

**VIGILANCIA TECNOLÓGICA DE LOS PROCESOS BIORREMEDIACION EX-  
SITU CON REACTORES DE LODOS ACTIVADOS, PARA SU POSIBLE  
APLICACIÓN EN BARRANCABERMEJA**

**ODACYR BELEÑO MIER**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2015**

**VIGILANCIA TECNOLÓGICA DE LOS PROCESOS BIORREMEDIACION EX-  
SITU CON REACTORES DE LODOS ACTIVADOS, PARA SU POSIBLE  
APLICACIÓN EN BARRANCABERMEJA**

**ODACYR BELEÑO MIER**

**Monografía para optar al título de Especialista en Química Ambiental**

**Director**

**M.Sc MABEL JULIANA QUINTERO SILVA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2015**

## **AGRADECIMIENTOS.**

*A Dios por guardarme la vida y permitirme terminar esta etapa de formación como profesional.*

*A mis Padres y Hermanos, por su amor, apoyo incondicional y ejemplo.*

*A Adriana Pinzón Moreno, mi novia, por su apoyo, compañía y ejemplo de vida.*

*A la Msc Mabel Juliana Quintero por su asesoría y paciencia.*

*Sin ustedes este logro no hubiese sido posible.*

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. MARCO TEORICO .....	20
3.1 REACTORES DE LODOS ACTIVADOS (RLA). .....	20
4. METODOLOGÍA .....	24
4.1 ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO.....	24
4.2 ANÁLISIS DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA .....	25
4.3 VISITA TECNICA.....	25
4.4 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA TECNOLOGIA DE REACTOR DE LODOS ACTIVADOS .....	26
5. RESULTADOS.....	27
5.1 ANÁLISIS BIBLIOMETRICO.....	27
5.1.1 BIORREMEDIACIÓN.....	27
5.1.2 BIORREMEDIACIÓN <i>IN SITU</i> . .....	32
5.1.3 BIORREMEDIACIÓN <i>EX-SITU</i> .....	37
5.1.4 REACTORES DE LODOS ACTIVADOS O BIORREMEDIACIÓN EN FASE SUSPENSIÓN. ....	43
5.2 ANÁLISIS DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA .....	48
5.3 VISITA TÉCNICA.....	53

5.4 PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA TECNOLOGIA DE REACTOR DE LODOS ACTIVADOS.....	57
5.4.1 UBICACIÓN IN-SITU O EX-SITU. ....	57
5.4.2 DISPONIBILIDAD DE OXÍGENO.....	58
5.4.3 TIPO DE AGITACIÓN.....	58
5.4.4 SISTEMA DE OPERACIÓN BATCH, CONTINUO O SEMI CONTINUO .....	58
5.4.5 TEMPERATURA.....	58
5.4.6 PH.....	59
5.4.7 RELACIÓN DE SOLIDOS.....	59
6. CONCLUSIONES .....	60
7. RECOMENDACIONES.....	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	72

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tendencia de investigación de la tecnología RLA. ....	50
Tabla 2. Biorremediación a escala Industrial. Caso 1.....	51
Tabla 3. Eficiencia de RLA en Southeastern Wood Preserving Superfund.....	51
Tabla 4. Biorremediación a escala Industrial. Caso 2.....	52
Tabla 5. Eficiencia de RLA en French Limited Superfund Site. ....	52
Tabla 6. Parámetros de operación de proceso de Biorremediación en Ecopetrol. ....	55
Tabla 7. Parámetros permitidos del protocolo de Louisiana sección 29-B .....	56

## LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Biorremediación. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos Scopus. ....	27
Gráfica 2. Biorremediación. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos Web of science.....	28
Gráfica 3. Biorremediación. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos SciELO.....	29
Gráfica 4. Biorremediación. Autores y número de publicaciones.....	30
Gráfica 5. Biorremediación. Universidades y Artículos publicados.....	30
Gráfica 6. Biorremediación. Revistas y número de publicaciones.....	31
Gráfica 7. Biorremediación: Áreas de investigación.....	32
Gráfica 8. Biorremediación in-situ. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos Scopus.....	33
Gráfica 9. Biorremediación in-situ. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos Web of Science.....	33
Gráfica 10. Biorremediación In-situ. Autores y número de publicaciones.....	34
Gráfica 11. Biorremediación In-Situ. Universidades y Artículos publicados.....	35
Gráfica 12. Biorremediación In-situ. Revistas y número de publicaciones.....	36
Gráfica 13. Biorremediación In-Situ. Áreas de investigación.....	37
Gráfica 14. Biorremediación in in-situ. Número de artículos publicados anualmente.....	38
Gráfica 15. Biorremediación Ex-situ. Publicación anual Web of Science.....	39
Gráfica 16. Biorremediación Ex-situ. Autores y número de publicaciones.....	39
Gráfica 17. Biorremediación Ex-situ. Universidades y número de publicaciones...	41
Gráfica 18. Biorremediación Ex-situ. Revistas y número de publicaciones.....	42
Gráfica 19. Biorremediación Ex-Situ. Áreas de investigación.....	43
Gráfica 20. Reactores de lodos Activados. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos Scopus.....	44

Gráfica 21. Reactores de lodos Activados. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos Web of Science. ....	45
Gráfica 22. Reactores de lodos Activados. Autores y número de publicaciones. ..	45
Gráfica 23. Reactores de lodos Activados Universidades y Artículos publicados..	46
Gráfica 24. Reactores de lodos Activados. Revistas y Artículos publicados.....	47
Gráfica 25. Reactores de lodos Activados. Publicaciones y Áreas de investigación .....	47

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de un reactor de lodos activados.....	23
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de separación de Aceite, Agua y Lodos. ....	55
Figura 3. Proceso Landfarming en la planta AMIR .....	57

## RESUMEN

### TITULO:

**VIGILANCIA TECNOLÓGICA DE LOS PROCESOS BIORREMEDIACION EX-SITU CON REACTORES DE LODOS ACTIVADOS, PARA SU POSIBLE APLICACIÓN EN BARRANCABERMEJA.**

**AUTOR:** Odacyr Beleño Mier.

### PALABRAS CLAVES:

Biorremediación, Biorremediación in-situ, Biorremediación ex-situ, Reactores de lodos activados.

### DESCRIPCIÓN

Debido al impacto ambiental generado por los vertimientos de petróleo, a nivel mundial se han desarrollado múltiples tecnologías con el fin de mitigar el daño generado por la contaminación con hidrocarburos en cuerpos hídricos y suelos. Algunos métodos utilizados para la remoción del crudo en suelos son de carácter físico-químico, sin embargo muchas de estas tecnologías, además de ser costosas, generan efectos colaterales. Adicionalmente, se encuentran los procesos biotecnológicos con microorganismos especializados, que transforman las sustancias problema en sustancias inocuas, que no afectan la bioquímica del suelo y pueden ser fácilmente asimilables por las plantas. Entre estas nuevas estrategias de biorremediación de suelos y fuentes de agua, se encuentran las tecnologías de biorremediación ex-situ, que involucran la remoción del material contaminado y su posterior transporte a un lugar donde se garantizan mejores condiciones para su biodegradación. Entre estas metodologías ex-situ, se encuentra la tecnología de reactores de lodos activados que se proyectan como una solución real, para suelos contaminados con hidrocarburos u otro tipo de sustancia tóxica.

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este trabajo es realizar a través de la revisión bibliográfica una vigilancia tecnológica de los procesos de Biorremediación ex-situ con reactores de lodos activados, a escala industrial, con el propósito de plantear una posible aplicación en el complejo petrolero de la ciudad de Barrancabermeja.

Las conclusiones permiten establecer que para una posible aplicación industrial se debe realizar análisis posteriores con ayuda de plantas piloto, para evaluar su eficacia.

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de ciencias. Escuela Química. Especialización Química Ambiental. Director MsC. QUINTERO Silva Mabel Juliana

## ABSTRACT

**TITLE: MONITORING TECHNOLOGY PROCESS BIORREMDEIACION EX-SITU SLURRY BIOREACTOR FOR POSSIBLE APPLICATION IN BARRANCABERMEJA.**

**AUTHOR: Odacyr Beleño Mier**

**KEYBOARDS:** Bioremediation, Bioremediation in-situ, Bioremediation ex-situ, Slurry Bioreactors.

### DESCRIPTION

Because of the environmental impact caused by oils spills, many technologies there have developed worldwide in order to mitigate the damage generated by oil pollution in bodies of water and soil. Some methods to remove oil of soil have physicochemical nature. In addition this, there are processes that use specialized microorganisms that transform toxic substances into harmless substances that do not affect the soils biochemistry and can be easily assimilated by plants. These new strategies for bioremediation of soils and bodies of water, are part of ex-situ bioremediation technologies that involve the removal of contaminated material and its subsequent transport to a place where better conditions for biodegradation are guaranteed. Among these ex-situ processes it is possible to find on specific process called Slurry Bioreactors that due to its successful result is been projected as a real solution for soil contaminated by hydrocarbons or the other toxic substance.

Finally, the main purpose of this papers is to review the existent literature regarding the field of slurry bioreactors on industrial scale as a bioremediation ex-situ process, consequently as a future goal to offer it as a possible solution to the soil contamination problem in Barrancabermeja.

The findings establish that one for a possible industrial application must further analysis using pilot plants to evaluate their effectiveness.

\* Work degree

\*\* Science Faculty. Chemistry School. Specialization Environmental Chemistry. Director MsC. QUINTERO Mabel Silva Juliana

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, todo sistema socio-económico presenta una dependencia de la demanda de energía. Esta dependencia se refleja en los altos índices de consumo de este recurso como resultado del crecimiento de la economía en los países emergentes. Un ejemplo es el caso de Qatar, con un incremento en el consumo de energía del 174%. Por su parte, China y Vietnam también tuvieron un incremento del 154% [1].

Por otro lado, el consumo del petróleo a nivel mundial ha cambiado, presentando a Asia como el mayor consumidor, seguido por Norte América con 33,2 % y 25,7%, respectivamente [2].

Colombia no ha sido ajena al desarrollo de la industria petrolera, a pesar de ser un pequeño productor. De acuerdo con datos oficiales de la Agencia Nacional de Hidrocarburos, durante el año 2014, Colombia presentó una producción mensual promedio de un millón de barriles de crudo por día calendario [3]. Por otra parte, el boletín del Banco de la Republica afirma que, para el año 2013, hubo un ingreso de 7.910 millones de dólares por concepto de exportaciones de petróleo. Este valor presenta una disminución del 4% con respecto al mismo periodo del año inmediatamente anterior [4]. A su vez, el informe de la ANDI, establece que el sector petrolero ha tenido un crecimiento constante de un 3,9% a lo largo de la década. Este crecimiento está representado en la participación del sector en el PIB, que para 2012 representó el 9%, en contraste con el 4% de los años anteriores a 2008 [5].

De acuerdo con lo anterior, la industria petrolera en Colombia ha hecho contribuciones importantes a la economía nacional. Aunque en la actualidad, debido a la caída en los precios del petróleo y a la disminución en la producción de

crudo, la economía del país se ha desacelerado [6]. Sin embargo, todas las actividades relacionadas con la explotación, refinación y transporte del crudo aún se mantienen y presentan (en mayor o menor grado) efectos adversos. Particularmente, para el caso de la geósfera, la contaminación durante estas actividades se da por vertimientos al suelo, resultado de filtraciones, derrames o accidentes como el sucedido en la finca Chaparral, municipio de Orocué, departamento del Casanare, donde se presentó un derrame de 20 barriles de petróleo crudo [7].

Los efectos del petróleo en el suelo dependen de la topografía, la composición, la permeabilidad y la presencia de vegetación del terreno, además de las propiedades físicas y químicas del crudo [8]. Los principales efectos de la contaminación con hidrocarburos en el suelo son la inhibición o reducción de la capa vegetal en la zona específica del derrame y la contaminación por infiltración a los cuerpos de agua subterránea. Se ha podido establecer una escala de referencia para conocer el impacto del crudo en la flora afectada por el derrame:

- Plantas muy susceptibles a la contaminación: Plantas con raíces de poca profundidad y reservas alimenticias muy bajas: No se recuperan y mueren. Ej. *Suaeda Marina*.
- Plantas susceptibles: Plantas perennes arbustivas. Ej. *Halimione portulacoides*.
- Plantas intermedias: Plantas perennes que aceptan una o dos contaminaciones y luego declinan. Ej. *Spartina Anglica*.
- Plantas resistentes: Plantas perennes con grandes reservas alimenticias y en especial las que mueren superficialmente en invierno. Ej. *Armenia marítima*.
- Plantas muy resistentes: son del mismo tipo que las anteriores y además tienen resistencia a nivel celular. Ej. La familia de las umbíferas [8].

Debido al impacto ambiental generado por los vertimientos de petróleo, a nivel mundial se han desarrollado múltiples tecnologías con el fin de mitigar el daño generado por la contaminación con hidrocarburos en cuerpos hídricos y suelos. Algunos métodos utilizados para la remoción del crudo en suelos son de carácter físico-químico, sin embargo muchas de estas tecnologías, además de ser costosas, generan efectos colaterales. Adicionalmente, se encuentran los procesos biotecnológicos con microorganismos especializados, que transforman las sustancias problema en sustancias inocuas, que no afectan la bioquímica del suelo y pueden ser fácilmente asimilables por las plantas. Entre estas nuevas estrategias de biorremediación de suelos y fuentes de agua, se encuentran: el Composteo, la fitorremediación, los reactores de lodos activados (RLA) y la utilización de micro-algas [9]. Estas tecnologías, además de presentar excelentes resultados, son una alternativa económicamente viable cuando se compara con procesos de remoción fisicoquímicos.

Las tecnologías de Biorremediación pueden clasificarse en tres categorías: ***in situ***, ***ad situ*** y ***ex situ***. Esta clasificación depende del sitio de aplicación: si el proceso de remediación tiene lugar en el sitio de contaminación, se le denomina biorremediación *In situ*; si el material contaminado se remueve y es transportado hasta un lugar donde los microorganismos presentan mejores condiciones de temperatura, nutrientes y humedad para desarrollar su labor, el proceso es denominado Biorremediación *ad situ* y *ex situ*. Como ejemplo de tecnologías *ad situ* y *ex situ*, que han demostrado ser buenas alternativas de mejoramiento, se mencionan los reactores de lodos activados (RLA) [9].

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este trabajo es realizar a través de la revisión bibliográfica una vigilancia tecnológica de los procesos de Biorremediación *ex-situ* con reactores de lodos activados, a escala industrial, con el propósito de plantear una posible aplicación en el complejo petrolero de la ciudad de Barrancabermeja

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Barrancabermeja es la segunda ciudad del departamento de Santander y es donde se encuentra el mayor complejo petroquímico de Colombia. Es el punto de llegada de la gran mayoría de oleoductos colombianos y el de partida de poliductos y vehículos pesados que transportan productos refinados. Estas actividades de transporte y refinación generan fugas y derrames de crudo, lodos y productos químicos diversos en la geósfera de la ciudad y sus alrededores. Un caso típico de esta situación está representado por las lagunas de residuos aceitosos, particularmente la Ciénaga 6, que se construyó en los años 80's para el vertimiento de estos residuos [10]. Esta laguna comprendía un área de aproximadamente 130.000 metros cuadrados y tenía hasta 15 metros de profundidad, una gran extensión de tierra impactada por esta actividad industrial.

Existen más casos de contaminación por residuos de refinación como la ciénaga Miramar, y en los terrenos aledaños a los poliductos en el sector de la ciénaga San Esteban, donde en Julio del 2012, por manos criminales, se derramaron alrededor de mil barriles de crudo [11]. También han ocurrido vertimientos de crudo en suelos de manera accidental, como es el caso ocurrido en la vereda “El Playón”, municipio de Barrancabermeja, donde el derrame de 20 barriles de petróleo, afectó 21.200 m<sup>2</sup> de terreno, siendo evidencia del grave daño generado a los cuerpos de agua y suelos de Barrancabermeja [12].

Debido al impacto ambiental negativo de la industria petrolera y petroquímica en los suelos de las zonas aledañas al complejo petroquímico y zonas de extracción de crudo en Barrancabermeja, los procesos de biorremediación (*in-situ* o *ex-situ*) se postulan como una alternativa viable, comparados con los procesos de remoción fisicoquímicos, debido a su bajo costo y su alta eficiencia. Además, se ha comprobado que los efectos o consecuencias de estas tecnologías

generalmente son inofensivos. En la actualidad, la tecnología de Biorremediación más utilizada en el sector petrolero es el Landfarming, el cual es un proceso *ex-situ*, en el que el suelo contaminado es removido y mezclado con un suelo no contaminado inoculado con microorganismos, sin embargo, los porcentajes de remoción obtenidos con esta tecnología no son muy eficientes [13].

Por lo anterior, en Colombia se hace necesario realizar la vigilancia tecnológica de nuevas alternativas que permitan recuperar eficientemente los suelos contaminados. Entre las alternativas de Biorremediación que presentan mayor eficiencia de remoción de hidrocarburos, se encuentran las tecnologías *ex-situ* debido a la facilidad de estas para controlar variables importantes para el proceso como temperatura, humedad y concentración de nutrientes [9].

Por otra parte, de las tecnologías de Biorremediación *ex-situ* el proceso que utiliza Reactores de Lodos Activados (RLA) ha sido sobre el cual se están direccionando importantes recursos en investigación, ya que ha despertado mucho interés en la comunidad científica. Para aplicar esta tecnología de Biorremediación se necesita realizar procedimientos como caracterizar el material contaminante, el tipo de suelo afectado, las temperaturas de proceso, los tiempos de retención, la concentración de hidrocarburos, las dimensiones y formas de las instalaciones y de los equipos, para alcanzar altos porcentajes de remoción, comparados con otras tecnologías [9].

Sin embargo, las investigaciones que se han desarrollado sobre este tema aunque han sido muchas, se han quedado a nivel de escala laboratorio y han sido muy pocos los trabajos que han logrado sobrepasar esta barrera y han alcanzado un nivel de aplicación industrial.

Por lo anterior, a través de la presente monografía se pretende hacer una revisión bibliográfica en bases de datos especializadas, sobre los procesos de

biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos utilizando la tecnología de Reactores de Lodos Activados (RLA). En esta búsqueda se priorizará sobre ejemplos de aplicación industrial para conocer sus ventajas de aplicación e implementación con el fin de presentar una alternativa para disminuir los impactos ambientales negativos ocasionados por el complejo petrolero y procesos de perforación y extracción de petróleo, en el corregimiento el Centro, de la ciudad de Barrancabermeja, los sectores aledaños al complejo petroquímico.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la vigilancia tecnológica y un análisis de la madurez a la tecnología de Biorremediación *ex situ* de reactores de lodos activados (RLA), mediante bibliometría, para su aplicación en la disminución del impacto ambiental ocasionada por la industria petrolera sobre la geósfera de Barrancabermeja.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis bibliométrico sobre la tecnología de Biorremediación *ex situ* de RLA.
- Analizar la madurez y aplicación de la tecnología *ex situ* de RLA mediante revisión bibliográfica.
- Seleccionar a partir de fuentes bibliográficas, las mejores condiciones de operación para aplicar el proceso de remediación *ex situ* de los RLA en la remoción de hidrocarburos y sustancias tóxicas.

### 3. MARCO TEORICO

#### 3.1 REACTORES DE LODOS ACTIVADOS (RLA).

Entre las múltiples tecnologías de Biorremediación *Ex-situ* que se han desarrollado, se encuentra la tecnología reactores de lodos activados. Aunque han sido utilizados desde tiempo atrás, su aplicación se limitaba a los procesos de tratamiento de aguas residuales. Desde hace un tiempo, estos reactores son empleados como una alternativa para la remoción de materiales altamente tóxicos y en concentraciones elevadas [14]. Esta tecnología se ha utilizado en suelos arcillosos, de poca filtración, y con un alto contenido de materia orgánica. La puesta en marcha consta de cuatro etapas:

- Instalaciones para el manejo y acondicionamiento de suelos contaminados.
- Batería de biorreactores operados en serie, en condiciones aerobias o anaerobias.
- Instalaciones para la manipulación de suelo tratado y eliminación.
- Equipos auxiliares para el tratamiento de efluentes [9].

Los RLA presentan múltiples ventajas en comparación con las otras formas de Biorremediación, entre las cuales se pueden destacar:

- Tiempos cortos de remediación, comparados con los tiempos de remediación de los procesos *in-situ*.

- Mayor control de las variables de operación tales como: temperatura, humedad y concentración de nutrientes. Este control permite mejorar la eficiencia de los procesos.
- Mayor transferencia de masa, lo que facilita la eficiencia de degradación de los contaminantes [15].

Entre sus principales desventajas se encuentran las siguientes:

- Los elevados costos de operación en comparación con otras tecnologías de Biorremediación, debido a los equipos y procesos adicionales que se requieren para la separación del material remediado y el tratamiento de aguas residuales, producto de la Biorremediación.
- Elevados volúmenes de agua de desecho que necesitan tratamiento.

En los reactores de lodos activados, el material contaminado se encuentra en fase acuosa y se mantiene en suspensión mediante agitación constante, la cual puede ser realizada a través de medios mecánicos o neumáticos, permitiendo una mayor interacción de los microorganismos, los contaminantes y los nutrientes. Los RLA pueden contener del 60 al 95% de agua, y esto depende de la naturaleza del contaminante. Adicionalmente, para mantener el pH dentro del reactor, se puede agregar un ácido o álcali a la mezcla anterior [15]. Estos reactores pueden presentar una forma de operación batch, semi-continua o continua y en ellos se pueden desarrollar procesos aerobios o anaerobios.

La operación de un reactor de lodos activados se puede describir de la siguiente manera: El suelo contaminado es excavado y pre-tratado antes de ser cargado al reactor. El pre-tratamiento del suelo se realiza por medio de las operaciones de trituración y cribado. Las fracciones más gruesas del suelo tienen un tamaño de

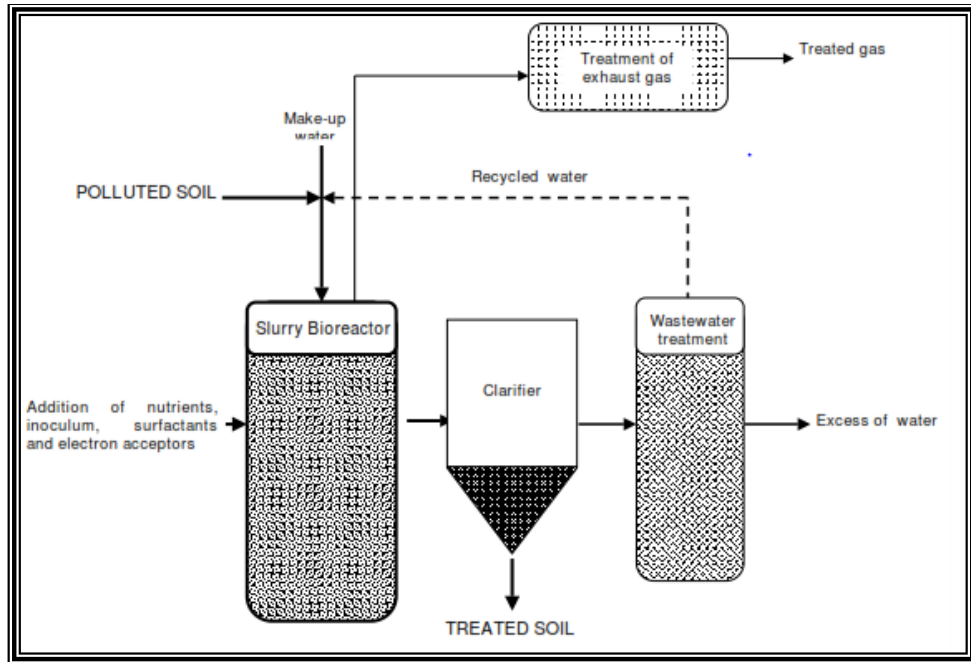
partícula que oscila entre 0,85 y 4,00 mm. Posteriormente, se genera una suspensión acuosa al interior del reactor [9].

Las dimensiones de un reactor presentan múltiples variaciones dependiendo de los recursos con los que se disponga. Una alternativa es una línea de lagunas de 15 m x 24 m. Las dimensiones de un biorreactor, pueden variar de 3 a 25 metros de diámetro y 4,5 a 8 metros de altura, con capacidades de entre 60 a 1000 m<sup>3</sup> [9].

En los reactores de lodos activados, por lo general se utilizan microorganismos nativos presentes en los suelos contaminados para realizar el proceso de biorremediación. No obstante, cuando estos no tienen la capacidad de degradar algunos de los compuestos a tratar, se pueden considerar otras alternativas como inducir un proceso de bioaumentación o también se pueden adicionar consorcios de bacterias especializadas, las cuales mejoraran el proceso de biorremediación con diferentes contaminantes de suelos [16]. Los pesticidas, sustancias órganocloradas, explosivos e hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAH's) pueden ser tratados en reactores de lodos activados aerobios. En los reactores aerobios la degradación de los contaminantes se lleva a cabo por oxidación a través Oxigenasas o Dioxigenasas [9].

Otra variación de los RLA es la utilización de aceptores de electrones diferentes al oxígeno, como el  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{NO}_3^{-1}$  y  $\text{CO}_2$ . Esta forma de operación aumenta la degradación de contaminantes tóxicos y recalcitrantes entre los que se encuentran los compuestos organoclorados y los plaguicidas [14]. Aunque los estudios en cuanto a conocer en detalle la forma de operación son escasos, se han publicado estudios que registran altos rendimientos hasta del 80% en la remoción de diésel de un suelo contaminado. Por tal motivo se proyecta un futuro prometedor en el desarrollo de procesos donde se utilice aceptores de electrones combinados o secuenciales.

Figura 1. Diagrama de un reactor de lodos activados.



\*Fuente: Gonzales-Robles, 2008

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

Para realizar el análisis bibliométrico se consultaron tres (3) bases de datos: Scopus, Web of Science y SciELO. Los criterios para elegir estas fuentes de información fueron:

- Tamaño de la base de datos.
- Credibilidad de la información reportada.
- Cobertura de temas reportados en ellas.
- La base de datos on-line SciELO, se tomó en cuenta porque es una publicación relevante para Iberoamérica y el Caribe.

Para realizar el análisis de la información siempre se tomaron los datos reportados para los últimos 15 años, observando así el histórico de la producción científica en cada uno de los temas de interés. De igual forma, siempre se analizó la producción escrita de los diez (10) autores, universidades y revistas más productivas en cada uno de los temas. Por último, el análisis bibliométrico se limitó al análisis de la literatura científica en forma de artículos y reviews y, adicionalmente, se consultó la existencia de patentes sobre las tecnologías analizadas. Los temas consultados fueron los siguientes:

**Biorremediación.** Proceso biológico utilizado para recuperación de cuerpos de agua o suelos a través de microorganismos.

**Biorremediación *Ex-situ*.** Tecnología derivada de la biorremediación, que se realiza bajo condiciones controladas y en un sitio diferente al lugar impactado inicialmente.

**Biorremediación *In-situ*.** Proceso de biorremediación que se realiza en el lugar donde ocurrió el derrame o evento contaminante.

**Tecnología de Reactores de lodos Activados o Biorremediación en fase lodos.** Proceso de Biorremediación *Ex-situ*, donde el material (suelo) es llevado a un reactor y estando suspensión acuosa, microorganismos endémicos o especializados y bajo condiciones de temperatura, presión, humedad y pH, se logra la eliminación del material contaminante.

#### **4.2 ANÁLISIS DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA**

Para esta actividad, se evaluaron trabajos y patentes reportadas por las bases de datos, además de varios documentos de agencias ambientales como FRTR y EPA. En esta búsqueda se priorizó sobre ejemplos de aplicación a escala piloto e industrial.

Finalmente, una vez se obtuvieron los resultados de la búsqueda se aplicó la evaluación de los Niveles de Preparación de una Tecnología o TRLS (Technology Readiness Levels). Estos niveles son un modelo desarrollado por la NASA y sirven para evaluar la madurez de la tecnología en un proyecto.

#### **4.3 VISITA TECNICA**

Teniendo en cuenta que, como resultado de este trabajo se busca analizar los sistemas de biorremediación usados en la zona petrolera cercana a la ciudad de Barrancabermeja y proponer recomendaciones o mejoras a los mismos, según la tecnología analizada, se buscaron empresas que realizaran esta actividad en los sectores cercanos del distrito de producción El Centro, Complejo industrial y otras zonas aledañas, o empresas que hubieran intervenido recientemente en sitios

donde se generaron derrames de crudo en la geósfera. Lo anterior, con el objetivo de evidenciar y conocer de cerca los correctivos y tecnologías que estas empresas han aplicado y la magnitud del impacto ambiental.

#### **4.4 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE REACTOR DE LODOS ACTIVADOS**

Para realizar la selección de los parámetros de operación de la tecnología de reactores de lodos activados, se tuvieron en cuenta los datos encontrados durante la búsqueda bibliográfica. A su vez, también se consultaron patentes desarrolladas acerca de la tecnología y valores reportados por agencias ambientales norteamericanas.

Estos rangos de valores para los parámetros de operación de la tecnología de Reactores de Lodos Activados (RLA), no se estimaron con datos reportados en artículos científicos, por ser medidos en equipos a escala de laboratorio y bajo condiciones controladas. Por esta razón, se tomaron casos reales donde los RLA fueron utilizados a escala industria, evidenciando buenos resultados, procurando así, determinar las condiciones de operación más ajustadas a un ambiente real

Con base en experiencias, se seleccionaron los rangos de valores de los parámetros de operación comúnmente reportados por los autores en la bibliografía como: agitación, oxígeno disuelto, sistemas de operación, temperatura, pH, relación de sólidos, etc

## 5. RESULTADOS

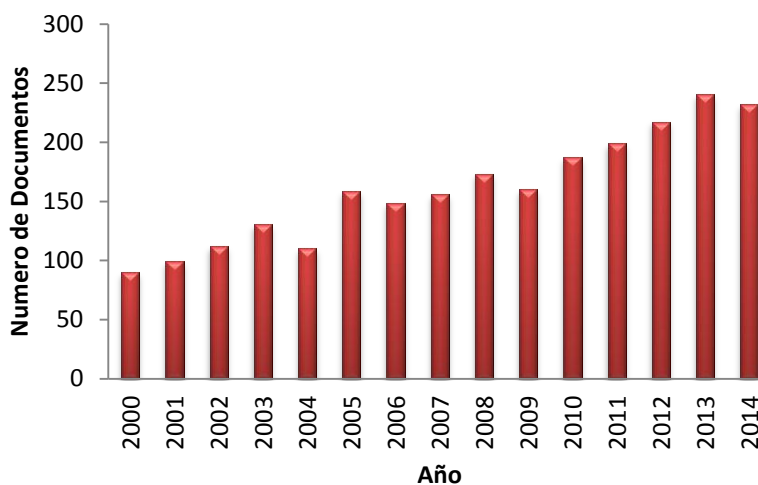
### 5.1 ANÁLISIS BIBLIOMETRICO

#### 5.1.1 Biorremediación

Al realizar la búsqueda bibliográfica, teniendo en cuenta los parámetros anteriormente descritos sobre el tema general Biorremediación, los hallazgos fueron los siguientes:

En la base de datos de Scopus, se encontraron 2.410 documentos, entre artículos y reviews, registrados desde el año 2.000 hasta el año 2014, tal como se puede observar en la Gráfica 1.

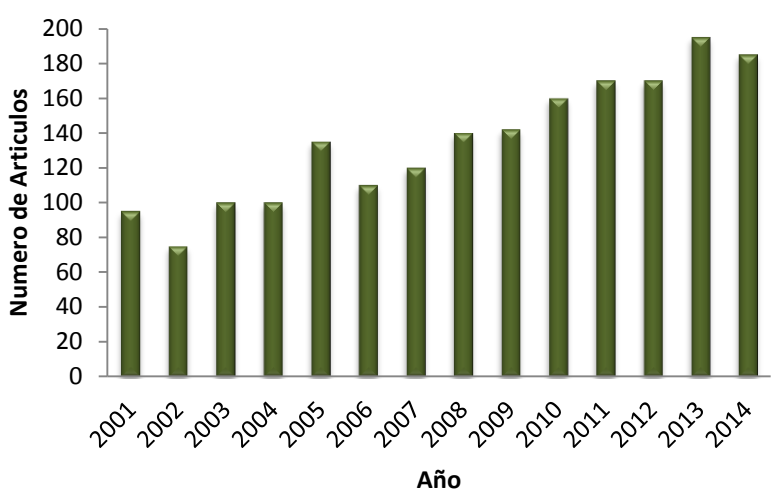
Gráfica 1. Biorremediación. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos Scopus.



Fuente: Scopus

En la base de datos web of Science se realizó una búsqueda similar. Los resultados se muestran en la gráfica 2. Se obtuvieron un total 2.131 documentos, los cuales en su totalidad fueron artículos.

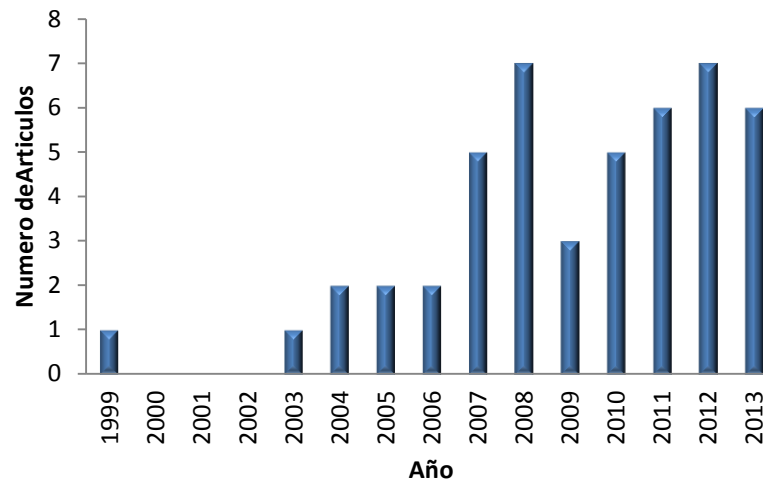
Gráfica 2. Biorremediación. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos Web of science.



Fuente: Web of Science

En la biblioteca electrónica SciELO, se realizó la misma búsqueda y se encontraron un total de 47 publicaciones, registradas desde el año 1999 hasta el año 2013, como se puede evidenciar en la Gráfica 3.

Gráfica 3. Biorremediación. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos SciELO..

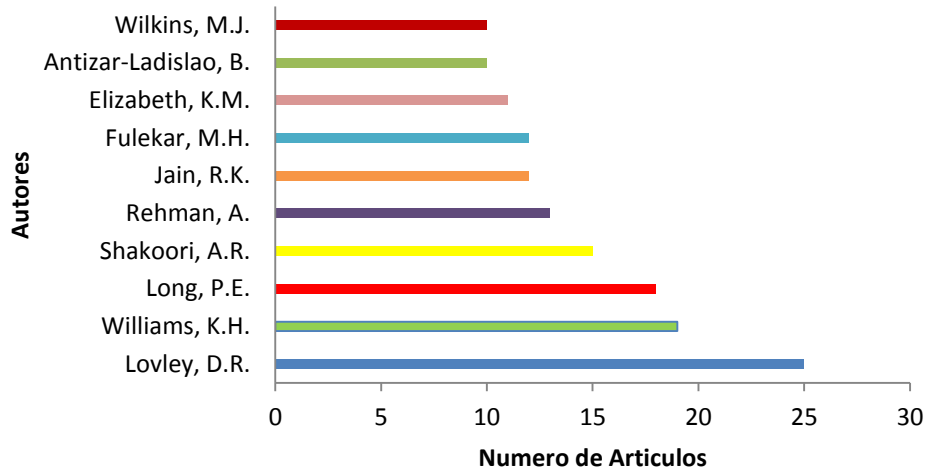


Fuente: SciELO.

En todas las bases de datos consultadas se observa una gradual y creciente producción científica en cuanto al tema de biorremediación hasta el año 2013. A pesar de esto, se puede apreciar el gran interés que ha generado la biorremediación como una alternativa, para la solución de los graves problemas por contaminación ambiental.

Tomando como base los resultados de Scopus, se puede concluir que un investigador destacado, en cuanto al tema de biorremediación es Lovley, Derek R., adscrito al Departamento de Microbiología de la Universidad de Massachusetts, Boston, Estados Unidos, quien cuenta con un total de 25 publicaciones, tal como se observa en la Gráfica 4. Por otra parte, este autor presenta un h-index de 102 (Scopus) y ha realizado 96 documentos en coautoría de Kelly P. Nevin de la Universidad de Massachusetts y con Holmes, Dawn E. de la Universidad Western New England, del Departamento de Física y Ciencias Biológicas.

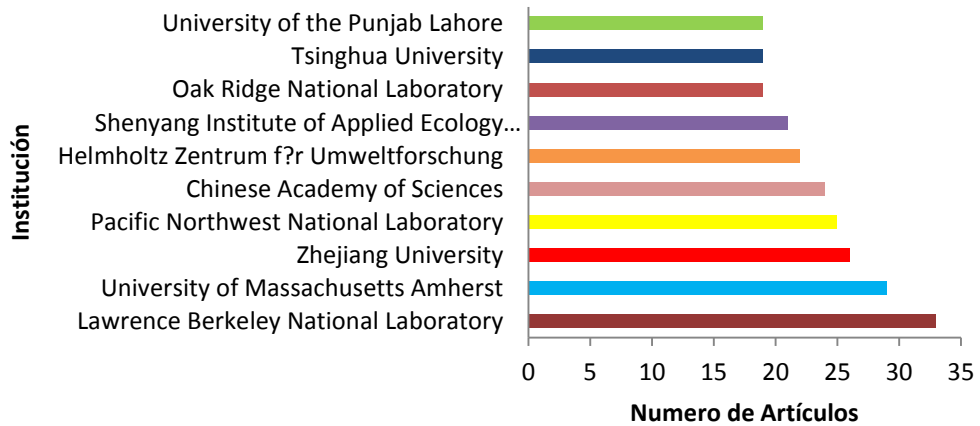
Gráfica 4. Biorremediación. Autores y número de publicaciones.



Fuente: Scopus

El Centro de investigaciones que mayor cantidad de artículos ha publicado sobre biorremediación es el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, ubicado en Cyclotron Road, Berkeley CA, United States. Este laboratorio ha auspiciado un total de 33 artículos en el tema de Biorremediación. Ver Gráfica 5.

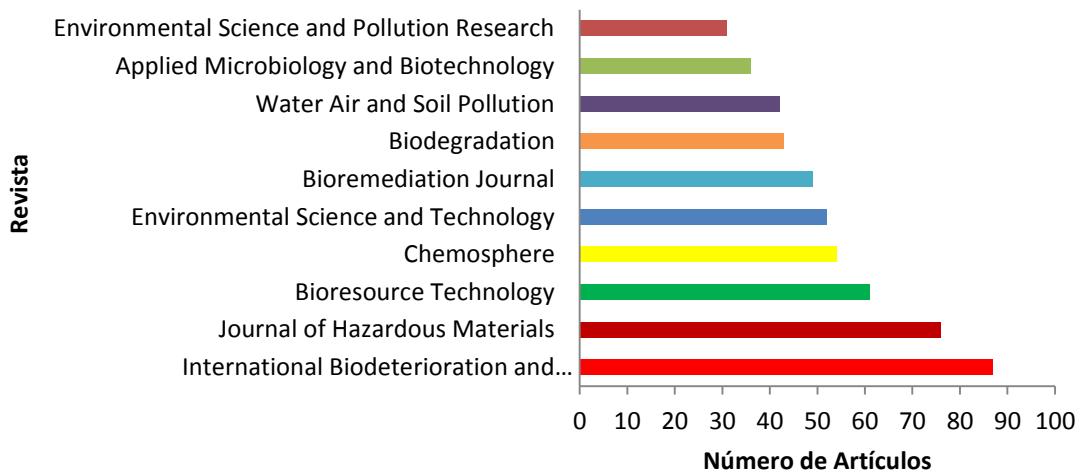
Gráfica 5. Biorremediación. Universidades y Artículos publicados.



Fuente: Scopus.

En el periodo seleccionado (2000-2014), la revista *International Biodeterioration and Biodegradation* (IBB) publicó un total de 87 artículos en el tema de biorremediación, ver Gráfica 6. La IBB tiene por objeto la publicación de artículos relacionados con causas biológicas de deterioro o degradación. Es preciso decir que el factor de impacto de esta revista es de 2,235 ( Elsevier).

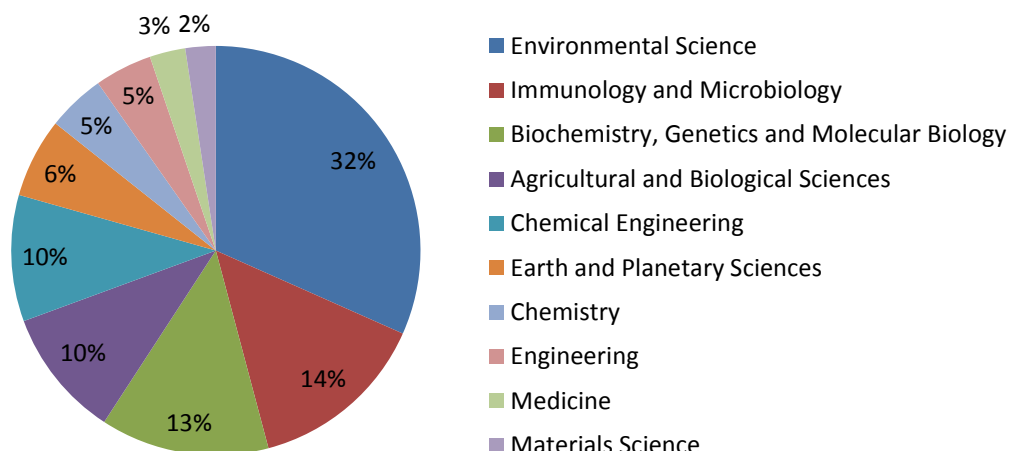
Gráfica 6. Biorremediación. Revistas y número de publicaciones.



Fuente: Scopus.

El área de investigación en la cual se ha desarrollado la mayor cantidad de artículos es Ciencias Ambientales, con un total del 32% de los documentos, tal como se observa en la Gráfica 7.

Gráfica 7. Biorremediación: Áreas de investigación.



Fuente: Scopus

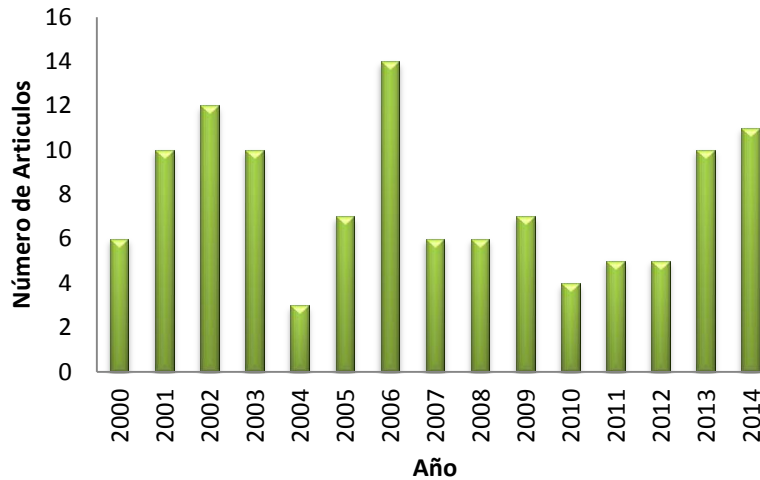
La base de datos Scopus registró que en el tema de biorremediación se han generado un total de 382 patentes, las cuales abarcan las diversas fases del proceso. Estas patentes están registradas en European Patent, European Patent Application, United Kingdom Patent Application, entre otras. Esto da a entender el grado de madurez de la tecnología y aplicación real a escala industrial.

### 5.1.2 Biorremediación *In situ*.

Al realizar la búsqueda bibliográfica sobre el tema Biorremediación *in-situ*, que es la tecnología análoga a la seleccionada para el presente trabajo, los hallazgos fueron los siguientes:

Entre los registros de la base de datos Scopus, desde el año 2000 hasta el año 2014, se hallaron 116 documentos que cumplían con los criterios de búsqueda, como se muestra en la Gráfica 8.

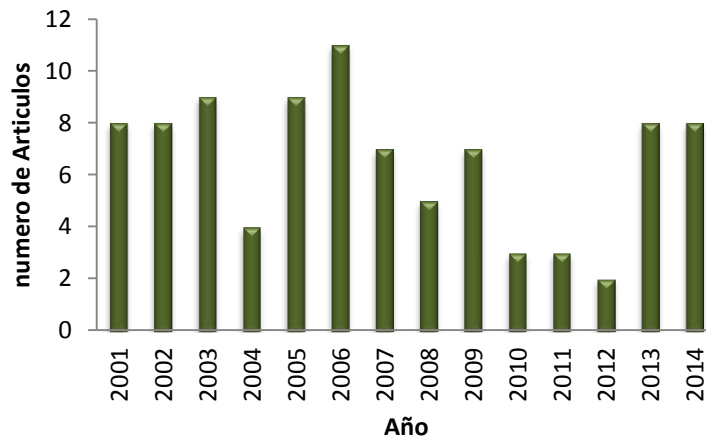
Gráfica 8. Biorremediación in-situ. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos Scopus.



Fuente: Scopus

En la base de datos de Web of Science se encontraron 92 documentos con las palabras clave en título: *In-Situ* and Bioremediation. Ver Gráfica 9.

Gráfica 9. Biorremediación in-situ. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos Web of Science



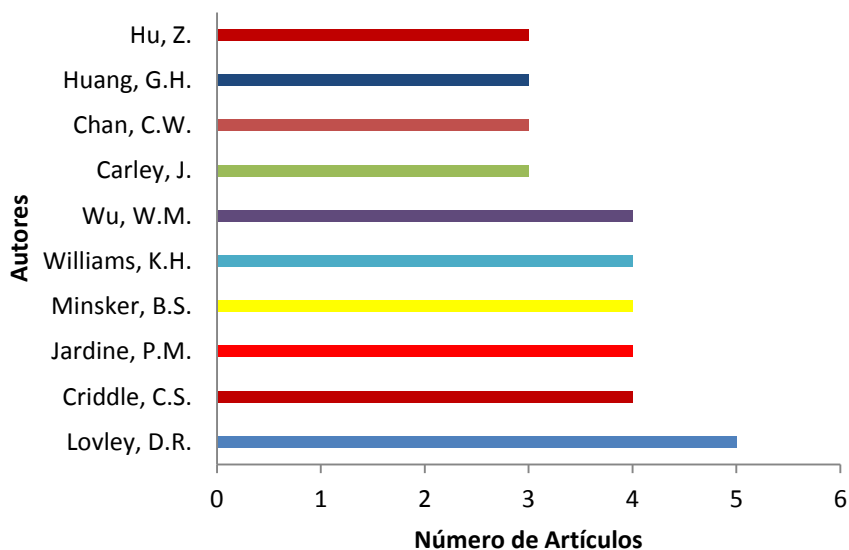
Fuente: Web of Science

En la base de datos Scientific Electronic Library Online, utilizando los criterios de selección, no se encontraron documentos al respecto.

La tecnología *In-situ* ha recibido mayor atención por parte de la comunidad científica, esto se puede apreciar por el número de publicaciones, año a año, sobre el tema. En las gráficas se observa un incremento en la producción científica para los últimos tres años, tal como se evidencia en las Gráficas 8 y 9. Cabe resaltar que la tecnología *In situ* es de más fácil aplicación, pero con dificultades para controlar variables como concentración, humedad y pH.

Entre los autores más reconocidos en el tema de biorremediación *In-Situ*, nuevamente se encuentra a Lovley Derek R, quien tiene la autoría de cinco (5) artículos. Ver Grafica 10.

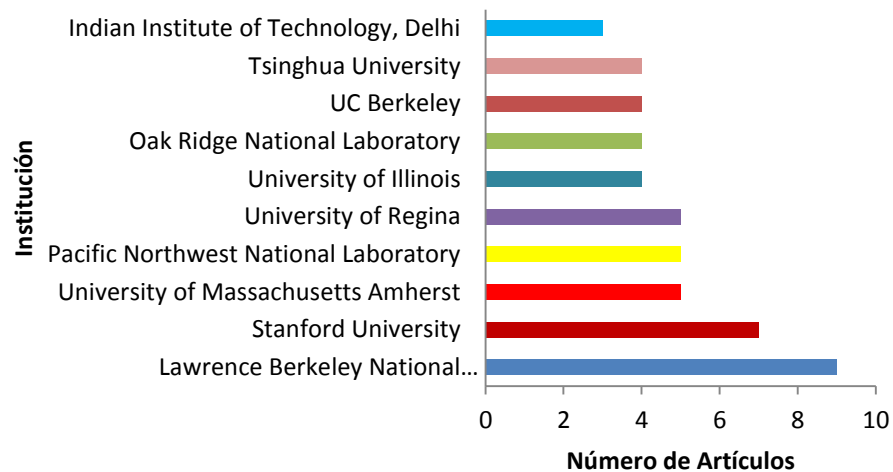
Gráfica 10. Biorremediación In-situ. Autores y número de publicaciones.



Fuente: Scopus

La institución que más investigaciones ha desarrollado, según la base de datos Scopus, es Lawrence Berkeley National Laboratory. En esta institución se encuentra el Centro para la Biotecnología Ambiental, donde se desarrollan programas de Tecnología en Remediación Ambiental. Ver Gráfica 11.

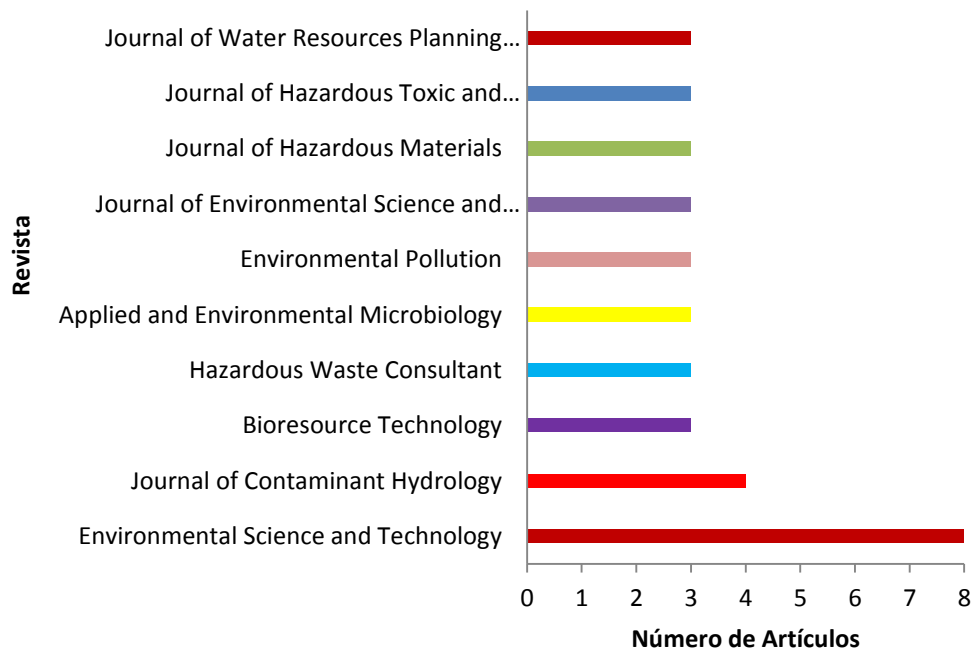
Gráfica 11. Biorremediación In-Situ. Universidades y Artículos publicados.



Fuente: Scopus

La revista *Environmental Science and Technology*, según datos emitidos en su propia página web, ha reportado 105.646 citaciones y presenta un factor de impacto de 5,481. Este factor mide la importancia de la publicación científica y fue establecido en el año 2013 por la Journal Citation Reports. Adicional a esto, como se aprecia en la Gráfica 12, es la revista con mayor número de publicaciones generadas en cuanto a biorremediación *In-situ*.

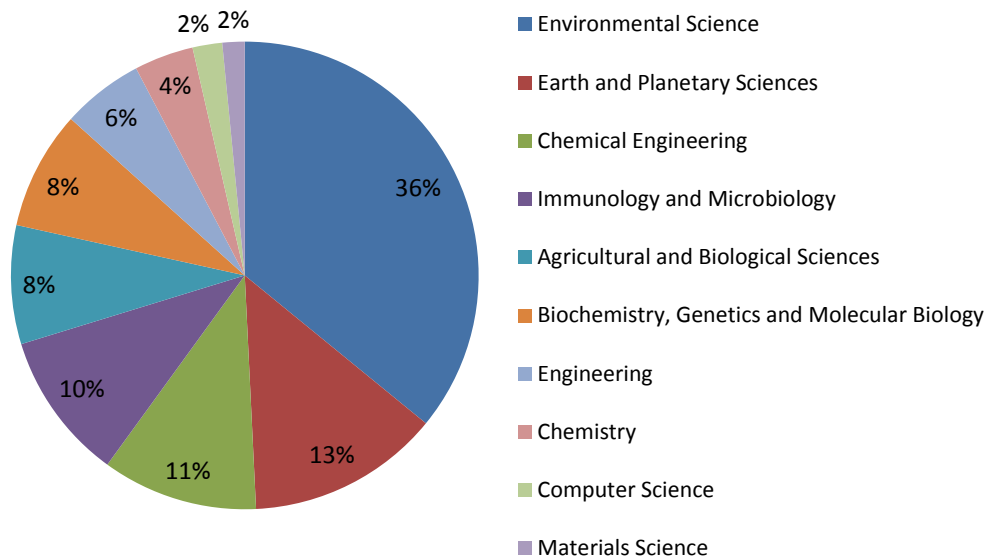
Gráfica 12. Biorremediación In-situ. Revistas y número de publicaciones.



Fuente: Scopus

El 36% del total de los documentos están relacionados con las ciencias ambientales, lo cual permite ver que el principal objetivo de las investigaciones publicadas es el desarrollo de tecnologías para el mejoramiento de los recursos agua o suelo. Ver Gráfica 13.

Gráfica 13. Biorremediación **In-Situ**. Áreas de investigación.



Fuente: Scopus

A partir de la información obtenida a través de la base de datos Scopus, se estableció que, para la tecnología In-situ de Biorremediación se han desarrollado 25 patentes. Cabe decir que este número de documentos es producto de toda la investigación generada en este tema, por lo tanto, las aplicaciones industriales comprobadas han hecho que el grado de madurez de esta tecnología sea mayor.

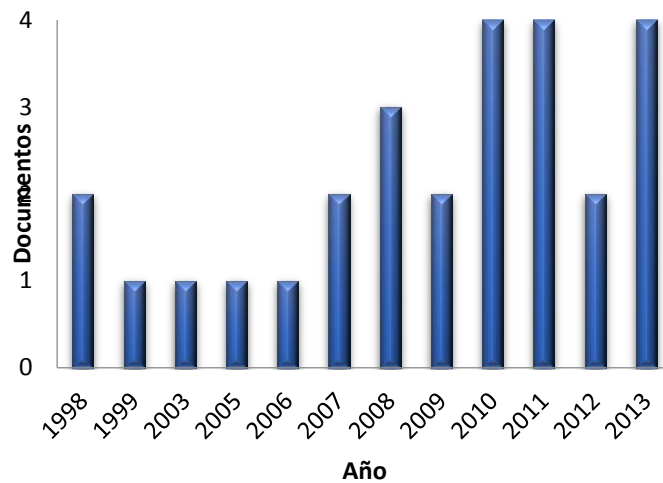
### 5.1.3 Biorremediación *Ex-situ*

Al realizar la búsqueda bibliográfica sobre el tema biorremediación *ex situ*, que es la tecnología seleccionada para el presente trabajo, los hallazgos fueron los siguientes:

En la base de datos Scopus se hallaron 27 documentos publicados desde 1998 hasta 2014, lo que indica, comparando con los datos reportados para la tecnología *In-situ*, una baja producción científica en cuanto al tema en todo el tiempo

analizado. Se puede apreciar en la Gráfica 14, un renaciente interés por la tecnología *Ex-situ* en los últimos años, como producto de nuevas alternativas y tendencias en estos procesos de Biorremediación.

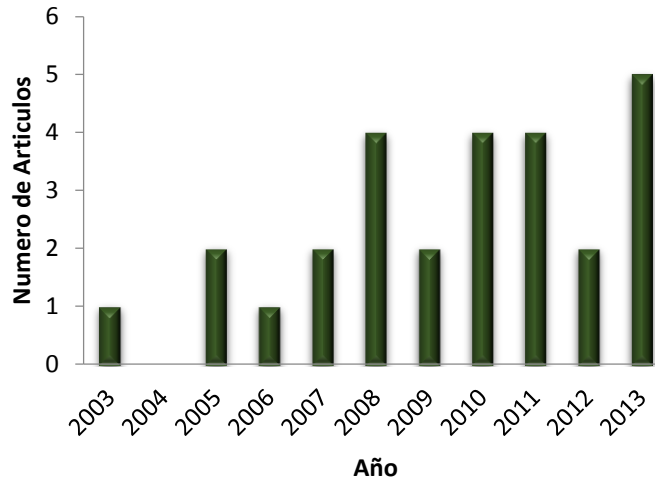
Gráfica 14. Biorremediación in in-situ. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos Scopus



Fuente: Scopus

En la base de datos Web of Science se encontraron 25 documentos con palabras clave en título: *Ex-Situ Bioremediation*. Ver Gráfica 15.

Gráfica 15. Biorremediación **Ex-situ**. Publicación anual Web of Science.



Fuente: Web of Science

En la base de datos Scientific Electronic Library Online, la búsqueda solo dio como resultado dos artículos, los cuales fueron publicados en los años 2009 y 2012.

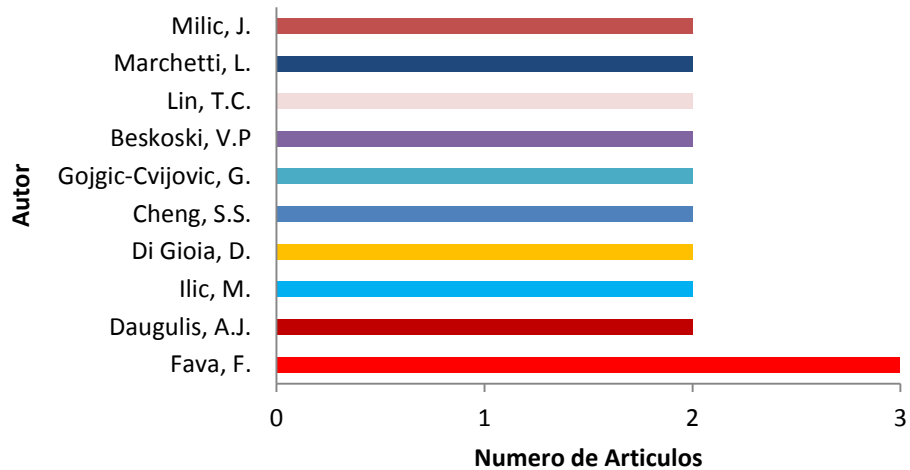
En las dos más grandes bases de datos consultadas, se puede apreciar un comportamiento similar para los últimos seis (6) años, en cuanto al tema de Biorremediación *Ex-situ*. En la base de datos Scopus se observa una tendencia creciente en el número de publicaciones con título *Ex situ Biorremediation* hasta el año 2013, al igual que en la Web of Science.

Uno de los factores que puede influir en las tendencias de producción científica, corresponde a los costos de operación de la tecnología *Ex-situ*. Aunque la eficacia de los procesos *Ex situ* es mayor que en los procesos *In situ*, la tecnología *Ex situ* requiere de mayor inversión para su puesta en marcha.

Según datos de Scopus en el tema de Biorremediación *Ex-situ*, el investigador de mayor producción es Fabio Fava, adscrito al Alma Mater Studiorum Università di

Bologna, Italia, quien tiene un total de 3 publicaciones realizadas, tal como se aprecia en la Gráfica 16.

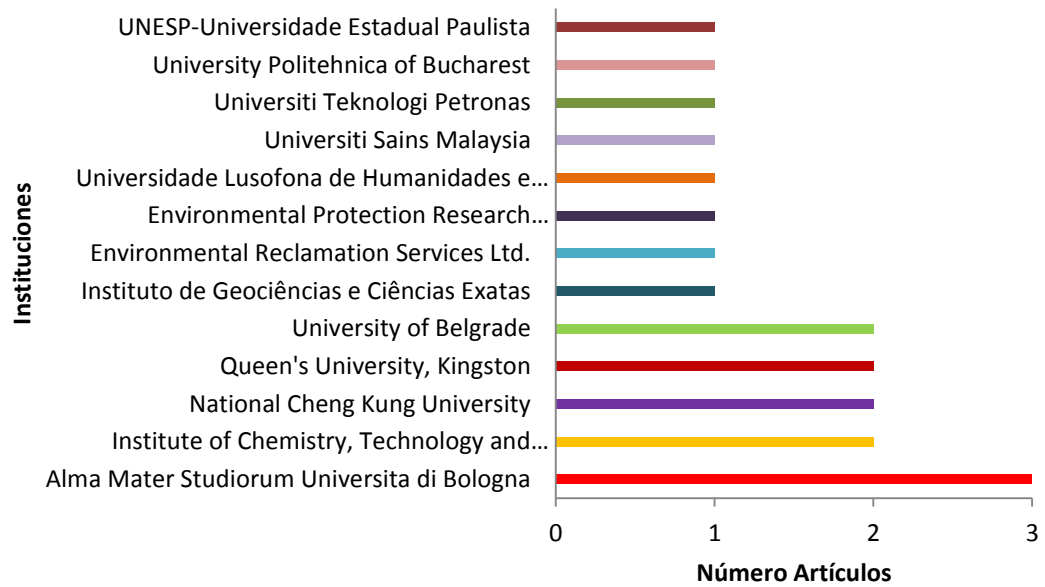
Gráfica 16. Biorremediación **Ex-situ**. Autores y número de publicaciones.



Fuente: Scopus

La institución que lidera la investigación en cuanto a biorremediación *ex-situ* es el Alma Mater Stodiorum Universita di Bologna, ubicada en Bologna, Italia. Este centro de estudios cuenta con tres (3) documentos realizados. Por otro lado, en esta universidad se encuentra la Sección de Biotecnología Ambiental, el cual está encargada de la investigación para el monitoreo y biorremediación de compuestos xenobióticos en suelos, aguas subterráneas y pantanos. Ver Gráfica 17.

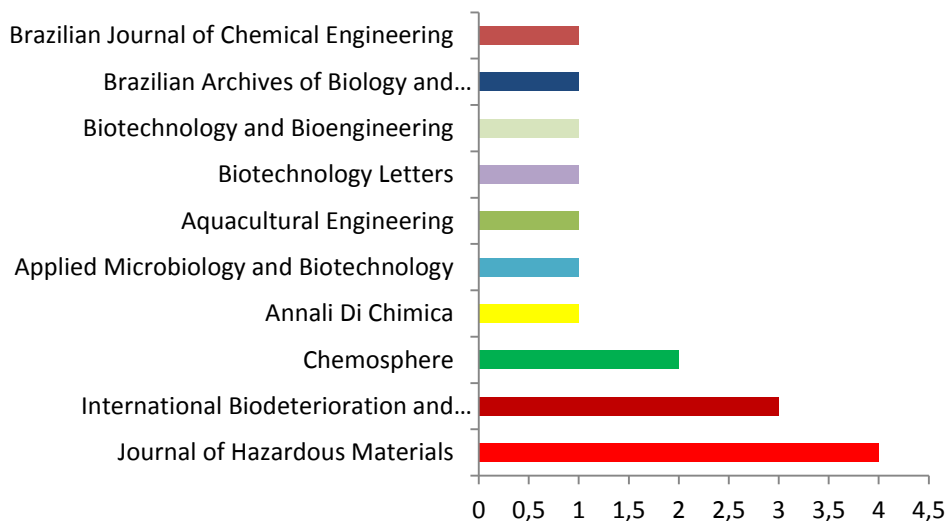
Gráfica 17. Biorremediación **Ex-situ**. Universidades y número de publicaciones.



Fuente: Scopus

Por otra parte, las revistas publican un promedio de un artículo anual sobre el tema biorremediación *Ex-situ*. Cabe destacar que el Journal of Hazardous Materials, desde 2008 hasta la fecha, ha generado cuatro (4) artículos, siendo la revista de mayor influencia en cuanto al tema. Ver Gráfica 18.

Gráfica 18. Biorremediación **Ex-situ**. Revistas y número de publicaciones.

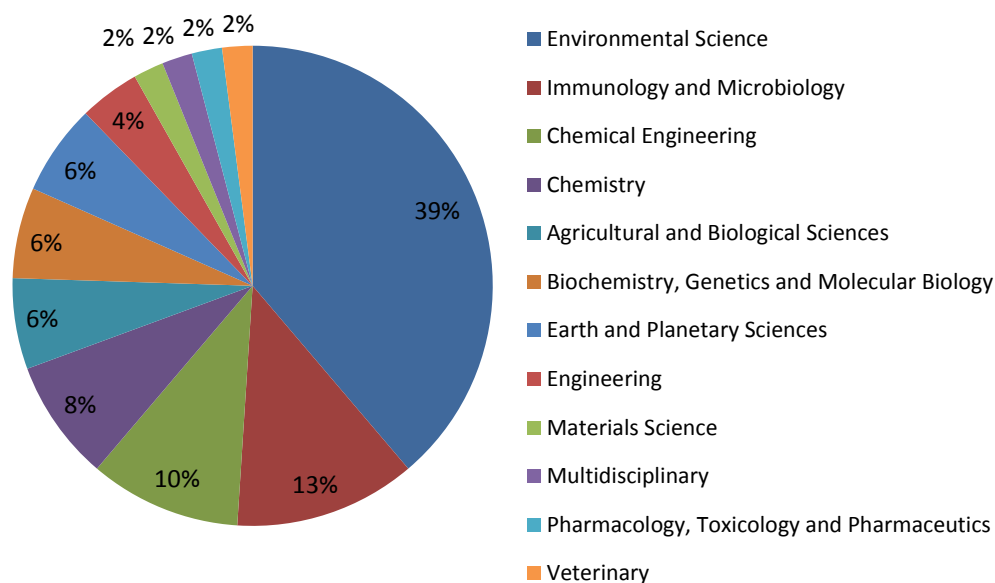


Fuente: Scopus.

En cuanto a la tecnología *Ex-situ*, la base de datos Scopus registra solo una patente, titulada *Method for in situ or ex situ bioremediation of hexavalent chromium contaminated soils and/or groundwater*, la cual data del 28 de Octubre de 1997 y está registrada en United States Patent.

Todos los esfuerzos realizados en el desarrollo de las tecnologías de biorremediación *ex-situ* están encaminados al desarrollo de nuevas alternativas para la mitigación de los impactos ambientales causados por las actividades industriales humanas. Ver gráfica 19.

Gráfica 19. Biorremediación Ex-Situ. Áreas de investigación.



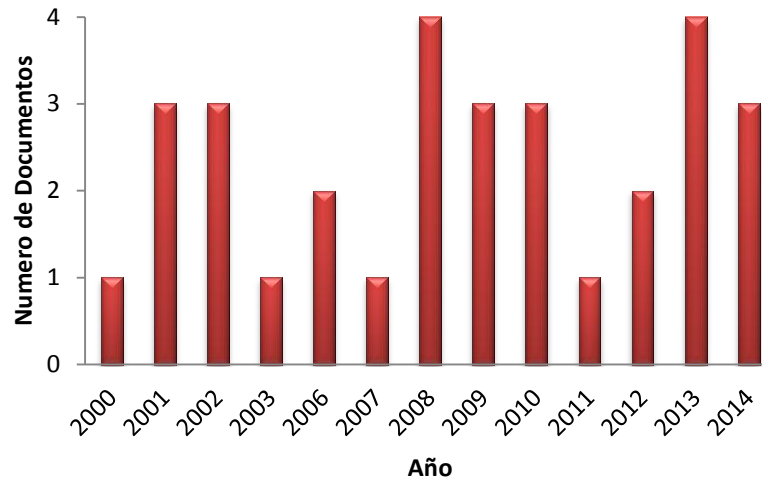
Fuente: Scopus

#### 5.1.4 Reactores de lodos activados o biorremediación en fase suspensión.

Entre las tecnologías de biorremediación *ex-situ*, el apartado de interés en este estudio es la realizada a través de reactores de lodos activados o como también es conocida, biorremediación en fase suspensión (Slurry Phase Bioremediation).

Bajo los criterios de búsqueda planteados inicialmente, se encontraron 31 documentos en la base de datos Scopus. En la Gráfica 20, se observa el histórico de producción científica, año tras año.

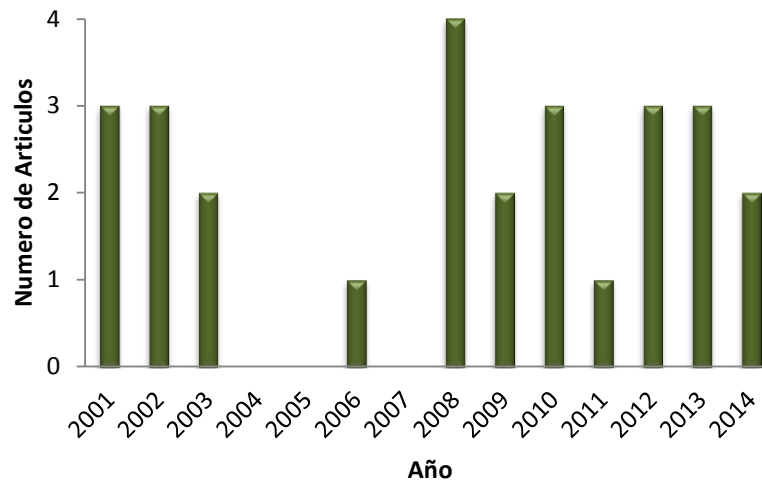
Gráfica 20. Reactores de lodos Activados. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos Scopus.



Fuente: Scopus

En la base de datos Web of Science, con las mismas palabras clave, se encontraron 27 documentos que presentaban a “Bioremediation and Slurry bioreactors” o “Slurry Phase Bioremediation” como tema de su investigación. Ver Gráfica 21.

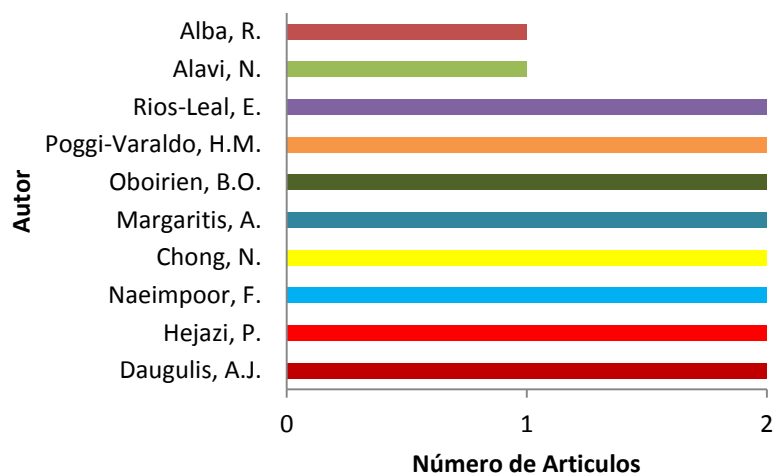
Gráfica 21. Reactores de lodos Activados. Número de artículos publicados anualmente. Base de datos Web of Science.



Fuente: Web of Science

Utilizando los mismos criterios de búsqueda, empleados en las bases de datos Scopus y Web of Science, los resultados obtenidos en la base de datos Online SciELO fueron nulos, es decir, no se encontraron documentos.

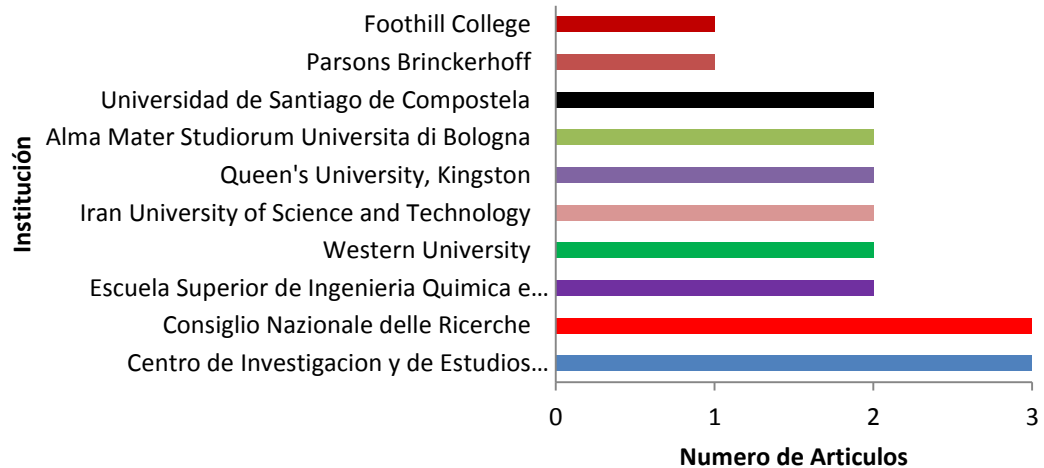
Gráfica 22. Reactores de lodos Activados. Autores y número de publicaciones.



Fuente: Scopus

Por otro lado, el Centro de Investigaciones y estudios avanzados del Departamento de Biotecnología y Bioingeniería de la ciudad de México, es la institución más destacada en cuanto a la tecnología Slurry Bioreactors. Es importante destacar que este centro de investigaciones ha publicado un total de 3 artículos, tal y como se muestra en la Gráfica 23.

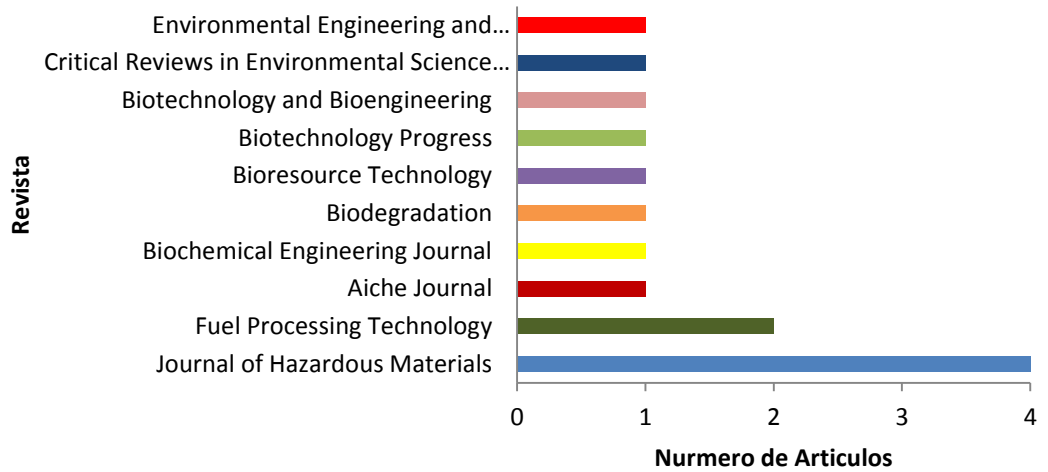
Gráfica 23. Reactores de lodos Activados Universidades y Artículos publicados.



Fuente: Scopus

En el periodo comprendido entre 1995 a 2014 el Journal of Hazardous Materials ha reportado cuatro (4) publicaciones sobre SB. Esta revista centra su atención en la divulgación de estudios relacionados con los peligros y riesgos que sustancias o algunos materiales puedan representar al medio ambiente y al ser humano. Adicional a esto, presenta un factor de impacto de 4,331 para el año 2013 (Journal Citation Reports). Ver Gráfica 24.

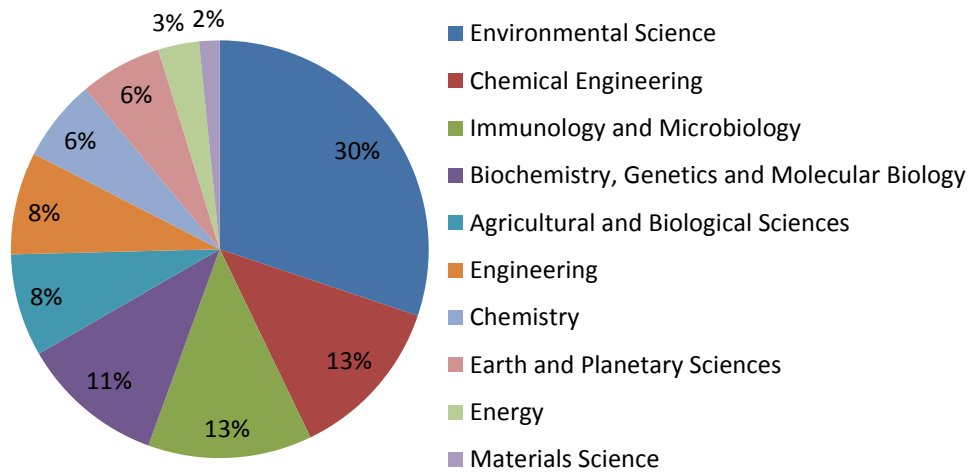
Gráfica 24. Reactores de lodos Activados. Revistas y Artículos publicados.



Fuente: Scopus

Por último, un total del 30% de las investigaciones sobre RLA, se centra en las ciencias ambientales, como se aprecia en la gráfica 25.

Gráfica 25. Reactores de lodos Activados. Publicaciones y Áreas de investigación



Fuente: Scopus

## 5.2 ANÁLISIS DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA

Para completar el análisis bibliográfico sobre la tecnología y conocer su grado de madurez, se establecieron como criterios de evaluación los Niveles de Preparación de una Tecnología o TRLS (Technology Readiness Levels). Estos conceptos fueron desarrollados en la NASA y sirven para evaluar la madurez de la tecnología en un proyecto. Esta metodología consta de nueve (9) niveles que se extienden desde los principios básicos de una tecnología, hasta su aplicación a escala real e industrial. Los niveles son:

- TRL 1: Principios básicos observados y reportados.
- TRL 2: Concepto y/o aplicación formulada.
- TRL 3: Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica.
- TRL 4: Validación de componente y/o disposición de los mismos en entorno de laboratorio.
- TRL 5: Validación de componente y/o disposición de los mismos en un entorno relevante.
- TRL 6: Modelo de sistema o subsistema o demostración de prototipo en un entorno relevante.
- TRL 7: Demostración de sistema o prototipo en un entorno real.
- TRL 8: Sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones.
- TRL 9: Sistema probado con éxito en entorno real. **[18]**

Ahora bien, debido a la producción de documentos reportada anteriormente, a través de la base de datos Scopus, se realizó un análisis de la tendencia de investigación desarrollada por los científicos y el grado de madurez de estos proyectos aplicando los criterios TRL. Se identificaron las variaciones introducidas en los procesos de biorremediación de lodos activados, que fueron relevantes a la hora de evaluar el desempeño del proceso. Estas variaciones del proceso, son

mejoras a la tecnología y, por ende, marcan una pauta. Cabe destacar, que todas estas mejoras fueron evaluadas bajo condiciones controladas a escala de laboratorio.

Para realizar el análisis de las tendencias de investigación, se tomaron todos artículos reportados por Scopus para el tema de Reactores de lodos activados y clasificarlos según los parámetros de operación objeto de investigación. Posteriormente se establece el porcentaje de cada enfoque investigativo, entre el total de artículos hallados.

En la literatura consultada, se identificaron unas líneas de investigación que aumentarían biodegradación, por parte de los micros organismos utilizados, en los reactores, como también la mejor comprensión del proceso. Estos enfoques de investigación son:

- Aplicación de Reactor de lodos Activados (RLA) con simultáneos y secuenciales aceptores de electrones, para suelos contaminados con sustancias diferentes a hidrocarburos.
- Evaluación de la factibilidad de RLA trifásicos que utilizan solventes inocuos.
- Desarrollo de ensayos eco toxicológicos, para mejorar la evaluación de la efectividad de los procesos de Biorremediación **[9]**.

Los resultados del análisis de tendencia de investigación, generados sobre los artículos científicos, reportados por Scopus , se muestran en la tabla 1

Tabla 1. Tendencia de investigación de la tecnología RLA.

Tendencia	Porcentaje [ %]
Bioaumentación	42,0
Aplicación de los RLA con aceptores de electrones secuenciales para suelos contaminados sustancias diferentes a Hidrocarburos.	10
Evaluación de la factibilidad de RLA trifásicos que utilizan solventes inocuos para la desorción de contaminantes fuertemente unidos al suelo.	13
Efecto de los Nutrientes en el proceso de Biodegradación.	13
Evaluación del rendimiento del RLA bajo condiciones Aeróbicas y Anaeróbicas	13
Otros	19

Fuente: Scopus

Entre estas mejoras, cabe resaltar que:

- La Bioaumentación es la adición de un consorcio microbiano especializado que ayuda la mejor biorremediación del material contaminado.
- Los procesos con aceptores de electrones secuenciales, son de carácter anóxico, donde utilizan  $SO_4^{-2}$ ;  $NO_3^{-1}$ ;  $CO_2$ , en lugar de Oxígeno para el intercambio de electrones.
- Los reactores de lodos activados trifásicos presentan la fase sólida, acuosa y la fase solvente. Donde el solvente se encarga de solubilizar el contaminante de tipo hidrofóbico, para que los microorganismos puedan realizar la biodegradación.

Para aplicar los criterios TRL, se debe tener en cuenta que todos los ensayos y mejoras registradas en los artículos, fueron llevadas a cabo a escala de laboratorio y aun no se reportan dichos cambios en el proceso de reactores de lodos activados en un ambiente real o escala industrial. Todo esto conlleva a estimar el grado de madurez de estas nuevas tendencias en un nivel de 4, debido a que "Validación de componente y/o disposición de los mismos en entorno de laboratorio".

Según registros consultados de la EPA (Environmental Protection Agency), se han desarrollado dos proyectos de biorremediación a escala industrial utilizando Biorreactores de lodos activados, con muy buenos resultados. Este hecho implica que la tecnología de interés de la presente monografía se podría catalogar en un nivel de madurez TRL 8. Ver Tablas 2 y 4

Tabla 2. Biorremediación a escala Industrial. Caso 1.

Lugar	Southeastern Wood Preserving Superfund
Localidad	Canton, Mississippi
Contaminantes	Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAH's). Total concentración de PAH's: 4.000 mg/kg Concentración de PAH carcinogénicos: 1.000-2.500 mg/kg
Tecnología a utilizar	Biorremediación en fase Suspensión (Biorremediación Ex-situ)
Cantidad de material Biorremediado	14.140 ton (10.500 yardas cúbicas)
Material Biorremediado por mes	336,6 ton/mes
Tiempo de Operación	1991- 1994
pH Promedio	7,2 a 8,4
Temperatura Promedio	15°C a 21°C en meses de invierno y entre 25°C a 40°C en el resto del año
Contenido de Oxígeno Disuelto	Mayor a 2,0 mg/L
Velocidad de flujo de Aire	350 450 SCFM (Pie cubico estándar por minuto)
Costo por actividades directamente relacionadas con la biorremediación	170 dólares/ton

Fuente: Environment Protection Agency (EPA)

Para el caso 1, se reportaron porcentajes de remoción de contaminantes como lo indica la tabla 3.

Tabla 3. Eficiencia de RLA en Southeastern Wood Preserving Superfund

Contaminante	Porcentaje de remoción [%]
Antraceno	94
Pireno	97
PAHs totales	92
PAHs Carcinogénicos	66

Fuente: Environment Protection Agency (EPA)

Otro ejemplo de la aplicación de la tecnología RLA a escala industrial, fue en la localidad de Crosby, Texas estados unidos. Los parámetros de operación utilizados para este caso, son presentados en la tabla 4.

Tabla 4. Biorremediación a escala Industrial. Caso 2.

Lugar	French Limited Superfund Site
Localidad	Crosby, Texas
Contaminantes	Benzo(a)Piereno, PCB's totales, Benceno, Arsénico, Cloro Vinilo.
Tecnología Utilizada	Slurry Phase Bioremediation (In-situ Biorremediación)
Cantidad de material Biorremediado	300.000 toneladas de lodos
Cantidad de Material Biorremediado por mes	27.272 Ton/mes Aproximadamente
pH Promedio	6,6 a 8,5
Temperatura Promedio	22,0°C a 37,0°C
Contenido de Humedad	70% al 95%
Tiempo de Operación	11 meses de Operación en el año de 1993
Contenido de Oxígeno Disuelto	0,5 a 4,0 mg/L
Velocidad de flujo de Aire	2.500 lbs/hr de Oxígeno
Costo por actividades directamente relacionadas con la biorremediación	90 dólares/ton

Fuente: Environmetal Protection Agency (EPA)

Para el caso 2, llevado a cabo en French Limited Superfund Site, Crosby Texas, se reportaron los siguientes porcentajes de remoción de contaminantes, como lo expone la tabla 5.

Tabla 5. Eficiencia de RLA en French Limited Superfund Site.

Contaminante	Porcentaje de remoción [%]
Cloro vinilos	95
Bencenos	99
PCBs Totales	90

Fuente: Environment Protection Agency (EPA)

Por otra parte, se encontró una patente desarrollada para esta tecnología titulada: **BIO-SLURRY REACTION SYSTEM AND PROCESS FOR HAZARDOUS WASTE**

**TREATMENT**, registrada en European Patent Office y cuya fecha es de Abril de 1993. [19] Esto se puede entender como un nivel de madurez de la tecnología TRL 9.

De acuerdo a los criterios antes establecidos y a la revisión bibliográfica realizada, se puede establecer que la tecnología de Biorreactores de Lodos Activados o Biorremediación en Fase Lodos, es una tecnología madura que se puede ubicar entre los criterios 8 y 9 de la escala TRL

La tecnología de Reactores de lodos Activados, como herramienta para la biorremediación de suelos, está en constante evolución. Debido a esta tendencia, se han realizado pruebas a escala de laboratorio, donde se investigan nuevas formas para mejorar el proceso. Un ejemplo de ello son las pruebas realizadas induciendo a la Bioaumentación y la ayuda de resinas como mejoradoras de los rendimientos del reactor. [16] [20]

### **5.3 VISITA TÉCNICA**

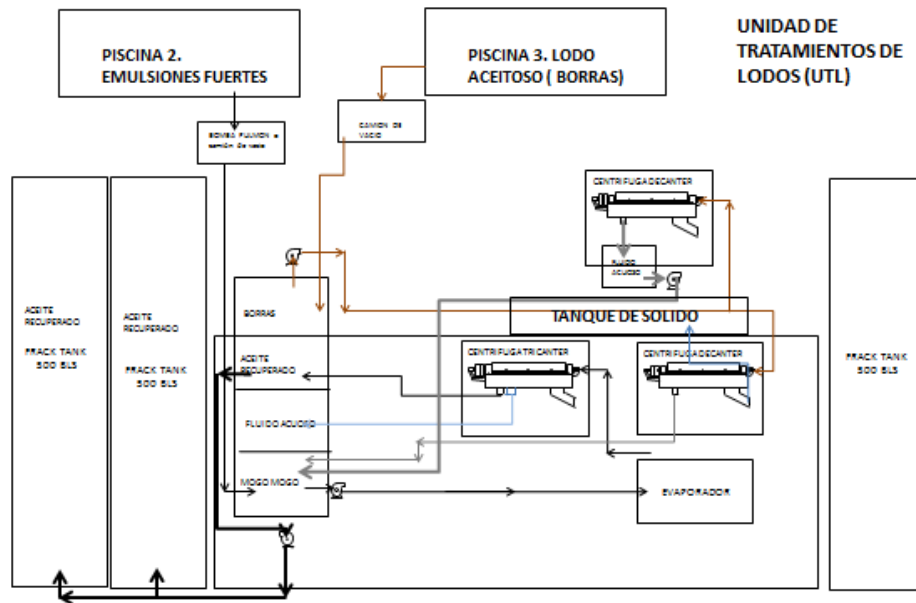
Con el objetivo de conocer cuál tecnología de Biorremediación se está desarrollando por el distrito de Producción El Centro de ECOPETROL S.A. Barrancabermeja, para la mitigación de los impactos ambientales negativos ocasionados por los frecuentes derrames de crudo sobre la geósfera de la ciudad y sus alrededores, se realizó una visita a éste para establecer:

- Empresas que estén desarrollando tareas de Biorremediación en el municipio de Barrancabermeja.
- Eventos generadores de suelos para Biorremediación.
- Tecnologías utilizadas para la remediación de suelos impactados por hidrocarburos.
- Condiciones de operación bajo las cuales se realiza la biodegradación.

Para la fecha de la visita realizada, se evidenció que solo una empresa presta servicios de remediación en la zona, ATP Ingeniería S.A.S. Esta empresa de capital colombiano, tiene como campo de acción los sectores de los aceites, de la industria Química y el industrial. Presenta tres unidades de negocios como son: El aspecto ambiental, la integridad y corrosión y calidad.

ATP ingeniería S.A.S. aplica tecnologías de remediación *In-situ* y *Ex-situ* para lodos y aguas residuales del proceso. Los suelos tratados, son el resultado de derrames o fugas del crudo vertido en tierra. Se encontró que los lodos aceitosos son extraídos de los fondos de los tanques de almacenamiento de crudo cuando se realizan actividades de mantenimiento o limpieza (Lodo aceitoso o Borrás). Estos fondos de tanques contienen agua, hidrocarburos y tierra. Aprovechando la diferencia de densidades de los diferentes materiales se logra su separación en las centrifugadoras Decanter y TriCanter. El sólido extraído, que posee entre un 7% a 10% en peso de hidrocarburos, es depositado en el tanque de sólidos y posteriormente pasa al proceso de Biorremediación para su recuperación y posterior deposición. Ver Figura 2.

Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de separación de Aceite, Agua y Lodos.



Fuente: ATP Ingeniería.

En la actualidad, la empresa ATP Ingeniería está llevando a cabo el tratamiento de un total de 20.000 metros cúbicos de suelos por medio del proceso Landfarming, que corresponde a una tecnología *Ex-situ*. Las condiciones de operación del proceso de Biorremediación son las siguientes: Ver Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de operación de proceso de Biorremediación en Ecopetrol.

Lugar	Barrancabermeja
Localidad	Corregimiento el Centro. AMIR. (Área de Manejo Integral de Residuos)
Contaminantes	.Hidrocarburos totales
Tecnología Utilizada	Landfarming (Ex-situ)
Cantidad de material Biorremediado	20.000 metros cúbicos de suelo
Cantidad de Material Biorremediado por mes	3000 m <sup>3</sup> /mes
pH Promedio	6,0 a 8,0
Temperatura Promedio	55°C (En el interior de la pila de materia)
Contenido de Humedad	30%
Tiempo de Volteo	Cada 24horas
Nutrientes Utilizados. (Los nutrientes son aplicados cada 8 días)	Triple 15 Gallinaza, Melaza

Fuente: ATP Ingeniería S.A.S

Periódicamente, el ICP (Instituto Colombiano del Petróleo) realiza análisis para establecer las concentraciones de los contaminantes de interés de acuerdo al Protocolo de Lousiana 29-B. Tan pronto estos valores sean evidenciados en el suelo tratado, el proceso de biodegradación es terminado. Actualmente, en las instalaciones del AMIR, la Empresa ATP, no realiza un análisis de composición química del suelo biorremediado ni la variación de las concentraciones a medida que avanza la Biodegradación. Ver Tabla 5 y Figura 3.

*Tabla 7. Parámetros permitidos del protocolo de Lousiana sección 29-B*

Parámetro	Criterio	Número de Pruebas Consecutivas
Suelo en la Zona de Tratamiento		
pH	6,5 – 9	2
TPH	≤ 3,0 %	2
EC	≤10 mmhos/cm	2
TCLP Benzene	≤0.5 ppm	2
SAR	≤12	2
ESP	≤15 %	2
Metales (ppm)		
As	≤10	2
Cd	≤10	2
Cr	≤1000	2
Cu	≤1,500	2
Pb	≤1,000	2
Hg	≤10	2
Mo	≤18	2
Ni	≤420	2
Se	≤10	2
Ag	≤200	2
Zn	≤2,300	2
Ensayos de Lixiviación		
Ba	10.0 mg/l	2

Fuente: Ecopetrol.

Figura 3. Proceso Landfarming en la planta AMIR



Fuente: Beleño, 2015.

#### **5.4 PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA TECNOLOGIA DE REACTOR DE LODOS ACTIVADOS.**

La tecnología de Reactores de Lodos Activados, puede ser muy versátil para ser escalada a nivel industrial, considerando aspectos como las características del terreno, tipo de contaminante presente y presupuesto del proyecto.

Aunque la tecnología de Reactores de Lodos Activados (RLA) es más costosa que otro tipo de tecnologías [9], su eficacia y rapidez la hacen atractiva para proyectos de Biorremediación de gran envergadura. A continuación se presentan los parámetros de operación más importantes:

##### **5.4.1 Ubicación In-situ o Ex-situ.**

Aunque la tecnología RLA es catalogada como *Ex-situ*, ha sido aplicada de forma In-situ, tal es el caso presentado en French Limited Superfund Site, Crosby, Texas

[25]. En este ejemplo, la tecnología se aplicó a una laguna de 22,5 Acres que fue utilizada como depósito de desechos industriales.

#### **5.4.2 Disponibilidad de Oxígeno.**

Los reactores de lodos activados pueden ser operados de manera Aeróbica o Anaeróbica [19][35]. Esto les permite utilizar una gran variedad de microorganismos y biorremediar un gran número de compuestos tóxicos de difícil degradación en otro tipo de tecnología.

#### **5.4.3 Tipo de Agitación.**

Para mantener los niveles de oxígeno disuelto, se requiere un mezclado uniforme que permita la transferencia de masa y la suspensión del material a biodegradar. En las experiencias a escala industrial se ha encontrado que el método de agitación más utilizado involucra el uso de difusores y sopladores. Estos equipos mantienen una agitación suave y uniforme que no afecta el crecimiento bacteriano. [19] [21][34]

#### **5.4.4 Sistema de Operación Batch, Continuo o Semi continuo**

La bibliografía consultada hasta el momento indica que el tipo de operación más utilizada para los RLA es la forma discontinua o conocida como modo de operación Batch. [19, 18, 21, 35] Esta forma de operación, permite un mayor manejo de variables importantes para el proceso como la temperatura, el pH y la humedad. De igual manera, los tiempos de residencia de la materia deben ser lo suficientemente prolongados para garantizar la biodegradación por parte de los microorganismos.

#### **5.4.5 Temperatura.**

Este parámetro es de suma importancia porque afecta el crecimiento de los microorganismos y la cinética de las reacciones bioquímicas que se generan el

proceso. La literatura indica que el rango de temperatura más utilizado para la operación de los biorreactores se encuentra entre 20°C y 40°C. [9, 19, 18, 21, 34]

#### **5.4.6 pH**

Este parámetro puede influir, tanto en el crecimiento de las bacterias, como en el equilibrio de las reacciones químicas que suceden en el interior de los microorganismos. Dependiendo del tipo de bacterias utilizadas en el proceso, se podría modificar este parámetro. Con base en la bibliografía examinada, se pudo establecer que el rango de pH utilizados en los casos industriales está entre 6,0 y 8,5. [9, 18, 21, 34]

#### **5.4.7 Relación de Sólidos**

Este parámetro depende de las características del terreno y determina la cantidad de energía necesaria para el bombeo del material a través de las diferentes etapas del proceso. Una relación sólido-agua para la formación del lodo, más aceptada y registrada en la literatura es entre 15% al 60% peso/volumen. [9, 19] aunque hay otros autores que reportan una relación de 45% w/w [35]

## 6. CONCLUSIONES

Una vez terminada la revisión bibliográfica se puede concluir que:

En cuanto al análisis bibliométrico se puede establecer que, de las tecnologías de Biorremediación, la biorremediación *in-situ* es la que despierta mayor interés por parte de la comunidad científica.

De la Biorremediación *ex-situ* se puede concluir que la producción científica sobre este tema en los últimos cuatro (4) años ha presentado un incremento importante.

De la biorremediación *ex-situ* utilizando la tecnología de reactores de lodos activados se ha podido establecer que, aunque hay muchas investigaciones a nivel de escala laboratorio, existe muy poca literatura que reporte casos exitosos de aplicación a escala piloto y a nivel industrial.

Aunque la literatura sobre aplicaciones exitosas de la tecnología de reactores de lodos activados para la biorremediación de suelos sea escasa, se pudo establecer, que presenta un alto nivel de desarrollo y un alto grado de versatilidad. Por otro lado, ha sido utilizada en algunos casos a escala industrial con porcentajes de remoción que algunos contaminantes está por encima del 90%. Adicionalmente se evidenció que se están realizando pruebas a escala de laboratorio, buscando mejoras a esta tecnología con el fin de generar procesos más eficientes.

En la actualidad la tendencia de las investigaciones va dirigida a determinar el efecto generado por la Bioaugmentación en los procesos de biorremediación con lodos activados. Estas nuevas alternativas que se están desarrollando sobre la tecnología reactores de lodos activados, pueden ser consideradas como tecnologías en etapa de gestación, según los criterios TRL

En Barrancabermeja, los procesos de biorremediación de suelos son llevados a cabo a través del Landfarming, que aunque tiene bajos costos, sus tiempos de operación son muy prolongados y las variables del proceso son difíciles de controlar.

Debido a la gran versatilidad y múltiples variaciones que puede presentar la tecnología de reactores de lodos activados, como operar bajo condiciones aerobias o anóxicas, se hace necesario establecer con claridad el tipo de contaminante en el suelo y así, definir las condiciones de operación que mejor se ajusten a cada necesidad.

## 7. RECOMENDACIONES

Con base en el desarrollo de la presente monografía, se pueden establecer las siguientes recomendaciones:

Para tener un mayor grado de certeza en cuanto a la eficiencia del proceso, bajo las condiciones del terreno y el clima de Barrancabermeja, se recomienda la realización de pruebas experimentales a escala piloto, donde se obtengan datos que puedan corroborar su eficiencia y en las que se puedan realizar variaciones a las condiciones de operación con el fin de optimizar el proceso de biorremediación.

Se recomienda realizar un estudio de factibilidad económica de la implementación de la tecnología, bajo las condiciones climáticas y edafológicas de Barrancabermeja, teniendo en cuenta los volúmenes de terreno que se manejarían, para así establecer su posible aplicación a escala industrial.

La tecnología de Reactores de Lodos Activados ha demostrado un alto grado de eficiencia de biorremediación, no sólo de suelos contaminados con hidrocarburos, sino también de suelos impactados por herbicidas e insecticidas. Debido al gran potencial agro-industrial de la región del Magdalena Medio, se recomienda realizar estudios para encontrar posibles aplicaciones industriales a la tecnología, y generar mejoras en los procesos productivos agrícolas de la región.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**[1]** UPME. Cadena del Petróleo 2013. {En línea}. {15 de Enero de 2015} Disponible en: ([http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/news/3086/files/cadena\\_del\\_petroleo\\_2013.pdf](http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/news/3086/files/cadena_del_petroleo_2013.pdf))

**[2]** SECRETARIA DE ENERGIA DE MEXICO. Perspectiva del Petróleo Crudo y Petrolíferos 2013-2027. {En línea} {Mayo de 2013} Disponible en: ([http://sener.gob.mx/res/PE\\_y\\_DT/pub/2013/Prospectiva\\_de\\_Petroleo\\_y\\_Petroliferos\\_2013-2027.pdf](http://sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2013/Prospectiva_de_Petroleo_y_Petroliferos_2013-2027.pdf))

**[3]** ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos). Producción Fiscalizada de crudo 2014. {En línea} {Enero 15 de 2015} Disponible en: (<http://www.anh.gov.co/Operaciones-Regalias-y-Participaciones/Sistema-Integrado-de-Operaciones/Paginas/Estadisticas-de-Produccion.aspx>)

**[4]** BANCO DE LA REPUBLICA. Evolución de la Balanza de pagos Enero-Marzo 2013 {en línea}. {10 de mayo de 2014} Disponible en: (<http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/paginas/I-Trim-2013.pdf>)

**[5]** ANDI. Colombia: Balance 2012 y perspectivas 2013. {En línea} {Diciembre de 2013} Disponible en: (<http://www.larepublica.co/sites/default/files/larepublica/andi.pdf>)

**[6]** PORTAFOLIO.COM. El Petróleo es uno de los principales retos para Colombia. {En línea} {Octubre 9 de 2014} Disponible en: (<http://www.portafolio.co/economia/petroleo-problema-colombia-octubre-2014>)

**[7]** EL TIEMPO. Emergencia por derrame de crudo en Casanare. {En línea} {1 de Diciembre de 2014} Disponible en: (<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-14917116>)

**[8]** CARVAJAL ORTIZ, L.H., JARA GUTIÉRREZ, F. Aspectos técnicos sobre derrame de crudo. Bucaramanga. 2005, p.1-435. Tesis de grado. (Ingeniero de Petróleos) Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímica.

**[9]** ROBLES GONZALES, Ileri; FAVA, Fabio y POGGI-VARALDO, Héctor. A review on Slurry biorrectors for bioremediation of soils and sediments. En: Microbial Cell Factories. Doi: 10.1186/1475-2859-7-5, p. 1-16.

**[10]** ECOPETROL. Barril con Fondo. En: Carta Petrolera. No 112. (Septiembre-Octubre de 2005) p. 1-68

**[11]** REDACCIÓN CÚCUTA. Emergencia en Barrancabermeja por derrame de crudo. Diario el Tiempo. Disponible en: ([http://www.eltiempo.com/Colombia/oriente/ARTICULO-WEB-NEW\\_NOTA\\_INTERIOR-12053083.html](http://www.eltiempo.com/Colombia/oriente/ARTICULO-WEB-NEW_NOTA_INTERIOR-12053083.html)). 21 de Julio de 2012.

**[12]** COLOMBIA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Resolución 0782. 2008, 16 de mayo. “Por lo cual se ordena la apertura de una investigación, y se toman otras determinaciones” Disponible en: [http://www.anla.gov.co/documentos/res\\_0782\\_160508.pdf](http://www.anla.gov.co/documentos/res_0782_160508.pdf). Bogotá 2008. p.1-6

**[13]** GOMEZ, Helena; DIAS-FERREIRA, Celia y RIBEIRO, Alexandra. Overview of in situ and ex situ remediation technologies for PCB-contaminated soils and sediments and obstacles for full-scale application. En: Science of the total Environment. 28 de Noviembre 2013, Vol. 445-446. p. 237-260

[14] FERRARA-CERRATO, Ronald; ROJAS-AVELIZAPA, Norma. POGGI-VARALDO, Héctor Et al. Procesos de Biorremediación de suelo y Agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. En: Revista Latinoamericana de Microbiología. Abril-Junio 2006. Vol., 48, No 2 p 179-187.

[15] CUEVAS GONZALES, B. G. Remoción de Hidrocarburos policíclicos Aromáticos (HPA's) utilizando reactores de suelos activados inoculados biológicamente. Tesis de Maestría. México D.F. Zacatenco. 2008 p 1-141. Instituto Politécnico Nacional, Escuela superior de ingeniería y Arquitectura. Sección de estudios de Post-grado.

[16] VENKATA MOHAN, S, Et al. Ex situ bioremediation of pyrene contaminated soil in bio-slurry phase reactor operated in periodic discontinuous batch mode: influence of bioaugmentation. En: International Biodeterioration & Biodegradation. 8 de Marzo de 2008. Vol 62, p. 162-169.

[17] TA-CHEN, Li; PO-TSEN, Pan y SHEN-SHUNG, Cheng. Ex-situ bioremediation of oil-contaminated soil. En: Journal of Hazardous Materials. 2010 Vol. 176, p. 27-34.

[18] EPA. Cost and Performance Report: Slurry-Phase Bioremediation at the French Limited Superfund Site Crosby, Texas {En Línea} {5 de Enero de 2015}. Disponible en: <http://clu-in.org/products/costperf/BIOREM/French.htm>

[19] UNITED STATE PATENT. Bio-slurry reaction system and process for hazardous waste treatment. Inventor: Frank J. Castaldi. Int.CI C02F 3/34.USA. Número de Patente: 5'232.596. Fecha de solicitud: 7 de Octubre de 1991.

**[20]** CONCETTA TOMEI, M. Et al. Ex situ remediation of polluted soils by absorptive polymers, and a comparison of slurry and two-phase partitioning bioreactors for ultimate contaminant degradation. En: Journal of Hazardous Materials. Agosto de 2013. Vol. 262, p 31-37.

**[21]** EPA. Slurry Phase Bioremediation at the Southeastern wood Preserving Superfund Site, Canton., Mississipi { En línea} {Marzo de 1994}. Disponible en : file:///C:/Users/ServidoMiranet/Downloads/Southeastern%20Slurry%20Bioreactors%20Full%20%20Scale.PDF

**[22]** CASTELLANOS, Roberto Ariel. Situación del mercado mundial del Petróleo {En línea}. {11 de Junio de 2014} Comisión Nacional de Energía atómica. Boletín energético No 14. Disponible [www.cnea.gov.ar/pdfs/boletin \\_energetico/14/castellano.pdf](http://www.cnea.gov.ar/pdfs/boletin_energetico/14/castellano.pdf)

**[23]** PARDO, J.; PERDOMO, M. y BENAVIDES, J. Efecto de la Adición de fertilizantes Inorgánicos Compuestos en la Degradación de Hidrocarburos en Suelos Contaminados con Petróleo. En: NOVA. Enero-Diciembre 2004. Vol.2, No 2; p 41-49

**[24]** DORRONSORO FERNANDEZ, Carlos. Descontaminación de suelos: Técnicas biológicas.{En línea} {10 de marzo de 2014}. Disponible en: (<http://edafologia.ugr.es/desconta/bioremediacion.pdf>.)

**[25]** ESCORCIA OTÁLORA, Tatiana Alexandra. Análisis bibliométrico como herramienta para el seguimiento de publicaciones científicas, tesis y trabajos de grado. Santa Fe de Bogotá. 2008, p 1-61. Trabajo de grado de Microbiología Industrial. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias.

**[26]** TORRES DELGADO, Katherine. ZULUAGA MONTOYA, Tatiana. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, Trabajo de grado. Universidad Nacional, Medellín, Colombia. 2009, p. 1-92

**[27]** BENAVIDES LÓPEZ, Joaquín; QUINTERO, Gladys. Et al. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. En: NOVA. Enero-Junio de 2006. ISSN 1749-2470. Vol. 4. Pág. 82-90.

**[28]** INFANTE, Carmen. Biorrestauración de Áreas impactadas por crudo por medio de intebios y Biorize. En: Interciencia. Octubre 2001 Vol. 26 No 10, p. 504-507

**[29]** ÑUSTES CUARTAS, Diana Cristina. Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible. Pereira, 2012. p. 1-113. Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales.

**[30]** KHAN, Faisa; TAHIR, Husain y HEJAZI, Ramzi. An overview analysis of site remediation technologies. En: Journal Environmental Management. Febrero de 2004, Vol 71, p. 95-122

**[31]** VARGAS GALLEGO, Paola; CUELLAR, René y DUSSAN, Jenny. Biorremediación de residuos del Petróleo. En: Hipótesis. Diciembre de 2004. Vol. 4, p. 44-49

**[32]** BONELL ROSALBA, Sheyla. Petróleo y la biotecnología: Análisis del estado del arte y las tendencias. {En línea}. {15 de Junio de 2014} disponible: {[http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S102494352009000100003&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S102494352009000100003&script=sci_arttext&tlng=pt)}

**[33]** EPA. Remediation case studies and Technology Assessments fact sheet. {En: línea} {10 de Julio de 2014} disponible en: {<http://www.epa.gov/tio/download/frtr/epa542f05004.pdf>}

**[34]** R.AP, Thomas;D.E Hugues y P, Daly. The use of slurry phase bioreactor technology for the remediation of coal tars. En: Land Contamination & reclamation. 2006. Vol 14. Numero 2, p. 235-241

**[35]** UNITED STATES PATENT. System and methods for biodegradations of compunds. Inventor: George E. Pierce; Lebanon N.J. int CI B09B/00. Número de Patente 5'688.685. Fecha de solicitud: 18 de Noviembre de 1995.

**[36]** AKBARI, A. y GHOSHAL, S. Pilot-scale bioremediation of a petroleum hydrocarbon-contaminated clayey soil from a sub-arctic site. En: Journal of Hazardous Materials 2014. 280, p.595-602.

**[37]** FUENTES, M. S. Et-al. Bioremediation by defined consortium of environmental streptomyces strains. En: International Journal of Environmental Science and Technology, 2014.11(4), p.1147-1156.

**[38]** ALAVI, N. Et-al. Biodegradation of petroleum hydrocarbons in a soil polluted sample by oil-based drilling cuttings. En: Soil and Sediment Contamination. 2014 23(5), p.586-597.

**[39]** CONCETTA TOMEI, M. y DAUGULIS, A. J. Ex situ bioremediation of contaminated soils: An overview of conventional and innovative technologies. En: Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2013. 43(20), p. 2107-2139.

**[40]** TOMEI, M. C. Et-al. Ex situ remediation of polluted soils by absorptive polymers, and a comparison of slurry and two-phase partitioning bioreactors for ultimate contaminant degradation. En: Journal of Hazardous Materials. 2013. 262, p. 31-37.

**[41]** TIWARI, M. K. y GUHA, S. Simultaneous analysis of endosulfan, chlorpyrifos, and their metabolites in natural soil and water samples using gas chromatography-tandem mass spectrometry. En: Monitoring and Assessment. 2013. 185(10), p. 8451-8463.

**[42]** OBOIRIEN, B. O.; OJUMU, T. V. y OBAYOPO, S. O. Fungi solubilisation of low rank coal: Performances of stirred tank, fluidised bed and packed bed reactors. En: Fuel Processing Technology. 2013. 106, p. 295-302.

**[43]** VARO-ARGUELLO, W. E. Et-al. Triphasic slurry bioreactors for the bioremediation of lindane-impacted soil under aerobic and anaerobic conditions. En: Environmental Engineering and Management Journal. 2012. 11(10), p.1811-1823.

**[44]** ABURTO-MEDINA, A. Et-al. Comparison of indigenous and exogenous microbial populations during slurry phase biodegradation of long-term hydrocarbon-contaminated soil. En: Biodegradation. 2012. 23(6), p.813-822.

**[45]** SHEIBANI, G.; NAEIMPOOR, F. & HEJAZI, P. Statistical factor-screening and optimization in slurry phase bioremediation of 2,4,6-trinitrotoluene contaminated soil. En: Journal of Hazardous Materials. 2011. 188(1-3), 1-9.

**[46]** FRASCARI, D. Et-al. 1,1,2,2-tetrachloroethane aerobic cometabolic biodegradation in slurry and soil-free bioreactors: A kinetic study. En: Biochemical Engineering Journal. 2010. 52(1), p. 55-64.

**[47]** JUWARKAR, A. A.; SINGH, S. K. y MUDHOO, A. A comprehensive overview of elements in bioremediation. En: Reviews in Environmental Science and Biotechnology. 2010. 9(3), p. 215-288.

**[48]** PARTOVINIA, A.; NAEIMPOOR, F. y HEJAZI, P. Carbon content reduction in a model reluctant clayey soil: Slurry phase n-hexadecane bioremediation. En: Journal of Hazardous Materials. 2010. 181(1-3), p. 133-139.

**[49]** SODA, S. Et-al. Slurry bioreactor modeling using a dissimilatory arsenate-reducing bacterium for remediation of arsenic-contaminated soil. En: Journal of Bioscience and Bioengineering. 2009. 107(2), p. 130-137.

**[50]** VENKATA MOHAN, S.; PURUSHOTHAM REDDY, B. y SARMA, P. N. Ex situ slurry phase bioremediation of chrysene contaminated soil with the function of metabolic function: Process evaluation by data enveloping analysis (DEA) and taguchi design of experimental methodology (DOE). En: Bioresource Technology. 2008. 100(1), p.164-172.

**[51]** DI GENNARO, P. Et-al. Slurry phase bioremediation of PAHs in industrial landfill samples at laboratory scale. En: Waste Management, 2008. 28(8), p.1338-1345.

**[52]** OBOIRIEN, B. O. Et-al. The effect of the particulate phase on coal biosolubilisation mediated by trichoderma atroviride in a slurry bioreactor. En: Fuel Processing Technology, 2008 89(2), p.123-130.

**[53]** Quintero, J. C. Et-al. Bioremediation of HCH present in soil by the white-rot fungus bjerkandera adusta in a slurry batch bioreactor. En: International Biodeterioration and Biodegradation. 2007. 60(4), p.319-326.

**[54]** CASTALDI, F. J. Tank-based bioremediation of petroleum waste sludges. En: Environmental Progress, (2003). 22(1), p. 25-36.

**[55]** CHONG, N.; KARAMANEV, D. G. y MARGARITIS, A. Effect of particle-particle shearing on the bioleaching of sulfide minerals. En: Biotechnology and Bioengineering. 2002. 80(3), p.349-357.

**[56]** SAPONARO, S. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHS) slurry phase bioremediation of a manufacturing gas plant (MGP) site aged soil. En: Water, Air, and Soil Pollution. 2002. 135(1-4), p. 219-236.

**[57]** OKEKE, B. C. Biodegradation of  $\gamma$ -hexachlorocyclohexane (lindane) and  $\alpha$ -hexachlorocyclohexane in water and a soil slurry by a pandoraea species. En: Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2002. 50(9), p. 2548-2555.

**[58]** WANG, S. y VIPULANANDAN, C. Biodegradation of naphthalene-contaminated soils in slurry barriers. En: Journal of Environmental Engineering. 2001. 127(8), p. 748-754.

**[59]** KARAMANEV, D.; MARGARITIS, A. y CHONG, N. The application of ore immobilization to the bioleaching of refractory gold concentrate. En: International Journal of Mineral Processing. 2001. 62(1-4), p. 231-241.

**[60]** GILCREASE, P. C.; MURPHY, V. G. y REARDON, K. F. Simultaneous grinding and dissolution of TNT solids in an agitated slurry. En: AIChE Journal. 2001. 47(3), p. 572-581.

**[61]** VILLEMUR, R. Et-al. Two-liquid-phase slurry bioreactors to enhance the degradation of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons in soil. En: Biotechnology Progress. 2000. 16(6), p. 966-972.

## BIBLIOGRAFÍA

ANDI. Colombia: Balance 2012 y perspectivas 2013. {En línea} {Diciembre de 2013} Disponible en: (<http://www.larepublica.co/sites/default/files/larepublica/andi.pdf>)

ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos). Producción Fiscalizada de crudo 2014. {En línea} {Enero 15 de 2015} Disponible en: (<http://www.anh.gov.co/Operaciones-Regalias-y-Participaciones/Sistema-Integrado-de-Operaciones/Paginas/Estadisticas-de-Produccion.aspx>)

BANCO DE LA REPUBLICA. Evolución de la Balanza de pagos Enero-Marzo 2013 {en línea}. {10 de mayo de 2014} Disponible en: (<http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/paginas/I-Trim-2013.pdf>)

BENAVIDES LÓPEZ, Joaquín; QUINTERO, Gladys. Et al. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. En: NOVA. Enero-Junio de 2006. ISSN 1749-2470. Vol. 4. Pág. 82-90.

BONELL ROSALBA, Sheyla. Petróleo y la biotecnología: Análisis del estado del arte y las tendencias. {En línea}. {15 de Junio de 2014} disponible: {[http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S102494352009000100003&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S102494352009000100003&script=sci_arttext&tlng=pt)}

CARVAJAL ORTIZ, L.H., JARA GUTIÉRREZ, F. Aspectos técnicos sobre derrame de crudo. Bucaramanga. 2005, p.1-435. Tesis de grado. (Ingeniero de Petróleos) Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímica.

CASTELLANOS, Roberto Ariel. Situación del mercado mundial del Petróleo {En línea}. {11 de Junio de 2014} Comisión Nacional de Energía atómica. Boletín energético No 14. Disponible [www.cnea.gov.ar/pdfs/boletin\\_energetico/14/castellano.pdf](http://www.cnea.gov.ar/pdfs/boletin_energetico/14/castellano.pdf)

COLOMBIA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Resolución 0782. 2008, 16 de mayo. "Por lo cual se ordena la apertura de una investigación, y se toman otras determinaciones" Disponible en: [http://www.anla.gov.co/documentos/res\\_0782\\_160508.pdf](http://www.anla.gov.co/documentos/res_0782_160508.pdf). Bogotá 2008. p.1-6

CONCETTA TOMEI, M. Et al. Ex situ remediation of polluted soils by absorptive polymers, and a comparison of slurry and two-phase partitioning bioreactors for ultimate contaminant degradation. En: Journal of Hazardous Materials. Agosto de 2013. Vol. 262, p 31-37.

CUEVAS GONZALES, B. G. Remoción de Hidrocarburos policíclicos Aromáticos (HPA's) utilizando reactores de suelos activados inoculados biológicamente. Tesis de Maestría. México D.F. Zacatenco. 2008 p 1-141. Instituto Politécnico Nacional, Escuela superior de ingeniería y Arquitectura. Sección de estudios de Post-grado.

DORRONSORO FERNANDEZ, Carlos. Descontaminación de suelos: Técnicas biológicas.{En línea} {10 de marzo de 2014}. Disponible en: (<http://edafologia.ugr.es/desconta/bioremediacion.pdf>.)

ECOPETROL. Barril con Fondo. En: Carta Petrolera. No 112. (Septiembre-Octubre de 2005) p. 1-68

EL TIEMPO. Emergencia por derrame de crudo en Casanare. {En línea} {1 de Diciembre de 2014} Disponible en: (<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-14917116>)

EPA. Cost and Performance Report: Slurry-Phase Bioremediation at the French Limited Superfund Site Crosby, Texas {En Línea} {5 de Enero de 2015}. Disponible en: <http://clu-in.org/products/costperf/BIOREM/French.htm>

EPA. Remediation case studies and Technology Assessments fact sheet. {En línea} {10 de Julio de 2014} disponible en: {<http://www.epa.gov/tio/download/frtr/epa542f05004.pdf>}

EPA. Slurry Phase Bioremediation at the Southeastern wood Preserving Superfund Site, Canton., Mississipi { En línea} {Marzo de 1994}. Disponible en : <file:///C:/Users/ServidoMiranet/Downloads/Southeastern%20Slurry%20Bioreactors%20Full%20%20Scale.PDF>

ESCORCIA OTÁLORA, Tatiana Alexandra. Análisis bibliométrico como herramienta para el seguimiento de publicaciones científicas, tesis y trabajos de grado. Santa Fe de Bogotá. 2008, p 1-61. Trabajo de grado de Microbiología Industrial. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias.

FERRARA-CERRATO, Ronald; ROJAS-AVELIZAPA, Norma. POGGI-VARALDO, Héctor Et al. Procesos de Biorremediación de suelo y Agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. En: Revista Latinoamericana de Microbiología. Abril-Junio 2006. Vol., 48, No 2 p 179-187.

GOMEZ, Helena; DIAS-FERREIRA, Celia y RIBEIRO, Alexandra. Overview of in situ and ex situ remediation technologies for PCB-contaminated soils and sediments and obstacles for full-scale application. En: Science of the total Environment. 28 de Noviembre 2013, Vol. 445-446. p. 237-260

INFANTE, Carmen. Biorrestauración de Áreas impactadas por crudo por medio de intebios y Biorize. En: Interciencia. Octubre 2001 Vol. 26 No 10, p. 504-507

KHAN, Faisa; TAHIR, Husain y HEJAZI, Ramzi. An overview analysis of site remediation technologies. En: Journal Environmental Management. Febrero de 2004, Vol 71, p. 95-122

ÑUSTES CUARTAS, Diana Cristina. Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible. Pereira, 2012. p. 1-113. Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales.

PARDO, J.; PERDOMO, M. y BENAVIDES, J. Efecto de la Adición de fertilizantes Inorgánicos Compuestos en la Degradación de Hidrocarburos en Suelos Contaminados con Petróleo. En: NOVA. Enero-Diciembre 2004. Vol.2, No 2; p 41-49

PORTAFOLIO.COM. El Petróleo es uno de los principales retos para Colombia. {En línea} {Octubre 9 de 2014} Disponible en: (<http://www.portafolio.co/economia/petroleo-problema-colombia-octubre-2014>)

R.AP, Thomas; D.E Hugues y P, Daly. The use of slurry phase bioreactor technology for the remediation of coal tars. En: Land Contamination & reclamation. 2006. Vol 14. Número 2, p. 235-241

REDACCIÓN CÚCUTA. Emergencia en Barrancabermeja por derrame de crudo. Diario el Tiempo. Disponible en: ([http://www.eltiempo.com/colombia/oriente/ARTICULO-WEB-NEW\\_NOTA\\_INTERIOR-12053083.html](http://www.eltiempo.com/colombia/oriente/ARTICULO-WEB-NEW_NOTA_INTERIOR-12053083.html)). 21 de Julio de 2012.

ROBLES GONZALES, Ireri; FAVA, Fabio y POGGI-VARALDO, Héctor. A review on Slurry biorreactors for bioremediation of soils and sediments. En: Microbial Cell Factories. Doi: 10.1186/1475-2859-7-5, p. 1-16.

SECRETARIA DE ENERGIA DE MEXICO. Perspectiva del Petróleo Crudo y Petrolíferos 2013-2027. {En línea} {Mayo de 2013} Disponible en: ([http://sener.gob.mx/res/PE\\_y\\_DT/pub/2013/Prospectiva\\_de\\_Petroleo\\_y\\_Petroliferos\\_2013-2027.pdf](http://sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2013/Prospectiva_de_Petroleo_y_Petroliferos_2013-2027.pdf))

TA-CHEN, Li; PO-TSEN, Pan y SHEN-SHUNG, Cheng. Ex-situ bioremediation of oil-contaminated soil. En: Journal of Hazardous Materials. 2010 Vol. 176, p. 27-34.

TORRES DELGADO, Katherine. ZULUAGA MONTOYA, Tatiana. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, Trabajo de grado. Universidad Nacional, Medellín, Colombia. 2009, p. 1-92

UNITED STATE PATENT. Bio-slurry reaction system and process for hazardous waste treatment. Inventor: Frank J. Castaldi. Int.CI C02F 3/34.USA. Número de Patente: 5'232.596. Fecha de solicitud: 7 de Octubre de 1991.

UNITED STATES PATENT. System and methods for biodegradations of compunds. Inventor: George E. Pierce; Lebanon N.J. int CI B09B/00. Número de Patente 5'688.685. Fecha de solicitud: 18 de Noviembre de 1995.

UPME. Cadena del Petróleo 2013. {En línea}. {15 de Enero de 2015} Disponible en: ([http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/news/3086/files/cadena\\_del\\_petroleo\\_2013.pdf](http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/news/3086/files/cadena_del_petroleo_2013.pdf))

VARGAS GALLEGGO, Paola; CUELLAR, René y DUSSAN, Jenny. Biorremediación de residuos del Petróleo. En: Hipótesis. Diciembre de 2004. Vol. 4, p. 44-49

VENKATA MOHAN, S, Et al. Ex situ bioremediation of pyrene contaminated soil in bio-slurry phase reactor operated in periodic discontinuous batch mode: influence

of bioaugmentation. En: International Biodeterioration & Biodegradation. 8 de Marzo de 2008.Vol 62, p. 162-169.