturales de las especies, las referencias bibliográficas existentes de aplicación de las mismas para fitorremediar determinados suelos, el posible aprovechamiento a realizar, etc. Esta información se podrá estructurar como una base de datos modificable que recopile los datos de interés de las especies para su aplicación a las técnicas de remediación. Aunque excede de las posibilidades de este proyecto, una primera aproximación a este sistema de valoración y diagnóstico ha comenzado a ser realizado con el fin de valorar su viabilidad desde el punto de vista de aplicación a una solución global para cualquier instalación siderúrgica independientemente de su localización. En la **figura 3**, se muestra un ejemplo de la información que se puede recopilar en el caso del clima para filtrar las especies según si sus requerimientos son adecuados a las características del medio de implantación

**Figura 3. Ejemplo de características climáticas para las diferentes especies**

Especie	Clima					
	Temperaturas (°C)			Precipitaciones (mm)		
	Máxima absoluta	Mínima absoluta	Resistencia heladas	Precipitación media anual	Precipitación media verano	Resistencia sequía
<i>Especie 1</i>	25	10	No	1000	200	No
<i>Especie 2</i>	40	10	No	200	50	Sí
<i>Especie 3</i>	20	0	Sí	800	100	No
-	-	-	-	-	-	-

## 5. Conclusiones

La necesidad de descontaminar suelos con metales pesados procedentes de actividades industriales es cada vez mayor. Las alternativas para la realización de este tipo de actividades son múltiples pero generalmente su eficiencia viene determinada por el incremento de costes asociados al proceso tradicional de extracción, limpieza ex situ y devolución o sustitución por otro tipo de material.

Las técnicas de fitorremediación han demostrado su eficiencia como alternativa al proceso tradicional de descontaminación en numerosas ocasiones lo que la convierte en una alternativa interesante. El análisis de ciclo de vida (ACV) aporta una garantía a los decisores de que las soluciones adoptadas desde el punto de vista de la ingeniería a un problema son compatibles y adecuados para el medio ambiente y el desarrollo sostenible. De esta forma la combinación de la fitorremediación y el ACV puede ser una de las principales alternativas al problema planteado. Sin embargo para llevarlo a cabo es necesario disponer de criterios y técnicas que nos permitan implementarlo de forma sistemática y organizada en diferentes ámbitos y situaciones.

En el presente trabajo se muestra una aportación instrumentada a través de un sistema de apoyo a la decisión (SAD) que permitirá a sus utilizadores independientemente del lugar donde se encuentren estudiar la viabilidad de llevar a cabo la fitorremediación de suelos industriales contaminadas de acuerdo a criterios de ACV. La importancia de esta aportación incipiente radica en ser independiente de ámbitos espaciales y temporales dado que de forma versátil se puede aplicar sistemáticamente en diferentes lugares y momentos.

El futuro desarrollo de esta iniciativa pasará por la elaboración de bases de datos completas para los requerimientos de las diferentes especies vegetales potencialmente aplicables así como por la programación y desarrollo matemático/informático de una aplicación web que permita su utilización desde cualquier parte del mundo y en cualquier momento.

## 6 Referencias

- Azadpour, A. and Matthews, J.E. (1996). Remediation of Metal-Contaminated Sites Using Plants. *Remediation* v 6:3 p 1(18).
- Bare, J.C. (2006). "Risk Assessment and Life Cycle Impact Assessment (LCIA) for Human Health Cancerous and Noncancerous Emissions: Integrated and Complementary With Consistency Within the U.S. EPA." *Human and Ecological Risk Assessment*, 12, 3.

Bardos, A. Lewis, S. Nortcliff, C. Matiotti, F. Marot, T. Sullivan. (2002). Review of decision support tools for contaminated land and their use in Europe, in: Austrian Federal Environment Agency on behalf of the Concerted Action 'Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies' (CLARINET), Vienna, Austria.

Bayer, P. Finkel M. (2006). Life cycle assessment of active and passive groundwater remediation technologies, *J. Contam. Hydrol.* 83 171–199.

Blanc, A. Métivier-Pignon, H. Gourdon, R. Rousseaux, P. (2004). Life cycle assessment as a tool for controlling the development of technical activities: application to the remediation of a site contaminated by sulfur, *Adv. Environ. Res.* 8, 613–627.

Bentjen, S. <http://members.tripod.com/bioremediation> . 30/01/2000.

Bradshaw A.D. (1997). Restoration of Mined Lands using Natural Process. *Ecological Engineering.* 8: 255-269.

Cadotte M , Deschenes L , Samson R. (2007). Selection of a remediation scenario for a diesel-contaminated site using LCA . *Int J LCA* 12 : 239 – 251

Curran M.A. (2007). Studying the effect on system preference by varying coproduct allocation in creating life-cycle inventory, *Environ. Sci. Technol.* 41. 7145–7151.

Environment Agency. (2001). Guidance on the Application of Waste Management Licensing to Remediation.

Environmental Protection Agency. (1999). Phytoremediation Resource Guide. EPA 542-B-99-003. Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation. Office. Washington, DC.

Environmental Protection Agency. (2000). Introduction to Phytoremediation. EPA/600/R-99/107. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio 45268

Environmental Protection Agency. (2002). National Recommended Water Quality Criteria. EPA-822-R-02-047. Office of Water/Office of Science and Technology (4304T).

Environmental Protection Agency. (2000b). Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA/625/R-99/010. Office of Research and Development Cincinnati, Ohio 45268.

Glass, D.J. (1998). The 1998 United States Market for Phytoremediation. Glass Associates, Inc., Needham, MA 140 pp April 1998.

Godin, J. Menard J.F., Hains S., Deschenes L., and Samson R. (2004). Combined Use of Life Cycle Assessment and Groundwater Transport Modeling to Support Contaminated Site Management. *Human and Ecological Risk Assessment*, Vol.10, 1099-1116.

Harbottle, M.J., Al-Tabbaa, A., Evans, C.W. (2007). A comparison of the technical sustainability of in situ stabilisation/solidification with disposal to landfill, *J. Hazard. Mater.* 141: 430–440.

Interstate Technology and Regulatory Cooperation. (1998). Emerging Technologies for the Remediation of Metals in Soils: Phytoremediation. Available at <http://www.sso.org/ecos/itrc>.

ISO. (2006). Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework. ISO 14040:2006.

[ISO.\(2003\)](#). ISO/TR 14047 Environmental management -- Life cycle impact assessment -- Examples of application of ISO 14042

ISO. (2002). [ISO/TS 14048:2002](#) Environmental management -- Life cycle assessment -- Data documentation format.

McIntyre, T. and Lewis, G.M. (1997). The Advancement of Phytoremediation as an Innovative Environmental Technology for Stabilization, Remediation, or Restoration of Contaminated Sites in Canada: A Discussion Paper. Journal of Soil Contamination v 6:3 p 227

Payet, J., Gambazzi, F. (2008). Assessing LCA and ERA for sustainable site management in a single framework, Project Musa, SETEMIP-Environment, October.

Rebitzer, L. Ekvall, Frischknecht, R. Hunkeler, D. Norris, G. Rydberg, T., Schmidt, W.P, Suh, S. , Weidema, B.P., Pennington, W.D.( 2004). Life cycle assessment. Part 1. Framework, goal and scope definition. inventory analysis, and applications, Environ. Int. 30 701–720

Ribbenhed M , Wolf-Watz C , Almemark M , Palm A , Sternbeck J. (2002). Livscykelanalys av marksaneringstekniker för förorenad jord och sediment . Stockholm , IVL Svenska Miljöinstitutet AB , p 108

Toffoletto L , Deschenes L , Samson R. (2005). LCA of ex-situ bioremediation of diesel-contaminated soil . Int J LCA 10 : 406 – 416

**Correspondencia** (Para más información contacte con): Manuel Fco. Marey Pérez

Secretaría VIX Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos.

Phone: +0034 982823248

Fax: + 0034 982 285926

E-mail : [manuel.marey@usc.es](mailto:manuel.marey@usc.es)

URL : <http://www.usc.es>