



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEOS**

**TEMA:
“ELECTORREMEDIACIÓN IN SITU APLICADA A SUELOS
CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS”**

**PROYECTO PRACTICO DE EXAMEN COMPLEXIVO
“TRABAJO DE INVESTIGACIÓN”**

TESINA

**AUTOR:
CRISTHIAN FERNANDO TIMANÁ INSUASTY**

**TUTOR:
ING. GERARDO HERRERA BRUNETT**

LA LIBERTAD - ECUADOR

2020

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEOS**

TEMA:

**“ELECTRORREMEDIACIÓN IN SITU APLICADA A SUELOS
CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS”**

**PROYECTO PRACTICO DE EXAMEN COMPLEXIVO
“TRABAJO DE INVESTIGACIÓN”**

TESINA

AUTOR:

CRISTHIAN FERNANDO TIMANÁ INSUASTY

TUTOR:

ING. GERARDO HERRERA BRUNETT

LA LIBERTAD - ECUADOR

2020

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



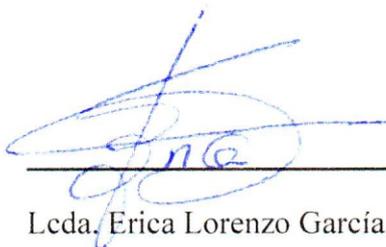
Ing. Marllelis Gutiérrez Hinestroza,
PhD.

**DIRECTORA DE LA CARRERA
DE PETRÓLEOS**



Ing. Gerardo Herrera Brunett, MSc.

TUTOR



Lcda. Erica Lorenzo García, PhD.

DOCENTE GUIA DE LA UIC

DEDICATORIA

**Lleno de alegría y
satisfacción por
culminar una etapa
importante en mi
vida, dedico este
proyecto a mis padres
que son el pilar
fundamental en mi
vida y mis guías
durante todo este
proceso.**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser mi guía y nunca abandonarme.

A mi madre por su constante amor y sacrificio para formarme como buen ser humano con muchos valores.

A mi padre por su corazón noble y su valiosa compañía durante todo el camino para cumplir este sueño.

A mi hermano por motivarme a ser siempre mejor y enseñarme que con dedicación se puede lograr muchas cosas.

A familiares y amigos que siempre estuvieron apoyándome.



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO

**“ELECTRORREMEDIACIÓN IN SITU APLICADA A SUELOS
CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS”**

Autor: Cristhian Fernando Timaná Insuasty

Tutor: Ing. Gerardo Herrera Brunett

RESUMEN

El medio ambiente en Colombia se encuentra vulnerable por los continuos derrames presentes en los últimos años, estos se han presentado por diversas circunstancias entre las que cabe destacar que suelen ser accidental por la misma empresa prestadora del servicio o por atentados de grupos al margen de la ley. En algunas circunstancias, dichas situaciones se han generado en sectores del país de difícil acceso impidiendo el desarrollo de estrategias de vigilancia y control o en el caso dado, de recuperación. Generando no solo el daño del medio ambiente sino afectando a la población que vive cerca de donde ocurren estos derrames correspondientes al oleoducto transandino. Esto tiene algunas consecuencias negativas como es la contaminación del agua, suelo, flora y fauna. Causando graves problemas ambientales y económicos. Además de estos factores, a lo largo del tiempo se vienen presentando daños por parte de grupos alzados en armas que quieren obtener de una manera ilegal el producto que se transporta por los oleoductos del país. Cada año se registran múltiples atentados en los cuales los recursos naturales terminan siendo contaminados.

El objetivo de aplicar estos tratamientos está dirigido principalmente a transformar los contaminantes en compuestos con menor peligrosidad para la población en un futuro, más estables y disminuyendo en grandes cantidades su movilidad. Los tratamientos fisicoquímicos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación. Este tipo de tecnologías generalmente son efectivas en cuanto a costos y pueden concluirse en periodos relativamente cortos, en comparación con otras tecnologías como el caso de la biorremediación.

La electrorremediación es una tecnología enfocada básicamente a la restauración de los suelos contaminados en la cual se genera un campo eléctrico suministrando corriente directa en la zona afectada por el derrame del petróleo. Para emplear una diferencia de potencial, o una corriente directa, se requiere el uso de electrodos (ánodo y cátodo), los cuales van instalados en pozos excavados a una corta profundidad. Normalmente se los humectan con algunas soluciones electrolíticas generando así una mejora en las condiciones de conducción del campo eléctrico. La acción del electrolito permite movilizar el contaminante hacia los pozos en donde posteriormente será extraído. Al contrario del arrastre de fluidos, esta técnica permite establecer una migración dirigida, donde se evita la dispersión del contaminante fuera de la zona de tratamiento que es lo que más nos interesa, así no se generara una mayor contaminación y tendremos controlada la remediación del suelo.

Palabras clave: electrorremediación, derrame de hidrocarburos, control de contaminantes, daños al medio ambiente, biorremediación tecnologías limpias.

“IN SITU ELECTROREMEDIATION APPLIED TO SOILS CONTAMINATED BY HYDROCARBONS”

Author: Cristhian Fernando Timana Insuasty

Tutor: Ing. Gerardo Herrera Brunett

ABSTRACT

The environment in Colombia is vulnerable due to the continuous spills present in recent years, these have occurred due to various circumstances, among which it is worth noting that they are usually accidental by the same company that provides the service or by attacks by groups outside the law. In some circumstances, these situations have been generated in sectors of the country that are difficult to access, preventing the development of surveillance and control strategies or, where appropriate, recovery strategies. Generating not only damage to the environment but also affecting the population that lives near where these spills corresponding to the trans-Andean pipeline occur. This has some negative consequences such as the contamination of water, soil, flora and fauna. Causing serious environmental and economic problems. In addition to these factors, over time there have been damages by armed groups that want to illegally obtain the product that is transported through the country's pipelines. Every year there are multiple attacks in which natural resources end up being contaminated.

The objective of applying these treatments is mainly aimed at transforming pollutants into compounds that are less dangerous for the population in the future, more stable and reducing their mobility in large quantities. Physicochemical treatments take advantage of the physical and/or chemical properties of the contaminants or the contaminated environment to destroy, separate or contain the contamination. These types of technologies are generally cost-effective and can be completed in relatively short periods of time, compared to other technologies such as bioremediation.

Electroremediation is a technology basically focused on the restoration of contaminated soils in which an electric field is generated by supplying direct current in the area affected by the oil spill. To use a potential difference, or a direct current, the use of electrodes (anode and cathode) is required, which are installed in wells dug at a short depth. Normally they are moistened with some electrolytic solutions, thus generating an improvement in the conduction conditions of the electric field. The action of the electrolyte allows the contaminant to be mobilized towards the wells where it will later be extracted. Contrary to the dragging of fluids, this technique allows to establish a directed migration, where the dispersion of the contaminant outside the treatment area is avoided, which is what interests us the most, so that more contamination will not be generated and we will have soil remediation under control.

Keywords: electroremediation, hydrocarbon spill, contaminant control, environmental damage, bioremediation, clean technologies.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

CARTA DE ORIGINALIDAD	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMA.....	1
1.2 JUSTIFICACION	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
CAPÍTULO II	3
MARCO TEÓRICO.....	3
1.4 UBICACIÓN DEL CAMPO DE ESTUDIO.....	3
1.5 OLEDUCTO DE COLOMBIA	4
1.6 Oleoducto Caño Limón-Coveñas.....	4
1.7 Oleoducto del Alto Magdalena (OAM).	4
1.8 Oleoducto de Colombia (ODC).	5
1.9 Oleoducto Central S.A. (Ocensa).	5
1.10 Oleoducto Transandino.....	5
1.11 DERRAMES DE HIDROCARBUROS POR OLEODUCTOS EN COLOMBIA	6
1.12 PROBLEMAS CRÍTICOS Y DIFERENCIA DE PERCEPCIÓN.....	6
1.12.1 Conflicto armado	6
1.13 ELECTORREMEDIACIÓN.....	6
1.14 MECANISMOS DE REMOCIÓN	7
1.14.1 Electromigración.....	7
1.14.2 Electroósmosis	8

1.14.3	Electroforesis	9
1.15	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ELECTORREMEDIACIÓN	9
1.15.1	Contenido de agua	9
1.15.2	Conductividad eléctrica	9
1.15.3	Ph	10
1.15.4	Potencial zeta (ζ).....	10
1.15.5	Naturaleza y química del suelo.....	10
1.15.6	Naturaleza del contaminante.....	11
1.15.7	Naturaleza y arreglo de los electrodos.....	11
	CAPÍTULO III.....	12
	METODOLOGÍA	12
1.16	Tipo y diseño de investigación.	12
1.17	Unidad de análisis.....	12
1.18	Población de estudio	12
1.19	Proceso de electrorremediación.....	12
1.20	Sistema de eliminación y recuperación de contaminantes.....	13
1.21	Preparación del electrolito	14
	CAPÍTULO IV.....	15
	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	15
	CAPÍTULO V	17
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	17
1.22	CONCLUSIONES	17
1.23	RECOMENDACIONES.....	17
	BIBLIOGRAFÍA	19

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico, el consumo masivo e indiscriminado de los recursos naturales y en muchos casos la contaminación por derrames petroleros, ha provocado la presencia de muchos metales en cantidades importantes en el ambiente, provocando numerosos efectos sobre la salud y el equilibrio de los ecosistemas.

El interés por desarrollar tecnologías que ayuden a solucionar el problema de los suelos contaminados, la mayoría de estas se han orientado hacia los procesos de remediación in situ, dentro de los cuales se ha propuesto a la electrorremediación por su capacidad de remover contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos.

El desarrollo de diversas tecnologías para la remediación de suelos contaminados como la electrorremediación se ha aplicado exitosamente. Sin embargo, en Colombia este tipo de investigación no ha tenido la importancia que requiere. La remediación de nuestros suelos demanda la investigación detenida de los factores que influyen en la eficiencia y eficacia de la técnica y método a ser aplicado. Las variables tanto físicas como químicas son complejas por lo que las técnicas en investigación cada día van sufriendo modificaciones, la remediación, específicamente la electrorremediación también tiene que tener en cuenta estas variables para su análisis.

El presente trabajo se realiza una revisión técnica sobre la tecnología de electrorremediación para la restauración de suelos contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos, se presenta el fundamento técnico, los mecanismos para remoción del contaminante, los factores principales que influyen en el proceso, las variantes electrocinéticas utilizadas para mejorar su rendimiento, así como una visión sobre su aplicación en campo, donde se ha presentado derrames de hidrocarburos.

1.1 PROBLEMA

La contaminación de suelos generada por el derrame de hidrocarburos en Colombia cada día es más usual, dado que los oleoductos y refinerías del país son atacadas constantemente por grupos insurgentes. De ahí nace la necesidad de estudiar las nuevas tecnologías de remediación con el fin de remediar los suelos contaminados en Colombia.

1.2 JUSTIFICACION

El aumento de los problemas ambientales generados por el derrame de petróleo en los suelos, ha generado que se desarrollen técnicas de remediación de suelos, como por ejemplo la electrorremediación. En Colombia los derrames de petróleo son muy comunes, ya que los grupos armados arremeten contra los oleoductos provocando problemas ambientales, por lo que nace la necesidad de estudiar tecnologías de remediación, en el presente trabajo se analizará la electrorremediación con el fin de ser aplicada a un derrame actual en Colombia

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Estudio de la factibilidad de ampliación de Electrorremediación en suelos contaminados por derrames de hidrocarburos en el oleoducto Trasandino en Colombia.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Análisis de la tecnología de Electrorremediación para la aplicación en zonas contaminadas por derrames de petróleo.
- Implementación del método de Electrorremediación en suelos contaminados por derrames de petróleo del oleoducto Trasandino en Colombia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

1.4 UBICACIÓN DEL CAMPO DE ESTUDIO

El presente trabajo estudia el derrame de petróleo ocurrido en Nariño-Colombia (ver figura 1), por el atentado de grupos armados al oleoducto Trasandino ocurrido el 31 de marzo del presente año, en la siguiente figura se muestra la contaminación en el área de estudio (ver figura 2).

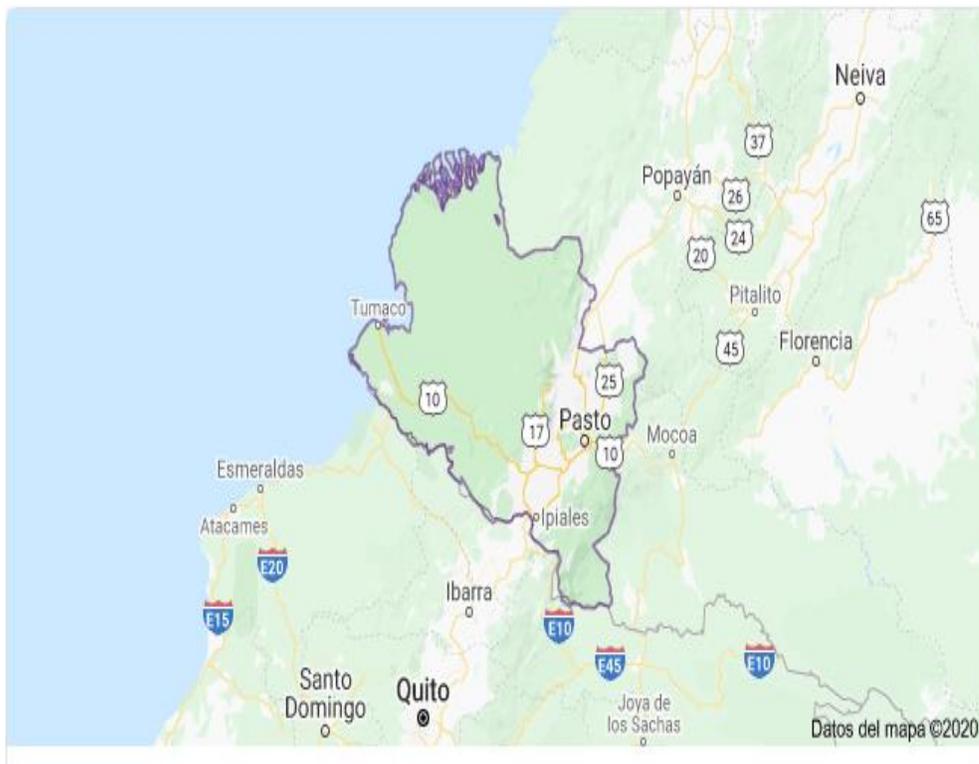


Figura 1 ubicación geográfica de Nariño-Colombia



Figura 2 Derrame de petróleo en el oleoducto Trasandino, sección Nariño.

1.5 OLEDUCTO DE COLOMBIA

Colombia cuenta con una precaria infraestructura de transporte. La mayor parte del petróleo está en las zonas más apartadas del país donde la infraestructura vial es incipiente y concentrada en un 95% en las carreteras; distancias de más de 1.500 kilómetros se tienen que recorrer para transportar gran parte del petróleo, producto actual de exportación en Colombia, cuyos yacimientos se encuentran ubicados en los Llanos Orientales. Las principales redes de transporte están compuestas por los oleoductos y poliductos que transportan el 90% del crudo (ver figura 3).

1.6 Oleoducto Caño Limón-Coveñas

Tiene 770 kilómetros de longitud y a través de él se transportan los crudos producidos en el campo Caño Limón (Arauca).

1.7 Oleoducto del Alto Magdalena (OAM).

Transporta los crudos que se obtienen en el Valle Superior del Magdalena y en el cual Ecopetrol participa con el 49%.

1.8 Oleoducto de Colombia (ODC).

Tiene 481 kilómetros y conecta la estación de Vasconia con el puerto de Coveñas. Ecopetrol tiene el 42.5% de participación

1.9 Oleoducto Central S.A. (Ocensa).

Con 790 kilómetros de longitud, transporta fundamentalmente los crudos del piedemonte llanero (CusianaCupiagua) hasta el terminal marítimo de Coveñas.

1.10 Oleoducto Transandino.

Fue construido en el año 1969 por la Texas petroleum company con la finalidad de transportar el crudo que se produce en los campos de orito hasta el puerto de Tumaco. Dicho oleoducto cuenta con cuatro instalaciones principales: La planta orito destinada a almacenar los crudos del campo, dos plantas impulsoras o de rebombeo (Guamaes y Alisaes) y el terminal Tumaco, donde se almacena el crudo en cuatro tanques para su exportación. Con 306 kilómetros,



transporta petróleo desde Ecuador hasta el puerto de Tumaco, sobre el océano Pacífico.

Figura 3 Principales oleoductos en Colombia

1.11 DERRAMES DE HIDROCARBUROS POR OLEODUCTOS EN COLOMBIA

Según Fredy Jara y Luis Carvajal, una forma de clasificar los accidentes que ocurren en instalaciones petroleras es la siguiente: emisión, incendio y explosión, entre otros, los cuales pueden desencadenarse de riesgos operativos. Los derrames de petróleo crudo pertenecen o hacen parte del grupo de emisión.

También hace parte de este grupo los escapes de gases o vapores generalmente por pérdida de contención de los fluidos. El origen de un accidente puede ser fugas en forma de escape en el caso de crudo²⁰ Cuando un derrame de hidrocarburos se presenta, son muchos y variados los procesos que comienzan a ocurrir y que hacen que el impacto que se produce sobre el entorno sea más o menos fuerte. Algunos factores y fenómenos tienen mayor influencia que otros, pero probablemente de todos, en especial los relacionados con el hidrocarburo mismo, el más importante es el tipo de producto que se derramo, ya que de este aspecto depende en gran medida el grado de toxicidad.

1.12 PROBLEMAS CRÍTICOS Y DIFERENCIA DE PERCEPCIÓN

1.12.1 Conflicto armado

Según Camilo Posso, el conflicto armado en las zonas de alta inversión petrolera ha tenido especial notoriedad en los atentados a los oleoductos y en el robo de combustible para costear mafias, paramilitares y guerrilla. El oleoducto Caño Limón – Coveñas ha sido blanco de atentados desde su construcción y con menor frecuencia también han sido saboteados con explosivos los oleoductos Colombia, Ocesa y Putumayo. Algunos estimativos de la Defensoría del Pueblo, que incluyen los oleoductos secundarios, registran 4456 ataques en dos décadas, con 235 promedio anual. Cabe resaltar que el número de atentados ha tenido variaciones considerables en algunos años debido a los escenarios desarrollados en el país de la siguiente manera: los ataques disminuyeron significativamente de 155 en 2005 a 31 en 2010, Sin embargo, desde 2010 el número de ataques Aumentó sustancialmente, alcanzando 259 ataques en 2013, 141 en 2014 y 80 en 2015.

1.13 ELECTORREMEDIACIÓN

Según Pérez. D, señala que: “La Electrorremediación es una tecnología para restaurar suelos contaminados que se basa en la generación de un campo eléctrico a partir de imponer corriente directa. Para la aplicación de una diferencia de potencial, o una corriente directa, se

requiere el empleo de electrodos (ánodo y cátodo), los cuales son colocados en pozos excavados en el suelo, usualmente estos se humectan con un electrolito para mejorar las condiciones de conducción del campo eléctrico. La acción del electrolito permite transportar el contaminante hacia los pozos en donde será extraído. Al contrario del arrastre de fluidos, esta técnica permite establecer una migración dirigida, la cual evita la dispersión del contaminante fuera de la zona de tratamiento”.

Esta técnica implica la aplicación de un campo eléctrico continuo entre dos electrodos enterrados, para el caso del suelo, durante un cierto tiempo. Con la aplicación de este campo eléctrico se consigue, dependiendo de diversos factores como el grado de humedad del terreno, acidez, etc., movilizar las especies cargadas hacia los electrodos correspondientes, ánodo o cátodo. La técnica de electro-remediación consiste en la descontaminación, especialmente de metales pesados y otros compuestos iónicos, de suelos o lodos provenientes de algún tratamiento previo, contaminados con estas especies (Vásquez, 2015).

Es de utilidad en aquellas zonas donde se disponga de energía eléctrica de bajo costo, pudiendo incluso adaptarse un sistema de energías alternativas (energía solar y/o eólica, almacenando energía en acumuladores) que permita el funcionamiento de manera más o menos autónoma y con bajo costo (Vásquez, 2015).

1.14 MECANISMOS DE REMOCIÓN

Los mecanismos de remoción por los cuales el campo eléctrico conduce los contaminantes hacia los electrodos son: electromigración, electroósmosis y electroforesis. Donde los dos primeros los que ejercen la mayor influencia en el transporte del contaminante (Ibarra, Navarro, Terán, & Vizcarra, 2015).

1.14.1 Electromigración

Es un fenómeno en el cual los iones en solución y los coloides que tienen carga eléctrica se mueven a través del campo eléctrico con una velocidad que es proporcional al producto de la fuerza del campo eléctrico y la movilidad del ión o partícula, un esquema se presenta en la figura 4.

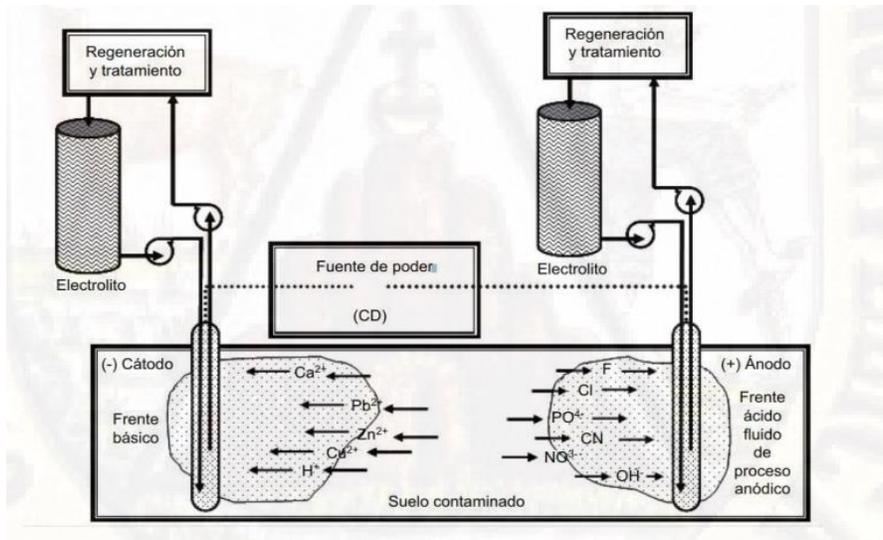


Figura 4 Esquema básico del proceso de electroremediación, las especies iónicas migran por la acción del campo eléctrico

1.14.2 Electroósmosis

Es un fenómeno de transporte en el cual el líquido saturado junto con las sustancias que se suspenden en él (coloides con y sin carga eléctrica), fluyen hacia uno de los electrodos (normalmente hacia el cátodo), un esquema se muestra en la figura 5. La tasa de este flujo es proporcional al producto de la fuerza del campo eléctrico aplicado y al potencial ζ de la interfase sólido-líquido. El valor del potencial ζ es función de las propiedades del suelo, así como de la fuerza iónica y el pH del electrolito.

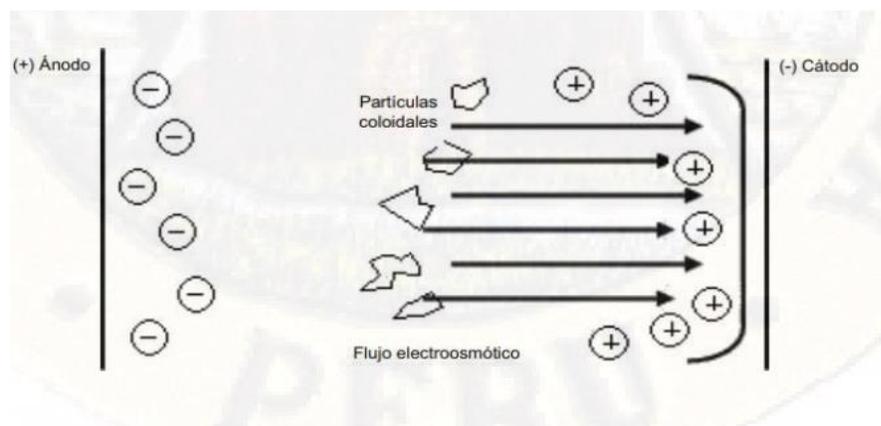


Figura 5. Esquema básico del fenómeno de electroósmosis, las especies iónicas migran por la acción del campo eléctrico (Ibarra, Navarro, Terán, & Vizcarra, 2015).

1.14.3 Electroforesis

Este fenómeno se observa cuando hay partículas o coloides con carga eléctrica, de forma que los contaminantes ligados a este material particulado pueden ser transportados por el campo eléctrico. En principio se espera que la aplicación de la electrorremediación en un sitio contaminado con metales sea sencilla debido al rápido transporte por electromigración y a que no es afectada por las variaciones de potencial ζ . En suelos contaminados con metales, la electromigración tiene un mayor impacto que la electroósmosis, para que un metal sea transportado por el fenómeno de electromigración debe de estar en solución y tener una carga eléctrica, la cual no debe de cambiar mientras migra hacia uno de los electrodos (Ibarra, Navarro, Terán, & Vizcarra, 2015).

1.15 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ELECTORREMEDIACIÓN

Existen varios factores fisicoquímicos que influyen en el transporte de los contaminantes, y por ende en una efectiva remediación del suelo contaminado; los factores de mayor importancia se describen a continuación.

1.15.1 Contenido de agua

El grado de saturación del suelo es un factor indispensable para llevar a cabo el proceso electrocinética. Una distribución irregular de humedad en el suelo contaminado puede observarse durante la electrorremediación, ya que el electrolito se mueve hacia uno de los electrodos, incrementando la humedad en este y disminuyéndola en el electrodo contrario. Esta disminución está asociada con el desarrollo de poros de presión negativos, variaciones en el pH y por lo tanto en la fuerza del campo eléctrico, lo cual resulta en tasas de flujo electro osmótico irregulares. Por tanto, es necesario mantener una humedad adecuada agregando electrolito a la misma tasa electro osmótica a la que es drenado del sistema. Por otro lado, un contenido bajo de agua puede generar la sequedad del suelo, debido a efectos de calentamiento o al desarrollo de algunas reacciones químicas exotérmicas **Fuente especificada no válida..**

1.15.2 Conductividad eléctrica

Se define como la capacidad de un medio o espacio físico de permitir el paso de la corriente eléctrica. Para conocer la conductividad eléctrica de un suelo, es necesario ponerlo en suspensión acuosa y medirla con un conductímetro. La medida obtenida (siemens) es el

inverso de la resistencia a la conducción por centímetro de material, la cual tiene una relación empírica con la concentración de iones capaces de conducir la electricidad en solución acuosa ($1\mu\text{S}/\text{cm} \approx 0.52$ a 0.64 ppm de sales).

En algunos experimentos con suelos industriales contaminados, la conductividad del suelo se incrementa con el tiempo, debido a la penetración de los frentes ácido y alcalino, así como por la solubilización de las especies iónicas ya sea como resultado de los cambios de pH o por un aumento de temperatura (Hahladakis, Lekkas, & Smponias, 2013).

1.15.3 Ph

Los cambios de pH promueven reacciones de los metales con otras sustancias que se encuentran en el suelo de forma natural, este factor regula la movilidad de los contaminantes en el proceso de electroremediación.

1.15.4 Potencial zeta (ζ)

Es la medida que determina la carga de un coloide (volts), en función de la superficie cargada y la naturaleza y composición del medio en el que está suspendido; las sales iónicas que pueden solubilizarse totalmente en medios acuosos no pueden ser clasificadas como coloides ya que se encuentran en la fase continua y por lo tanto su ζ es muy pequeño.

En la mayoría de los suelos el potencial ζ es negativo debido a que la superficie del suelo generalmente tiene carga negativa. Con el incremento de la acidez ζ disminuye su negatividad y, en algunos casos, pueda alcanzar valores positivos. Estos cambios afectan la velocidad del flujo electroosmótico, ya que se ha observado que la tasa de flujo decrece cuando el pH del electrolito se acerca a la neutralidad o se incrementa la alcalinidad

1.15.5 Naturaleza y química del suelo

La electroremediación se ha probado exitosamente en ensayos de laboratorio con suelos de granulometría muy fina (limos y arcillas) y baja permeabilidad. También puede ser aplicada en suelos arenosos, siempre y cuando exista un horizonte impermeable debajo del suelo contaminado, el cual impedirá que el electrolito drene a estratos más profundos (Ibarra, Navarro, Terán, & Vizcarra, 2015).

1.15.6 Naturaleza del contaminante

La especie química de los contaminantes es un factor que influye fuertemente sobre la eficiencia de la técnica. Los contaminantes pueden existir como sólidos precipitados, solutos disueltos, adsorbidos a partículas del suelo o sorbidas en materia orgánica. En la actualidad las especies químicas son evaluadas por extracción secuencial o lixiviación selectiva y se ha demostrado que las formas intercambiables migran con mayor rapidez que las absorbidas en la materia orgánica o en la fracción residual (Ibarra, Navarro, Terán, & Vizcarra, 2015).

1.15.7 Naturaleza y arreglo de los electrodos

Con la finalidad de evitar introducir contaminantes en el sistema, para la fabricación de los electrodos generalmente se eligen materiales inertes como titanio con cubierta electrocatalítica de varios óxidos; sin embargo, también pueden elegirse materiales reactivos como el hierro o el grafito (Haran et al. 1996, Ho et al. 1999). La estructura de los electrodos debe ser porosa para establecer un buen contacto con los electrolitos y para poder liberar los gases producidos por la electrólisis del agua. El tamaño, forma y arreglo de los electrodos, así como la distancia entre ellos afectan las tasas de remoción de contaminantes.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

1.16 Tipo y diseño de investigación.

Se tendrá en cuenta estudios realizados a nivel internacional de electroremediación como son artículos científicos, trabajos de grado o algún documento académico, para comparar con datos obtenidos con distintos suelos estudiados, teniendo, así como base los resultados obtenidos anteriormente al aplicar este mismo método.

1.17 Unidad de análisis

La unidad de análisis para este proyecto es toda el área contaminada por el derrame de hidrocarburo que se produce desde el oleoducto que pasa por este sector hasta las orillas de la reserva natural del río Ñambi.

1.18 Población de estudio

La población de estudio será en la Vereda El Barro, a 5 Km del corregimiento de Altaquer, municipio de Barbacoas, al sur occidente de Colombia, en la vía que de Pasto conduce al mar pacífico, sobre la vertiente Pacífica del nudo de los pastos en la cordillera de los Andes. La cual tiene como extensión más o menos aproximadamente unas 1400 hectáreas.

1.19 Proceso de electroremediación

El Sistema de electroremediación consiste básicamente en una serie de electrodos, un sistema de control y distribución de energía, equipo de monitoreo de proceso automatizado y tuberías de proceso para distribuir enmiendas químicas a los pozos de electrodos y extraer contaminantes de los pozos.

La matriz de electrodos consta de una serie de ánodos y cátodos alojados en pozos. Lynntech estableció el espacio entre los pozos de electrodos basándose en los gradientes de voltaje observados durante una prueba de campo preliminar realizada en octubre de 1997. Con base en estas pruebas, se determinó que la distancia óptima entre los ánodos y los cátodos era de 14 pies. Se determinó que la distancia óptima entre cada pozo de ánodo en las filas de pozos de ánodo (así como cada pozo de cátodo en cada fila de pozos de cátodo) era de 6 ½ pies (Hodko et al 1999).

Los pozos de los electrodos del ánodo son revestimientos de pozos ranurados de cloruro de polivinilo (PVC) de 4 pulgadas de diámetro.

Los materiales de los electrodos utilizados en el ánodo y el cátodo se seleccionaron en función de su capacidad para resistir los procesos corrosivos creados por la aplicación del campo eléctrico. El electrodo de ánodo, que opera en condiciones altamente corrosivas, era un electrodo en forma de varilla construido de titanio con un recubrimiento de óxido de iridio. El electrodo de cátodo se construyó a partir de tiras de malla de acero inoxidable de aproximadamente 2 pulgadas de ancho.

1.20 Sistema de eliminación y recuperación de contaminantes

El sistema de recuperación electrocinética fue diseñado para extraer los contaminantes metálicos mediante la electromigración de los iones contaminantes y la concentración de los iones en los pozos de los electrodos. Se esperaba que la mayoría de estos contaminantes permanecieran en solución.

Una vez que se hubieran acumulado concentraciones de contaminantes metálicos en el pozo del electrodo, se realizaría el procesamiento del fluido electrolítico para extraer los contaminantes metálicos y devolver el fluido electrolítico procesado a los pozos para su uso continuo. Esto habría reducido al mínimo el volumen de los residuos generados por el proceso y como resultado la producción de un material potencialmente reciclable. El procesamiento del fluido consiste en bombear periódicamente el fluido de los pozos a un tanque de efluentes de doble pared de 1,000 galones. La frecuencia de extracción del electrolito contaminado de los pozos se determinaría en función de la concentración de los metales en el electrolito y los efectos observados que el electrolito contaminado con metales estaba teniendo en la eficiencia de eliminación del sistema electrocinético. Una vez que se haya recogido el líquido electrolítico contaminado en el tanque de efluentes, el líquido se procesará a través de una unidad de reversión de electrodiálisis (EDR). Cualquier lodo residual resultante del proceso debía almacenarse en el sitio para su análisis, clasificación y eliminación o reciclaje.

1.21 Preparación del electrolito

El electrolito se prepara de la siguiente manera: Se calcula la cantidad de ácido fosfórico (H_3PO_4) al 0.01 M y de ácido acético (CH_3COOH) al 0.3 M que se necesita para el procedimiento. La cantidad de ácido que se necesita se mide en una pipeta de 10 ml con la guía de una pera, se coloca previamente en un balón aforado una medida específica de agua destilada para amortiguar la reacción del ácido concentrado para terminar el aforo se adiciona a la dilución agua hasta encolar.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para encontrar la factibilidad de recuperación que se puede obtener al momento de aplicar este método en la Vereda El Barro, a 5 Km del corregimiento de Altaquer, municipio de Barbacoas, al sur occidente de Colombia. Se tomaron como guía los resultados que se obtuvieron en diferentes procesos en años anteriores donde al aplicar este procedimiento se generaron tanto en laboratorio como en la práctica in situ unos buenos resultados obteniendo porcentajes altos de recuperación del suelo, determinando así parámetros importantes como lo son la remediación del suelo que se obtendrá en el área afectada por diferentes compuestos que están presentes en el hidrocarburo y el factor que se podrá alcanzar al momento de realizar la limpieza por medio de la electrorremediación. En los siguientes ejemplos se muestra el potencial de la tecnología de electrorremediación para remover diversos tipos de contaminantes aplicada en diferentes campos donde el medio ambiente se encontró afectado.

En 1995 Geokinetics International Inc. reportó la remediación de un sitio de 213 m² y 1 m de profundidad, contaminado con Cd, Cu, Ni, Pb, y Zn, tan solo en 18 meses de electrorremediación, se pudo obtener una eficiencia diferente para cada elemento (desde 75 % para el cobre hasta 99 % para el plomo) con un costo desde 300 hasta 500 dólares por yarda cúbica pero se encontraron valores altos de remediación, superando más del 70 % de remediación (USEPA 1995).

En 1996 se realizó una demostración de extracción de plomo de un campo de pruebas balísticas de la armada norteamericana. Los resultados mostraron una disminución del nivel de contaminación de 4500 mg/Kg a menos de 300 mg/Kg de plomo en 30 semanas de operación (USAEC 1997).

En 1997 la empresa Environmental & Technology Services reportó la remediación de un sitio de 3700 m² y 21 m de profundidad, contaminado con compuestos orgánicos volátiles, BTEX e hidrocarburos totales derivados del petróleo, en tan solo 12 meses. Se obtuvieron eficiencias mayores al 90 % con un costo entre 17 y 50 dólares por tonelada de suelo que se trató, siendo

un método muy efectivo a la hora de limpiarlos de algún agente contaminante (Loo y Chilingar 1997).

Los costos asociados a la aplicación en campo de la electrorremediación dependen de factores como la cantidad de suelo a remediar, la conductividad del suelo, el tipo de contaminante, el tipo y construcción de los electrodos, la distancia entre electrodos y el diseño utilizado; sin embargo, el factor que tiene un mayor impacto es el consumo de energía eléctrica. Al aplicarse corriente directa de baja intensidad, es posible utilizar acumuladores recargables por celdas fotoeléctricas para disminuir los costos de la energía utilizada (Rodríguez y Vázquez 2003).

Con base en información reportada por el United States Army Environmental Center en Estados Unidos se estima que de manera general la tecnología de electrorremediación para extraer metales del suelo tiene un costo de tratamiento, de 50 dólares por metro cúbico con un consumo y costo de energía de 500 kWh/m³, considerando un costo de kilowat por hora de 0.03 dólares y una separación de electrodos entre 1 y 1.5 m (USAEC 1997). De forma general la electrorremediación ha demostrado su aplicación exitosa en campo.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.22 CONCLUSIONES

- La electroremediación tiene un gran potencial para descontaminar diversos tipos de suelos contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos en un amplio rango de concentraciones. Aunque en diversos estudios, tanto de laboratorio como de campo se han obtenido buenos resultados, todavía es necesario avanzar en las investigaciones para tener un mejor entendimiento de los fenómenos de transporte involucrados en este proceso. De esta manera se podrá desarrollar en el futuro mejores técnicas híbridas que aprovechen las capacidades de la electroremediación y obtener altas eficiencias de remoción en campo.
- Dado que en algunos casos se requiere de varios días de tratamiento para que la remoción sea efectiva y se pueda dejar limpia la zona donde se realiza el procedimiento, su factibilidad también podría estar determinada por la cantidad de energía consumida para un grado de remoción aceptable.
- Se tendrá en cuenta parámetros de diseño al momento de diseñar el tipo de electrodos que se utilizaran en el área de remoción del contaminante. Es un punto importante, ya que dependiendo de su material y el tamaño para el diseño, podría afectar la aplicabilidad de esta tecnología por los costos que se pueden involucrar al momento de generar la limpieza.

1.23 RECOMENDACIONES

- A medida que pasa el tiempo de aplicabilidad del proceso se tiene que tener en cuenta un factor muy importante el cual es el tipo de electrodos que se están utilizando, en cuanto a su material y también su forma. Se recomendaría usar electrodos planos que permitan abarcar una mayor área de remediación, junto con su disposición en la

matriz del suelo, ya que el uso de soluciones a los extremos no dio una buena respuesta al momento de desarrollar este método.

- Experimentalmente se puede decir que para este suelo en particular se requeriría un mayor tiempo de tratamiento, ya que entre mayor sean las horas que se aplica el método se encontraron mejores resultados en cuanto a pH esperados y perfiles de concentración. De todas maneras esta tecnología es atractiva como alternativa a técnicas más convencionales, ayudándola con un lavado de suelos los beneficios que se obtendrán serán mucho mayores.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, O. (12 de Noviembre de 2012). *La Comunidad Petrolera*. Recuperado el 2 de Febrero de 2015, de La Comunidad Petrolera: <http://yacimientos-de-gas.lacomunidadpetrolera.com/2008/11/yacimientos-de-gascaracterstica-del.html>

Amaya Jiménez, A. G. (Noviembre 2014). CÁLCULO DE RESERVAS. En "ESTUDIO DE LOS POZOS CERRADOS PARA SU REHABILITACIÓN E INCREMENTO DE LA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO EN EL ACTIVO LAGUPA, APLICANDO NUEVAS TECNOLOGÍAS" (pág. 46). Quito, Ecuador.

Azad, J. (1968). *Geology and Petroleum Prospects of the Santa Elena Peninsula*. Quito: Reporte Inédito (JA10).

Benitez, S. (1989). *Estratigrafía de las Formaciones Cayo y Guayaquil en la Cordillera Chongón - Colonche: hacia una redefinición.*, (pág. 24). Loja.

Benitez, S. (1995). Conclusiones sobre La Paleogeografía del Grupo Ancón en Ancón. En *EVOLUCIÓN GEODINÁMICA DE LA COSTA ECUATORIANA* (pág. 111).

BRISTOW, C., & HOFFSTETTER, R. (1977). *Léxico Estratigráfico del Ecuador*. Paris.

Canfield, R. W. (1966). En *Reporte Geológico de la Costa Ecuatoriana* (pág. 30). Quito.

COATZACOALCOS, I. T. (s.f.). *es.slideshare.net*. Recuperado el 17 de Octubre de 2017, de <https://es.slideshare.net/GuillermoAlmaznHernandez/presiones-de-formacin>

Comisión Nacional de Hidrocarburos. (4 de Junio de 2010). *FACTORES DE RECUPERACIÓN DE ACEITE Y GAS EN MÉXICO*. DOCUMENTO TÉCNICO 1. Recuperado el 5 de Febrero de 2015,

de <http://www.cnh.gob.mx/>:
http://www.cnh.gob.mx/_docs/DOCUMENTOTECNICO1FINAL.pdf

CONSULTORA SEEROIL LIMITED. (2006). *ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE REGISTROS DE 21 POZOS PARA LA DETERMINACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE GAS Y/O ACEITE*. Quito.

Craft, B. C., & Hawkins, M. F. (1991). CALCULATING GAS IN PLACE BY THE VOLUMETRIC METHOD. En *APPLIED PETROLEUM RESERVOIR ENGINEERING Second Edition* (pág. 71). Louisiana: Prentice Hall.

Craft, B. C., & Hawkins, M. F. (1991). CALCULATION OF UNIT RECOVERY FROM VOLUMETRIC GAS RESERVOIRS. En B. C. Craft, & M. F. Hawkins, *APPLIED PETROLEUM RESERVOIR ENGINEERING Second Edition* (pág. 77). Louisiana: Prentice Hall.

Da Silva, M. (28 de Septiembre de 2008). *La Comunidad Petrolera*. Recuperado el 4 de Febrero de 2015, de La Comunidad Petrolera: <http://industria-petrolera.lacomunidadpetrolera.com/2008/09/los-factores-volumtricos-de-formacin.html>

Escuela Politécnica del Ejercito. (2007). *Mapa de Anomalías de Bouguer Completa*. Ecuador.

Feininger, T. (1982). SIMPLE BOUGUER GRAVITY ANOMALY FIELD OF ECUADOR. En *SIMPLE BOUGUER GRAVITY ANOMALY FIELD AND THE INFERRED CRUSTAL STRUCTURE OF CONTINENTAL ECUADOR*.

Goossenes, P. J., & Rose, W. I. (1973). En *Chemical Composition and Age Determination of Tholeiitic Rocks in the Basic Igneous Complex* (págs. 1043-1052).

- Helander, D. P. (1983). En *Fundamentals of Formation Evaluation* (pág. 154). Tulsa: OGCI Publication.
- Higley, D. K. (2004). Petroleum Occurrence - Hydrocarbon Source Rocks. En *The Progreso Basin Province of Northwestern Peru and Southwestern Ecuador: Neogene and Cretaceous-Paleogene Total Petroleum Systems* (pág. 12). Reston, Virginia, United States: U.S. Geological Survey.
- Kingston, J. (1994). En *Undiscovered petroleum of southern South America* (pág. 443). U.S. Geological Survey Open-File Report.
- Malone, P. (1999). *Informe Geológico y Reservorio del Área*. Ancón.
- Mccain, W. D. (1990). *The Properties of Petroleum Fluids*. PennWell Books.
- MÉXICO, U. N. (s.f.). *www.ptolomeo.una*. Recuperado el 17 de Octubre de 2017, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1082/Tesis.pdf?sequence=1>
- Moody, G. B. (1961). En *Petroleum Exploration Handbook* (págs. 19.5-19.6-19.22-19.23). McGraw-Hill Book Company.
- Moody, G. B. (1961). Electrical Logging. En *Petroleum Exploration Handbook* (págs. 19.5-19.6-19.22-19.23). United States of America: McGraw-Hill Book Company.
- Olsson, A. A. (1931). The Peruvian Oligocene. En *Contributions to the tertiary Paleontology of Northern Peru* (págs. 100-264).
- PACIFPETROL S.A. (2002). *ESTUDIO DEL AREA NAVARRA*. Ancon-Ecuador.
- PACIFPETROL S.A. (2003). *Estudio Geológico de la FM. Atlanta en el Área Gasífera Navarra*. Ancon - Ecuador.

- PACIFPETROL S.A. (2010). *SISMICA Y GEOLOGIA AREA NAVARRA*. Ancon - Ecuador.
- PALMA, U. R. (s.f.). *cybertesis.urp.edu.pe*. Recuperado el 17 de Octubre de 2017, de http://cybertesis.urp.edu.pe/bitstream/urp/122/1/cavero_c.pdf
- Perdomo Moreno, J. A. (1973). Definiciones sobre Reservas de Hidrocarburos. En "*ESTUDIO DE YACIMIETNO DE GAS*" (pág. 19). Guayaquil.
- Roperch, P., & Mourier, T. (1987). Geophys. En *Rotated oceanic blocks in western Ecuador*. (págs. 558-561).
- Rosello, E. (1996). *Evaluación Geoestructural del Bloque Santa Elena*. Reporte interno de CGC.
- Sauer, W. (1965). En *Geología del Ecuador* (pág. 135). Quito.
- Stainforth, R. M. (1948). En *Applied Micropaleontology in coastal Ecuador* (págs. 112-151).
- Universidad Nacional de Piura. (s.f.). <http://www.unp.edu.pe>. Recuperado el 5 de Febrero de 2015, de <http://www.unp.edu.pe: http://www.unp.edu.pe/facultades/minas/petroleo/Alumn/pyg/YACIMIENTOS%20DE%20GAS.pdf>
- Welex, Halliburton /. (2006). En *Introducción al Analisis de Registros Eléctricos*. Maracaibo.
- www.slb.com*. (s.f.). Recuperado el 17 de Octubre de 2017, de https://www.slb.com/~/_media/Files/resources/oilfield_review/spanish05/win05/p26_47.pdf