

## ***PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS***

### ***METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR CONTAMINATED SOIL RECOVERY***

*José Antonio Fabelo Falcón<sup>1\*</sup>*

---

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Septiembre 12, 2016; Revisado: Septiembre 26, 2016; Aceptado: Octubre 7, 2016

---

#### **RESUMEN**

La contaminación de suelos, por diferentes sustancias y/o productos es cada vez más extensa en todo el mundo, su determinación, minimización y tratamiento para alcanzar la recuperación de los mismos, constituye una necesidad, aunque, no se le otorga el nivel de importancia requerido por los países afectados. El objetivo del trabajo consiste en proponer una metodología para la recuperación de los suelos con un alto grado de eficiencia y eficacia en la selección de los procedimientos, independientemente de los tipos de contaminantes y del uso del suelo una vez recuperado. La propuesta metodológica implica las etapas de diagnóstico, caracterización, selección de la tecnología y su validación técnico económico a nivel de laboratorio y planta piloto. Posteriormente se diseña la tecnología del tratamiento, con ello se realiza un estudio objetivo de cada caso particular y un análisis de factibilidad técnico económico imprescindible para las diferentes escalas del desarrollo del proceso tecnológico.

**Palabras clave:** recuperación de suelos, tratamientos de residuos.

---

Copyright © 2017. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

---

\* Autor para la correspondencia: José A. Fabelo, Email: [fabelo@uclv.edu.cu](mailto:fabelo@uclv.edu.cu)

## **ABSTRACT**

The contamination of soils, by different substances and / or products is becoming more extensive throughout the world, its determination, minimization and treatment to reach the recovery of them is a necessity, even though it is not granted the level of importance required by the countries concerned. The objective of this work is to propose a methodology for the recovery of soils with a high degree of efficiency and effectiveness in the selection of procedures, regardless of the types of pollutants and land use once recovered. The methodological proposal involves the stages of diagnosis, characterization, selection of the technology and its technical and economic validation at the laboratory and pilot plant level. Subsequently, the technology of the treatment is designed, along with the elaboration of an objective study of each particular case and an essential economic and technical feasibility analysis for the different scales of the development of the technological process.

**Key words:** soil remediation, waste treatment.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El desarrollo social del hombre ha generado, en igual magnitud, la contaminación del aire, agua y suelo. Las tecnologías desarrolladas no han tenido presente, en su gran mayoría, minimizar las cargas contaminantes a estos sistemas, por lo que, el incremento de la contaminación está relacionado en forma exponencial con el progreso social.

Los procesos tecnológicos para el tratamiento de aguas residuales presentan un mayor desarrollo en comparación con tratamientos del aire y suelos, aunque se reconoce, que no con el grado de eficiencia y eficacia necesaria. Por otra parte, la tendencia mundial está dirigida a reducir la contaminación en el origen, aplicando los conceptos de producciones más limpias.

La contaminación de suelos por vertimiento de aguas residuales, mal uso de fertilizantes, desechos de hidrocarburos, metales pesados y complejos químicos, entre otros, hacen que la metodología a seguir para lograr su recuperación no han sido desarrolladas a plenitud, provocando con ello, que la efectividad de las tecnologías aplicadas, en muchas ocasiones es insuficiente.

Es conocido que la contaminación de suelos es provocada por una variedad grande de sustancias o residuos que hacen su recuperación, un proceso muy complejo, el cual parte de establecer de forma precisa el tipo de contaminante y su concentración, con esta información, permitirá posteriormente, seleccionar la posible tecnología para su recuperación.

En dependencia de las características físicas químicas de los contaminantes así serán sus posibilidades de ser extraídos, recuperados o eliminados por una tecnología específica o la combinación de varias tecnologías.

Hay que señalar que es común encontrarse las sustancias contaminantes en los suelos en forma de moléculas estables lo cual provoca, que las tecnologías para su recuperación o eliminación de las áreas contaminadas se conviertan en una pesadilla para los encargados de desarrollar las tecnologías que logren este objetivo.

Diferentes autores (Batista y Sánchez, 2009); (Noguera-Solís, y Huete-Pérez, 2008); (Volke y Velasco, 2002), han reportados los procesos utilizados para la descontaminación de suelos, entre ellas están:

- Procesos Químicos – Físicos.
- Procesos que utilizan la acción de MO.

Los procesos Químicos – Físicos, están concentrados en etapas electroquímicas seguidas de sedimentación y/o separaciones, por ejemplo la centrifugación, la radiación, (Volke y Velasco, 2002).

Estas tecnologías dependen, fundamentalmente, de la forma en que se encuentre presente las sustancias contaminantes, es decir, de los parámetros químicos físicos que los identifican, de aquí la importancia, de realizar una buena caracterización inicial de los suelos contaminados.

Los procesos que utilizan la acción de los microorganismos, conocidos como biorremediación, son reportados ampliamente en la literatura especializada, (Mendoza y col., 2011), (Noguera-Solís, y Huete-Pérez, 2008). De igual forma, depende su utilización de la forma en que se presenten los contaminantes y de la existencia de un organismo vivo que sea capaz de transformarlo.

Como concepto, la biorremediación es el uso de seres vivos para restaurar ambientes contaminados. Para llevar a cabo este proceso son usados los MO, tales como: bacterias, algas, hongos, también pueden ser utilizadas plantas; (fitorremediación), o nemátodos; (vermiremediación).

Entre todos los microorganismos destacan especialmente las bacterias, los seres vivos con mayor capacidad metabólica del planeta, pueden degradar prácticamente cualquier sustancia orgánica. Además, su accionar puede ser en presencia de oxígeno; aeróbicas, o en su ausencia total; anaeróbicas, en este caso, elimina nitratos, sulfatos, hierro, manganeso, selenio, entre otras.

Además, muchas bacterias son capaces de modificar sustancias químicas peligrosas, transformándolas en otras menos tóxicas. Así, algunas bacterias pueden reducir la biodisponibilidad (hacerla menos accesible y por tanto menos tóxica) de metales pesados tales como el mercurio, el arsénico, el cromo, el cadmio, el zinc o el cobre.

Según (Noguera-Solís, y Huete-Pérez, 2008), existen tres tipos de biorremediación, los cuales se señalan a continuación:

- Degradación enzimática: consiste en agregar enzimas al sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas. Estas enzimas se obtienen de microorganismos especialmente diseñados para así obtener una alta especificidad. Las enzimas no son consumidas por las reacciones que ellas catalizan, por lo que a medida que ellas consumen los sustratos contaminantes pueden seguir actuando.
- Degradación microbiana: consiste en la utilización de microorganismos (Ej: hongos) en el lugar contaminado, los cuales son implantados en el foco contaminante para descomponer sustancias tóxicas a través del uso de micelios fúngicos que producen enzimas capaces de degradar los componentes contaminantes
- Fitorremediación: consiste en el uso de seres vegetales para la descontaminación, haciendo uso de los sistemas radicales de plantas y árboles

para la extracción de metales pesados y otros contaminantes de suelo, agua y aire.

Dentro de las técnicas de biorremediación están:

- Bioventeo.
- Atenuación natural.
- Bioestimulación.
- Biopilas.

Las técnicas biológicas utilizadas pueden ser aplicadas en el lugar donde se encuentra el suelo contaminado; (in-situ), o el suelo se traslada a una instalación para su tratamiento; (ex-situ), dependiendo del tipo de contaminante y factibilidad económica. Las primeras se están convirtiendo en las más notorias, ya que, tratan de acelerar los procesos degradadores naturales mediante el suministro de oxígeno y nutrientes a la zona contaminada durante un largo periodo. El problema más complicado suele ser la falta de oxígeno especialmente en las capas más profundas de suelos contaminados por hidrocarburos.

Aunque existen una gran variedad de reportes bibliográficos de cómo enfrentar estas situaciones, (Cortón y Viales, 2006), resume que, en todas se parten de una caracterización del sitio o sistema, diseño y aplicación de un sistema de tratamiento. Además, puntualiza que, todos carecen de una retroalimentación de la eficacia del proceso seleccionado, lo cual provoca, que los objetivos de eliminación de los contaminantes no se logren con una efectividad adecuada, redundando en pérdidas económicas y de tiempo, además de mantener la contaminación en el lugar y por ende la no utilización de los terrenos en otros fines.

Por tal razón, el trabajo pretende proponer una metodología que permita establecer el camino lógico para darle solución a los suelos contaminados por diferentes productos o sustancias.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

La necesidad de descontaminar un suelo se debe ejecutar siguiendo una metodología que permita la selección y ejecución del tratamiento de forma más eficiente, eficaz y económicamente factible. Según Viñas (2005), se reduce a dos pasos fundamentales:

- En primer lugar se debe realizar una investigación exhaustiva del emplazamiento en relación con los contaminantes y en relación con el tipo de suelo.
- En segundo lugar, se deben realizar ensayos de tratabilidad a nivel de laboratorio. Para llevar a cabo un tratamiento de biorremediación eficaz, se deben cumplir ciertos requisitos e identificar con anterioridad los factores específicos que condicionan el proceso, para así conocer las características microbianas, edafológicas y fisicoquímicas del terreno.

Por otra parte, (Batista y Sánchez, 2009), plantean las siguientes etapas para el diseño del sistema de tratamiento:

- Investigación y caracterización de la contaminación y del emplazamiento.
- Análisis y elección de las medidas biocorrectivas.
- Evaluación de la efectividad del sistema elegido.
- Diseño y evaluación del sistema.
- Evaluación del control y seguimiento.

- Análisis e interpretación de resultados.

Esta secuencia de pasos ha sido utilizada por diferentes autores (Volke y Velasco, 2002), en el estudio de suelos contaminados en México. De igual forma, en el estudio (Cortón y Viales, 2006); (Mendoza y col., 2011); Viñas (2005), se aplica la secuencia recomendada para estos sistemas.

Siguiendo estos criterios, se realizó los siguientes pasos para llegar a la propuesta de metodología:

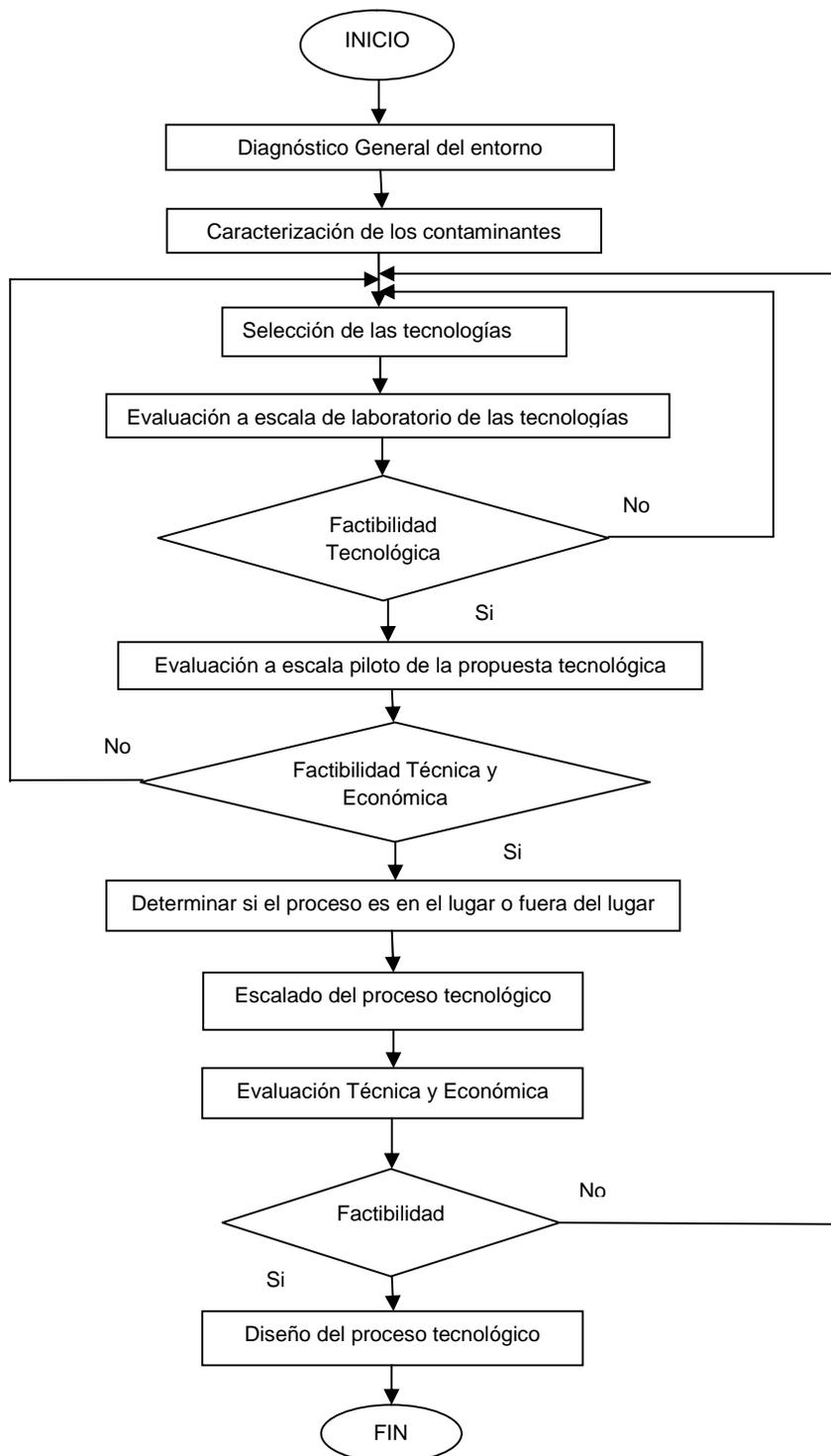
1. Etapa inicial de revisión de la literatura científica sobre la temática de descontaminación de los suelos.
2. Revisión crítica de los diferentes procedimientos para la descontaminación de los suelos.
3. Análisis minucioso de la concepción metodológica de los algoritmos heurísticos aplicados en los estudios de procesos químicos.
4. Concepción de una metodología para la descontaminación de los suelos que integre los procedimientos reportados en la literatura científica sobre descontaminación de los suelos mediante la lógica de los algoritmos heurísticos.
5. Elaboración y revisión crítica de la metodología.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Con los elementos antes analizados se desarrolló una propuesta de metodología, que independientemente de los contaminantes y del uso del suelo una vez recuperado, permita un alto grado de eficiencia, eficacia y economía en la selección de los tratamientos que se utilicen en la remediación de suelos.

A partir del análisis anterior, se propone el siguiente diagrama heurístico, figura 1, donde se precisa una secuencia lógica para la selección y diseño de tecnologías en la recuperación de suelos contaminados.

De forma general, abarca las etapas propuestas en trabajos anteriores, pero incluye, sistemas de retroalimentación, combinación de tratamientos, y valoración económica, permitiendo un análisis más integral en el proceso de selección por parte de los especialistas.



**Figura 1.** Diagrama Heurístico para selección y diseño de tecnologías de recuperación de suelos contaminados

El Diagrama Heurístico de la propuesta de metodología para la selección o diseño de una tecnología de recuperación de suelos contaminados, describe de forma lógica el procedimiento a seguir para lograr el objetivo de rescate de suelos corrompidos. El primer paso a realizar es el Diagnóstico General del Entorno donde se encuentra el suelo contaminado. Esta etapa es de vital importancia, se analizan los aspectos geográficos, hidrológicos, características del suelo, flora, fauna, condiciones

atmosféricas, relación con regiones de frontera, aspectos sociales, entre otros aspectos, citados por los autores de referencia de este trabajo.

Un diagnóstico adecuado permitirá seleccionar el tratamiento más adecuado y sobre todo, la determinación de realizarlo en el lugar o fuera del lugar, con sus respectivas implicaciones. Lo contrario puede generar una contaminación mayor, además, de gastos de recursos humanos y financieros.

La segunda etapa, Caracterización de los contaminantes, requiere de una determinación detallada de las propiedades químicas – físicas y micro biológicas de las sustancias, lo cual se realiza con el conocimiento de cuáles son los principales compuestos que participan en la contaminación, además, la identificación de organismos que están presentes en el suelo objeto de estudio.

La determinación de las propiedades de los contaminantes, permite proponer una tecnología, el grado de estabilidad de las sustancias, su posible transformación micro biológica, el uso de tratamientos químicos - físicos ó térmicos, entre otros.

Por otra parte, la existencia de una flora microbiana en el suelo en estudio, que sea capaz de transformar los contaminantes, a partir del diseño de una tecnología fermentativa controlada, permite la selección de procesos microbiológicos para el tratamiento. Esta etapa es vital en el estudio de recuperación de suelos, constituye la etapa fundamental de la metodología propuesta.

Una vez caracterizado el suelo a tratar, se pasa a seleccionar y evaluar las propuestas de tecnologías a desarrollar a escala de laboratorio, siempre es recomendable valorar un proceso independiente de otro, al concluir el estudio, realizar el análisis de secuencias de tratamientos, conocido como tren de tratamientos.

En este punto de la metodología, con el conocimiento de las tecnologías más adecuadas, es necesario pasar a un nivel superior de investigación, escala piloto, donde se verifican los resultados de laboratorio, se define la tecnología a aplicar para la recuperación del suelo y se valora económicamente la factibilidad de su aplicación.

La eliminación de esta etapa provoca errores en el diseño del proceso que conducen a situaciones más comprometidas desde el punto de vista ambiental, económico y social. Los procesos de tratamiento, sobre todo, el micro biológico, requieren necesariamente de una etapa de escalado controlada, la etapa de estudios a nivel piloto es indispensable para obtener resultados adecuados.

La información alcanzada en las etapas anteriores permite definir si la tecnología propuesta puede realizarse en el lugar o fuera del lugar, aspecto importante ya que la decisión implica la entrada de otros factores externos a tener presente en la valoración económica del sistema de tratamiento propuesto, sobre todo en el caso de realizarse fuera del lugar.

Posteriormente se plantea, el escalado de la tecnología, evaluación técnica y económica y análisis de factibilidad, de ser viable, se procede al diseño tecnológico y su puesta en funcionamiento, como recomiendan los autores citados en el trabajo.

#### **4. CONCLUSIONES.**

1. La metodología propuesta, recoge todas las etapas necesarias para lograr una selección o diseño adecuado, en función de las condiciones particulares del suelo y las características de los contaminantes que contiene.

2. La etapa de caracterización de los contaminantes, requiere de una determinación detallada de las propiedades químicas – físicas de las sustancias que participan en la contaminación.
3. La metodología propuesta establece un análisis de factibilidad técnico económico imprescindible como etapa del proceso, para las diferentes escalas del desarrollo del tecnológico.

## **REFERENCIAS**

- Batista, R.A., y Sánchez, A., Fitorremediación de metales pesados y microorganismos., Medio Ambiente y Desarrollo, Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente, Año 9, No.16, 2009, pp. 1-6.
- Cortón, E., Viales, A., Solucionando grandes problemas ambientales con la ayuda de pequeños amigos: las técnicas de biorremediación., Ecosistemas, No. 3, 2006, pp. 5-10. Disponible URL en: [http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=446&Id\\_Categoria=4&tipo=portada](http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=446&Id_Categoria=4&tipo=portada).
- Mendoza, J.C. Perea, Y.S., Salvador, J.A., Morales, J.A. y Pérez, G., Biodegradación bacteriana de plaguicidas permetrina y cipermetrina en cultivo lote., ACI, Vol. 2, No. 3, 2011, pp. 45-55.
- Noguera-Solís, C. E. y Huete-Pérez, J. A., Potencial de biodegradación de DDT y sus metabolitos en suelos agrícolas de Chinandega., Encuentro, Año XL, No. 81, 2008 pp. 48-69.
- Viñas, M., Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Biología, Universidad de Barcelona, España, 2005.
- Volke, T., y Velasco, J.A., Tecnologías de remediación para suelos contaminados., México: Instituto Nacional de Ecología. INE-SEMARNAT, México DF., 2002, pp. 31-64.