

Eliminación de aceite dieléctrico con por medio de tierra fuller Removal of dielectric oil fuller's earth

Edison-Alexander Agudelo¹   Linda-Ivette Berrio¹  Oscar-Darío Beltrán¹ 
Santiago-Alonso Cardona-Gallo¹ 

¹Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia.

Resumen

Introducción. El aceite dieléctrico está clasificado como un material peligroso por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América). El aceite está compuesto principalmente de hidrocarburos nafténicos, aromáticos y parafínicos. Con el uso continuo de estos aceites en equipos de potencia como transformadores y cables, se presentan reacciones que crean depósitos en los equipos, por lo cual su re naturalización es costosa. Este artículo propone una técnica de extracción con solventes. Para lo cual se propuso una planta de tratamiento compacta que permitiría la gestión de este tipo de residuos peligrosos de manera económicamente competitiva y ambientalmente segura.

Objetivo. El objetivo de esta investigación fue desarrollar un sistema de tratamiento para tierra Fuller contaminada con aceite dieléctrico mediante extracción por solventes con etanol y TRITON para la reducción de la huella de carbono para los usuarios de la industria eléctrica.

Metodología. Se evaluaron las propiedades del disolvente, como la afinidad química y el punto de ebullición, mientras se eliminaba el contaminante. Después del tratamiento con el sistema propuesto, la tierra contaminada de Fuller cumplió con los estándares de limpieza requeridos por las regulaciones ambientales colombianas actuales. Para ello, se construyó un sistema piloto de tratamiento para probar el proceso de tratamiento de 1 kg de tierra de Fuller contaminada y evaluar la mejor alternativa encontrada en el reactor, con extracción con etanol.

Resultados. Los resultados del estudio muestran que la extracción con etanol de grado industrial (96% de pureza) eliminó la mayor cantidad de aceite dieléctrico. La cantidad en el suelo después del tratamiento promedió 0.5 ppm, el valor máximo permitido por la ley (Resolución 1170 de 1997 del Departamento de Administración Ambiental).

Conclusiones. El proceso de extracción con etanol ofrece una nueva solución para la disposición final de la tierra de Fuller contaminada con aceite dieléctrico, que hasta ahora se ha realizado mediante incineración y constituye una opción ecológica para la gestión de residuos peligrosos.

Palabras clave: Tierra fuller, extracción con disolventes, etanol, TRITON, toxicología en suelos.

Abstract

Introduction. Dielectric oil is classified as a hazardous material by the EPA (Environmental Protection Agency of the United States of America). The oil is composed primarily of naphthenic, aromatic, and paraffinic hydrocarbons. With the continuous use of these oils in power equipment such as transformers and cables, reactions occur that create deposits on the equipment, making their renaturation costly. This article proposes a solvent extraction technique. A compact treatment plant was proposed to allow for the cost-effective and environmentally safe management of this type of hazardous waste.

Objective. The objective of this research was to develop a treatment system for Fuller's earth contaminated with dielectric oil using solvent extraction with ethanol and TRITON to reduce the carbon footprint for users in the electrical industry.

Methodology. The properties of the solvent, such as chemical affinity and boiling point, were evaluated while the contaminant was being removed. After treatment with the proposed system, the contaminated Fuller's earth met the cleanup standards required by current Colombian environmental regulations. To this end, a pilot treatment system was built to test the treatment process on 1 kg of contaminated Fuller's earth and evaluate the best alternative found in the reactor, using ethanol extraction.

Results. The results of the study show that extraction with industrial-grade ethanol (96% purity) removed the greatest amount of dielectric oil. The amount in the soil after treatment averaged 0.5 ppm, the maximum value permitted by law (Resolution 1170 of 1997 of the Department of Environmental Management).

Conclusions. The ethanol extraction process offers a new solution for the final disposal of Fuller's earth contaminated with dielectric oil, which until now has been carried out by incineration, and constitutes an environmentally friendly option for the management of hazardous waste.

Keywords: Fuller's earth, solvent extraction, ethanol, TRITON, soil toxicology.

¿Cómo citar?

Agudelo EA, Berrio LI, Beltrán OD, Cardona-Gallo S. Eliminación de aceite dieléctrico con por medio de tierra fuller. Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(1)e-21115254
<https://doi.org/10.25100/iyv.v28i1.15254>

Recibido: 17/09/25

Revisado: 30/10/25

Aceptado: 12/03/26

Online: 16/03/26



Correspondencia

eaagudelo@unal.edu.co



CrossMark



OPEN  ACCESS

¿Por qué se realizó este estudio?

Este estudio se realizó porque por que la tierra fuller retiene los aceites dieléctricos de los transformadores de potencia en la industria eléctrica cuando se le realiza el mantenimiento, para minimizar el impacto de la tierra fuller se procedió a extraer el aceite dieléctrico con solventes y poder reutilizar el adsorbente.

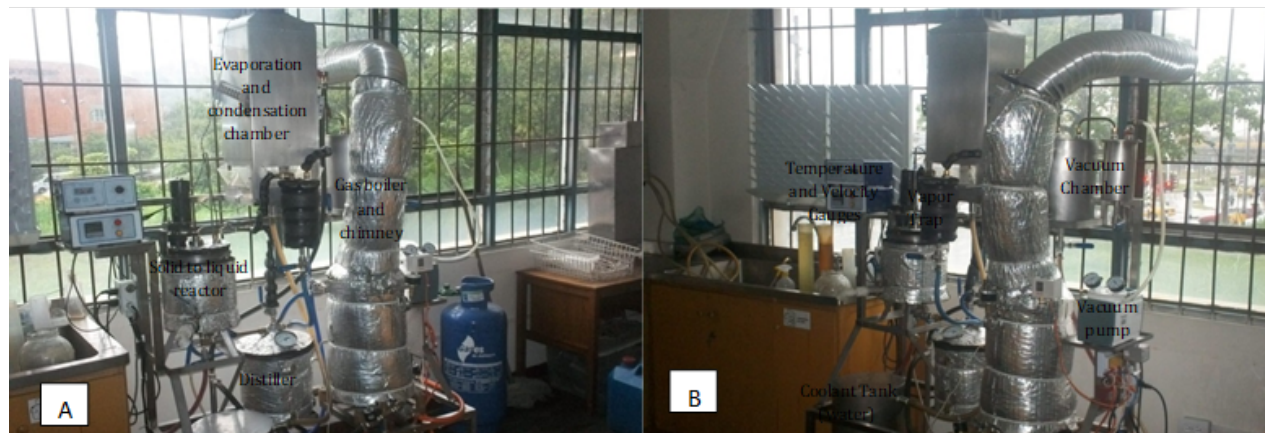
¿Cuáles fueron los hallazgos más relevantes?

El proceso de tratamiento propuesto retorna subproductos comercializables y cumple con los estándares establecidos para regular la contaminación en Colombia.

¿Qué aportan estos hallazgos?

El sistema propuesto ha demostrado ser económicamente competitivo con las técnicas actuales (incineración o revestimiento de seguridad en vertederos) y es una opción respetuosa con el medio ambiente para la gestión de residuos peligrosos.

Graphical Abstract



Introducción

El aceite dieléctrico está clasificado como material peligroso según las definiciones EPA 40 CFR 260.10, 40 CFR 260.20-260.24 de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (8), la Orden MAM 304 de 2002 de la Unión Europea (6) y el Anexo 1 del Decreto 4741 de 2005 de la ley ambiental colombiana. El aceite está compuesto principalmente por hidrocarburos nafténicos, aromáticos y parafinos. Con el uso continuado de estos aceites en equipos eléctricos como transformadores y cables, se crea una serie de reacciones químicas en las que se forman ácidos compuestos y se depositan en el lodo, lo que afecta la transferencia de calor del equipo al medio ambiente y disminuye la vida útil del transformador. El aceite dieléctrico debería cambiarse para seguir siendo efectivo, pero es una opción costosa o debe regenerarse para eliminar impurezas. En busca de una solución adecuada al problema de los residuos generados en la regeneración del aceite dieléctrico, la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín ha presentado diversos estudios (1), (2) que han contribuido al éxito del sistema de tratamiento presentado en este artículo. La técnica de extracción con disolventes se basa en transferir la sustancia de interés del sólido al disolvente utilizado en el lavado como un tratamiento relativamente asequible (13). Se evaluaron diferentes disolventes, incluidos solventes orgánicos y tensioactivos, en el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos. Se eligieron aceites vegetales como una opción respetuosa con el medio ambiente debido a su bajo coste, no toxicidad y biodegradabilidad, y devolvieron resultados igual de eficientes que los obtenidos con otros disolventes y tensioactivos. Los ácidos grasos presentes en estos aceites actuaban de manera similar a los tensioactivos sintéticos, permitiendo la fuerte absorción de compuestos hidrofóbicos como los hidrocarburos poliaromáticos (HAP) (7). Los tensioactivos son sustancias químicas que se utilizan como disolventes en diferentes lavados. Estos disolventes poseen la capacidad de modificar sus propiedades fisicoquímicas dependiendo del medio en el que se encuentren, ya que sus estructuras contienen una parte hidrofóbica, apolar, así como una parte hidrofóbica, polar, (4), (9). Su dualidad estructural permite a estos disolventes orientarse en medios con diferentes polaridades y solubilizar compuestos hidrofóbicos. Los biosurfactantes también forman parte de este grupo de sustancias. Son producidos por diferentes levaduras y bacterias con una variedad de estructuras químicas, desde ácidos grasos simples hasta estructuras complejas como glicolípidos, lipopéptidos, lipopolisacáridos y fosfolípidos (3). La baja tensión interfacial, la concentración micelar crítica (CMC) y las temperaturas estables son características de estos compuestos (16). Además de reducir la tensión superficial, los tensioactivos también contribuyen a aumentar la biodisponibilidad del contaminante destinado a la extracción y a solubilizar el resto que queda en el sólido. Las características del suelo como el pH, el tamaño de las partículas, la permeabilidad y los contaminantes absorbidos son factores que afectan la eliminación de los contaminantes (9). Por tanto, elegir un tensioactivo adecuado y aplicarlo en la concentración adecuada es, por tanto, un factor crítico en la implementación de técnicas de remediación y presenta un efecto significativo en la eficiencia y el coste del tratamiento (16).

El estudio preliminar presentó los siguientes resultados: No existe una solución viable de mercado para el tratamiento de residuos peligrosos en Colombia. La técnica de manejo más utilizada es la incineración. La ignorancia sobre la naturaleza peligrosa de los residuos dieléctricos persiste entre ciertos gestores y productores; lo consideran inofensivo e inocuo (1). Se conoce poco sobre los estándares de responsabilidad civil no contractuales, lo que abre la puerta a posibles demandas

por parte de posibles víctimas de residuos peligrosos mal gestionados, incluso cuando dicha gestión la lleva a cabo un tercero respaldado por las autoridades medioambientales. La producción de este tipo de residuos (tierra de Fuller contaminada con aceite dieléctrico) está creciendo en Colombia porque la industria energética está en auge y seguirá haciéndolo a menos que surja una nueva tecnología para refrigerar y aislar sistemas eléctricos. Los empresarios y emprendedores del sector energético están tomando conciencia de que deben proteger el medio ambiente y que sus actividades pueden afectarlo negativamente, por lo que están abiertos a la idea de tecnologías alternativas para el tratamiento de aceites dieléctricos que sean tanto seguras como asequibles. Los hidrocarburos que componen el aceite dieléctrico se consideran peligrosos porque presentan características adversas para la salud humana y del ecosistema. El hexano es un disolvente orgánico que posee las características físicas y químicas adecuadas para extraer petróleo presente en la tierra de Fuller, aunque en Colombia, la Dirección Nacional de Estupefacientes (DNE; Dirección Nacional de Narcóticos) restringe su uso. Poner en marcha una planta de tratamiento basada en la extracción con disolventes requiere la obtención de permisos especiales de la autoridad ambiental responsable, lo que podría ser un factor limitante en la aplicación de la tecnología propuesta. El proceso de extracción con disolventes limpia la tierra de Fuller contaminada, pero el material no se recupera completamente debido a la pérdida de aluminio durante el intercambio iónico.

Los hallazgos previos se tuvieron en cuenta para diseñar un sistema piloto de tratamiento para la tierra de Fuller contaminada con aceite dieléctrico que utilice métodos de tratamiento alternativos a la incineración. El diseño incluía dos conjuntos de objetivos. La primera fue evaluar qué disolvente eliminaba mejor el contaminante dieléctrico del petróleo del suelo. Los resultados de esta parte del estudio muestran que la extracción con etanol de grado industrial (pureza del 96%) eliminó la mayor cantidad de aceite dieléctrico; la cantidad en el suelo tras el tratamiento fue de 0,5 ppm, el valor máximo permitido por la ley (Resolución 1170 de 1997 del Departamento de Administración Ambiental). Además, se demostró que la extracción con etanol es económicamente competitiva con la incineración. El segundo objetivo era diseñar un sistema de tratamiento económicamente viable capaz de completarse con incineración en el mercado. Para ello, se construyó un sistema piloto de tratamiento para probar el proceso de tratamiento con 1 kg de tierra contaminada de Fuller y evaluar la mejor alternativa encontrada en el reactor. Finalmente, se propuso un posible plan para una planta de tratamiento a tamaño completo que permitiría gestionar este tipo de residuos peligrosos de manera económicamente competitiva y ambientalmente segura.

El objetivo de esta investigación era desarrollar un sistema para tratar la tierra contaminada de Fuller utilizando una técnica de extracción de aceite dieléctrico con disolventes, etanol y TRITON.

Materiales y métodos

Materiales y reactivos

La metodología de investigación presenta el sistema de tratamiento para suelos de Fuller contaminados con aceite dieléctrico mediante una técnica de extracción con disolvente, reactivo de etanol de grado industrial y los tensioactivos TRITON X114 y TRITON X100. El reactivo de etanol de grado industrial y los tensioactivos TRITON X114 y TRITON X100 fueron adquiridos en un proveedor local de productos químicos. Un medidor de energía KILL A WATT TM, una placa térmica analítica

científica Velp y un cronómetro se utilizaron para construir el sistema piloto de extracción de 1 kg de tierra contaminada de Fuller.

Condiciones analíticas

Se muestran los factores determinantes que influyen directamente en las propiedades físicas y químicas de la solución disolvente en el proceso de extracción. La temperatura, este parámetro es de suma importancia en el proceso de extracción, ya que se ha demostrado que cuanto mayor es la temperatura, mejor se solubiliza el aceite dieléctrico (5), (1). Por tanto, en este experimento se variaron las temperaturas entre la temperatura ambiente del laboratorio (aproximadamente 22°C-24°C) y 70°C.

Tensioactivos

En estudios previos sobre la limpieza de suelos contaminados con hidrocarburos se encontró que los tensioactivos no iónicos eliminaban la mayor cantidad de contaminantes. Estos tensioactivos no se separan en iones una vez disueltos en agua y su acción detergente (sustancias grasas solubilizantes) es mucho mayor que la de los tensioactivos catiónicos o aniónicos. Los tensioactivos elegidos para este análisis fueron TRITON X-100 (octil fenoleoxilado con un rango de 9 a 10 moles de óxido de etileno) y TRITON X-114, ambos referenciados en estudios previos por (11) y (4). El tensioactivo de concentración es de vital importancia ya que se relaciona directamente con la cantidad de contaminantes que pueden eliminarse durante el tratamiento. El tensioactivo elimina los hidrocarburos del suelo contaminado y tiene un impacto directo en los costes del proceso. Por lo tanto, es necesario calcular la dosis correcta de este compuesto para limpiar el suelo de forma eficiente tanto desde una perspectiva técnica como ambiental. Estudios previos han encontrado que las concentraciones de tensioactivos no necesitan ser mucho mayores que el valor crítico de concentración de micelas (CMC). A esta concentración, la tensión superficial del agua (en el caso de soluciones a base de agua) es constante, lo que indica que valores más altos no afectan a la tensión superficial de la solución. La CMC es un valor obtenido experimentalmente y varía según el tipo de superficie, por lo que se realizaron pruebas con valores 100, 300 y 500 veces superiores al valor de CMC para cada tensioactivo según investigaciones previas (4). La relación tierra-llenador de disolvente es muy importante en el tratamiento con tensioactivos, como se ha visto en trabajos previos de (11) y (4). La importancia se debe a la relación casi directa entre la cantidad de disolvente y el nivel de descontaminación alcanzado. (4), por ejemplo, usó proporciones de 1:2, 1:5 y 1:8.

Etanol

En trabajos previos sobre extracción con etanol, se encontró que las proporciones de 1:2, 1:4 y 1:8 eran las más eficientes, tanto en términos de costes como en la eliminación del contaminante (1). Tiempo de tratamiento; (11) ejecutó el proceso durante 30 minutos. El sistema propuesto fue analizado en relación con este tiempo, calificado por encima o por debajo de 30 minutos. Sólidos Volátiles: Se utilizó la determinación gravimétrica de la materia orgánica presente antes y después del tratamiento para cuantificar la cantidad de aceite dieléctrico presente en las muestras de tierra de Fuller contaminadas y descontaminadas. Se tomó la tierra limpia y sin utilizar de Fuller como valor de referencia donde se entendió que toda la materia orgánica presente en el suelo se debía a la contaminación por aceite dieléctrico. La metodología se describe en la regulación NEN

5754 (Determinación del contenido de materia orgánica en el suelo como pérdida por encendida, 1992) (10) para el diseño experimental factorial y el análisis estadístico utilizando Design Expert® Software. Antes de rechazar (o confirmar) una de las opciones propuestas inicialmente en el estudio (descontaminación con tensioactivos o extracción con alcohol etílico), las tecnologías de tratamiento se evaluaron primero a escala de laboratorio mediante un procesamiento fácilmente implementable con un diseño experimental factorial. Se utilizaron muestras de suelo entre 10 y 20 gramos.

Método con etanol y tensioactivo

El diseño consistió en 216 pruebas con dos réplicas para cada lavado con un tensioactivo y 54 pruebas para extracción con etanol, también con dos réplicas. Finalmente, los resultados se analizaron con software estadístico para identificar una proporción que devuelve la tasa más alta de descontaminación al considerar las variables analizadas. La tasa objetivo de eliminación era de 5000 mg/kg, la tasa estándar especificada por la Resolución 1170 de 1997 del Departamento de Administración Ambiental de Colombia.

En el lavado con tensioactivos, en los experimentos realizados con los tensioactivos TRITON X-100 y TRITON X-114, se necesitaba un control para establecer adecuadamente la tasa de eliminación de cada condición evaluada. El criterio utilizado para determinar si la cantidad de contaminante extraída de la tierra de Fuller cumplía con las normas ambientales fue la cantidad de sustancias volátiles restantes tras el tratamiento. Si la tierra del Fuller tras el tratamiento contenía la misma cantidad de sólidos volátiles que la tierra limpia y sin usar de Fuller o menos, resultó estar libre de materia orgánica resultante del aceite dieléctrico. La Resolución 1170 de 1997 de la ley ambiental colombiana exige que la cantidad de contaminante tras el tratamiento sea inferior a 5000 mg/kg (cabe señalar que esta norma se refiere específicamente a suelos contaminados con hidrocarburos, como el diésel, en las estaciones de servicio y no a la tierra de Fuller). Se eligió la cantidad de sólidos volátiles que quedaban tras el tratamiento como criterio de evaluación porque en experimentos anteriores con una metodología de extracción con agitación – centrifugación para hidrocarburos totales en petróleo (THP) (12) – se encontró que el diclorometano utilizado para eliminar los hidrocarburos presentes en la tierra de Fuller tratada también eliminaba las sustancias solubles presentes en la tierra limpia, la tierra de Fuller sin usar. Al realizar la prueba de THP recomendada por otros autores, se encontró que la tierra de Fuller limpia y sin usar también mostraba un valor de THP medible mediante métodos gravimétricos. Por ello, se decidió que una prueba de sólidos volátiles como se menciona en el Reglamento (10) sería una mejor opción. Los sólidos volátiles presentes en la tierra limpia y sin utilizar de Fuller, con las mismas características que en el experimento (un nivel del 4,6% p/p, datos del fabricante) indican que si el suelo tras el tratamiento tiene un nivel del 5,1% de sólidos volátiles, cumplirá el requisito de limpieza estipulado por la ley.

Resultados y discusión

Los resultados muestran que los lavados con el tensioactivo TRITON X-114 fueron muy superiores en la eliminación del aceite dieléctrico en comparación con los lavados que usaron TRITON X-100. Aunque el TRITON X-100 tiene un coste mucho menor que el TRITON X-114, el tensioactivo

no cumplió las tasas de eliminación necesarias para cumplir con las condiciones legales. Por lo tanto, solo se presentan los resultados del lavado con TRITON X-114. Si la cantidad de sustancias volátiles era mayor tras el tratamiento, cuando mayor podía ser tan solo un 0,5% superior al valor encontrado en el suelo limpio y no utilizado, se consideraba tóxica. Si la tierra tóxica de Fuller se vertiera en un vertedero, contaminaría el suelo, haciendo que el suelo circundante también fuera tóxico. La Figura 1A muestra que el lavado de tensioactivo TRITON X-114 con una proporción de suelo a solución de 1:8, a una temperatura de 70°C, devolvió cantidades de sólidos volátiles por debajo del 5,1% necesario para cumplir con las estipulaciones de la Resolución 1170 de 1997. Sin embargo, a pesar de los resultados del uso del TRITON X-114, el coste por kilogramo es aproximadamente de 12 USD por kg más impuestos, lo que hace que su coste de uso sea prohibitivo en comparación con los métodos actuales de incineración de eliminación. Para ser claros, el coste de este producto no se estableció hasta después de realizar las pruebas de extracción, ya que el material fue donado por un proveedor local del TRITON X-114; de lo contrario, el tensioactivo habría sido descartado como opción de prueba desde el principio. El resultado es interesante porque este tensioactivo elimina la necesidad de trabajar con disolventes orgánicos, que por sí solos pueden presentar cierto riesgo. El único problema del tensioactivo TRITON X-114 es su coste. El uso de TRITON X-114 es una técnica muy prometedora porque separa tanto el tensioactivo TRITON como el aceite dieléctrico durante el tratamiento y permitiría su reutilización posterior. El tratamiento con TRITON X-114 es una tecnología innovadora que muestra resultados prometedores; sin embargo, no pudo analizarse en profundidad porque estaba fuera del alcance de este estudio. Sin embargo, el tema sigue abierto a futuras investigaciones investigadoras.

La extracción con alcohol, a pesar de los excelentes resultados obtenidos al usar el TRITON X-114 como tensioactivo de extracción, el material fue descartado por limitaciones de coste. En consecuencia, no se realizó el análisis de biodegradabilidad que se realiza para evitar el traslado de contaminación de un lugar a otro. Más bien, los esfuerzos se centraron en encontrar una alternativa más rentable, que fuera el etanol (grado industrial, 96% de pureza). En los resultados obtenidos de las pruebas, se alcanzaron altos niveles de extracción con un tiempo de extracción de 60 minutos. En la Figura 1B se analiza la relación entre la variable de respuesta (sustancias volátiles) y las variables independientes. Cuando el experimento se realizó con etanol durante 60 minutos a una temperatura de 70 °C con un contenido suelo-etanol de 1:8, se eliminó gran parte del aceite dieléctrico de la tierra de Fuller, resultando en un remanente del 7,8% de sólidos volátiles. Sin embargo, a diferencia de la extracción simple con tensioactivos, este lavado único (extracción) con etanol no alcanzó los restos legalmente requeridos del 5,1% o menos para sólidos volátiles. El análisis ANOVA para este diseño experimental se muestra en la Tabla 1. Según la tabla, el valor de F en el modelo (44,45) indica que el modelo propuesto es significativo y que hay menos del 0,01% de posibilidad de que el gran valor de F en el modelo se produzca en ruido. Los valores de Prob > F menores que 0,050 indican los términos significativos para el modelo; en este caso A, B y C son términos significativos. Los valores superiores a 0,100 indican que los términos no son significativos en el modelo. Si hay muchos términos insignificantes en el modelo, es recomendable reducirlo para mejorarlo.

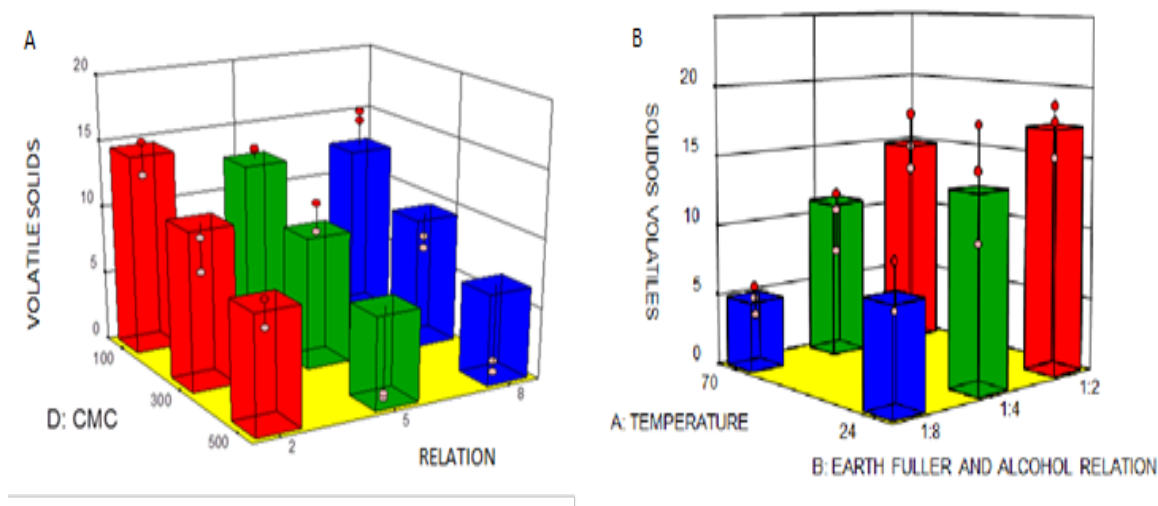


Figura 1. 1A: Relación de las variables evaluadas en el lavado TRITON X-114. 1B: Extracción simple con etanol durante un periodo de 60 minutos.

Tabla 1. Análisis de varianza de la varianza para extracción con etanol

Fuente	Suma de los cuadrados	Grados de la Libertad	medio cuadrado	Valor F	Valor p Prob > F
Modelo	1064.07	5	212.81	44.45	< 0,0001
A - TEMPERATURA	95.28	1	95.28	19.90	< 0,0001
B – Proporción de tierra de Fuller respecto al alcohol	903.29	2	451.65	94.33	< 0,0001
C – Tiempo de Extracción	65.50	2	32.75	6.84	0.0024
Residual	229.81	48	4.79		
Corr. Total	1293.88	53			
Desviación estándar	2.19		R2		0.8224
Promedio	12.65		R 2 ajustado		0.8039
C.V %	17.30		R 2 predicho		0.7752
Prensa	290.85		Precisión		20.689

Las estadísticas predichas de R2 y R2 ajustadas son del mismo orden de magnitud (0,7752 y 0,8039 respectivamente) y, aunque no son los valores más altos, son adecuadas. La estadística de precisión mide la reacción entre el signo y el ruido en el modelo; son deseables relaciones mayores a 4. En este caso, la estadística de precisión es 20,689, lo que indica que el modelo es adecuado para navegar por el espacio de diseño. El siguiente paso fue encontrar la combinación de variables en el proceso de extracción con etanol capaz de devolver una cantidad de sustancias volátiles inferior a la norma requerida para el suelo tratado. Como se observa en el análisis de varianza, todos los términos son significativos, lo que significa que todas las variables analizadas tienen un impacto directo en la eliminación de sustancias volátiles del suelo tratado. No fue posible elevar la temperatura de la mezcla suelo:alcohol por encima de 78 °C, que es el punto de ebullición del alcohol etílico. Similitud, era imposible aumentar la proporción suelo:alcohol, y la medida resultaba demasiado grande para el equipo del sistema piloto. Por ello, se decidió aumentar el tiempo de

la reacción y ajustar indirectamente la proporción suciedad:alcohol realizando un segundo lavado en las mejores condiciones que se obtuvieran tras el primero. Con esta técnica, pudimos obtener una proporción mayor en relación con el etanol y el tiempo de tratamiento. Para ello, se propuso otro diseño experimental factorial. Aunque el diseño anterior logró la mayor tasa de eliminación de sólidos volátiles, a una temperatura de 70°C, en este nuevo diseño, la temperatura y el tiempo de tratamiento volvieron a ser variables debido a sus impactos directos en el consumo energético y los costes operativos del tratamiento. La Figura 2A muestra la nueva relación obtenida entre la variable dependiente, las sustancias volátiles, y las variables independientes de temperatura y tiempo de tratamiento. La proporción suelo:etanol se mantuvo constante. Con el nuevo diseño, el valor medio de los sólidos volátiles restantes fue del 4,43% en un punto óptimo, un valor inferior al exigido por la normativa medioambiental, lo que significa que el proceso cumple los objetivos plantados desde el principio desde un punto de vista técnico. Con los valores encontrados en el punto óptimo, un tiempo de tratamiento de 30 minutos, una proporción tierra:etanol de Fuller de 1:8 y una temperatura de 70°C con doble lavado, se construyó un sistema piloto que aparece en la Figura 1. Tras construir el prototipo, se realizó un diseño experimental para corroborar los resultados encontrados a escala de laboratorio. Este diseño variaba la velocidad de agitación entre 14 y 24 RPM usando agitadores Rouston o helicoidales. Las variables de respuesta incluyeron el consumo de energía, la pérdida de disolvente, el agua neta consumida y sustancias volátiles. Estas variables eran necesarias en el cálculo de los costes del sistema de tratamiento. Como se muestra en la Figura 2B, el nuevo sistema de extracción confirmó las condiciones óptimas encontradas en el experimento anterior. Una velocidad de agitación de 24 RPM devuelve los niveles de limpieza requeridos por la norma ambiental, donde la limpieza se mide por la cantidad de sólidos volátiles restantes (debería estar por debajo del 5,1% en función de la normalidad). El mejor método es usar una agitación helicoidal porque esto permite remover el sólido durante el proceso de secado, reduciendo la cantidad de disolvente perdido. Presenta los resultados del experimento, incluyendo la pérdida de disolvente (mínima), el consumo de energía, el agua consumida en el sistema de evaporación y condensación. Consumo del nuevo sistema piloto por kilogramo de tierra de Fuller tratada: consumo de energía: incluye agitación, bombeo de agua para calefacción y refrigeración, evaporación de disolventes y funcionamiento de vacíos a 4,7 Kwh; Valor medio de los niveles de disolvente encontrados en el sistema 0,2% v/v; Consumo de agua para la condensación del disolvente 10 litros. La tabla 2 presenta la ecuación final en términos de factores codificados, y la tabla 3 muestra la ecuación final en términos de factores reales. Para el tratamiento con alcohol, se determinó que la temperatura y la proporción tierra:alcohol de Fuller fueron los factores más significativos. En este caso, se optimizaron las condiciones bajo las cuales se alcanzaron los niveles de eliminación requeridos. Según el nuevo diseño experimental, se obtuvieron sólidos volátiles del 4,34% en el punto óptimo. Este valor está por debajo del nivel exigido por la normativa medioambiental. La Figura 3 presenta la superficie de respuesta.

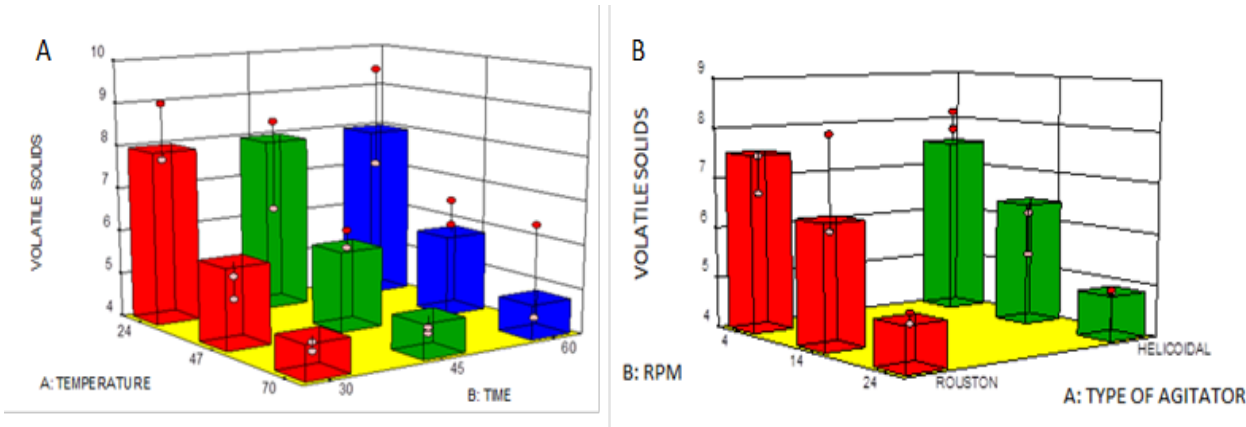


Figura 2.2A: Doble extracción con etanol. 2B: Relación entre sólidos volátiles, tipo de agitador y velocidad de agitación en el sistema piloto de extracción.

La pérdida de disolvente obtenida en el proceso probado se encontraba dentro del intervalo de pérdida permitido para este tipo de procesos. (14) Muestra de suelo tratada mediante extracción con disolventes para recuperar suelos contaminados con hidrocarburos. Los autores consideraron que la proporción óptima sólido:disolvente para eliminar el contaminante y conectar las fases es de 1:3 wight/volumen. La eficacia de la destilación como técnica para recuperar el disolvente utilizado se observa claramente, con una pérdida de solo el 10%. El proceso de extracción es igualmente eficaz para eliminar los contaminantes orgánicos tanto para (14) como para el proceso de extracción aquí probado. En relación con el criterio objetivo (un valor de sustancias volátiles igual al 5,1% o menos de la tierra de Fuller tratada), el proceso desarrollado aquí presentó una eficiencia de eliminación del 98%. Para comparar, (15) estudió la eliminación de hidrocarburos totales del petróleo (THPs) en un suelo arenoso contaminado con diésel a escala de laboratorio. Realizaron el tratamiento en un biorreactor continuo alcanzando una tasa de eliminación del 91%. (5) Logró una tasa de eliminación del 73% combinando un lavado de surfactante con bio-landfarming. En esta investigación solo se utilizó la extracción con disolventes y, aun así, los resultados entraban en el rango de tasas de eliminación publicadas en la literatura existente sobre este tipo de procesamiento y contaminante. El consumo de agua durante la refrigeración debería mejorarse, pero el consumo energético depende en gran medida de cómo se utilice el equipo.

Tabla 2. Ecuación final en términos de factores codificados

Coeficiente		Estándar	IC 95%	IC 95%	Alto	VIF
Término	Estimación	df	Error	Grave		
Interceptación	12.65	1	0.30	12.05	13.25	1.00
A TEMPERATURA	-1.33	1	0.30	-1.93	-0.73	
B(1)4.46	1	0.42	3.61	5.31		
B(2)0.96	1	0.42	0.11	1.81		
C(1)-1.03	1	0.42	-1.87	-0.18		
C(2)1.53	1	0.42	0.68	2.37		

Tabla 3. Ecuación final en términos de factores reales

	Coefficiente	Término
SOLIDOS VOLATILES		
Interceptación	+12.65	
Temperatura	-1.33	A
Tierra más densa: relación con el alcohol	+4.46	B1 (relación 1:2)
Tierra más densa: relación con el alcohol	+0.96	B2 (relación 1:8)
Tiempo de extracción	-1.03	C1 (15 min)
Tiempo de extracción	+1.53	C2 (60 min)

SOLIDOS VOLATILES = +12.65-1.33A+4.46B(1)+0.96B(2)-1.03C(1)+1.53C(2)

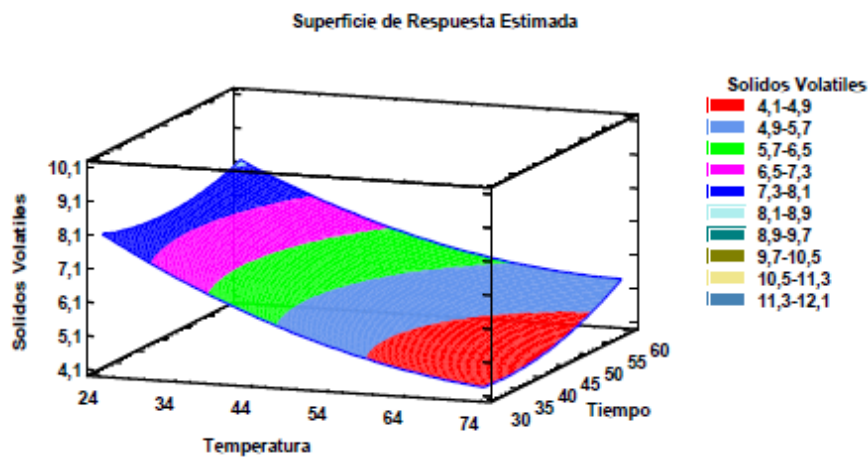


Figura 3. Presenta la superficie de respuesta

Conclusiones

El proceso de extracción con etanol ofrece una nueva solución para la eliminación final de la tierra de Fuller contaminada con aceite dieléctrico, que hasta ese momento había sido incineración. El proceso de tratamiento propuesto devuelve subproyectos comercializables y cumple con los estándares establecidos en el Reglamento 1170 de 1997 del Departamento de Administración Ambiental de Colombia. La extracción con un tensioactivo como punto de partida es otra solución prometedora, aunque requiere más investigación para comprender en profundidad las variables que influyen en el proceso. Los análisis de la rentabilidad tecnológica y económica del proyecto propuesto muestran buenos resultados. El sistema propuesto ha demostrado ser económicamente competitivo con las técnicas actuales (incineración o revestimiento de seguridad en vertederos) y es una opción respetuosa con el medio ambiente para la gestión de residuos peligrosos. Recomendaciones: el sistema de tratamiento propuesto puede mejorarse para minimizar aún más la

pérdida de disolventes y reducir el consumo de agua en la refrigeración, reduciendo así aún más los costes. Se recomienda trabajar con el prototipo en la misma ciudad donde se instalará el sistema de tratamiento a tamaño real para evaluar su rendimiento y ajustarlo. Además, las previsiones de flujo de caja deberían desarrollarse más para considerar los efectos de trabajar con capital prestado. Finalmente, el suelo Fuller obtenido puede utilizarse para otro propósito, ya que su valor de mercado es alto.

Agradecimientos

Este estudio se llevó a cabo con el apoyo de la Vicedecanatura de Investigación y Extensión de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín con el código de proyecto #20701008760. Finalmente, agradecemos al Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Minas y al Laboratorio de Ciencias Ambientales y de la Tierra de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín por el uso de sus instalaciones en el desarrollo de este proyecto.

Referencias

1. Agudelo E A. Un método de gestión ambiental adecuado para el tratamiento y la disposición final de un residuo peligroso. Caso: tierra Fuller contaminada con aceite dieléctrico. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 2010. <https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/f41840c2-c632-4ac2-b024-2704d4e30443/content>
2. Agudelo EA , Cardona Gallo S. Análisis preliminar del tratamiento fisicoquímico y biológico del aceite dieléctrico presente en tierra Fuller. Dyna, vol. 78, No. 167 (Junio), pp. 193-202. 2011. https://www.researchgate.net/profile/Edison-Agudelo/publication/264860783_Analisis_preliminar_del_tratamiento_fisicoquimico_y_Biologico_del_aceite_dielectrico_presente_en_tierra_Fuller/links/53fb54280cf27c365cf09e43/Analisis-preliminar-del-tratamiento-fisicoquimico-y-Biologico-del-aceite-dielectrico-presente-en-tierra-Fuller.pdf
3. Bordoloi N.K y Konwar, B.K. Biosurfactante bacteriano en la mejora de la solubilidad y metabolismo de hidrocarburos petrolíferos. Journal of Hazardous Materials, vol. 170, No. 1 (octubre), pp. 495-505. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.136>
4. Da Silva, A. Microemulsiones aplicadas al tratamiento de aceites aislantes. Tesis Doctoral para optar título de doctor en Ingeniería Química. Universidad Federal del Rio Grande. 2006.
5. Duran, m., Contreras, N. Alternativa de tratamiento para tierras Fuller contaminadas con aceite dieléctrico. Scientia et Technica, No 32. P 419-424. 2006. <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/6329>
6. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. 3285 ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero https://gestionacomunidad.madrid/rlma_web/html/web/FichaNormativa.icm?ID=85#
7. Gan, S; Lau, E.V. y Ng, H.K. Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Journal of Hazardous Materials, vol. 172, No.2-3 (diciembre), pp. 532-549. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.118>
8. Kiely, G. Ingeniería Ambiental, Fundamentos, Entornos, Tecnologías y Sistemas de Gestión. Ed Mc Graw Hill. 2003.

9. Mulligan, C.N; Yong, R.N. y Gibbs, B.F. Remedición mejorada con surfactante de suelos contaminados: una revisión. *Geología de la Ingeniería*, vol. 60, N° 1-4 (junio), pp. 371-380. 2001.

[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00117-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00117-4)

10. Hoogsteen, M. & Lantinga, Egbert & Bakker, Evert-Jan & Groot, Jeroen & Tittonell, P.A.. (2015). Estimación del carbono orgánico del suelo por pérdida por la ignición: efectos de las condiciones de encendido y la pérdida estructural de agua. *Revista Europea de Ciencia del Suelo*. 66. <https://doi.org/10.1111/ejss.12224.11>.

11. Orantes Gómez, J. L. Aplicación de surfactantes en suelos contaminados con hidrocarburos. Tesis de Maestría. Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 2002.

12 <https://repositorio.unam.mx/contenidos/aplicacion-de-surfactantes-en-suelos-contaminados-con-hidrocarburos-112962>.

12. Schwab, A.P. Wetzel, J. Pekarek, S. Banks, K. Extracción de hidrocarburos petrolíferos del suelo mediante agitación mecánica. *Entorno. Sci. Technology*, 33, p. 1940-1945. 1999.

<https://doi.org/10.1021/es9809758>

13. Semer, Robin y Reddy, Krishna R. Evaluación del proceso de lavado de suelo para eliminar contaminantes mixtos de la tierra arenosa. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 45, No.1 (enero), pp. 45-57. 1996.

[https://doi.org/10.1016/0304-3894\(96\)82887-1](https://doi.org/10.1016/0304-3894(96)82887-1)

14. Silva A, Delerue-Matos, C. Fiúza, A. Uso de extracción con disolventes para remediar suelos contaminados con hidrocarburos. *Revista de Materiales Peligrosos B* 124. P. 224-229. 2005.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.05.022>

15. Truax D. D., Britto R. y Sherrard Joseph H. Estudios a escala de banco ff Tratamiento basado en reactores de suelos contaminados con combustible. *Waste Management*, Vol. 15, N° 5/6, pp. 351-357. 1995.

[https://doi.org/10.1016/0956-053X\(95\)00036-Y](https://doi.org/10.1016/0956-053X(95)00036-Y)

16. Wang, Suiling y Mulligan, Catherine N. Evaluación de la tecnología de espuma surfactante en la remediación de suelos contaminados. *Chemosphere*, vol. 57, N° 9 (diciembre), pp. 1079-1089. 2004.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.08.019>