

04-016

BIOREMEDIATION OF HYDROCARBON CONTAMINATED SOILS THROUGH BIOSTIMULATION WITH SEWAGE SLUDGE - PILOT SCALE EXPERIMENTATION

Ruiz Martínez, Stephanie Sabrina ⁽¹⁾; Vega Guzmán, Álvaro ⁽¹⁾; Angulo Reyes, María Rosalva ⁽¹⁾; Leigue Fernández, María Alejandra ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Católica Boliviana. Centro de Investigación de Ingenierías y Ciencias Exactas

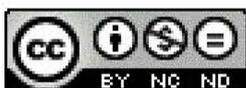
In the last decade, Bolivia has consolidated its position as one of the main producers of hydrocarbons and their derivatives, but due to hydrocarbon activities, large oil spills have occurred throughout the country, affecting the flora, fauna, soil and water in different regions. Soil alterations caused by oil spills and/or its derivatives, caused accidentally or by bad practices, affect the physicochemical and biological properties of the soil, irretrievably degrading it. The objective was to evaluate in a pilot scale experiment, the results of the use of sewage sludge in the bioremediation process of soils contaminated with hydrocarbons and/or their derivatives. The experiment lasted 90 days and consisted of 7 plots of contaminated soil to which stabilized sludge was added at concentrations of 0%, 30%, 50% and 70%, all with a duplicate except for the 0% treatment. Total heterotrophs, nitrates, phosphates and TPH were evaluated monthly in each plot. The results were satisfactory in terms of TPH removal, especially in the plot containing 30% sewage sludge and 70% contaminated soil; this plot obtained a minimum of 42.9% removal of the contaminant.

Keywords: biostimulation; sewage sludge; contaminated soils; hydrocarbons

BIOREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS A TRAVÉS DE BIOESTIMULACIÓN CON LODOS RESIDUALES - EXPERIMENTACIÓN A ESCALA PILOTO

En la última década, Bolivia se ha consolidado como uno de principales productores de hidrocarburos y sus derivados, pero debido a las actividades hidrocarburíferas se produjeron grandes derrames de hidrocarburos a lo largo del territorio, afectando la flora, fauna, suelo y agua de diferentes regiones. Las alteraciones en los suelos a causa de derrames de petróleo y/o sus derivados, provocados de forma accidental o por malas prácticas, afectan las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, degradándose irremediablemente. El objetivo ha sido evaluar en un experimento a escala piloto, los resultados del uso de lodos residuales en el proceso de Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos y/o sus derivados. El experimento tuvo una duración de 90 días y consistió en montar 7 parcelas de suelo contaminado a las cuales se le agregó lodo estabilizado en concentraciones de: 0%, 30%, 50% y 70%, todos con un duplicado a excepción del tratamiento de 0%. En cada parcela se evaluó mensualmente heterótrofos totales, nitratos, fosfatos y TPH. Los resultados fueron satisfactorios en cuanto a la remoción de TPH, especialmente en la parcela que contenía 30% lodo residual y 70% de suelo contaminado, esta parcela obtuvo un mínimo de 42,9% de remoción del contaminante.

Palabras clave: bioestimulación; lodos residuales; suelos contaminados; hidrocarburos



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. INTRODUCCIÓN

La historia del sector petrolero en el mundo es reciente, apenas ha pasado siglo y medio (1859) desde que se perforó el primer pozo en Estados Unidos. Sin embargo, a partir de 1900 los hidrocarburos se han convertido en el principal motor energético de la industria mundial. En la actualidad el transporte y la industria dependen de esta fuente de energía. (CEBID, 2010).

Las actividades industriales en las que se hace uso de hidrocarburos producen grandes alteraciones en los suelos a causa de derrames de petróleo y/o sus derivados, ya sean provocados de forma accidental o por malas prácticas, resultando ser uno de los mayores problemas ambientales en la actualidad. La principal consecuencia es la afectación de las propiedades fisicoquímicas del suelo, llegándose a producir la degradación de este.

La contaminación por hidrocarburos es dinámica, los componentes individuales pueden separarse de la mezcla original: los compuestos orgánicos volátiles (COVs) se evaporan, algunos se solubilizan gracias a la polaridad de las moléculas, otros se absorben en la superficie de la fase sólida del suelo por reacciones químicas o debidos a fuerzas físicas (siendo la primera, la que fija los contaminantes, limita el transporte y disminuye la biodisponibilidad para los microorganismos), mientras otros componentes son degradados fácilmente por microorganismos (Eweis, Ergas, Chang, & Schroeder, 1999).

Existen diversas técnicas para rehabilitar suelos contaminados, algunas con un costo económico más elevado que otras, estas técnicas pueden ser: fisicoquímicas, térmicas, biológicas o mixtas, siendo las dos primeras de un costo económico considerable.

En la actualidad, hay un interés creciente por los métodos de recuperación biológicos ya que prometen tecnologías más sencillas, menos costosas y respetuosas con el medio ambiente que otros tratamientos, conocidas como técnicas de Biorremediación. (Ortiz Bernad, Sanz García, Dorado Valiño, & Villar Fernández, 2006), las cuales han cobrado gran importancia ya que representan una alternativa eficiente para la recuperación de los ecosistemas impactados (Ortiz, y otros, 2005)

La biorremediación está referida al conjunto de metodologías que utilizan microorganismos o partes de ellos para degradar o neutralizar sustancias tóxicas, transformándolas en sustancias menos tóxicas o convirtiéndolas en inocuas (Brutti, Beltrán, & García de Salamone, 2018) y (López de Mesa, y otros, 2006). Los procesos de biorremediación se clasifican en técnicas de bioestimulación y bioaumentación (Ortiz, y otros, 2005). La técnica de bioestimulación consiste en la adición de nutrientes y un aceptor de electrones (oxígeno) como complementación del medio en el cual se encuentran los microorganismos, logrando acelerar el crecimiento y desarrollo de organismos capaces de biodegradar los contaminantes del medio (Gallego, y otros, 2006) y (Ortiz, y otros, 2005). La bioaumentación es una técnica donde se inocula el sistema con uno o varios microorganismos exógenos o endógenos apropiados. La bioestimulación es la técnica más empleada para reducir la concentración de contaminantes (Gómez, Gaviria, & Cardona, 2009)

Científicos y grupos de profesionales interesados en la recuperación de un suelo contaminado por derrame de crudo, han determinado que ciertos microorganismos, en especial bacterias, pueden utilizar los hidrocarburos como alimento y fuente de energía. Algunas investigaciones demostraron que los microorganismos eran responsables de la descomposición, oxidando el

petróleo a dióxido de carbono, agua y energía. (Fernández , Llobregat, Jiménez, Altomare, & Labrador, 2008)

Existen reveladoras evidencias de que la adición de composta madura puede emplearse de manera exitosa y económica para la limpieza de sitios contaminados con hidrocarburos (Riancho Sauri & Castillo Borges, 2002).

Los lodos residuales se obtienen del resultado de la transformación microbiológica de la materia orgánica del proceso tratamiento de las aguas residuales, constituidos principalmente por partículas minerales finas y gran cantidad de materia orgánica (Alcañiz, Ortiz, & Carabassa, 2009).

Para que los lodos puedan disponerse en un medio de forma inocua es necesario someterlos a un tratamiento dirigido a reducir el contenido humedad y por consiguiente el volumen de estos, lo que representa una reducción de patógenos, eliminar el nivel de putrefacción y los olores desagradables (METCALF & EDDY, 1995). Al utilizar lodos estabilizados como fuente de nutrientes y con condiciones necesarias para el crecimiento microbiano, que promuevan la recuperación del suelo contaminado por hidrocarburos y sus derivados, se le está dando un uso con valor agregado a dichos lodos y así mismo rehabilitando el suelo contaminado por hidrocarburos y sus derivados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar a través de una experimentación a escala piloto los resultados del uso lodos residuales en el proceso de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos y/o sus derivados, a través de bioestimulación, para minimizar la contaminación en suelos afectados por derrames hidrocarburíferos y realizar una adecuada disposición de lodos.

2.2 Objetivos Secundarios

- Recolectar, estabilizar y clasificar lodos residuales provenientes de las lagunas de oxidación de San Luis, mediante análisis de laboratorio y una técnica natural de secado, para reducir los microorganismos patógenos y lograr que el lodo sea apto para su disposición en suelos.
- Recolectar y caracterizar el suelo a través de análisis químicos, microbiológicos y granulométricos en laboratorio, para determinar las condiciones iniciales del suelo antes y después de ser contaminado.
- Recrear suelo contaminado con hidrocarburos derivados: gasolina de alto octanaje y diésel, para posteriormente aplicar el proceso de biorremediación.
- Evaluar el proceso de biorremediación con lodos residuales, a través del monitoreo y análisis de laboratorio, determinando el grado de remoción de TPH (Hidrocarburos Totales de Petróleo) en los suelos de estudio.

3. METODOLOGÍA Y/O CASO DE ESTUDIO

La presente investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Católica Boliviana - Sede Tarija, donde se propuso aplicar a escala piloto el método de biorremediación a través de bioestimulación con lodos residuales estabilizados en 7 parcelas tipo que contenían suelo caracterizado previa y posteriormente contaminado con hidrocarburos y/o sus

derivados, en este caso gasolina y diésel; experimentación que tuvo una duración de noventa días.

El porcentaje de adición de lodo fue el siguiente: la primera parcela A0 tuvo 0% de contenido de lodo estabilizado; las siguientes 30A y 30B con 30%, las parcelas 50A y 50B con 50% y, por último, 70A y 70B con 70% de lodo. De esta manera se pudo evaluar la biodegradación de TPH en suelo que contenía estas tres diferentes concentraciones de lodo residual estabilizado y contrastar con la de control (0%).

Se tomaron muestras mensuales de diferentes parámetros: nitratos, fosfatos, heterótrofos totales e hidrocarburos totales de petróleo (TPH).

Se aplicó riego y labranza manual cada dos días para mantener las condiciones óptimas de humedad y aireación.

La investigación es de tipo experimental controlada y semicuantitativa, en la cual el factor a controlar y cuantificar es la degradación de TPH.

Se presentaron tres tipos de variables en la investigación experimental: variables independientes, variables dependientes y variable interviniente (ver tabla 1 y 1a).

Tabla 1: Operacionalización de variables en la aplicación del Proceso de Biorremediación a Escala Piloto.

Tipo de Variable	Variable	Dimensiones	Indicadores	Técnicas e Instrumentos
Variable Independiente	Cantidad de Lodo Residual Estabilizado agregado como Bioestimulante al suelo contaminado.	Porcentaje de Lodo/Suelo contaminado.	Cantidad en Kilogramos.	Pesaje.
Variable Dependiente	Grado de Biorremediación del Suelo contaminado con Hidrocarburos y/o sus derivados	Incremento de Heterótrofos Totales. Remoción del contaminante (Hidrocarburo)	Numero de UFC (Unidades Formadoras de Colonias) Cantidad de TPH (Hidrocarburos Totales de Petróleo)	Recuento en placa. Espectrofotometría.

Tabla 1a: Variable Interviniente proceso de Estabilización de Lodos.

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Técnicas e Instrumentos
Grado de Estabilización del Lodo	Grado de reducción del contenido de humedad, patógenos y olores en el lodo residual.	Humedad	% de humedad en el lodo	Gravimetría
		Patógenos	Número de UFC de <i>Escherichia coli</i> .	Recuento en placa
		pH	Escala de pH (ácido-base)	Potenciometría
		Conductividad	μS/cm	Conductimetría
		Metales pesados	Cantidad por mg/l	Digestión ácida /Espectrofotometría
		Nitrógeno	Cantidad por mg/l	Espectrofotometría
		Fósforo	Cantidad por mg/l	Espectrofotometría
		DBO DQO	Cantidad por mg/l Cantidad por mg/l	Método respirométrico Digestión

Nota: Elaboración Propia

3.1. Estabilización de Lodos Residuales.

Se recolectó lodo residual procedente de las Lagunas de Oxidación de San Luis y fue estabilizado con una técnica natural de secado durante aproximadamente 31 días en un lecho de secado para posteriormente ser utilizado como bioestimulante en el proceso de Biorremediación.

El lodo residual fue estabilizado y posee un valor de pH dentro del rango 7-9 por lo cual no es necesario un proceso adicional de estabilización, el valor de pH es apto para la rehabilitación de suelos.

Posteriormente fue clasificado según los requerimientos de la (EPA, 1995) para biosólidos que incluye reducción de patógenos y límite de concentración para metales pesados, se realizaron análisis de laboratorio antes y después del proceso de estabilización y se clasificó a los lodos como biosólidos de calidad excepcional (Clase A), por lo que puede ser utilizado en la rehabilitación de suelos sin restricciones, debido a que los valores de metales pesados para Cobre (Cu) se encuentran muy por debajo del límite de concentración para lodos de calidad excepcional de la EPA.

Durante el proceso de estabilización se aplicó labranza manual cada dos días para evitar la acumulación de humedad en áreas específicas, ver fotografía 1.

Fotografía 1: Lodo en proceso de estabilización.



Nota: Elaboración Propia

3.2. Recolección y caracterización granulométrica del Suelo

Se recolectó suelo proveniente de un sitio accesible, San Pedro de Sola de la ciudad de Tarija, en cantidad aproximada de 25 kilogramos.

Posteriormente en el laboratorio de suelos se procedió a realizar la caracterización granulométrica según normas ASTM. La caracterización granulométrica se realizó con un juego de tamices ASTM: 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10, N°40 y N°200.

Se pesó 1000 gramos de suelo previamente seco y se procedió a tamizar la muestra.

Tomando en cuenta la fracción de arena (76.3%) y limo (10.25%), según la clasificación del diagrama triangular de clases texturales USDA (FAO, s.f.), el suelo es de tipo **Areno Franco**.

Así mismo, se realizaron análisis de nutrientes del suelo sin contaminar, los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Análisis de Nutrientes en el suelo sin contaminar.

Parámetro	Valor	Unidad
Nitrógeno	4700	mg/kg
Fósforo	859	mg/kg

Nota: Elaboración Propia

3.3. Recreación del suelo contaminado

El suelo ya caracterizado fue contaminado con ayuda de gasolina de alto octanaje y diésel, en las proporciones indicadas en la tabla 3.

Tabla 3: Cantidades usadas para Recreación del Suelo Contaminado

Gramos de Suelo sin contaminar	Miligramos de Gasolina de alto octanaje	Miligramos de Diésel	Concentración final de TPH en la muestra
995	2500	2500	5000 ppm

Nota: Elaboración Propia

Se contaminaron aproximadamente 25 kg con una concentración de TPH de 5000 ppm.

3.4. Preparación de muestras para Escala Piloto.

Las cantidades de lodo estabilizado y suelo contaminado requeridas para cada cubeta son de 5 kilogramos y se presentan en la tabla 4.

Tabla 4: Contenido de lodo y suelo en parcelas experimentales.

N° Parcela	% Lodo	Lodo (kg)	Suelo (kg)
1 (0 _A)	0	0	5
2 (30 _A)	30	1.5	3.5
3 (30 _B)	30	1.5	3.5
4 (50 _A)	50	2.5	2.5
5 (50 _B)	50	2.5	2.5
6 (70 _A)	70	3.5	1.5
7 (70 _B)	70	3.5	1.5

Nota: Elaboración Propia

3.5. Aplicación y seguimiento del proceso de biorremediación a través de bioestimulación con Lodos.

Se aplicó el proceso de biorremediación a través de bioestimulación con lodos residuales estabilizado, iniciando con el rotulado de cada parcela con las siguientes etiquetas: 0A, 30A, 30B, 50A, 50B, 70A y 70B, luego se pesó las cantidades correspondientes de lodo estabilizado y de suelo contaminado. Se distribuyó las cantidades calculadas en la tabla 4 para cada parcela (previamente rotuladas) y se procedió con la mezcla de suelo y lodo.

Se aplicó riego y labranza manual cada dos días para mantener las condiciones óptimas de humedad y aireación, ver fotografía 2.

Fotografía 1: Parcela 30A.



Nota: Elaboración Propia

3.6. TPH (hidrocarburos Totales de Petróleo)

Los TPH son una mezcla de productos químicos individuales compuestos principalmente de hidrógeno y carbono (hidrocarburos) que han sido divididos en grupos de hidrocarburos de petróleo que se comportan en forma similar en el suelo o en el agua. Para el inicio de la experimentación se ha definido la concentración de TPH en cada parcela, ver tabla 5.

Tabla 5: Contenido de lodo y suelo en parcelas experimentales.

N° Parcela	Concentración	Unidad
0A	5000	ppm
30A	3500	ppm
30B	3500	ppm
50A	2500	ppm
50B	2500	ppm
70A	1500	ppm

Nota: Elaboración Propia

Se utilizó el método Hach 10050, el cual en su protocolo indica que genera resultados por interpolaciones entre los calibradores. En este sentido, se realizó inicialmente la lectura de los calibradores TPH para poder interpretar posteriormente los resultados las lecturas de cada muestra, ver tabla 6.

Tabla6: Lectura de datos para los calibradores de TPH.

Calibrador.	Absorbancia.
20 ppm	0.300
50 ppm	0.240
100 ppm	0.190
200 ppm	0.170

Nota: Elaboración Propia

Existe una relación inversa entre la concentración de TPH y la lectura de absorbancia: Si la lectura de absorbancia de la muestra es más pequeña que la lectura del calibrador, entonces la concentración de la muestra es más grande que la lectura del calibrador y viceversa. De donde se obtienen las lecturas de absorbancia para cada parcela en la tabla 7.

Tabla 7: Lectura de absorbancia para cada parcela.

Parcela	Absorbancia.	Interpretación.
0A	0.279	Entre 2000 a 5000 ppm
30A	0.400	Menor a 2000 ppm
30B	0.322	Menor a 2000 ppm
50A	0.298	Entre 2000 a 5000 ppm
50B	0.309	Menor a 2000 ppm
70A	0.333	Menor a 2000 ppm
70B	0.319	Menor a 2000 ppm

Nota: Elaboración Propia

4. RESULTADOS

4.1. Lodo residual estabilizado

Los resultados del lodo estabilizado se muestran la Tabla 8, lo que indica que el lodo se encuentra en la clasificación de: biosólidos de calidad excepcional (Clase A), debido a que cumple con todos los requerimientos establecidos por la EPA, por lo que puede ser aplicado en la rehabilitación de suelos sin ningún tipo de restricción.

Tabla 8: Resultados de Análisis de Lodo estabilizado.

Parámetro	Valor inicial	Valor final	Unidades
% Humedad	81.20	30	-
Nitrógeno	79200	79205	mg/kg
Fósforo	12125	12130	mg/kg

Hierro (Fe)	35.72	35.72	mg/kg
Cobre (Cu)	1.68	1.69	mg/kg
Coliformes Fecales	123×10 ⁵	7×10 ²	UFC/g
Coliformes Totales	127×10 ⁵	43×10 ²	UFC/g

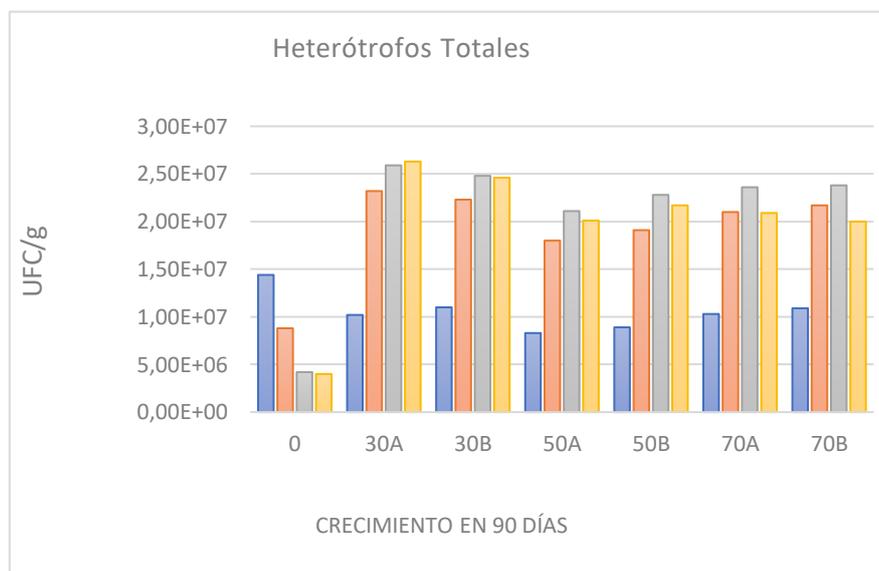
Nota: Elaboración Propia

Con los resultados de lodo estabilizado ha sido posible proceder a la preparación de las muestras lodo/suelo contaminado y proceder con la experimentación conforme a los descrito en los puntos 3.4 y 3.5. Para cada una de las parcelas se tomaron muestras mensuales de nitratos, fosfatos, heterótrofos totales y TPH.

4.2. Heterótrofos totales

Se realizó conteo de heterótrofos totales (método pour plate EPA recuento en placa en UFC unidades formadoras de colonias) durante los 90 días que duró el experimento y se evidenció la muerte de estos en la parcela sin tratamiento de lodo estabilizado (control), en las demás parcelas se observó un crecimiento exponencial, el mayor incremento de microorganismos se produjo en las parcelas 30A y 30B, estas parcelas serían también las que más reducción de TPH tuvieron, ver gráfica 1. Los resultados que coinciden con (Alcañiz, Ortiz, & Carabassa, 2009) y (Gómez, Gaviria, & Cardona, 2009) quienes indican que, en sus experimentaciones se evidenció el notable crecimiento de bacterias heterótrofas por su capacidad de utilizar los hidrocarburos (gasolina y diesel) como única fuente de carbono y energía.

Gráfica 1: Crecimiento de Heterótrofos.

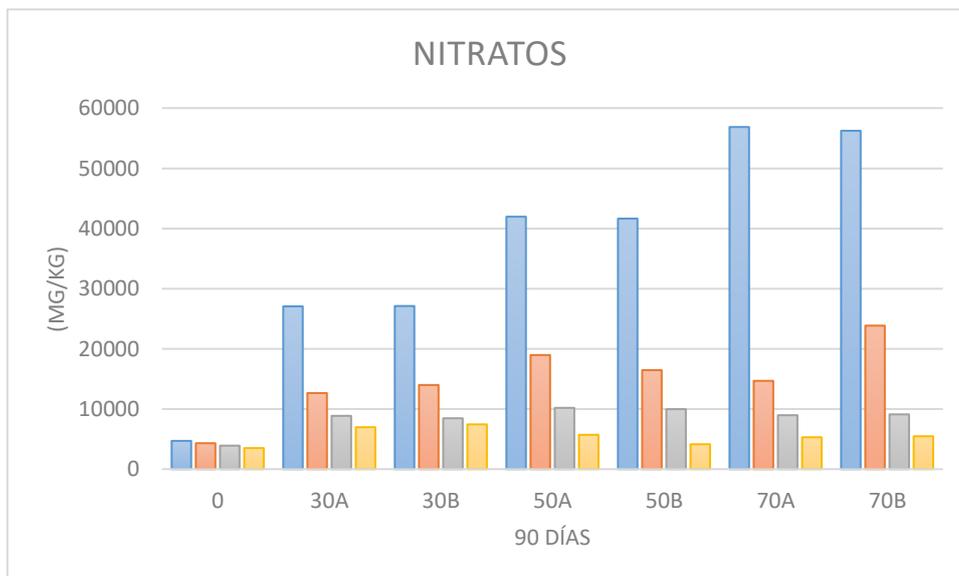


Nota: Elaboración Propia

4.3. Nitratos

Para el contenido de nitratos se utilizó el método Hach 8039. Se puede observar de la gráfica 2, que en general presento una disminución durante los 30 y 60 días, se puede observar que los microorganismos consumieron una cantidad relativamente considerable de nitratos, asociadas a la disminución de microorganismos en las diferentes parcelas dependiendo de la cantidad de lodo adicionado.

Gráfica 2: Disminución de Nitratos

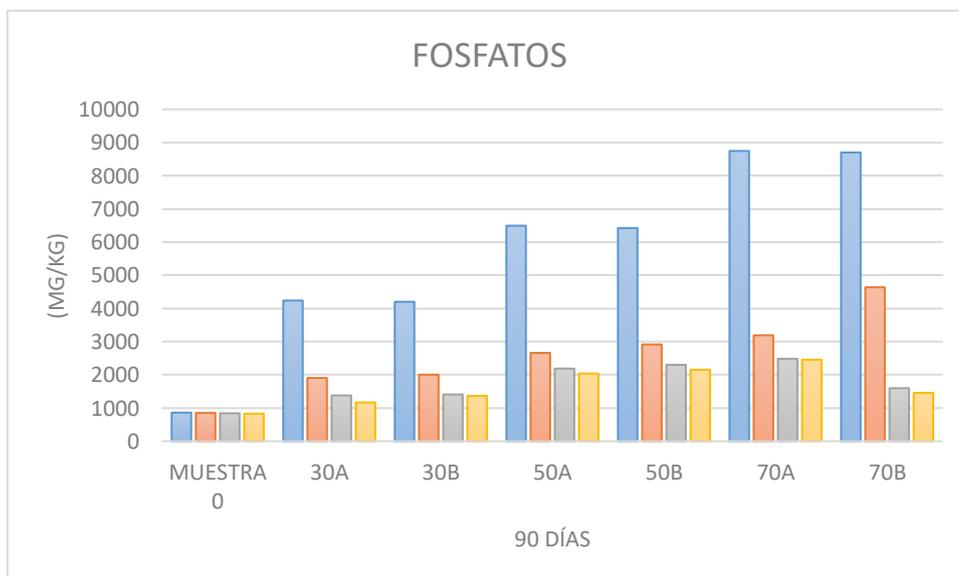


Fuente: Elaboración Propia

4.4. Fosfatos

Los fosfatos se obtuvieron por el método Hach 8156 (aprobado por EPA). En la gráfica 3 se puede observar que los fosfatos fueron consumidos principalmente en el primer mes del experimento, de manera similar a ocurrido con los nitratos.

Gráfica 3: Disminución de Fosfatos



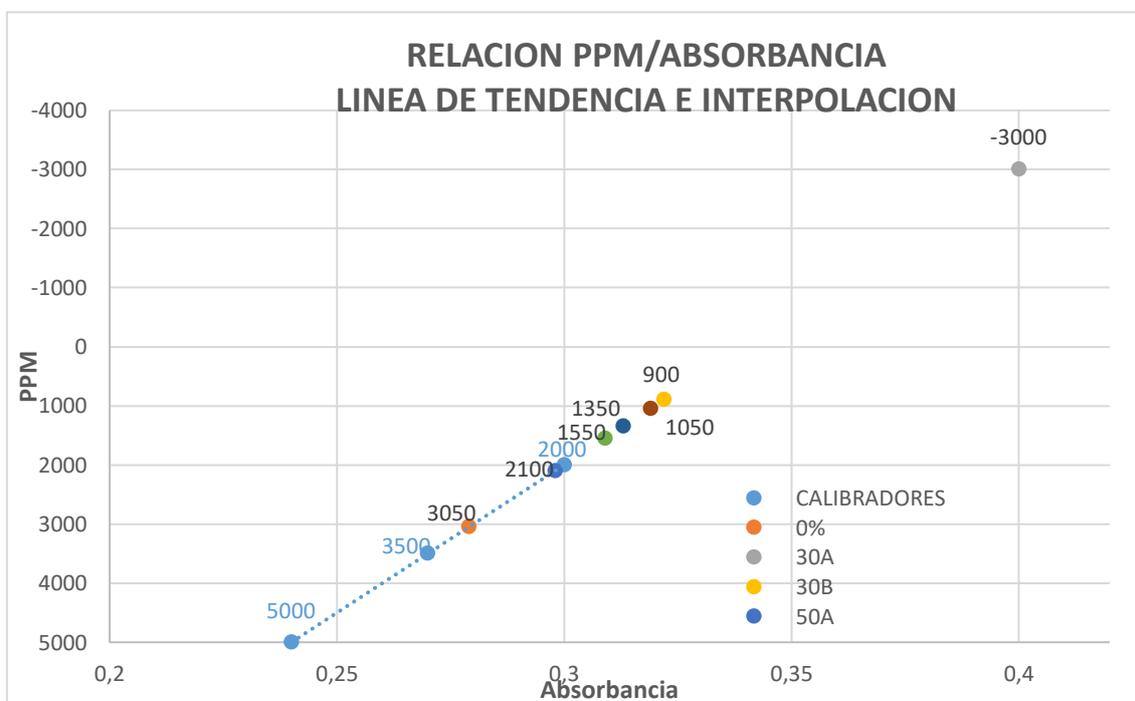
Fuente: Elaboración Propia

4.5. TPH (hidrocarburos totales de petróleo)

El TPH es el parámetro más importante de la investigación porque mide el porcentaje de remoción del contaminante y es el que representó un mayor grado de dificultad en su análisis, se utilizó el método Hach 10050, siguiendo las recomendaciones de protocolo descrito en 3.6.

La gráfica 4 mediante interpolación nos indica los valores aproximados de ppm de TPH y relacionando con la tabla 9, nos comprueba que las parcelas con mayor remoción de TPH son 30A y 30B, que tienen una concentración de TPH menor a 2000 ppm habiendo iniciado con 3500 ppm cada una, lo que quiere decir que 42.9% de la contaminación fue efectivamente retirada; sin embargo, el porcentaje real de remoción podría estar entre 42.89 y 74.28% si se toman los datos aproximados de interpolación. La parcela 50A se encuentra entre 2000 a 5000 ppm y la parcela 50B menor a 2000 ppm, ambas iniciaron con 2500 ppm. Estas últimas parcelas tuvieron una remoción efectiva del 20.4% del contaminante y si se toma en cuenta los datos de interpolación, hasta 38% de remoción. Por último, las parcelas 70A y 70B iniciaron con 1500 ppm cada una, por lo tanto, la lectura es menor a 2000 ppm y no se puede tener un valor real sobre si hubo o no remoción por la limitación del protocolo. Contrastando con (Alcañiz, Ortiz, & Carabassa, 2009) que lograron un porcentaje de 60.45 % en la reducción de los TPH con la tecnología bioestimulación pero con métodos más precisos. (Gómez, Gaviria, & Cardona, 2009) por su parte, concluyen que todas sus variantes detectaron la disminución de los hidrocarburos en el tiempo, aunque se notó menor porcentaje de remoción en la bioestimulación tradicional.

Gráfica 4: Remoción TPH



Nota: Elaboración Propia

Tabla 9: Resultados en % de remoción TPH.

Parcela.	TPH Inicial (ppm)	TPH Final (ppm).	% de Remoción
0A	5000	Entre 2000 a 5000	No cuantificable
30A	3500	Menor a 2000	42.89
30B	3500	Menor a 2000	42.89
50A	2500	Entre 2000 a 5000	No cuantificable
50B	2500	Menor a 2000	20.4

70A	1500	Menor a 2000	No cuantificable
70B	1500	Menor a 2000	No cuantificable

Nota: Elaboración Propia

5. CONCLUSIONES.

- El lodo residual fue estabilizado en el lecho de secado, cumpliendo con todos los requerimientos de la EPA para ser clasificado como biosólidos de calidad excepcional (Clase A), lo que indica que puede ser aplicado en la rehabilitación de suelos sin ningún tipo de restricción, además, que puede ser utilizado como fertilizante natural debido a su alto contenido de nutrientes.
- Se evidenció un notable crecimiento de bacterias heterótrofas demostrando así la capacidad de los microorganismos para degradar hidrocarburos en el suelo contaminado.
- En cuanto a resultados de nutrientes (nitratos y fosfatos) es indudable la disminución debido al proceso en sí, en el que se adicionó el lodo estabilizado como bioestimulante.
- Las parcelas que demostraron mayor eficiencia de remoción de TPH fueron aquellas a las que se añadió lodo estabilizado con una proporción del 30% y 70% de suelo contaminado, obteniendo un porcentaje de remoción de 42,9% como mínimo, pudiéndose obtener porcentajes más elevados.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible



6. BIBLIOGRAFÍA

- Alcañiz, J., Ortiz, O., & Carabassa, V. (2009). *Utilización de lodos de depuradora en restauración*. Cataluña-España: Agencia Cataluña del Agua.
- Brutti, L., Beltrán, M., & García de Salamone, I. (2018). *Biorremediación de los Recursos Naturales*. Buenos Aires, Argentina: INTA 1ra.Edición.
- CEBID. (2010). *cebid.org*. Obtenido de <https://www.cedib.org/wp-content/uploads/2012/09/EL-SECTOR-DE-LOS-HIDROCARBUROS-EN-BOLIVIA.pdf>
- EPA, A. d. (1995). *Manual de Gestión de Biosólidos, Norma Parte 503*. EE.UU: US EPA.
- Eweis, J., Ergas, S., Chang, D., & Schroeder, E. (1999). *Principios de Biorremediación*. Madrid.
- FAO, L. (s.f.). *fao.org*. Obtenido de https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm.
- Fernández, C., Llobregat, M., Jiménez, B., Altomare, V., & Labrador, H. (2008). Biodegradación de asfalto y resinas por microorganismos presentes en suelo contaminado con hidrocarburo. *Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela*.

- Gallego, J., Menéndez-Vega, D., Gonzáloes-Rojas, E., Sánchez, J., García-Martínez, M., & Llamas, J. (2006). Fertilizantes oleofílicos y biorremediación: Una nueva perspectiva. En A. Mendez-Villas, *Modern Multidisciplinary Applied Microbiology: Exploiting microbes and their Interactions*. John Wiley & Sons, Inc.
doi:10.1002/9783527611904
- Gómez, W., Gaviria, J., & Cardona, S. (2009). Evaluación de la bioestimulación frente a la atenuación natural y la bioaumentación en un suelo contaminado por una mezcla de gasolina-diesel. *DYNA*, 83-90.
- López de Mesa, J., Quintero, G., Guevara Vizcaino, A., Jaimes Cáceres, D., Gutiérrez Riaño, S., & Miranda García, J. (2006). Los procesos de biorremediación clasifican en técnicas de bioestimulación y bioaumentación. *NOVA*, 82-90.
- METCALF & EDDY, I. (1995). Diseño de instalaciones para el tratamiento y vertido del fango. En *Ingeniería de aguas residuales. Vertido, tratamiento y reutilización*. Madrid: McGraw-Hill.
- Ortiz Bernad, I., Sanz García, J., Dorado Valiño, M., & Villar Fernández, S. (2006). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados*. Alcalá: Base12 diseño y comunicación s.l.
- Ortiz, E., Núñez, R., Fonseca, E., Oramas, J., Almazán, V., Cabranes, Y., . . . Borges, G. (2005). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Revista Contribución a la Educación y la Protección del Medio*, 51-60.
- Riancho Sauri, M., & Castillo Borges, E. (2002). Utilización de la composta en procesos para la remoción de contaminantes. *Ingeniería*, 55-60.