

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE
HIDROCARBUROS TOTALES DE LODOS PETROLIZADOS
EMPLEANDO UN PROCEDIMIENTO DE OXIDACIÓN QUÍMICA**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MÁSTER (MSc.) EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

MÓNICA PAULINA TAPIA HINOJOSA
monica.tapia.h@gmail.com

DIRECTOR: ANA LUCÍA BALAREZO Ph.D.
ana.balarezo@epn.edu.ec

Quito, Enero 2016

DECLARACIÓN

Yo, Mónica Paulina Tapia Hinojosa, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente.

MÓNICA PAULINA TAPIA HINOJOSA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo fue desarrollado por Mónica Paulina Tapia Hinojosa, bajo mi supervisión.

**PROF. ANA BALAREZO PhD.
DIRECTOR DEL PROYECTO**

AGRADECIMIENTOS

A Dios,

A mis padres Angelita y Adolfo que con amor supieron inculcar en mi los deseos de superación.

A mis hermanas Isabel, Mariela y Daniela por ser mis amigas y mi apoyo incondicional.

A mi compañero de vida Danny y al motor de mi vida Danaé.

A mi profesor el Ingeniero Marcelo Muñoz por su guía y conocimientos durante casi toda la investigación, así como a la Dra. Ana Lucía Balarezo Directora en la fase final del Proyecto.

A mis amigos Byron Lapo, Nathalia Valencia y Gustavo Moncayo, que de un modo u otro contribuyeron para la culminación de este trabajo.

Un agradecimiento muy especial a José Luis Pazmiño y a Sergio Olivo por su amistad y por los conocimientos compartidos siempre de modo tan generoso.

DEDICATORIA

A mi corazón Danaé.

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
SIGLAS Y ABREVIATURAS	XIV
RESUMEN.....	XV
SUMMARY	XVI
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2 OBJETIVO GENERAL	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO 2	4
INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE LODOS PROVENIENTES DE FONDOS DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE PETRÓLEO CRUDO.....	4
2.1.1 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS.....	5
2.1.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS	6
2.1.3 TRATAMIENTOS FÍSICOS/QUÍMICOS	6
2.2 TRATAMIENTOS QUÍMICOS PARA REDUCCIÓN DE HIDROCARBUROS TOTALES	7
2.2.1 PERMANGANATO.....	7
2.2.2 OZONO.....	8
2.2.3 PERÓXIDO DE HIDRÓGENO	8
2.3 REACTIVO FENTON	9

2.4	CINÉTICA DEL PROCESO.....	12
2.4.1	FACTORES QUE INFLUYEN EN EL SISTEMA FENTON	14
	CAPÍTULO 3	17
	INVESTIGACIÓN DE CAMPO	17
3.1	CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN LA MUESTRA COLECTADA	17
3.2	APLICACIÓN DE DIFERENTES CONCENTRACIONES DE REACTIVO FENTON	19
3.2.3	APLICACIÓN DE REACTIVO FENTON EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.....	20
3.3	ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE TPH	25
3.4	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE TPHs.....	26
	CAPÍTULO 4.....	27
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
4.1	CARACTERIZACIÓN INICIAL	27
4.2	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	28
4.2.1	PRE TRATAMIENTO.....	28
4.2.2	TRATAMIENTO 1 – T1	29
4.2.3	TRATAMIENTO 2 – T2	33
4.2.4	TRATAMIENTO 3 – T3	36
4.2.5	COMPARACIÓN GENERAL	40
4.2.6	ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO	42
4.2.7	ESTIMACIÓN DE COSTOS Y TIEMPOS DE TRATAMIENTO	49
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
5.1	CONCLUSIONES.....	51
5.2	RECOMENDACIONES	52
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
	ANEXOS.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 MÉTODOS DE REMEDIACIÓN, COSTOS Y DURACIÓN APROXIMADOS.....	5
TABLA 2.2 REACTIVIDAD DE FENTON CON CONTAMINANTES COMUNES	10
TABLA 2.3 PROPIEDADES DE COMPUESTOS INVOLUCRADOS EN EL REACTIVO FENTON.....	11
TABLA 2.4 ALGUNAS ESPECIES REACTIVAS EN LA REACCIÓN FENTON, SU POTENCIAL ESTÁNDAR DE REDUCCIÓN E ^o , RANGO DE pH Y FUNCIÓN.....	11
TABLA 2.5 POTENCIALES DE REDUCCIÓN DE ESPECIES DE REACCIÓN EN SISTEMAS DE OXIDACIÓN	12
TABLA 2.6 CONCENTRACIÓN DE PERÓXIDO Y RELACIONES ADECUADAS	16
TABLA 3.1 CONDICIONES DE PRE-TRATAMIENTO	19
TABLA 3.2 IDENTIFICACIÓN DE TRATAMIENTOS.....	21
TABLA 3.4 CONDICIONES EXPERIMENTALES FIJAS DE LOS ENSAYOS.....	24
TABLA 4.1 ANÁLISIS QUÍMICO DE MUESTRA INICIAL	27
TABLA 4.2 CONCENTRACIÓN INICIAL DE TPHS DE LA MUESTRA Y CONCENTRACIÓN OBTENIDA LUEGO DE LA APLICACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL SEPARADOR DE FASES.....	28
TABLA 4.3 CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO1 – APLICACIÓN 1.....	29
TABLA 4.4 CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 1 – APLICACIÓN2.....	30
TABLA 4.5 CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 1 – APLICACIÓN 3.....	31
TABLA 4.6 CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 2 –.....	33
TABLA 4.7 CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 2 –.....	34

TABLA 4.8 CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 2 – APLICACIÓN 3.....	35
TABLA 4.9 CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 3 – APLICACIÓN 1.....	37
TABLA 4.10 CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 3 – APLICACIÓN 2.....	38
TABLA 4.11 CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 2 – APLICACIÓN 3.....	39
TABLA 4.12 CLASIFICACIÓN DE GRUPOS DE HIDROCARBUROS.....	43
TABLA 4.13 COMPARACIÓN DE LA FRACCIONES REMOVIDAS PARA LA MUESTRA DE FONDO DE TANQUE INICIAL Y LA MUESTRA LUEGO DE LA APLICACIÓN DEL SEPARADOR DE FASES	43
TABLA 4.14 PORCENTAJE DE DE LA FRACCIONES REMOVIDAS PARA LA MUESTRA DE FONDO DE TANQUE INICIAL Y LA MUESTRA LUEGO DE LA APLICACIÓN DEL SEPARADOR DE FASES	49
TABLA 4.15 COSTOS ESTIMADOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL TRATAMIENTO PROPUESTO.....	51

ÍNDICE DE FOTOS

FOTO 3.1 FONDO DE TANQUE.....	18
FOTO 3.2 REACTORES UTILIZADOS.....	20
FOTO 3.3 ENSAYOS T1A1 X 3.....	22
FOTO 3.4 FOTO ENSAYOS T2A1 X 3.....	23
FOTO 3.5 ENSAYOS T3A1 X 3.....	23

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1	ESQUEMA DEL MECANISMO DE REACCIÓN DE UN PROCESO FENTON	14
FIGURA 4.1	CONCENTRACIÓN DE TPHS EN LAS 3 REPETICIONES DESPUÉS DE LA PRIMERA APLICACIÓN T1A1.....	29
FIGURA 4.2	TRATAMIENTO1 – APLICACIÓN 2	30
FIGURA 4.3	TRATAMIENTO1 – APLICACIÓN 3	31
FIGURA 4.4	CONCENTRACIÓN DE TPHS (mg/Kg) PARA LAS 3 REPETICIONES EN LAS 3 DIFERENTES APLICACIONES DEL TRATAMIENTO 1	32
FIGURA 4.5	TRATAMIENTO 2 APLICACIÓN 1	33
FIGURA 4.6	TRATAMIENTO 2 APLICACIÓN 2	34
FIGURA 4.7	TRATAMIENTO 2 APLICACIÓN 3	35
FIGURA 4.8	CONCENTRACIÓN DE TPHS (mg/Kg) PARA LAS 3 REPETICIONES EN LAS 3 DIFERENTES APLICACIONES DEL	36
FIGURA 4.9	TRATAMIENTO 3 APLICACIÓN 1	37
FIGURA 4.10	TRATAMIENTO 3 APLICACIÓN 2	38
FIGURA 4.11	TRATAMIENTO 3 APLICACIÓN 3	39
FIGURA 4.12	CONCENTRACIÓN DE TPHS (mg/Kg) PARA LAS 3 REPETICIONES EN LAS 3 DIFERENTES APLICACIONES DEL TRATAMIENTO 3	40
FIGURA 4.13	COMPARACIÓN GENERAL ENTRE TRATAMIENTOS	41
FIGURA 4.14	CROMATOGRAMAS DE LA MUESTRA INICIAL DE FONDO DE TANQUE Y DE LA MUESTRA LUEGO DE LA APLICACIÓN DEL SEPARADOR DE FASES.....	44
FIGURA 4.15	COMPARACIÓN DE LOS CROMATOGRAMAS DE LA MUESTRA DE FONDO DE TANQUE LUEGO DE APLICACIÓN DEL SEPARADOR DE FASES (TO) CON LAS MUESTRAS DE LOS TRES TRATAMIENTOS LUEGO DE LA TERCERA APLICACIÓN (T1A3, T2A3 Y T3A3).....	46
FIGURA 4.16	CROMATOGRAMAS DE LA MUESTRA T1A3	46

FIGURA 4.17	CROMATOGRAMAS DE LA MUESTRA T2A3	47
FIGURA 4.18	CROMATOGRAMAS DE LA MUESTRA T3A3	48

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: CROMATOGRAMAS OBTENIDOS.....	59
ANEXO 2: LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE TPH (RAOHE 1215, 2001)	79
ANEXO 3: ESPECIFICACIONES DE NEOFLOAT®.....	81

SIGLAS Y ABREVIATURAS

TPH	Hidrocarburos Totales de Petróleo
TNRCC	Texas Natural Resource Conservation Commission
PCE	Percloroetileno
TCE	Tricloroetileno
DCE	Dicloruro de etileno
VC	Cloruro de vinilo
CB	Clorobenceno
BTEX	Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno
MTBE	Metil tert-butil éter
DCA	Dicloroetano
HAP's	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
TCA	Tricloroetano
CT	Clorotolueno
PCB's	Bifenilo policlorado
Ox F	Oxidante fuerte
Red D	Reductor débil
Ox D	Oxidante débil
Diels-Alder	Reacción de Diels-Alder
Ene	Componente Enófilo
E°	Potencial estándar de reducción
NHE	Electrodo normal de hidrógeno
V	Voltios

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo analizar la eficiencia de la remoción de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPHs) presentes en lodos de fondo de tanques provenientes de actividades petroleras, mediante el uso del reactivo de Fenton. Entre los procesos de oxidación avanzada (AOP), el uso del reactivo Fenton ha destacado en los últimos tiempos por ser un método rápido y de eficiencia aceptable, para oxidación de compuestos orgánicos.

Durante la fase experimental se ensayaron tres diferentes concentraciones de reactivo Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2\text{-Fe}$): 10% (T1), 20% (T2) y 30% (T3) (v/v) de Peróxido de Hidrógeno, manteniendo la misma concentración de hierro. Los tratamientos consistieron en realizar tres aplicaciones consecutivas de reactivo Fenton a una misma masa de muestra; además los tratamientos se realizaron por triplicado, esto es 27 ensayos en total. Tanto al inicio de cada tratamiento como luego de cada aplicación se determinó la concentración de TPHs acorde al método TNRCC 1005, mismo que utiliza cromatografía de gases (GC) con detector FID. Los resultados obtenidos mostraron que los tratamientos lograron remover el 44,39 %, 42,40 % y 44,25 % de TPHs para los tratamientos T1, T2 y T3, respectivamente; siendo el tratamiento T1 el más eficiente con el 44,39%, esto es, cuando se utilizó el reactivo Fenton al 10% (v/v).

Del análisis cromatográfico se determinó que la mayor eficiencia de remoción estuvo en los hidrocarburos presentes en menor concentración. Siendo entre el C6 al C11 y entre el C21 al C30, sin embargo los hidrocarburos intermedios tuvieron mejor remoción al aplicar el reactivo Fenton al 30%.

PALABRAS CLAVES:

LODOS DE FONDO DE TANQUE, HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO, REACTIVO FENTON, REMEDIACIÓN DE SUELOS, TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO

SUMMARY

The present work aimed to evaluate the removal treatment procedure of Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) concentrated in tank bottom sludge from petroleum extraction activities through the application of Fenton's reagent (H_2O_2-Fe). In the field of treatment procedures for removal of THP, a variety of physicochemical and biological methods have been used lately. Among them, the Fenton reaction treatment has shown to be a fast and effective removal procedure applicable for oxidation of organic compounds particularly in samples, which contains high levels of pollutants.

It was tested three different Fenton's reagent concentrations: at 10% (T1), 20% (T2) y 30% (T3) (v/v) of Hydrogen peroxide and always keeping the same iron concentration ratio. The tests were done applying three consecutives Fenton's reagent treatments in the same sample, given a total of 27 experiments. The analytical measurements were approached using TNRCC1005 method, which use gas chromatograph with FID detector.

The results indicated that the three procedures achieved 44,39%, 42,40% and 44,25% TPH removal in the corresponding T1, T2, and T3 treatments. Therefore, it was seen that the better results were obtained in T1 using Fenton's reagent at 10% (v/v).

The chromatographic analysis showed that the better removal efficiency was obtained in hydrocarbons with lower initial concentration, i.e. C6 to C11 and C21 to C30. For intermediate samples, i.e. C12 to C20, the best results were obtained applying Fenton's reagent at 30%

KEY WORDS:

TANK BOTTOM SLUDGE, TOTAL PETROLEUM HYDROCARBONS, FENTON REACTION, SOIL REMEDIATION, PHYSICOCHEMICAL TREATMENT

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

La principal zona de influencia de la actividad petrolera del Ecuador se encuentra concentrada en un 80% en la Amazonía; principalmente en cuatro cantones: Nueva Loja, Orellana, La Joya de los Sachas y Shushufindi. Esta zona tiene un número considerable de pasivos ambientales contaminados con hidrocarburos, como resultado de fugas o descargas accidentales de petróleo y combustibles como gasolina y diésel. Además, la disposición de recortes de perforación, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados, que se han producido dentro y fuera de las instalaciones productoras y almacenadoras, tienen el potencial para ser tratados para descontaminación, previo a su disposición final.

Los procesos físicos y químicos de separación del petróleo del agua de formación, gas y arena, generan anualmente 4% de sedimentos, conocidos como fondos de tanques. Estos sedimentos resultan durante el almacenamiento del crudo, donde la parte más pesada desciende al fondo del tanque; este fondo, a su vez es tratado con diésel para recuperar la última fracción posible de crudo, quedando finalmente, una porción de lodo pesado. (Abad, 2008).

En el Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas del Ecuador, del 13 de febrero del 2011, los fondos de tanque son considerados como desechos peligrosos con código A4060 "Desechos de mezclas y emulsiones de aceite y agua o de hidrocarburos y agua". En el Listado Nacional de Sustancias Químicas Peligrosas, Desechos Peligrosos y Especiales, Acuerdo

Ministerial 142, del Ministerio del Ambiente del Ecuador; este desecho se codifica como C.19.04.

Los métodos de tratamiento propuestos por el Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas del Ecuador del 13 de febrero del 2011 son: recuperación, reutilización adecuada y tratamiento.

En el país las dos primeras alternativas no son utilizadas por la operadoras de campos productores de petróleo, ya que no pueden reusar o recuperar los residuos porque son emulsionados de producto de retro lavado de tanques, líneas y separadores.

Los fondos de los tanques contienen sustancias peligrosas como: metales pesados, hidrocarburos poliaromáticos, bacterias, entre otros.

Si estas emulsiones reingresan al proceso se taponarían los filtros causando daños en bombas, retrasos en procesos e incrementos en costos por mantenimiento y suspensión de la producción (Abad, 2008).

La Empresa Pública EP Petroecuador ha reusado estos fondos de tanque mezclado con gravilla fina o lastre, para construcción de vías de acceso a las islas de producción y carreteras de acceso a plantas, dando como resultado gran cantidad de lixiviados con altos contenidos de hidrocarburos y metales pesados que son arrastrados por la lluvia hacia los esteros, ríos, suelo y vegetación (Abad, 2008).

Para el tratamiento y disposición final de este tipo de residuo la bibliografía muestra opciones de tratamientos biológicos, térmicos y químicos, estos últimos comparados con las tecnologías físicas y químicas ofrecen ventajas por la simplicidad, la gama de la eficiencias y tiempo corto de operación (Federal Remediation Technologies Roundtable, 2009).

La importancia de las tecnologías químicas radica en que por ser reacciones de oxidación-reducción (redox) convierten químicamente compuestos tóxicos o peligrosos a compuestos no peligrosos, más estables, menos móviles o inertes;

cadenas más cortas y de fácil degradación de los contaminantes. Siendo estos tratamientos útiles como alternativas o complementos a técnicas convencionales mencionadas (U.S. EPA. 2006).

Los agentes oxidantes más usados para tratar este tipo de residuos son peróxido de hidrógeno, hipocloritos, cloro, dióxido de cloro y el reactivo Fenton (peróxido de hidrógeno y hierro) (U.S. EPA. 2006).

El uso del reactivo Fenton para reducir los niveles de contaminación de substratos orgánicos es ampliamente empleado; este método puede aplicarse *in situ* o *ex situ* en suelos, lodos, sedimentos y otros sólidos. A pesar de sus facilidades de uso, los niveles de eficiencia de su aplicación, en el Ecuador, no han sido estudiados, razón por la que, en base a lo expuesto, la presente investigación buscó conocer la eficiencia del uso del reactivo Fenton para la remoción de hidrocarburos totales (TPHs) de lodos provenientes de los tanques de almacenamiento de petróleo.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Analizar la eficiencia de la remoción de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) de lodos provenientes de los tanques de almacenamiento de petróleo, a través de una técnica de oxidación química empleando el reactivo Fenton.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la concentración inicial de hidrocarburos totales (TPH) de lodos provenientes de los tanques de almacenamiento de petróleo.
- Determinar la concentración de (H₂O₂-Fe) de reactivo Fenton más apropiada para la remoción de TPH.
- Determinar la eficiencia de la remoción de TPH del fondo de tanque en estudio.

CAPÍTULO 2

INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE LODOS PROVENIENTES DE FONDOS DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE PETRÓLEO CRUDO

Acorde a U.S. EPA (2006), las tecnologías de remediación *in-situ* están clasificadas en tres grandes grupos:

- a) Tecnologías de tratamiento físico-químico
- b) Tecnologías de tratamiento biológico y
- c) Tecnologías de tratamiento térmico

De ellas, las tecnologías físico-químicas representan el más diverso grupo de tecnologías de remediación, las que incluyen: extracción sólido-vapor, solidificación/estabilización, oxidación, lavado de sólidos y separación electrocinética (U.S. EPA. 2006).

Las tecnologías de tratamiento implican cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que alteran la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas, de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (U.S. EPA. 2006).

El proceso más ampliamente usado para remediación de suelos contaminados por hidrocarburos de petróleo, en la región amazónica nororiental del Ecuador, en las primeras etapas, es el lavado con agua, ya sea a presión, con aplicación

de calor, con ayuda de surfactantes o con combinaciones de éstos y otros elementos (PEPDA, 2005; PECS-IECONTSA, 2001); las biopilas y el landfarming son los comunes tratamientos biológicos secundarios; se usa además la bioaumentación para potenciar y acelerar estos procesos, también se ha empleado la estabilización mediante el uso de puzolánicos, cal, cemento (PECS-IECONTSA, 2001) y la desorción térmica en menor escala, para fabricación de ladrillos con residuos petroleros (CELTEL, 2007).

Según, Toledo (2009), los métodos de remediación, sus costos y duración aproximada del proceso se muestra la Tabla 2.1.

TABLA 2.1
MÉTODOS DE REMEDIACIÓN, COSTOS Y DURACIÓN APROXIMADOS
PARA SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

MÉTODO DE REMEDIACIÓN	TIEMPO (meses)	COSTO USD / m ³
Extracción por fluidos	2 a 6	238
Tratamiento electroquímico	Semanas a 8 meses	350
Inyección de aire	2	25
Lavado de suelo	4	35
Fitorremediación	>6	120
Biorremediación	>6	150
Solidificación/Estabilización	Horas o semanas	110

FUENTE: Toledo, 2009

2.1.1 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

La biorremediación, es una técnica aplicable a los contaminantes orgánicos, dirigida a una adecuada estimulación de los microorganismos para crecer y utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía, en un entorno favorable de humedad, temperatura y pH. Este tratamiento utiliza las reacciones metabólicas de ciertos microorganismos para degradar, transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos como el CO₂ y el H₂O (Solanas, 2009).

Los tratamientos biológicos se han utilizado con éxito para remediar los suelos, lodos y aguas subterráneas contaminadas por hidrocarburos de petróleo. Dado que los productos petrolíferos son mezclas complejas de hidrocarburos y derivados, la biodegradación es selectiva, debido a que los microorganismos no degradan por igual las distintas familias de hidrocarburos, por lo que después de una biorremediación pueden quedar concentraciones residuales de algunos hidrocarburos. El tratamiento biológico de Hidrocarburos Poli Aromáticos (HAPs) deja HAPs menos degradables (cHAPs) (Solanas, 2009).

Durante el proceso de biorremediación, algunos compuestos, pueden ser metabolizados en subproductos más tóxicos (por ejemplo, tricloroetileno (TCE) a cloruro de vinilo). En aplicaciones *in situ*, éstos metabolitos pueden movilizarse al agua subterránea o ponerse directamente en contacto con el personal si no se utilizan técnicas de control. Este tipo de sistema de tratamiento requiere de suelos, acuíferos, y la caracterización de contaminantes, y puede requerir tratamiento del agua subterránea extraída. El agua subterránea con bajo nivel de contaminación puede ser reusada para abastecer de agua el área en proceso de tratamiento (Federal Remediation Technologies Roundtable, 2009).

2.1.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Estos tratamientos utilizan calor para incrementar la volatilización (separación), quema, descomposición (destrucción) o fundición (inmovilización) de los contaminantes en un suelo. Las tecnologías de separación incluyen la desorción térmica y descontaminación por gas caliente, mientras que las tecnologías de destrucción son la incineración y la pirólisis (Federal Remediation Technologies Roundtable, 2009).

2.1.3 TRATAMIENTOS FÍSICOS/QUÍMICOS

Este tipo de tratamientos utilizan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener éstos. Típicamente, involucran reacciones de oxidación-reducción (redox) que

convierten químicamente compuestos tóxicos o peligrosos a compuestos menos tóxicos o no peligrosos, que son más estables, menos móviles y más inertes. (U.S. EPA. 2006). Estos métodos se pueden aplicar *in situ* o *ex situ* en suelos, lodos, sedimentos y otros sólidos contaminados. Los agentes oxidantes más usados para tratar contaminantes peligrosos en el suelo, son: permanganato de sodio (NaMnO_4), permanganato de potasio (KMnO_4), ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), hipocloritos (ClO^-), cloro (Cl_2), dióxido de cloro (ClO_2) y el reactivo Fenton (peróxido de hidrógeno más hierro).

Es importante considerar las propiedades del suelo y el método de inyección cuando se escoge el oxidante apropiado ya que existen inconvenientes que se debe tomar en cuenta como:

- La introducción del oxidante puede impactar negativamente en la superficie del suelo.
- Disminuye la permeabilidad del suelo (formación de coloides).
- Producción de compuestos tóxicos.
- Producción de calor y gas.
- Logística para manejo y almacenamiento de los oxidantes químicos.

2.2 TRATAMIENTOS QUÍMICOS PARA REDUCCIÓN DE HIDROCARBUROS TOTALES

2.2.1 PERMANGANATO

El permanganato (MnO_4)¹⁻ es un oxidante químico emergente, usado para destruir compuestos orgánicos derivados del petróleo en suelos y aguas subterráneas. Sin embargo, su incapacidad para oxidar benceno lo convierte en un mal candidato para la oxidación de sitios contaminados con petróleo.

Las ventajas de este agente oxidante son las siguientes:

- Oxida compuestos orgánicos en un amplio rango de pH.
- Permanece un período prolongado en el subsuelo permitiendo al oxidante reaccionar más efectivamente sobre los contaminantes adsorbidos en suelos permeables.
- Normalmente no produce calor o vapores que preocupen a la salud y seguridad.
- Trata con éxito el MTBE (Metil Ter Butil Éter) en estudios de laboratorio

El permanganato aplicado puede ser de sodio (NaMnO_4) o potasio (KMnO_4), siendo este último más empleado por ser menos costoso, disponible en el mercado local, y su estado sólido facilita su transporte y manejo; además tiene una solubilidad mucho menor que el NaMnO_4 y generalmente se aplica en concentraciones más bajas (U.S. EPA, 2006).

2.2.2 OZONO

El ozono (O_3) es uno de los oxidantes más fuertes, puede ser aplicado como gas o disuelto en agua. Como gas, el ozono puede degradar directamente un sin número de productos químicos, proporcionando un entorno rico en oxígeno para contaminantes que se degradan bajo condiciones aeróbicas. El ozono acuoso se degrada para formar especies radicales, que son altamente reactivas y no específicas.

Una desventaja del uso de ozono es que tiene un corto tiempo de retención en el subsuelo debido a que reacciona rápidamente con una amplia gama de especies químicas no objeto de tratamiento como minerales reducidos, orgánica materia, incluyendo el ion hidróxido (OH^-) (U.S. EPA, 2006).

2.2.3 PERÓXIDO DE HIDRÓGENO

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es un oxidante fuerte que puede ser inyectado en una zona para destruir contaminantes de petróleo. Su reacción es

exotérmica lo que permite que los contaminantes sean degradados más fácilmente y se volatilicen. Cuando es inyectado en agua subterránea es inestable y reacciona con contaminantes y compuestos orgánicos del suelo.

Al H_2O_2 no es factible de direccionarlo hacia contaminantes encontrados en suelos de baja permeabilidad debido a su alta tasa de reacción y descomposición. Los peróxidos sólidos, como el peróxido de calcio, en forma de suspensión pueden moderar la tasa de disolución y la generación de peróxido, lo que permite una distribución más uniforme (U.S. EPA, 2006).

2.2 REACTIVO FENTON

Hace más de 100 años, H.J.H. Fenton reportó que el ion Fe^{2+} promovió fuertemente la oxidación del ácido málico con peróxido de hidrógeno. La combinación de H_2O_2 y sales de Fe^{2+} , se denominó desde entonces “reacción Fenton”, la cual es un oxidante eficaz para una amplia variedad de sustratos orgánicos (Peyton, Holm, & Shim, 2006).

El reactivo Fenton es la combinación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y sulfato ferroso ($FeSO_4$), en esta reacción se generan radicales hidroxilo ($OH\cdot$) que son oxidantes poderosos. La reacción es rápida, libera oxígeno, es exotérmica y puede ser difícil de controlar. Debido a la alta velocidad de reacción, el área de influencia alrededor del punto de inyección es pequeña (U.S. EPA, 2006).

En el proceso Fenton la carga contaminante se trata típicamente a presión atmosférica, temperaturas entre $20^\circ C$ a $40^\circ C$ y en condiciones ácidas. El proceso puede alcanzar una significativa degradación de los contaminantes orgánicos, comprendiendo:

- Un cambio estructural de los compuestos orgánicos lo que posibilita un eventual tratamiento biológico posterior.

- Una oxidación parcial que redunde en una disminución de la toxicidad del residuo.
- Una oxidación total de los compuestos orgánicos en sustancias inocuas que posibilitan una descarga segura del efluente sin necesidad de un posterior tratamiento.

El proceso Fenton ha resultado efectivo para degradar compuestos alifáticos y aromáticos clorados, PCBs, nitroaromáticos, colorantes azo, clorobenceno, PCP, fenoles, fenoles clorados, octacloro-p-dioxina y formaldehído. Son muy pocos los compuestos que no pueden ser atacados por este reactivo.

La Tabla 2.2, presenta la relación del poder de reacción del reactivo Fenton con contaminantes comunes.

TABLA 2.2

REACTIVIDAD DE FENTON CON CONTAMINANTES COMUNES

OXIDANTE	ALTA	MODERADA	BAJA
Reactivo Fenton	PCE, TCE, DCE, VC, CB, BTEX, MTBE, Fenoles.	DCA, CH ₂ Cl ₂ , HAPs, Explosivos	TCA, CT, CHCl ₃ , PCBs, Pesticidas

PCE: Percloroetileno, TCE: Tricloroetileno, DCE: Dicloruro de etileno, VC: Cloruro de vinilo, CB: Clorobenceno, BTEX: Benceno, Tolueno, Etileno, Xileno, MTBE: Metil tert-butil éter, DCA: Dicloroacetato, HAP's: Hidrocarburos aromáticos policíclicos, TCA: Tricloroacetaldehído; CT: Clorotolueno, PCB's: Bifenilo policlorado

FUENTE: ITRC 2005

ELABORADO POR: Mónica Tapia.

Las ventajas de usar el reactivo Fenton son las siguientes:

- El Fe²⁺ es abundante y no tóxico.
- El manejo del peróxido de hidrógeno (H₂O₂) es fácil y es ambientalmente benigno.
- No se forman compuestos clorados como en otras técnicas oxidantes y no existen limitaciones de transferencia de masa por tratarse de un sistema homogéneo.

La desventaja de usar el reactivo Fenton es:

- Puede ocurrir una oxidación incompleta o formación de compuestos intermedios, dependiendo del contaminante.

Las Tablas 2.3 y 2.4 muestran algunas propiedades físicas y químicas de las especies involucradas.

TABLA 2.3
PROPIEDADES DE COMPUESTOS INVOLUCRADOS EN EL REACTIVO FENTON

FÓRMULA	PESO MOLECULAR (g/mol)	DENSIDAD (g/cm ³)	ESTADO FÍSICO	SOLUBILIDAD DE AGUA
H ₂ O ₂	34	1,11 (sol. 30%)	Líquido	Miscible
FeSO ₄ ·7H ₂ O	278	1,895	Sólido	30%

FUENTE: Villacreces, L., 2013

ELABORADO POR: Mónica Tapia

TABLA 2.4
ALGUNAS ESPECIES REACTIVAS EN LA REACCIÓN FENTON, SU POTENCIAL ESTÁNDAR DE REDUCCIÓN E⁰, RANGO DE pH Y FUNCIÓN

ESPECIE	FÓRMULA	E ⁰ (V)	pH	FUNCIÓN
H ₂ O ₂	H ₂ O ₂	1,776	< 11,6	Ox F, Red D
Radical hidroxilo	OH [•]	2,59	< 11,9	Ox F
Anión superóxido	O ₂ ^{•-}	- 0,33	> 4,8	Red D
Radical perhidroxilo	HO ₂ [•]	1,495	< 4,8	Ox F
Anión hidroperóxido	HO ₂ ⁻	0,878	> 11,6	Ox D, Red D
Ion ferril	FeO ₂ ⁺	desconocido	Desconocido	Ox F
Electrones solvatados	e ⁻ (aq)	-2,77	> 7,85	Red F
Oxígeno singlete	¹ O ₂	no aplicable	Desconocido	Diels-Alder / Ene
Oxígeno triplete (atm.)	³ O ₂	1,23	Cualquiera	Ox D

Ox F: Oxidante fuerte, Red D: Reductor débil, Ox D: Oxidante débil, Diels-Alder: Reacción de Diels-Alder, Ene: Componente Enófilo, E⁰: Potencial estándar de reducción, NHE: Electrodo normal de hidrógeno, V: Voltios

FUENTE: Villacreces, 2013

ELABORADO POR: Mónica Tapia

TABLA 2.5
POTENCIALES DE REDUCCIÓN DE ESPECIES DE REACCIÓN EN
SISTEMAS DE OXIDACIÓN

REACCIÓN	E° (V vs NHE)	RANGO DE pH
$\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1,776	ácido
$\text{HO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \leftrightarrow 3\text{OH}^-$	0,878	alcalino
$\text{OH}^\cdot + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$	2,59	ácido
$\text{H}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \text{OH}^-$	1,64	alcalino
$\text{HO}_2^- + \text{H}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	1,495	ácido
$\text{O}_2^- + \text{e}^- \leftrightarrow \text{O}_2^{\cdot-}$	-0,33	alcalino

FUENTE: Villacreses, 2013

ELABORADO POR: Mónica Tapia

Acorde a varios autores, entre diferentes tipos de oxidación, la oxidación de Fenton es una de las tecnologías más populares para la remediación in-situ, y ésta es reconocida como una de las más poderosas herramientas en la oxidación, ya que es usada para destruir en una variedad de compuestos orgánicos biorefractarios en residuos acuosos y sólidos, gracias al alto poder oxidativo y simplicidad. (Mang Lu, 2010; Souza, Valdinete, De Barros, & Simonnot, 2009; Millioli, V., Freire, D., Cammarota, M., 2003).

2.3 CINÉTICA DEL PROCESO

La clásica reacción Fenton, mostrada en la ecuación 2.1, implica específicamente la reacción entre el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el ión ferroso (Fe^{2+}) produciendo el radical hidroxilo (OH^\cdot) y férrico (Fe^{3+}) y los iones hidroxilo (OH^-).



La descomposición del peróxido de hidrógeno es catalizada por la presencia de iones ferrosos, los mismos que se mantienen en el medio a través de su

regeneración a partir de iones férricos en las reacciones presentadas en las ecuaciones 2.2 y 2.3.



Según Gordón (2015), estudios respecto a la cinética del proceso Fenton han establecido que la reacción 2.2 es la reacción limitante del mecanismo de reacción, puesto que es más lenta que la reacción 2.1. Otra posible reacción entre los iones ferrosos y el peróxido de hidrógeno se presenta en la ecuación 2.4, en la que se genera un tipo de complejos férricos, cuya formación se ve favorecida por la acidez del medio.



La ecuación 2.7 representa la terminación del ciclo de reacción (Barbusinsky, 2009)



Los radicales hidroxilos, generados según la ecuación 2.1, pueden reaccionar a la vez con los iones ferrosos y el peróxido de hidrógeno, como se muestra en las reacciones 2.5 y 2.6, por lo que también podrían consumir dicho radical; por ello, es importante establecer las cantidades adecuadas de estos reactivos, para evitar que la eficiencia del proceso disminuya (Gordón, 2015).

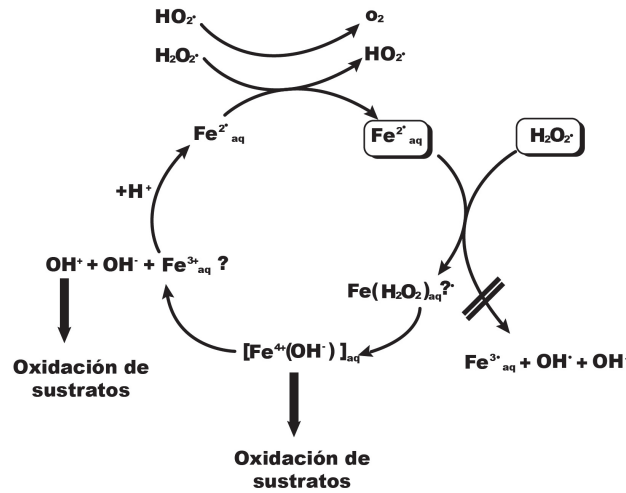
Según Blanco (2009), es necesario que el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) se encuentre en exceso respecto a la cantidad de hierro añadida (Reacciones 2.2-2.4).

El mecanismo de reacción de un sistema Fenton ha sido representado de forma esquemática en la Figura 2-1 donde se puede apreciar la secuencia de

reacciones de la descomposición del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) por la presencia de iones ferrosos (Fe^{2+}), los mismos que se mantienen en el medio a través de su regeneración a partir de iones férricos (Fe^{3+}).

FIGURA 2.1

ESQUEMA DEL MECANISMO DE REACCIÓN DE UN PROCESO FENTON



FUENTE: (Barbusinsky, 2009).

2.4.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL SISTEMA FENTON

Según Castells (2009), los parámetros de operación que influyen en el sistema Fenton son el pH, la concentración inicial de la sal ferrosa, la concentración inicial de peróxido de hidrógeno y la temperatura de la reacción.

- pH:** Los mejores rangos de pH para una operación ideal del sistema Fenton están en el rango de 3 y 4 (Gogate y Pandit, 2003); mantener el pH en estos valores permite asegurar una fase homogénea durante el proceso. A un valor de pH mayor a 3,0 precipitan los hidróxidos férricos formados, mientras que a un pH menor a 2,5 se forman compuestos férricos que reacciona con el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) disminuyendo de este modo la eficiencia del proceso (Gordón, 2015).

- b) **Concentración inicial de la sal ferrosa (Fe^{2+}):** Los resultados de varios estudios indican que la degradación de compuestos orgánicos es mayor cuando la concentración de iones ferrosos también es alta, hasta un nivel en el se producen reacciones considerables de competencia por el radical hidroxilo (Gordón, 2015).
- c) **Concentración inicial de peróxido de hidrógeno (H_2O_2):** Incide directamente en la eficacia del proceso de degradación, usualmente se observa que el porcentaje de degradación de los contaminantes aumenta cuando se incrementa la dosificación del peróxido de hidrógeno. (Gogate y Pandit, 2003).
Sin embargo, un exceso de este oxidante se convierte en un agente competidor de los mismos radicales hidroxilos generados. (Gordón, 2015). Además el peróxido de hidrógeno es nocivo para microorganismos y puede afectar la eficiencia de la degradación significativamente si el reactivo Fenton es usado como previo a un tratamiento biológico (Gogate y Pandit, 2003).
- d) **Temperatura de la reacción:** Se puede establecer que la eficiencia del proceso mejora a medida que la temperatura aumenta, Agustina y Ang, (2012) y Rivas et al. (2001), reportaron que la eficiencia de la degradación no se ve afectada cuando la temperatura aumenta de 10 a 40 °C.
Ma, Chang y Chao, (2012) y Torrades et al, (2008) indican que el incremento en la eficiencia del proceso es significativo a una temperatura mayor a 25 °C, sin embargo a temperaturas mayores a 30 °C, la variación de la eficiencia, ya no suele ser significativa y sobre los 40 °C se promueve la descomposición acelerada del peróxido de hidrógeno.

En la tabla 2.6 se resume las condiciones de varias investigaciones realizadas con Fenton en matrices similares, contaminadas con hidrocarburos y las eficiencias obtenidas han sido superiores al 70%, con concentraciones usadas de H_2O_2 del 5 al 50%.

TABLA 2.6

CONCENTRACIÓN DE PERÓXIDO Y RELACIONES ADECUADAS

MATRIZ	CONCENTRACIÓN DE H ₂ O ₂	RELACIÓN Fe ⁺² :H ₂ O ₂	EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN ALCANZADA (%)	OBSERVACIÓN	REFERENCIA
Suelo contaminado con petróleo	15%	No especificada	90	Acidificación con HNO ₃ y empleo de detergente multietápico	(Villacreses, 2013)
Lodo de petróleo	15%	0,1	73		(Farzadkia, Dehghani, & Moafian, 2014),
Lixiviado de residuo sólido	1%	0,6	98,9	Fenton-Adsorción	(Mendez & Pietrogiovanna, 2010)
Suelo contaminado con hidrocarburos	5-50%	No especificada	No especificada	Referencia General	(U. S. EPA, 2006)

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

CAPÍTULO 3

INVESTIGACIÓN DE CAMPO

3.1 CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN LA MUESTRA COLECTADA

3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL A TRATAR

Los fondos de tanque son un producto acumulado en el fondo de los tanques de almacenamiento de petróleo, éste material está formado por la precipitación de las partículas sólidas y fracciones de petróleo. Mismos que suelen contener agua, sedimentos, arenas, grasas, aceites, petróleo, compuestos orgánicos y elementos inorgánicos, como los metales (Pucci, G., Acuña A., Pucci, O., 2015).

Estos sedimentos son periódicamente removidos ya que quitan espacio de almacenamiento. Las empresas petroleras antes de entregar este desecho a un gestor ambiental, realizan un lavado con diésel para recuperar las últimas fracciones posibles de crudo, el resultado de ésta técnica es un lodo pesado denominado fondo de tanque.

La Foto 3.1 muestra el fondo de tanque (lodo pesado) utilizado en los ensayos, es decir, la muestra a ser oxidada para la remoción de TPHs.

FOTO 3.1**FONDO DE TANQUE**

FUENTE: Tapia, M. (2015)

3.1.2 PRETRATAMIENTO APLICADO

Se realizó un pre-tratamiento al fondo de tanque para recuperar parte del crudo presente, consistió en usar un separador de fases a base de Limoneno, de nombre comercial NeoFloat®.

El separador de fases es un agente tensoactivo o surfactante no iónico combinado con el d-limoneno, que es un solvente natural; esta solución actúa separando la fase grasa del sedimento, al bajar la tensión superficial y envolver químicamente al hidrocarburo formando una emulsión.

Según Delgado, K., & Zulaga T, (2009), la aplicación de esta técnica como pre-tratamiento permite disminuir la concentración del contaminante en al menos un 60 %.

El pretratamiento se realizó en un reactor estático metálico donde se colocaron 35 kg del fondo de tanque y se adicionó agua combinada con el agente desengrasante-separador de fases en relación 1:10, se agitó por 15 minutos y se dejó en reposo por 10 minutos para facilitar la separación de las diferentes fases y, finalmente se recuperó parte del hidrocarburo del sedimento.

Las condiciones utilizadas en este pre-tratamiento se resumen en la Tabla 3.1:

TABLA 3.1
CONDICIONES DE PRE-TRATAMIENTO

CONDICIÓN	VALOR	UNIDAD
Cantidad de fondo usado	35	kg
Cantidad de separador de fases agregado	6,5	kg
Cantidad de agua agregada*	65	kg
Relación Separador de fases– Agua	1:10	
pH mezcla	5,5	pH
Tiempo de agitación	15	min
Velocidad de agitación	20-25	rpm
Tiempo de sedimentación	10	min
Masa total	100	kg

*Cantidad de agua agregada acorde a las recomendaciones del fabricante

FUENTE Y ELABORADO POR ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

3.2 APLICACIÓN DE DIFERENTES CONCENTRACIONES DE REACTIVO FENTON

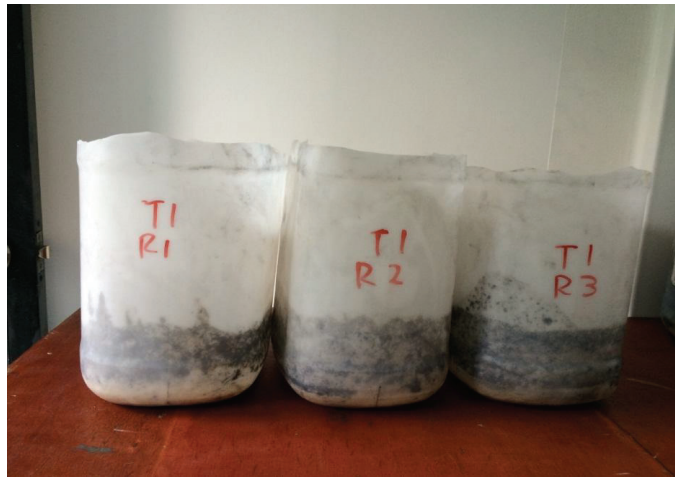
3.2.1 MATERIALES UTILIZADOS

Para las pruebas experimentales se tomaron 250 gramos de fondo de tanque pre-tratado.

Los fondos de tanque fueron ubicados en reactores estáticos de laboratorio de polietileno de alta densidad (HDPE) y de veinte litros de capacidad.

Se ejecutaron 3 tratamientos (T1, T2 y T3) a diferentes concentraciones de reactivo Fenton y de cada tratamiento se realizaron 3 repeticiones (R1, R2 Y R3). La Foto 3.2 muestra los reactores utilizados:

FOTO 3.2
REACTORES UTILIZADOS



FUENTE: Tapia, M. (2015)

3.2.2 REACTIVOS UTILIZADOS

Los reactivos utilizados para preparar el Fenton fueron de grado ACS siendo los siguientes:

- Solución de ácido nítrico (HNO_3) : 0,5 M.
- Sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) : 0,25 M.
- H_2O_2 al 50 %.

3.2.3 APLICACIÓN DE REACTIVO FENTON EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS

A fin de tener confiabilidad en los resultados, cada tratamiento se hizo por triplicado con la finalidad de evaluar las eficiencias de remoción de TPHs en cada experimento, resultando 27 tratamientos en total.

Tanto al inicio como al final se analizaron las muestras por TPHs.

Tanto las muestras de fondo de tanque, como los reactivos utilizados fueron preparados previamente y aplicados en un área ventilada, dado que este tipo de reacciones provocan elevada cantidad de vapores.

El reactivo Fenton utilizado fue preparado mezclando diferentes concentraciones de H_2O_2 y FeSO_4 en HNO_3 diluido. Las concentraciones de H_2O_2 agregadas, así como la concentración de Fe^{2+} añadido, fueron elegidas acorde al análisis de la información bibliográfica existente indicada en la tabla 2.6.

Las concentraciones elegidas de peróxido fueron de 10 %, 20 % y 30 % (v/v), y la relación $\text{Fe}^{2+}:\text{H}_2\text{O}_2$ fue de 0.5. La relación Fenton: fondo fue de 6:1, es decir se adiciono 6 ml de reactivo Fenton de la concentración correspondiente a cada gramo de fondo.

La tabla 3.2 describe la organización e identificación de los tratamientos evaluados:

TABLA 3.2
IDENTIFICACIÓN DE TRATAMIENTOS

TRATAMIENTOS APLICACIONES	TRATAMIENTO 1 [H_2O_2]:Fe 10% (v/v)	TRATAMIENTO 2 [H_2O_2]:Fe 20% (v/v)	TRATAMIENTO 3 [H_2O_2]:Fe 30% (v/v)
APLICACIÓN 1	T1A1_R1	T2A1_R1	T3A1_R1
	T1A1_R2	T2A1_R2	T3A1_R2
	T1A1_R3	T2A1_R3	T3A1_R3
APLICACIÓN 2	T1A2_R1	T2A2_R1	T3A2_R1
	T1A2_R2	T2A2_R2	T3A2_R2
	T1A2_R3	T2A2_R3	T3A2_R3
APLICACIÓN 3	T1A3_R1	T2A3_R1	T3A3_R1
	T1A3_R2	T2A3_R2	T3A3_R2
	T1A3_R3	T2A3_R3	T3A3_R3

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

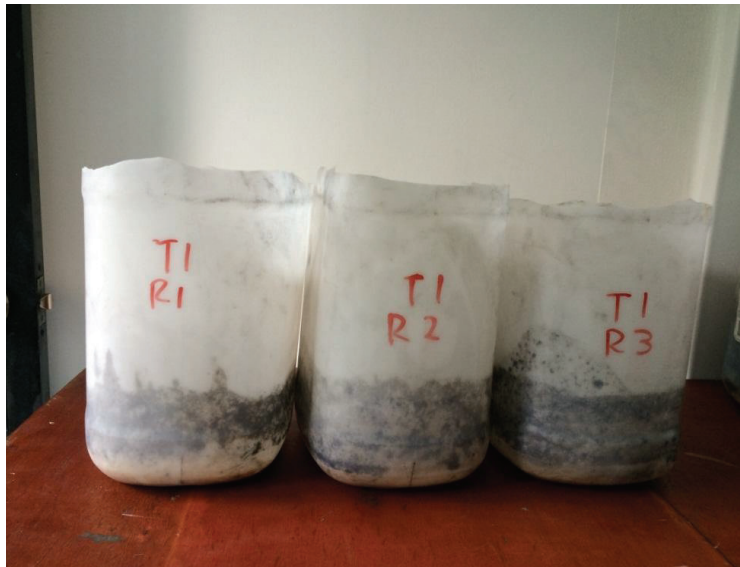
Donde T significa tratamiento, A aplicación y R número de réplica, existieron tres repeticiones para cada tratamiento y aplicación realizada. Por otra parte, la concentración de Peróxido de Hidrógeno fue la principal variable, siendo esta 10, 20 y 30 por ciento (v/v) para cada tratamiento y aplicación. Se realizaron tres aplicaciones, de modo que el fondo de tanque tratado, producto de la primera aplicación se trató nuevamente con la misma concentración de reactivo Fenton, y así nuevamente una tercera aplicación. Los ensayos fueron desarrollados en modo discontinuo.

Luego de cada aplicación se esperó que la reacción concluya para posteriormente separar el material sobrenadante resultante de la reacción del fondo de tanque tratado.

Las fotos 3.3, 3.4 y 3.5 muestran los ensayos con los tratamientos T1, T2 y T3 y sus respectivas repeticiones R1, R2 y R3, cuyas concentraciones de agua oxigenada [H₂O₂] fueron de 10%, 20% y 30% (v/v).

FOTO 3.3

ENSAYOS T1A1 X 3



FUENTE: Tapia, M. (2015)

FOTO 3.4
FOTO ENSAYOS T2A1 X 3



FUENTE: Tapia, M. (2015)

FOTO 3.5
ENSAYOS T3A1 X 3



FUENTE: Tapia, M. (2015)

En resumen, las condiciones experimentales para llevar a cabo los tratamientos se sintetizan en la tabla 3.4. Los valores referenciales fueron obtenidos de la bibliografía revisada, así Ershadi, L., (2011), recomienda un tiempo de retención de 4 horas, ya que en este tiempo no se encontró residuos de

reactivo Fenton en las muestras investigadas, es decir, es el tiempo en que se finaliza la reacción.

TABLA 3.3

CONDICIONES EXPERIMENTALES FIJAS DE LOS ENSAYOS

CONDICIÓN	VALOR	UNIDAD
Tiempo de Retención	4	horas
pH	3,5	Unidades de pH
Temperatura inicial	18	°C
Masa a tratar	250	g
Cantidad de Fe ⁺² en cada ensayo	0,7	g
Solución de FeSO ₄ .7H ₂ O ₂	50	ml
Solución de H ₂ O ₂	500	ml
Fenton : Fondo de tanque	2,2	ml/g (ml de reactivo Fenton por gramo de fondo de tanque)
Fe ⁺² : [H ₂ O ₂] al 10%	1 : 104	Relaciones en peso
Fe ⁺² : [H ₂ O ₂] al 20%	1 : 208	
Fe ⁺² : [H ₂ O ₂] al 30%	1 : 312	

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015).

El pH del reactivo Fenton fue de 3,5 y se fijó a este valor con ayuda de HNO₃, antes de ser adicionado al lodo de fondo de tanque, a este pH las reacciones de Fenton se llevan a cabo en las mejores condiciones de formación de radicales OH^{*} (Gogate y Pandit, 2003).

La relación de las soluciones preparadas de FeSO₄.7H₂O₂:H₂O₂ fue de 1 : 10 (v/v), es decir, por cada 500 ml de solución de H₂O₂ se adicionó 50 ml de solución de FeSO₄.7H₂O₂, mientras que la relación Fe:H₂O₂ varió según la concentración del H₂O₂ de cada tratamiento, las concentraciones de H₂O₂ se formularon basándose en la revisión bibliográfica resumida en la Tabla 2.6, donde se puede observar que se ha ensayado con concentraciones de H₂O₂

que van del 1 al 50% que este valor es intermedio a lo realizado en la mayoría de investigaciones donde se documenta la relación con la que se experimentó.

La masa a tratar dependió del tamaño de los reactores, siendo de 250 g. Los reactores plásticos utilizados se muestran en la Foto 3.5.

La relación de volumen de reactivo Fenton vs masa de fondo de lodo a tratar fue de 6 ml por cada gramo de matriz. Este valor fue elegido experimentalmente, ya que se verificó previamente que con este volumen de reactivo Fenton se saturaba de líquido la masa de lodo a tratar.

En relación al muestreo de los fondos de tanque luego de los tratamientos, se tomaron para análisis 50 g de muestra, que fue envuelta en papel aluminio y colocada en un cooler, con hielo para mantener una temperatura aproximada a 10°, para su transporte al laboratorio.

3.3 ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE TPH

3.3.1 METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS DE TPH

Los análisis de TPHs se realizaron acorde al Método TNRCC 1005 desarrollado por la Comisión de Conservación de los Recursos Naturales de Texas, el cual está diseñado para determinar concentraciones totales de hidrocarburos de petróleo (TPH) en matrices sólidas y acuosas usando cromatografía de gases; y puede ser utilizado para análisis cuantitativos de hidrocarburos de petróleo en rangos de gasolina y diésel, así como en rangos de fracciones más pesadas como lubricantes y asfaltos, los que tienen puntos de ebullición aproximadamente entre el n-hexano (nC6) y el n-pentatriacontano (nC35).

Este método consiste en extraer los TPHs con n-pentano, seguido de cromatografía de gases con detector FID, que separa los TPHs en dos rangos

(nC6 a nC12 y >nC12 a nC28), y en un tercero (>nC28 a nC35), cuando es aplicable, sustentándose en los puntos de ebullición de los hidrocarburos (Texas Natural Resource, 2001).

El método utiliza una mezcla comercial 1:1 de gasolina sin plomo y diésel como estándares de calibración y marcadores de n-alcano, nC6 , nC12, nC28 y nC35.

Los resultados de este método son usados para medir la concentración de TPH en un medio ambiente afectado y para evaluar la distribución relativa de hidrocarburos de petróleo en la muestra (Texas Natural Resource, 2001).

Generalmente, los resultados son reportados para el punto de ebullición de los hidrocarburos en el rango nC6 a nC12, >nC12 a nC28, y >nC28 a nC35. La concentración de TPH es reportada como la suma de todos los rangos de carbono (Texas Natural Resource, 2001).

3.4 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE TPHs

Según Lin, Chongyu, & Wensheng (2003), sugieren la siguiente ecuación para la determinación de la eficiencia de los distintos tratamientos.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Eficiencia de Remoción (\%)} \\
 = & \frac{[\textit{contaminante de entrada} - \textit{contaminante de salida}]}{\textit{contaminante de entrada}} \times 100 \qquad \textbf{(3.1)}
 \end{aligned}$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN INICIAL

La caracterización química inicial consistió en el análisis de 5 parámetros de una muestra de lodos de fondo de un tanque de almacenamiento de crudo; los siguientes parámetros fueron analizados:

- Hidrocarburos totales.
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos.
- Plomo.
- Cadmio.
- Níquel.

La tabla 4.1 muestra los resultados del análisis inicial realizado:

TABLA 4.1
ANÁLISIS QUÍMICO DE MUESTRA INICIAL

PARÁMETRO	MÉTODO/NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR PERMISIBLE (RAOHE 1215, 2001)
TPHs	PEE/LABCESTTA/26 TNRCC 1005	mg/kg	130136,48	<2500
HAPs	PEE/LABCESTTA/23 EPA SW-846 Method 8310	mg/kg	<0,3	<2
Pb	PEE/LABCESTTA/78 EPA SW- 846 N 3050B, 7420	mg/kg	<20	<100
Cd	PEE/LABCESTTA/76 EPA SW- 846 N 3050B, 7130	mg/kg	<0,8	<2
Ni	PEE/LABCESTTA/77 EPA SW- 846 N 3050B, 7520	mg/kg	<30	<50

FUENTE: Resultados de Análisis Laboratorio LABCESTTA, (2014)

ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

Acorde a la Tabla 4.1, el único parámetro fuera de la norma corresponde a los TPHs, siendo el valor encontrado superior en 50 veces, a comparación con lo establecido en el Reglamento Ambiental de Operaciones Hidrocarburíferas del Ecuador (RAOHE 1215, 201).

4.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

4.2.1 PRE TRATAMIENTO

La tabla 4.2 muestra la concentración inicial de TPHs del fondo de tanque, además indica la concentración obtenida luego de la aplicación del separador de fases como pre-tratamiento, observándose que se logra remover significativamente la concentración de TPHs de la muestra inicial.

TABLA 4.2

CONCENTRACIÓN INICIAL DE TPHS DE LA MUESTRA Y CONCENTRACIÓN OBTENIDA LUEGO DE LA APLICACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL SEPARADOR DE FASES

CONCENTRACIÓN	TPHs (mg/kg)
Inicial (To)	130136,48
Luego de la aplicación del separador de fases (Ti)	29167,14

FUENTE Y ELABORADO POR: Mónica Tapia H.

Con la aplicación del separador de fases, se logra remover TPHs en un 77,58%, luego de este pre-tratamiento se evaluó la factibilidad de la oxidación química con reactivo Fenton.

Al realizar un análisis del pre tratamiento se puede indicar que se registró una reducción de masa del lodo de fondo de tanque del 65,71%, esto es que la muestra tratada con un peso inicial de 35 kg pasó a 23 kg.

4.2.2 TRATAMIENTO 1 – T1

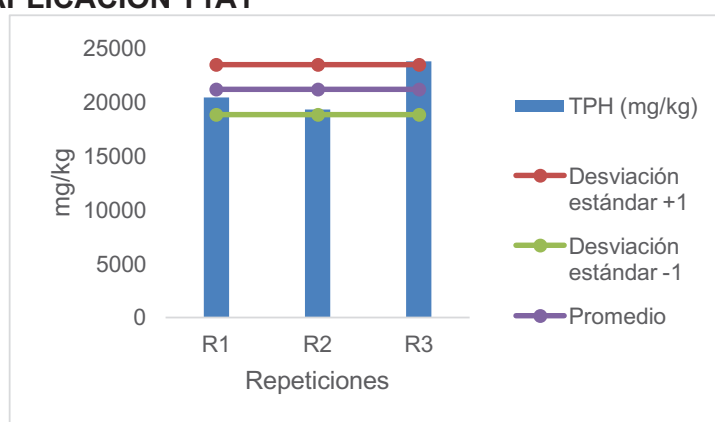
Luego de realizados los ensayos correspondientes al tratamiento 1, aplicación 1 T1A1, es decir reactivo de Fenton al 10%, con tres aplicaciones consecutivas, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 4.3 y graficados en la figura 4.1:

TABLA 4.3
CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO1 – APLICACIÓN 1

REPETICIÓN	TPH (mg/kg)	% REMOCIÓN
R1	20421,91	29,98
R2	19258,42	33,97
R3	23721,47	18,67
PROMEDIO, \bar{x}	21133,93	27,54
DESVIACIÓN ESTÁNDAR, σ	2315,15372	-

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

FIGURA 4.1
CONCENTRACIÓN DE TPHS EN LAS 3 REPETICIONES DESPUÉS DE LA PRIMERA APLICACIÓN T1A1



FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

La tabla 4.3 y la figura 4.1 muestran los resultados en la primera aplicación del tratamiento 1, es decir T1A1; se observa que en las tres repeticiones existió disminución de la concentración de TPHs, desde un valor inicial 29167,14

mg/kg, logrando remover alrededor de 8000 mg/kg de TPHs desde su valor inicial, resultando a 21133,93 mg/kg, en promedio, una remoción lograda del 27,54%.

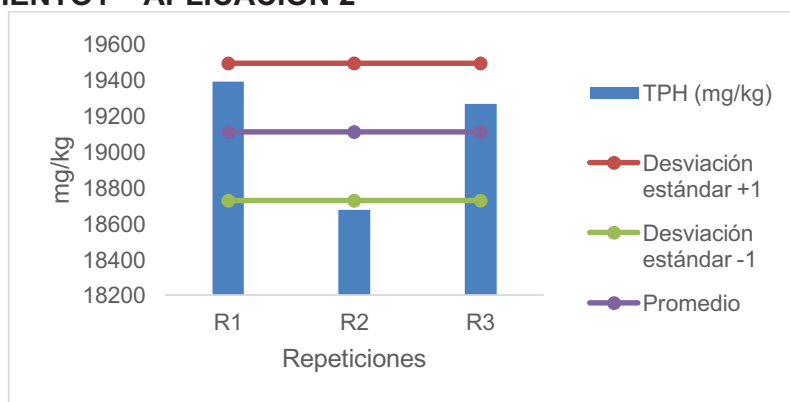
La tabla 4.4 y en la figura 4.2 presentan los resultados de la aplicación 2, tratamiento 1, T1A2. Es decir el suelo tratado en T1A1 fue sometido a una aplicación T1A2, con igual concentración de Fenton (H_2O_2 al 10%).

TABLA 4.4
CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 1
– APLICACIÓN 2

REPETICIÓN	TPHs (mg/kg)	% REMOCIÓN
R1	19390,43	5,05
R2	18674,65	3,03
R3	19265,34	18,79
PROMEDIO	19110,14	8,96
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	382,296393	-

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

FIGURA 4.2
TRATAMIENTO1 – APLICACIÓN 2



FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

Observando la tabla 4.4 y la figura 4.2, se puede concluir que en la segunda aplicación la concentración de TPHs se redujeron de 20421,91 mg/kg a

19390,43 mg/kg, esto es que se removió el 5.05% de TPHs y un promedio de 8.96% en las tres replicas.

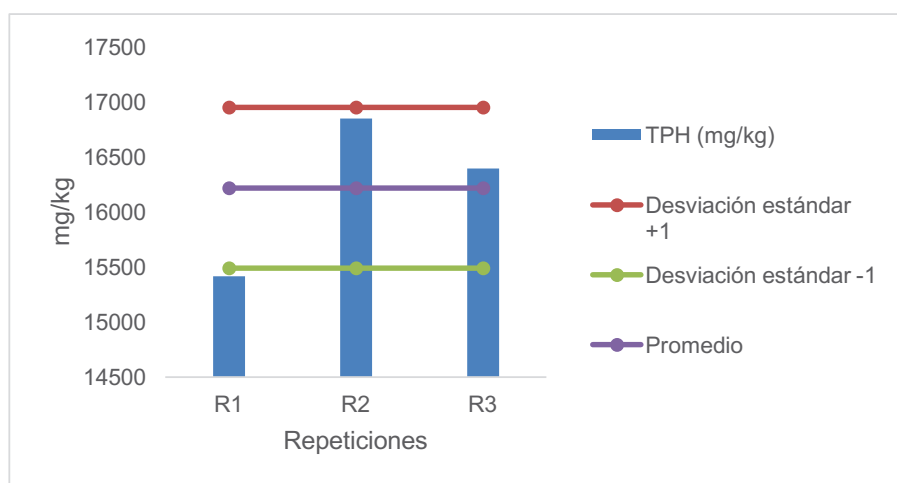
La tabla 4.5 y la figura 4.3 muestran los resultados de la tercera aplicación, es decir el ensayo T1A3.

TABLA 4.5
CONCENTRACIÓN DE TPHs Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 1
– APLICACIÓN 3

REPETICIÓN	TPHs (mg/kg)	% REMOCIÓN
R1	15414	20,51
R2	16845	9,8
R3	16394	14,9
PROMEDIO	16217,67	15,07
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	731,6148805	-

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

FIGURA 4.3
TRATAMIENTO1 – APLICACIÓN 3

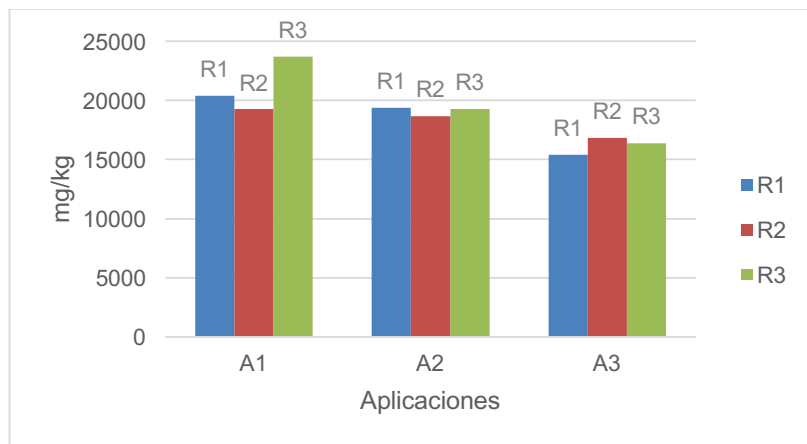


FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

En el caso de los tratamientos T1A3 y sus repeticiones, se observa que la remoción se refleja mejor con respecto a T1A2, pero menor que T1A1.

La Figura 4.4 muestra las concentraciones de TPHs luego del primer tratamiento y 3 aplicaciones T1A1, T1A2 y T1A3.

FIGURA 4.4
CONCENTRACIÓN DE TPHS (mg/Kg) PARA LAS 3 REPETICIONES EN LAS 3 DIFERENTES APLICACIONES DEL TRATAMIENTO 1



FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

En la figura 4.4 se puede observar un decrecimiento notable de la concentración de TPHs en las 3 aplicaciones (A1, A2, A3) en todos los casos; la concentración de TPHs decae desde su valor inicial de 29.197,14 mg/kg hasta 16.218 mg/kg de TPHs, en promedio, siendo su remoción total del 44,40%.

Entre diferentes tipos de oxidación, la oxidación Fenton es una de las tecnologías más poderosas y populares para la remediación in-situ ya que oxida una variedad de compuestos orgánicos biorefractarios tanto en matrices acuosas y sólidas, gracias al alto poder oxidativo y por su simplicidad (Mang Lu, 2010; Souza, Valdinete, De Barros, & Simonnot, 2009; Valeria S. Millioli, 2003).

De la misma forma, acorde a U.S. EPA, (2004), frecuentemente no es posible remover completamente los aceites derramados mediante el uso de una sola

tecnología, por lo que una solución es el denominado “tren de tratamiento” que consiste en aplicar dos o más tecnologías integradas.

4.2.3 TRATAMIENTO 2 – T2

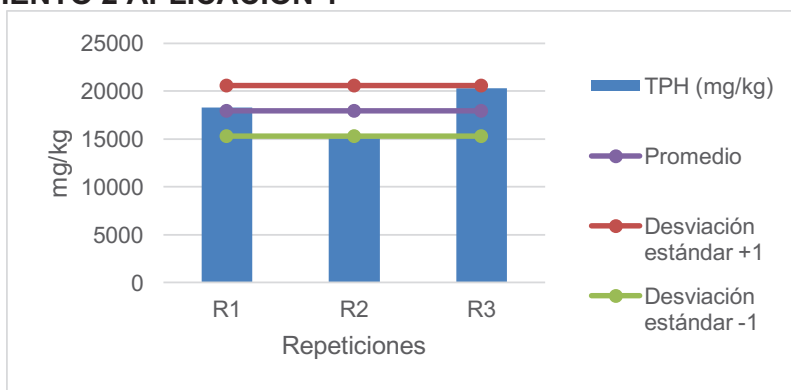
La tabla 4.6 y la figura 4.5 muestran las concentraciones de TPHs y porcentaje de remoción lograda en el tratamiento 2, aplicación 1; es decir, la aplicación de reactivo de Fenton que correspondió al 20% de concentración de peróxido de hidrógeno.

TABLA 4.6
CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 2 –APLICACIÓN 1

REPETICIÓN	TPH (mg/kg)	% REMOCIÓN
R1	18309,87	37,22
R2	15083,35	48,29
R3	20319,23	30,34
PROMEDIO	17904,15	38,62
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	2641,413709	-

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

FIGURA 4.5
TRATAMIENTO 2 APLICACIÓN 1



FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

En el tratamiento T2A1, cuya concentración de TPH inicial fue de 29.167,14 mg/kg, se logró remover TPH hasta un valor promedio de 17.904,15 mg/kg en

las tres repeticiones, lo que representa el 38,62% de eficiencia de remoción de este contaminante.

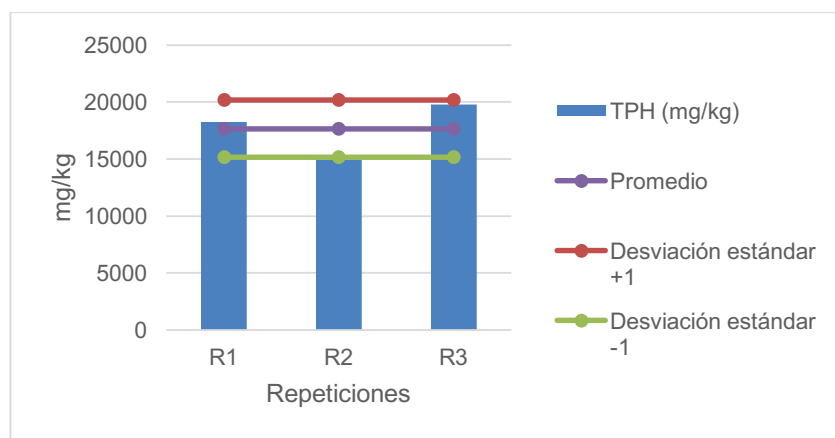
De la misma forma la Tabla 4.7 y la Figura 4.6 muestran el tratamiento correspondiente a T2A2, es decir una segunda aplicación de reactivo de Fenton al 20% sobre las muestras provenientes del ensayo T2A1.

TABLA 4.7
CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 2 –APLICACIÓN 2

REPETICIÓN	TPH (mg/kg)	% REMOCIÓN
R1	18264,69	0,25
R2	14926,36	1,04
R3	19793,56	2,59
PROMEDIO	17661,53	1,29
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	2489,026801	

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

FIGURA 4.6
TRATAMIENTO 2 APLICACIÓN 2



FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

Se nota eficiencias bajas en este tratamiento, no sobrepasando el 2,59%, con un promedio de 1,29%.

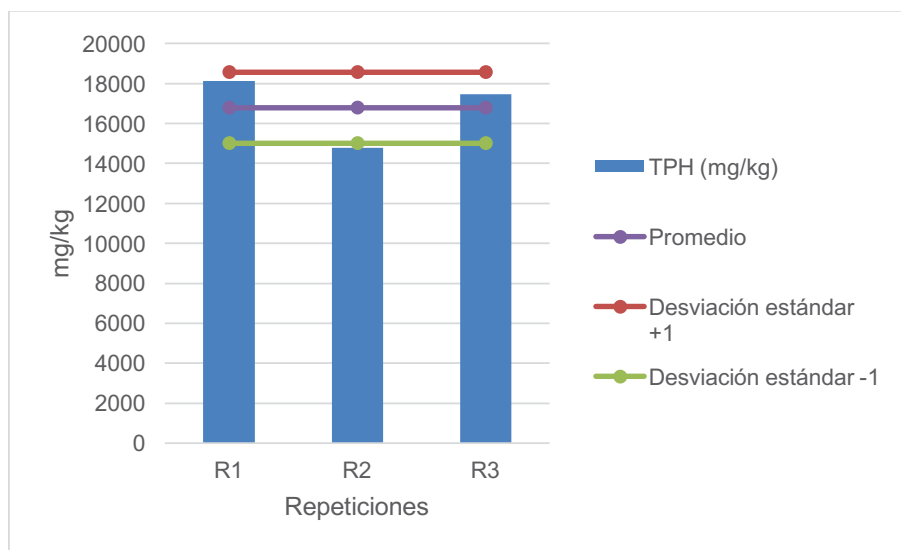
La Tabla 4.8 y la Figura 4.7 muestran el tratamiento T2A3, es decir una tercera aplicación de reactivo de Fenton al 20%.

TABLA 4.8
CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 2
-APLICACIÓN 3

REPETICIÓN	TPH (mg/kg)	% REMOCIÓN
R1	18138,76	0,69
R2	14784,84	0,95
R3	17469,34	11,74
PROMEDIO	16797,64	4,46
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1774,985575	

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

FIGURA 4.7
TRATAMIENTO 2 APLICACIÓN 3



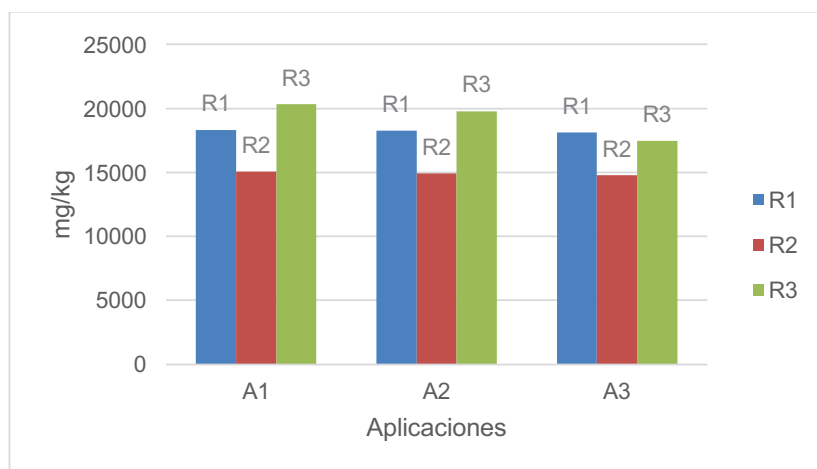
FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

Las eficiencias resultantes en este tratamiento T2A3 fueron bajas, siendo en promedio 4,46%, además es notorio que en la repetición 3 el valor de eficiencia logrado difiere de las otras repeticiones efectuadas.

La Figura 4.2 muestra los resultados del tratamiento 2 y sus 3 aplicaciones, se puede notar que las eficiencias logradas fueron: 38,62%, 1,69% y 4,46% para las tres repeticiones realizadas en cada aplicación.

Además, el porcentaje de eficiencia global fue de 42,41%, es decir, la eficiencia evaluada al valor inicial y final del tratamiento T2A1 y el resultado del tratamiento T2A3.

FIGURA 4.8
CONCENTRACIÓN DE TPHS (mg/Kg) PARA LAS 3 REPETICIONES EN LAS 3 DIFERENTES APLICACIONES DEL TRATAMIENTO 2



FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

4.2.4 TRATAMIENTO 3 – T3

El tratamiento 3 trata sobre la aplicación de reactivo Fenton al 30%, en tres aplicaciones consecutivas sobre la misma muestra y con tres repeticiones para cada ensayo.

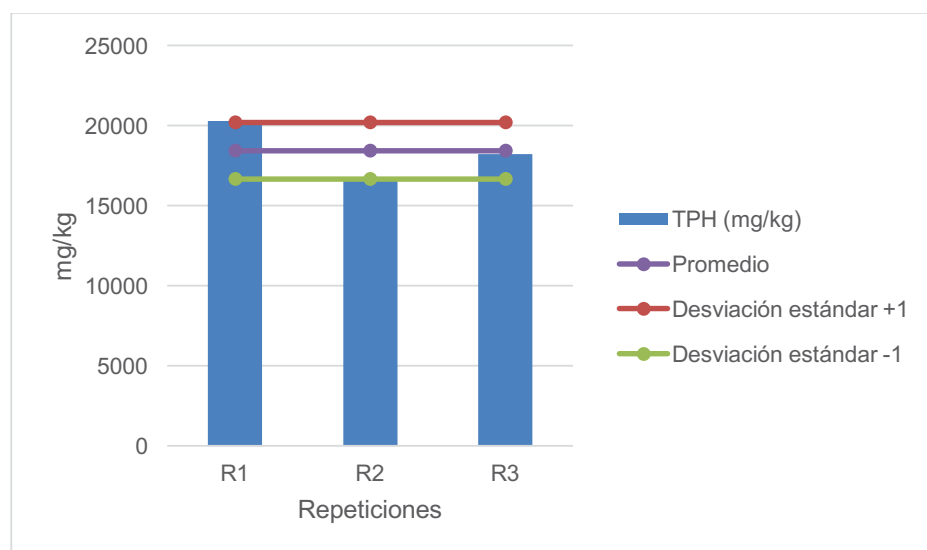
La Tabla 4.9 y la Figura 4.9, muestran los resultados del T3A1, los mismos que al calcular su eficiencia dan valores entre 30,47% y 42,52%, con un promedio de 36,83% para las tres repeticiones realizadas.

TABLA 4.9
CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 3
-APLICACIÓN 1

REPETICIÓN	TPH (mg/kg)	% REMOCIÓN
R1	20280,31	30,47
R2	16766,68	42,52
R3	18228,55	37,5
PROMEDIO	18425,18	36,83
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1765,048572	-

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

FIGURA 4.9
TRATAMIENTO 3 APLICACIÓN 1



FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

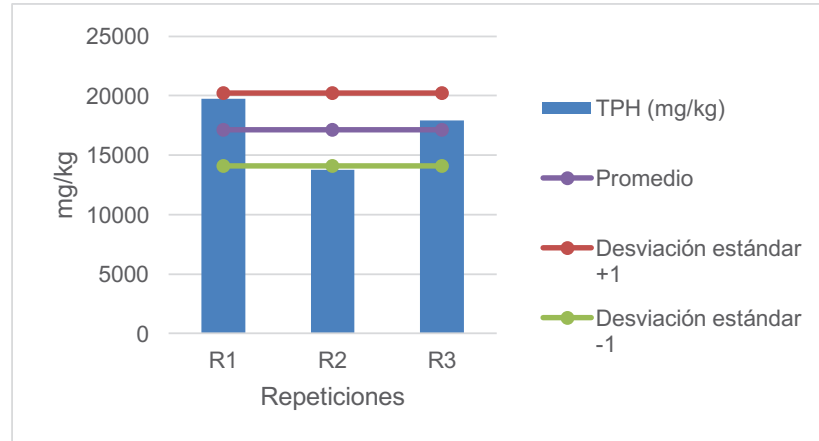
Por su parte, la tabla 4.10 y la Figura 4.10 muestran los resultados de T3A2, donde se presentaron valores bajos de eficiencia alcanzada, siendo en promedio 7,33% para las tres repeticiones.

TABLA 4.10
CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 3
-APLICACIÓN 2

REPETICIÓN	TPH (mg/kg)	% REMOCIÓN
R1	19742,53	2,65
R2	13785,37	17,78
R3	17942,27	1,57
PROMEDIO	17156,72333	7,33
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	3055,282555	

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

FIGURA 4.10
TRATAMIENTO 3 APLICACIÓN 2



FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

La Tabla 4.11 y la Figura 4.11 siguientes muestran los resultados del tratamiento T3A3.

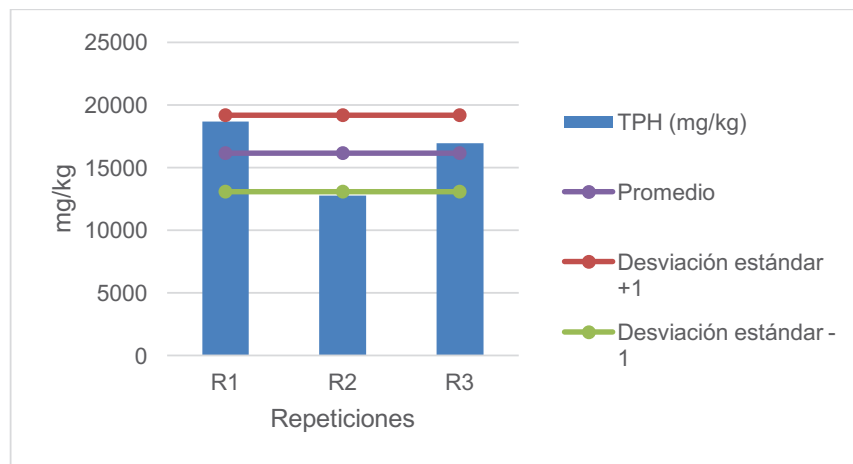
TABLA 4.11
CONCENTRACIÓN DE TPHS Y % DE REMOCIÓN EN EL TRATAMIENTO 2
– APLICACIÓN 3

REPETICIÓN	TPH (mg/kg)	% REMOCIÓN
R1	18672,76	5,42
R2	12763,82	7,41
R3	16946,49	5,55
PROMEDIO	16127,69	6,13
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	3038,374246	

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

Se muestra en este tratamiento T3A3, porcentajes de eficiencia alrededor del 6%, así, los resultados del tratamiento T3A3 muestran un decrecimiento en la eficiencia con respecto al tratamiento T3A2.

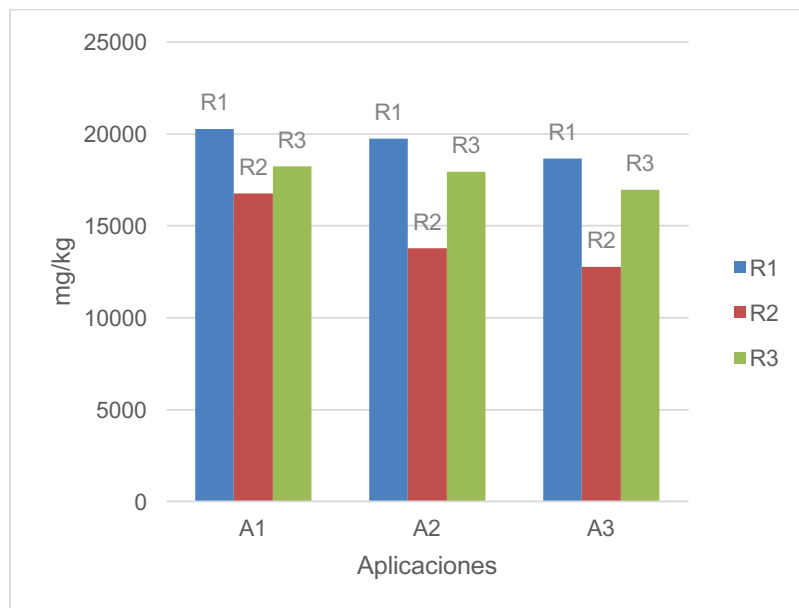
FIGURA 4.11
TRATAMIENTO 3 APLICACIÓN 3



FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

La Figura 4.12 muestra en resumen los resultados del tratamiento 3 realizado a las muestras en estudio.

FIGURA 4.12
CONCENTRACIÓN DE TPHS (mg/Kg) PARA LAS 3 REPETICIONES EN
LAS 3 DIFERENTES APLICACIONES DEL TRATAMIENTO 3



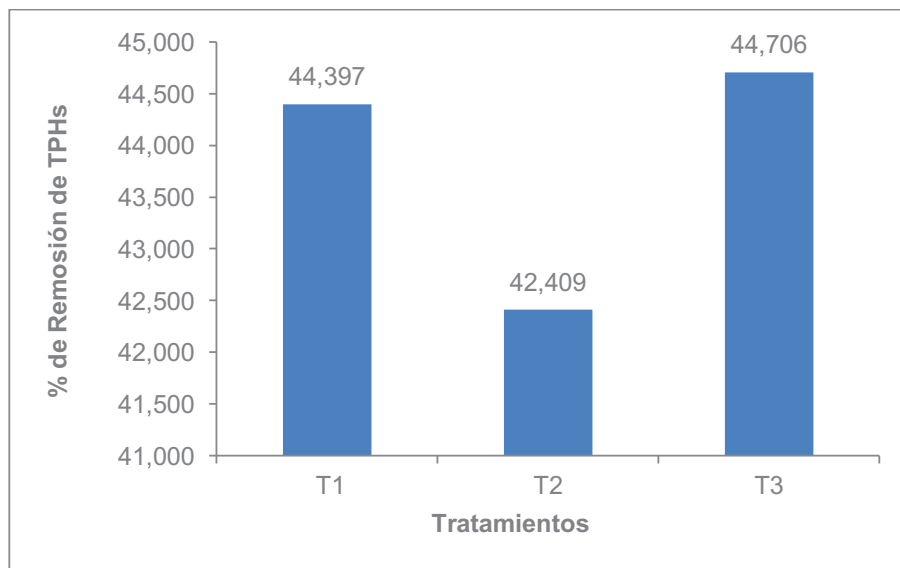
FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

En todas las aplicaciones y repeticiones existió reducción de la concentración del contaminante; así como, un comportamiento relativamente similar obteniendo un porcentaje de eficiencia final promedio para cada repetición de: 35,98 %, 56,24 % y 41,90 %, y un promedio general de 44,71 %.

4.2.5 COMPARACIÓN GENERAL

La figura 4.13 muestra los promedios de remoción de los 3 tratamientos realizados luego de las 3 aplicaciones. La eficiencia, citada así, se calculó tomando en consideración el valor inicial de TPHs luego del pre-tratamiento (29167,14 mg/kg) y el valor final promedio de las tres repeticiones luego de la tercera aplicación.

FIGURA 4.13
COMPARACIÓN GENERAL ENTRE TRATAMIENTOS



FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

Los resultados muestran que no existe mayor variación entre cada tratamiento, ya que sus promedios de remoción están entre 42,40 y 44,39 %, siendo el tratamiento 1 el que obtuvo mejores resultados, aunque con mínima diferencia respecto a los otros aplicados. Es decir, no existió diferencia cuando se aplicó reactivo Fenton al 10, 20 o 30 %, sin embargo la aplicación al 10 % obtuvo, con una mínima diferencia, un mejor resultado.

Autores como Chukwunonye & Osuji (2011), señalan en estudios similares acerca de la remediación de hidrocarburos, usando reactivo de Fenton, ésta fue eficiente en un ambiente ácido, dando la más alta remoción cerca del 96% para HAPs, 99 % para BTEX, y algunos TPHs desaparecieron completamente. Otros estudios llevados a cabo por Mang Lu (2010), probaron en un estudio tri-etápico conformado por el uso de un surfactante biodegradable en la primera etapa; seguido de oxidación mediante Fenton-like y por tratamiento mediante biorremediación en una tercera etapa, dónde se utilizó H_2O_2 al 6 %, y se alcanzó eficiencias del 15 %.

El principal problema que presenta el material a tratar es la textura fina y la asociación de hidrocarburos en esas partículas. Los estudios físico-químicos ensayados, hasta ahora no han tenido buenos resultados, con el proceso Fenton la oxidación de hidrocarburos fue de 30 % (García Frutos, y otros, 2009).

De la misma manera Farzadkia, Dehghani, & Moafian (2014) evaluaron cuatro parámetros a cuatro niveles para encontrar las condiciones óptimas de oxidación, mismas que dieron un 36,47 % de remoción al aplicar por una hora H_2O_2 y Fe_2 en una relación molar de 10 y pH 5. El presente estudio corrobora con la mayoría de estudios donde se reportan eficiencias de remoción de TPHs no superiores al 50 %, siendo la alcanzada de 42 %.

4.2.6 ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO

Los TPHs al ser estudiados bajo la norma TNRCC 1005, implican el uso de cromatografía de gases con detección de ionización de flama (GC-FID), que permite observar los cambios producidos en los hidrocarburos, o en grupos de hidrocarburos, tales como alifáticos o aromáticos, lográndose observar hidrocarburos entre el nC6 al nC35, desarrollado por la Comisión de Conservación de los Recursos Naturales de Texas (Texas Natural Resource, 2001).

Para interpretación del método de análisis de TPHs seleccionado se indica en la tabla 4.12 la clasificación de hidrocarburos totales por grupos desde nC6 a nC34 y sus principales productos.

TABLA 4.12

CLASIFICACIÓN DE GRUPOS DE HIDROCARBUROS

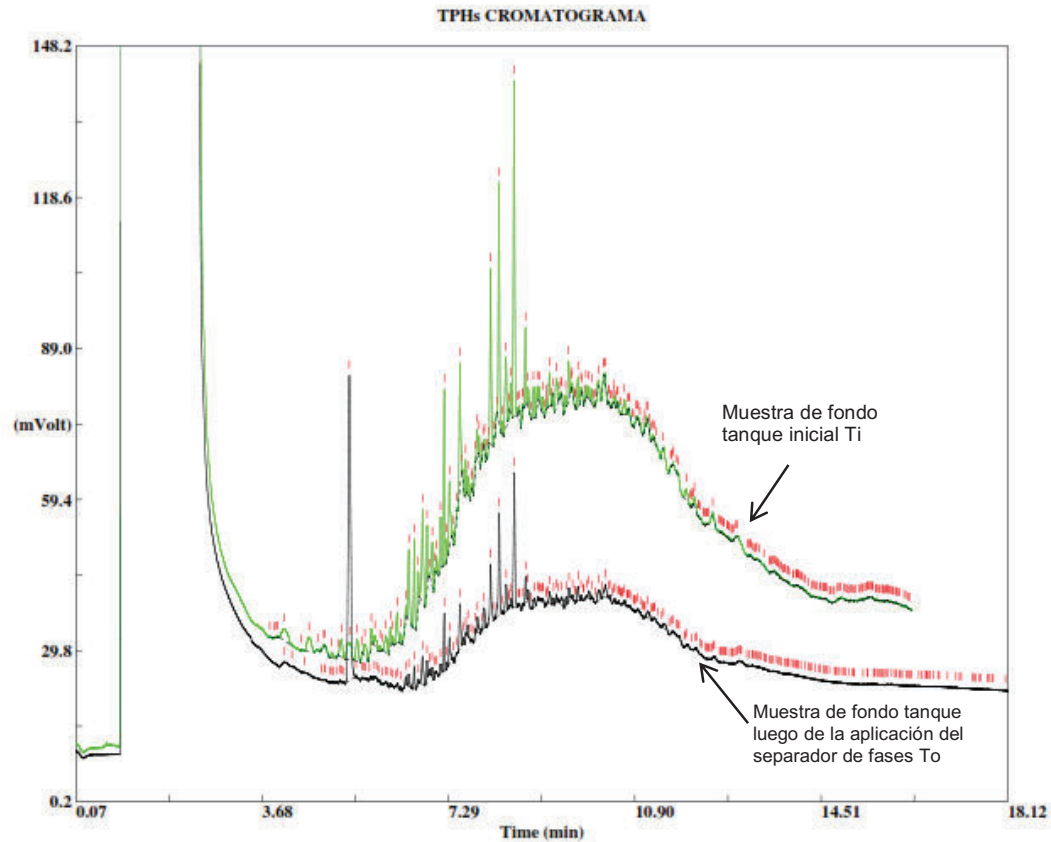
GRUPO DE HIDROCARBUROS	TIPO DE HIDROCARBURO	PRINCIPAL PRODUCTO
C6-C8	Alifáticos	Naftas
C8-C10	Alifáticos- Aromáticos	Naftas - Gasolina para autos
C10- C12	Alifáticos- Aromáticos	Gasolina para autos - Querosene
C12-C16	Alifáticos- Aromáticos	Querosene
C16-C21	Alifáticos- Aromáticos	Fuel-óleos - Lubricantes
C21-C34	Alifáticos- Aromáticos	Lubricantes-Asfaltos

FUENTE: Adaptado de (Allinger, 1984), (Alvarez, 2005).

La cromatografía gaseosa realizada en la muestra inicial de fondo de tanque se compara con la muestra de fondo a la que se le aplicó el separador de fases en la figura 4.14 pudiéndose observar un cambio significativo en las fracciones de carbono de los hidrocarburos presentes, este cambio se confirma con el valor de TPHs reportado pasando de 130136,48 (mg/kg) a 29167,14 (mg/kg) luego de haber aplicado el separador de fases y en la tabla 4.13 se realiza una comparación en porcentaje de las fracciones removidas.

FIGURA 4.14

CROMATOGRAMAS DE LA MUESTRA INICIAL DE FONDO DE TANQUE Y DE LA MUESTRA LUEGO DE LA APLICACIÓN DEL SEPARADOR DE FASES



FUENTE: Laboratorio CESTTA (2015) y Elaborado por: Tapia, M. (2015)

TABLA 4.13

COMPARACIÓN DE LA FRACCIONES REMOVIDAS PARA LA MUESTRA DE FONDO DE TANQUE INICIAL Y LA MUESTRA LUEGO DE LA APLICACIÓN DEL SEPARADOR DE FASES

Hydrocarburos	ppm inicial	ppm luego del separador de fases	% de remoción
C6	1086,01	120,02	88,95
C7	1424,42	157,42	88,95
C8	15931,08	1760,64	88,95
C9	6175,88	682,53	88,95
C10	10722,27	1184,98	88,95
C11	7751,16	856,63	88,95
C12	829,62	91,69	88,95

TABLA 4.14 CONTINUACIÓN

C13	4330,21	1606,89	62,89
C14	5154,97	569,71	88,95
C15	8971,84	1173,49	86,92
C16	7765,63	2418,46	68,86
C17	1848,99	714,17	61,37
C18	12773,35	5844,98	54,24
C19	7895,78	2785,93	64,72
C20	10978,57	4369,75	60,20
C21	1374,02	184,15	86,60
C22	1352,87	406,06	69,99
C23	7602,29	840,17	88,95
C24	2419,89	1068,22	55,86
C25	1338,02	147,87	88,95
C26	1457,71	441,16	69,74
C27	6496,09	717,92	88,95
C28	1388,82	153,49	88,95
C29	1576,90	579,26	63,27
C30	1490,08	473,51	68,22
suma	130136,48	29167,14	77,59

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

El grupo de fracciones que presentaron una mayor eficiencia de remoción son los carbonos comprendidos entre C6 y C14, es decir, naftas, gasolina y querosene; las fracciones C21, C23, C25, C27 y C28 también presentan la misma eficiencia con valores sobre el 86%.

Las fracciones C13, C16, C17, C19, C20, C22, C26, C29 y C30 presentaron una eficiencia sobre el 60%.

La fracción C18 es la que menor eficiencia de remoción tuvo, esto debido a que es la que se encontraba en mayor cantidad (12773,35 mg/kg).

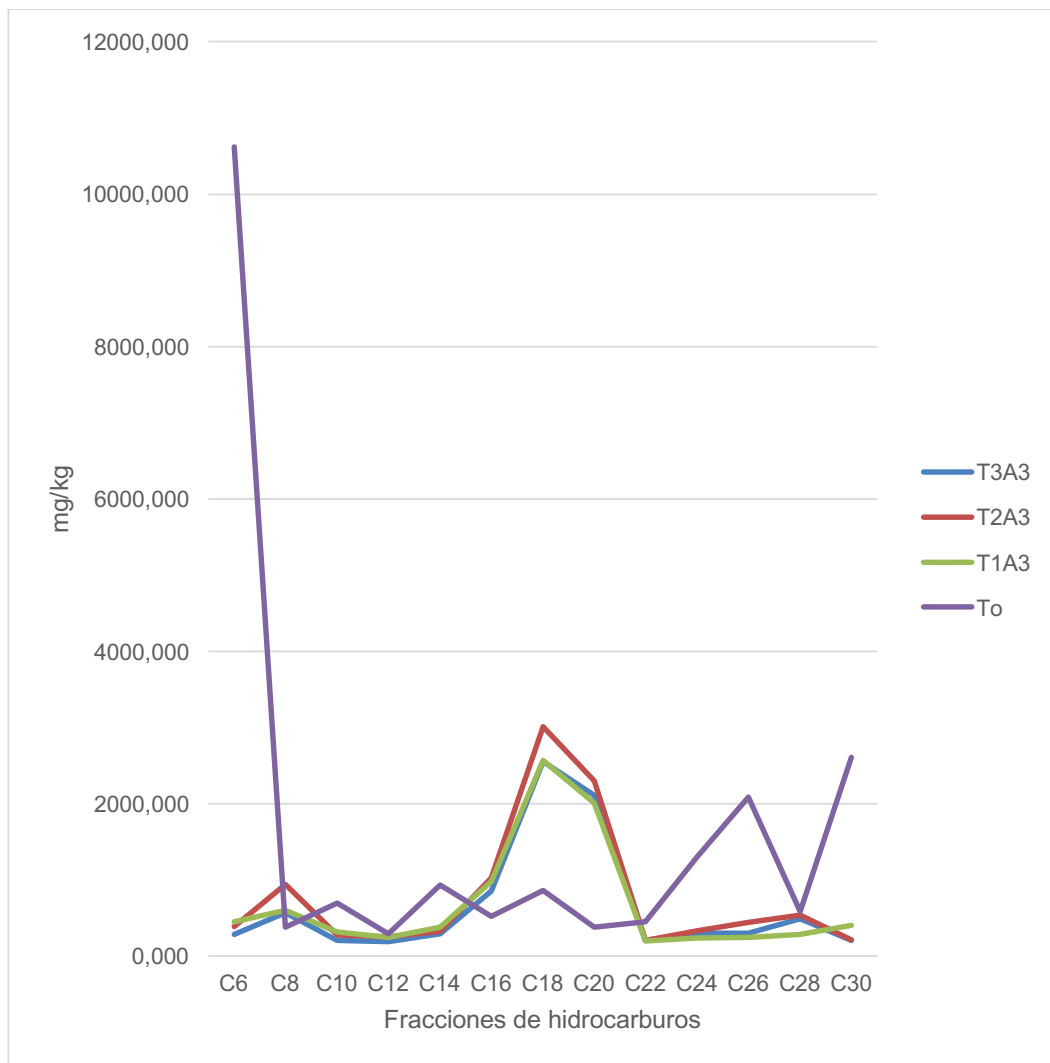
En la figura 4.15 se comparan los resultados obtenidos de la muestra de fondo de tanque luego de la aplicación del separador de fases con las muestras de los tratamientos T1, T2 y T3 para la tercera aplicación.

Las fracciones de C22 a C30 en todos los casos presentan reducción, mientras que las fracciones de C16 a C20 aumentan con respecto a la muestra inicial (To), lo que indica que hubo fraccionamiento de las cadenas más pesadas debido a la acción del reactivo Fenton.

En las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 se muestran los cromatogramas para T1A3, T2A3 y T3A3, pudiéndose observar los cambios ocurridos en las fracciones de hidrocarburos.

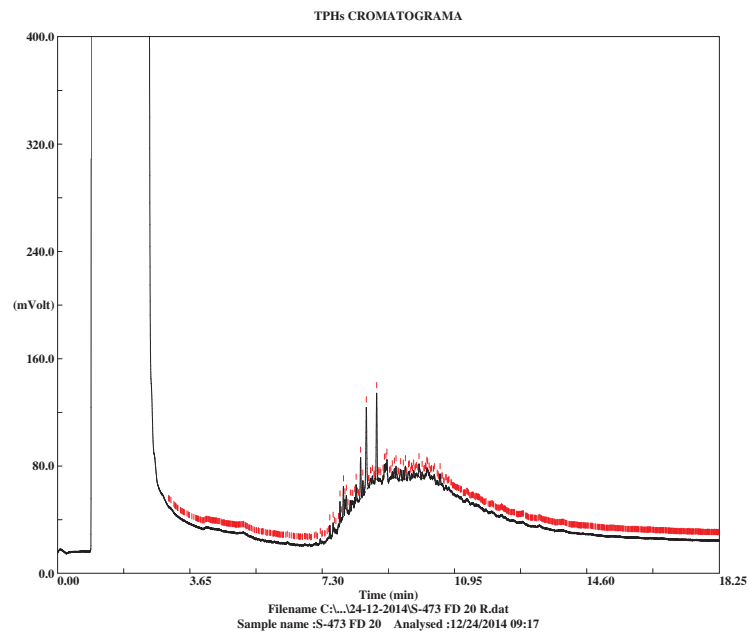
FIGURA 4.15

COMPARACIÓN DE LOS CROMATOGRAMAS DE LA MUESTRA DE FONDO DE TANQUE LUEGO DE APLICACIÓN DEL SEPARADOR DE FASES (T0) CON LAS MUESTRAS DE LOS TRES TRATAMIENTOS LUEGO DE LA TERCERA APLICACIÓN (T1A3, T2A3 Y T3A3)



FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

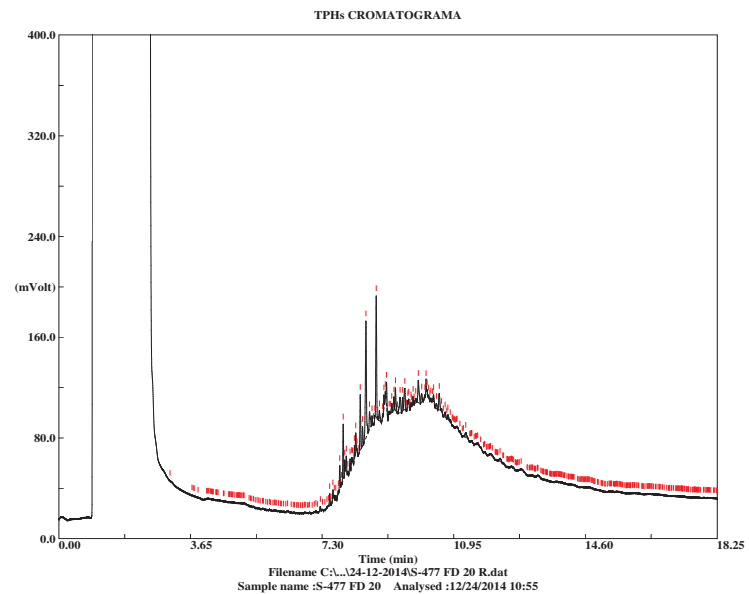
FIGURA 4.16
CROMATOGRAMAS DE LA MUESTRA T1A3



FUENTE: Laboratorio CESTTA (2015)

ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

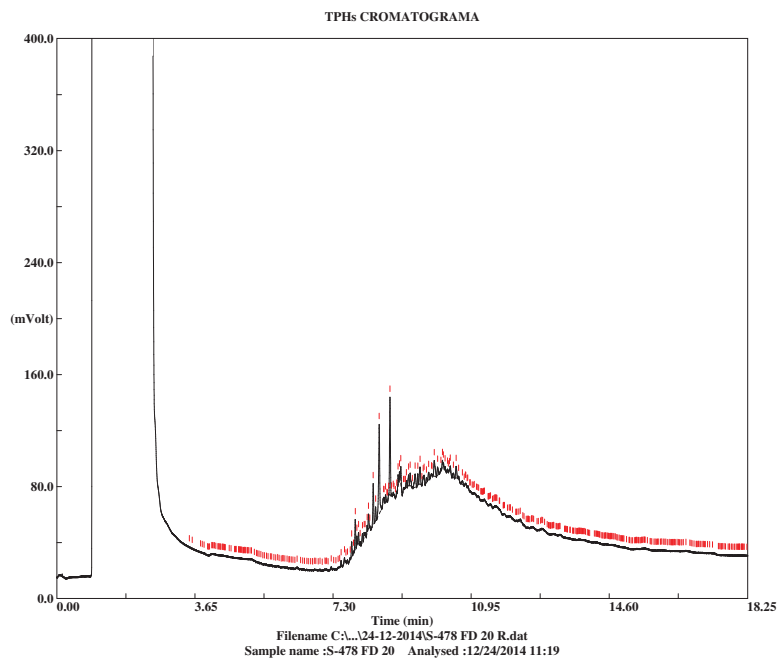
FIGURA 4.17
CROMATOGRAMAS DE LA MUESTRA T2A3



FUENTE: Laboratorio CESTTA (2015)

ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

FIGURA 4.18
CROMATOGRAMAS DE LA MUESTRA T3A3



FUENTE: Laboratorio CESTTA (2015)

ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

La tabla 4.14 muestra la reducción en porcentaje para las cadenas C6 a C14 y C22 a C30 con valores positivos, con excepción del C8, mientras que para las fracciones C16 a C20 muestra valores negativos debido al fraccionamiento de las cadenas largas a cortas.

TABLA 4.15
PORCENTAJE DE DE LA FRACCIONES REMOVIDAS PARA LA MUESTRA DE FONDO DE TANQUE INICIAL Y LA MUESTRA LUEGO DE LA APLICACIÓN DEL SEPARADOR DE FASES

Hydrocarbuos	ppm inicial	% remoción T1A3	% remoción T2A3	% remoción T3A3
C6	10617,947	95,737	96,327	97,302
C8	379,173	-59,468	-148,349	-51,247
C10	695,811	53,710	59,925	69,826

TABLA 4.16 CONTINUACIÓN

C12	295,667	15,722	14,213	34,940
C14	935,361	59,318	64,792	68,323
C16	522,442	-88,505	-96,400	-63,082
C18	867,577	-195,845	-247,255	-193,987
C20	378,356	-430,614	-507,617	-458,794
C22	456,203	56,519	54,318	54,958
C24	1309,488	81,705	74,202	76,889
C26	2090,671	88,292	78,804	85,632
C28	588,505	51,613	8,145	16,938
C30	2613,347	84,615	91,618	92,010

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2015)

4.2.7 ESTIMACIÓN DE COSTOS Y TIEMPOS DE TRATAMIENTO

La estimación de costos para la implementación del tratamiento propuesto por kilogramo de material a tratar, se ha realizado en función de los costos de los reactivos utilizados durante el ensayo para T1, es decir, con la concentración de H₂O₂ al 10% (v/v).

El análisis se plantea sobre la base de cotizaciones solicitadas a proveedores especializados en venta que productos químicos; no se consideran los costos indirectos como son construcción de reactores para la separación de fases y de piscinas impermeabilizadas en las que se realizarían las aplicaciones de Fenton, ya que estos dependerán principalmente de la cantidad de material a tratar.

La tabla 4.15 muestra el costo total del tratamiento propuesto para la aplicación del separador de fases y de reactivo Fenton con la concentración de H₂O₂ al 10% (v/v).

TABLA 4.17
COSTOS ESTIMADOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL TRATAMIENTO
PROPUESTO

Etapa	Detalle	Cantidad empleada por Kg	Unidad	Costo (USD/kg)
Separador de fases	Neofloat®	1,96	kg	1,96
Aplicaciones	Agua oxigenada al 50%	0,40	l	1,91
	Sulfato ferroso heptahidratado	13,89	g	0,0217
	Ácido nítrico al 65%	2	ml	0,0068
			TOTAL	3,91

FUENTE Y ELABORADO POR: Tapia, M. (2016)

El tiempo total requerido sería de 20 horas aproximadamente, incluido el tiempo necesario para la aplicación del separador de fases.

Cada aplicación necesita 6 horas aproximadamente, considerando un tiempo de retención de 4 horas por aplicación.

El costo del tratamiento propuesto es más alto que los métodos generalmente empleados, sin embargo, el remover altas concentraciones de TPHs en tan corto tiempo indica la importancia de la implementación de este método.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Es posible la remoción de alrededor del 40% de la concentración de TPHs de los fondos de tanque de almacenamiento de petróleo utilizando reactivo Fenton, esto cuando las muestras tienen concentraciones relativamente muy altas de TPHs, tal fue el caso de concentraciones iniciales de 29167 mg/kg.
- Luego de aplicar tres tratamientos con variación de la concentración de reactivo de Fenton, al 10, 20 o 30% (v/v), los valores obtenidos muestran que no existe mayor variación entre resultados, ya que sus promedios oscilan entre 42,40 y 44,39%.
- Con respecto al análisis individual de los hidrocarburos removidos, se pudo apreciar que la Aplicación 1, en todos los tratamientos logró el mejor porcentaje de remoción, siendo ésta en todos los casos superior al 20 % del valor inicial, para luego en los dos tratamientos subsiguientes tener remociones de alrededor del 14 % más. Es decir la aplicación 1 en todos los casos fue más eficiente que las dos aplicaciones siguientes.
- Cambios en los cromatogramas analizados indican que los hidrocarburos oxidados fueron en mayor proporción en los hidrocarburos que tuvieron menor concentración inicial, siendo éstos entre el C6 al C11 y entre el C21 al C30.
- Los valores de TPHs removidos no permite la disposición de este desecho ya que sobrepasa los límites permisibles establecidos en la legislación ambiental ecuatoriana, pudiéndose continuar con una etapa

final de tratamiento biológico ya que las concentraciones alcanzadas facilita la mineralización de contaminantes a través de técnicas de biorremediación.

5.2 RECOMENDACIONES

- Utilizar para futuras investigaciones concentraciones menores al 10% de reactivo de Fenton, para de esta forma conocer cuál es la mínima concentración requerida para lograr la máxima remoción posible de TPHs.
- Mejorar el diseño de reactor, a forma de que exista mejor contacto entre las fases, mejor movilidad hidrodinámica; a fin de mejorar las eficiencias logradas en la presente investigación. Ejemplo de ello son los reactores tipo pila, con distribución hidráulica del oxidante por goteo o ducha.
- Probar modificaciones a la técnica del reactivo de Fenton, tales como la adición de quelantes como el EDTA y estabilizadores de H_2O_2 , para de esta manera disponer el hierro a la reacción en su mayor parte, así como estabilizar el pH para la formación continua de radicales HO^\bullet
- Realizar investigaciones sobre la eficiencia del uso de químicos separadores de fases a diferentes concentraciones para recuperación de petróleo en este tipo de matrices.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abad, G. (2008). Tratamiento de fondos de tanque utilizando el método de biorremediación. Loja: Universidad Particular de Loja.

Acuerdo Ministerial 142. (2012). Listados Nacionales de Sustancias Químicas Peligrosas, Desechos Peligrosos y Especiales. (Registro Oficial 856).

Agustina, T. y Ang, H. (2012). Decolorization and Mineralization of C.I. Reactive Blue 4 and C.I. Reactive Red 2 by Fenton Oxidation Process. International Journal of Chemical and Environmental Engineering, 3(3), 141-147. <http://www.warponline.org/uploads/contents/49-content-1.DecolorizationandMineralization-of-C.I.-Reactive-Blue-4-and-C.I.-Reactive-Red-2-by-Fenton-Oxidation-Process.pdf>.(Enero, 2016).

Alvarez, J. A. (2005). Motores Alternativos de combustion interna. Barcelona: UPC.

Allinger, N. (1984). Quimica Orgánica. España: Reverte.

Barbusinski, K. (2009). Fenton Reaction-Controversy concerning the chemistry. Ecological Chemistry and Engineerings, 16 (3), 347-358. [http://tch.ie.uni.opole.pl/freeECE/S_16_3/Barbusinski_16\(3\).pdf](http://tch.ie.uni.opole.pl/freeECE/S_16_3/Barbusinski_16(3).pdf). (Enero, 2016)

Blanco, J. (2009). Degradación de un efluente textil real mediante procesos Fenton y Foto-fenton. Barcelona.

Castells, X. (2009). Reciclaje de residuos industriales: Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora.

//books.google.com.ec/books?id=8yWSZEBQsXgC&printsec=frontcover&dq=R
eciclaje+de+residuos+industriales:+Residuos+s%C3%B3lidos+urbanos+y+fang
os+de+depuradora.&hl=es&sa=X&ei=CXM4VLLeLO_hsASZ34GICg&ved=0CC
UQ6AEwAA#v=onepage&q (Enero 2016).

CELTEL. (2007). Gestión de Residuos Petroleros

Chukwunonye , O., & Osuji, L. (2011). Remediation of hydrocarbon in crude oil-
contaminated soils using fenton`s reagent. *Environ Monit Assess.*

Decreto Ejecutivo 1215. (2011). Reglamento Ambiental para Operaciones
Hidrocarburíferas en el Ecuador (Registro Oficial No. 265).

Delgado, K., Zuluaga, T., (2009). Biorremediación de suelos contaminados por
Hidrocarburos. Tesis de Grado para optar el título de Ingeniería Química.
Universidad de Nacional de Colombia.

Enríquez, G., (2013). Biodegradación Ecocleaner N4-3 M y Ecocleaner N4-3 G.
Tesis de Grado previo la obtención del título de Ingeniero Químico. Quito:
Universidad Central del Ecuador.

Ershadi, L., Ebadi, T., Ershadi, V., & Rabani, A. (2011). Chemical Oxidation of
crude oil in oil contaminated soil by Fenton process using nano zero valent Iron.
2nd International Conference on Environmental Science and Technology. 6.
IPCBE

Farzadkia, M., Dehghani, M., & Moafian, M. (2014). The effects of Fenton
process on the removal of petroleum hydrocarbons from oily sludge in Shirz oil
refinery, Iran. *Journal of Environmental Health Science&Engineering*, 12:31.
Federal Remediation Technologies Roundtable. (2009). <http://www.frtr.gov>.
Obtenido de http://www.frtr.gov/matrix2/top_page.html

Fernandez, A., Salager, J. & Scorzza, C., (2004). Surfactantes noiónicos,
Laboratorio FIRP, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes.

García Frutos, F., Escolano, O., Pérez, R., Rubio, A., Gimeno, A., Fernández, M., Laguna, J. (2009). Advances Methodologies for the treatment of hydrocarbons contaminated sludges from soil washing processes. 1st Spanish National Conference on Advances in Materials Recycling and Eco-Energy. Madrid.

Gogate, P. y Pandit, A. (2003). A review of imperative technologies for wastewater treatment oxidation technologies at ambient conditions. Adv Environmental Res, (8), 501-551.

http://repository.ias.ac.in/39608/1/49_pub.pdf. (Marzo, 2014).

Gordón, M., (2015). Tratamiento de efluentes de una industria textil del cantón Pelileo, provincia de Tungurahua, contaminados con colorantes azoicos mediante el uso de un proceso Foto-Fenton. Quito, 2015.

Interstate Technology Regulatory Council ITRC (2005). Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater. Second Edition.

J. A. Bergendahl, T. P. (2004). Fenton's oxidation of MTBE with zero-valent iron. Wat. Res., 327-334.

Lin, X., Chongyu, S., & Wensheng. (2003). Treatment of landfill leachate by subsurface-flow constructed wetland: a microcosm test. Guangzhou: Tercera Conferencia Internacional y exhibición.

Ma, Y., Chang, C. y Chao, C. (2012). Decolorization of Rhodamine B by a photo-Fenton Process; Effect of System Parameters and Kinetic Study. International Journal of Environment and Resource, 1(2), 73-80.
[file:///C:/Users/Majo/Downloads/IJER021%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Majo/Downloads/IJER021%20(2).pdf).(Enero, 2016)

Mang Lu, Z. Z. (2010). Remediation of petroleum contaminated soil after composting by sequential treatment with Fenton-like oxidation and biodegradation. Bioresource Technology, 101.

Mendez & Petrogiovanna. (2010). Determinación de la dosis óptima de reactivo fenton en un tratamiento de lixiviados por Fenton-adsorción. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, volumen 26, No 3.

Millioli, V., Freire, D., Cammarota, M., (2003). Petroleum oxidation using Fenton's reagent over beach sand following a spill. Journal of Hazardous Materials. 103-2

PECS-IECONSA. (2001). Contratos: 2001156, 2001157, 2001160: Remediación Ambiental de 43 piscinas para PETROPRODUCCIÓN. Quito
PEPDA. (2005). Informe de Actividades.

Peyton, G., Holm, T., & Shim, J. (2006). Development of low cost treatment options for arsenic removal in Water Treatment Facilities. The midwest Technology Assistance Center for Small Public Water Systems.

Pucci, G., Acuña, A., Pucci O., Biodegradación de hidrocarburos en fondos de tanques de la industria petrolera. Revista Peruana de Biología, versión On-line ISSN 1727-9933. Rev. peru biol. vol.22 no.1 Lima 2015

Rivas, F.J., Beltran, F.J., Frades, J., Buzeda,P., (2001). Oxidation of p-hydroxybenzoic acid by Fenton's reagent. Water Res. 35, 387. Solanas, A. (2009).

<http://congress.cimne.com/zns09/admin/files/filepaper/p422.pdf>. (Febrero,2013)

Solanas, A. (2009).

<http://congress.cimne.com/zns09/admin/files/filepaper/p422.pdf>. Recuperado el 2013, de <http://congress.cimne.com/zns09/admin/files/filepaper/p422.pdf>

Souza, P. T., Valdinete, L., De Barros, B., & Simonnot, M.-O. (2009). Phenanthrene and pyrene axidation in contaminated soils using Fenton`s reagent. HazMat.

Texas Natural Resource. (2001). TOTAL PETROLEUM HYDROCARBONS - TNRCC Method 1005.

Toledo, B. (2009). Aplicación de Procesos Biológicos como medida de Remediación para recuperar suelos Limo-Arcillosos contaminados con Gasolina. Tesis de Grado para la obtención del título de Ingeniero Civil, Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL), Facultad de Ciencias de la Tierra, Guayaquil.

Torrades, F., García, J. y Núñez, L. (2008). Fenton and photo-Fenton oxidation of a model mixture of dyes-overall kinetic analysis. *Coloration Technology*, 124 (6), 370-374. doi: 10.1111/j.1478-4408.2008.00165.x.

U.S. EPA. (2004). Treatment technologies for site cleanup annual status report (eleventh edition). Washington: EPA-542-R-03-009.

U.S. EPA. (2006). In Situ Treatments Technologies For Contaminated Soil. Washington: Solid Water and Emergency Response.

U.S. EPA. (2006). Solid Waste and Emergency Response 5203P. In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil: www.epa.gov/tio/tsp

U.S. EPA. (2006). In-Situ Chemical Oxidation. Office of Research and Development National Risk Management Research Laboratory Cincinnati, OH. 45268. EPA/600/R-06/072.

<http://www.clu-in.org/download/contaminantfocus/pcb/ISCO-600R06072.pdf>

Villacreses, L. (30 de 05 de 2013). Aplicación de oxidación química tipo fenton asistida con detergente para tratamiento de suelos contaminados con petróleo "http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/7802

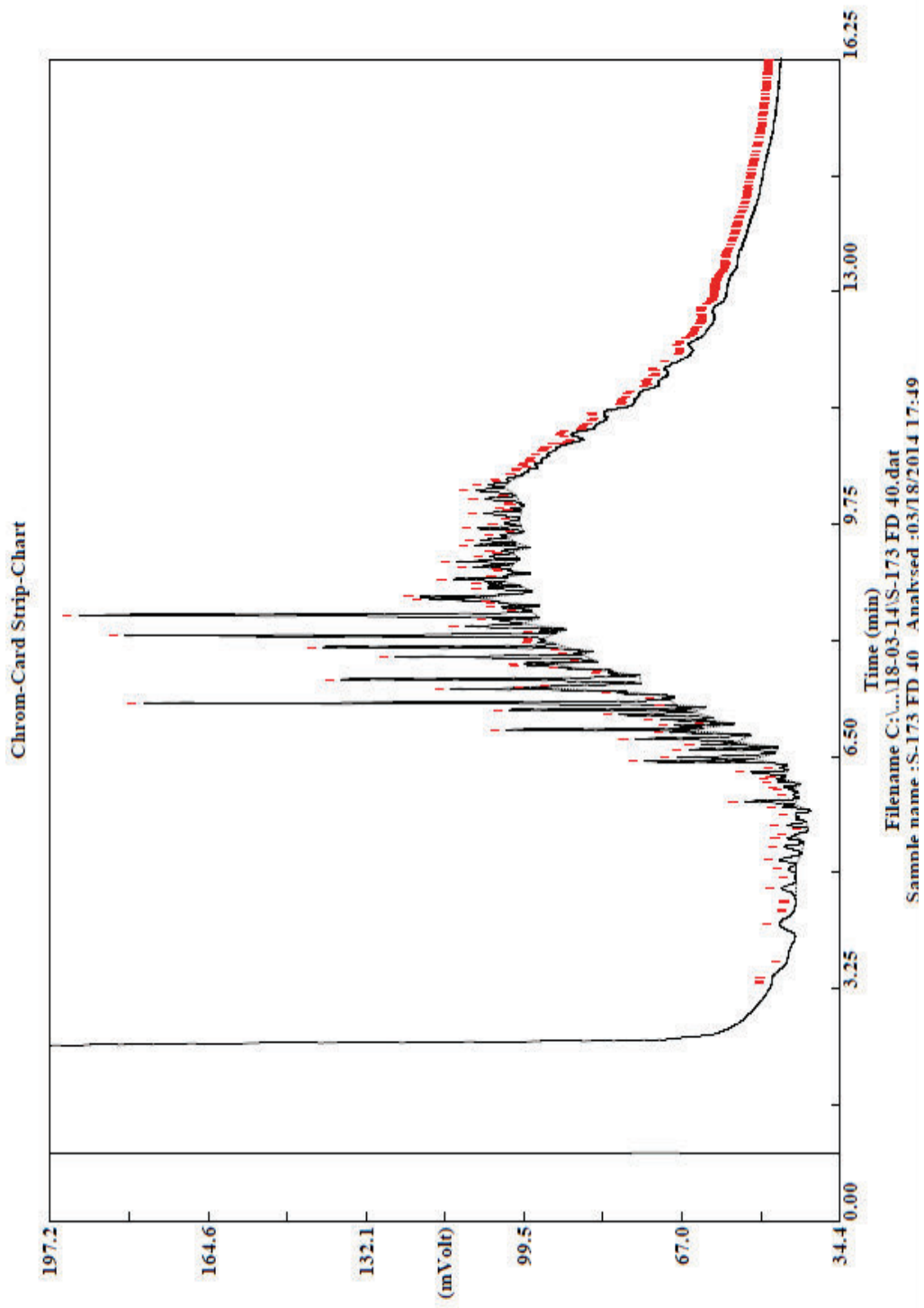
Wolke, T., & Velasco, J. (2002). Tecnologías de remoción para suelos contaminados. Mexico. INE-SEMARNAT.

ANEXOS

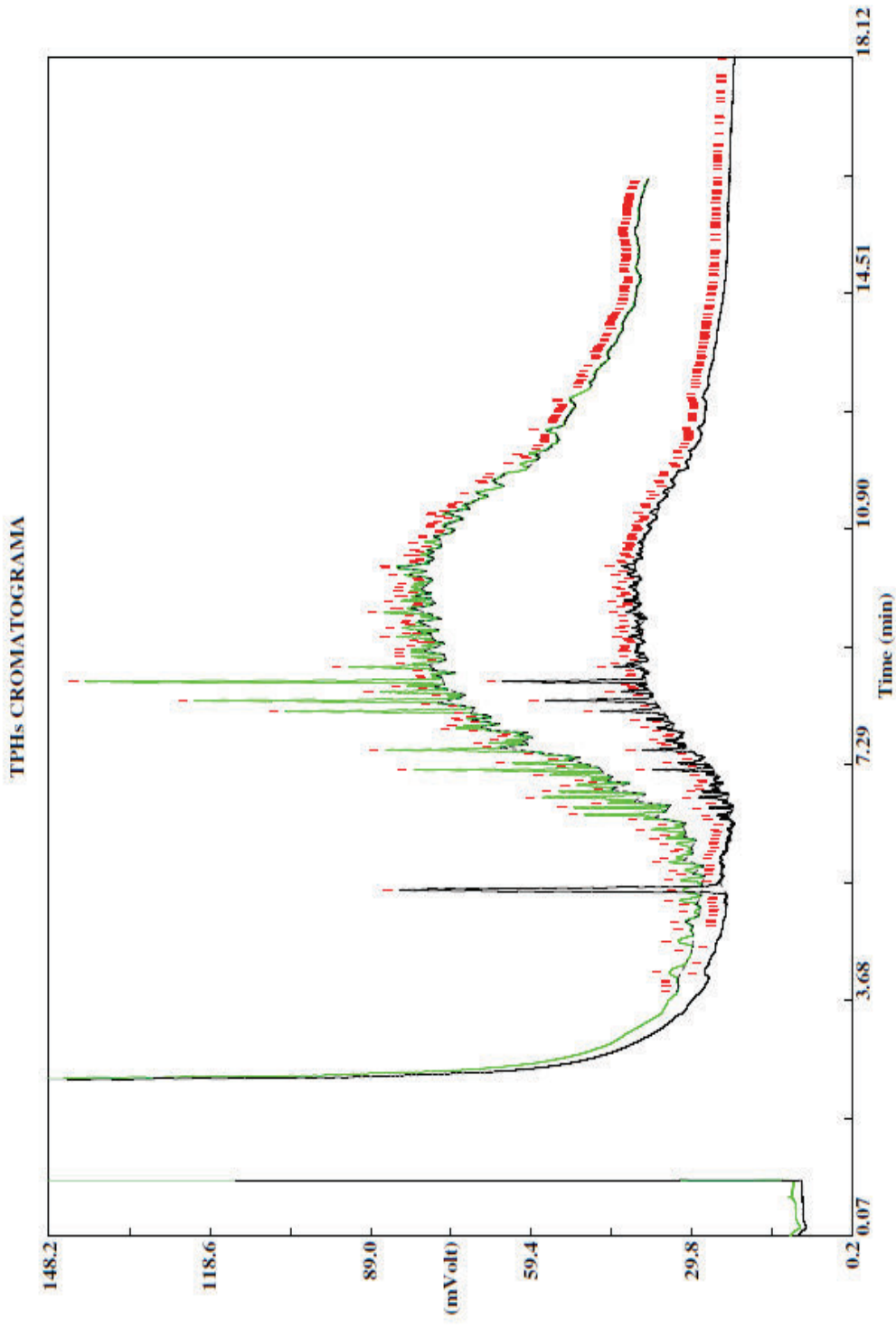
ANEXO 1

CROMATOGRAMAS OBTENIDOS

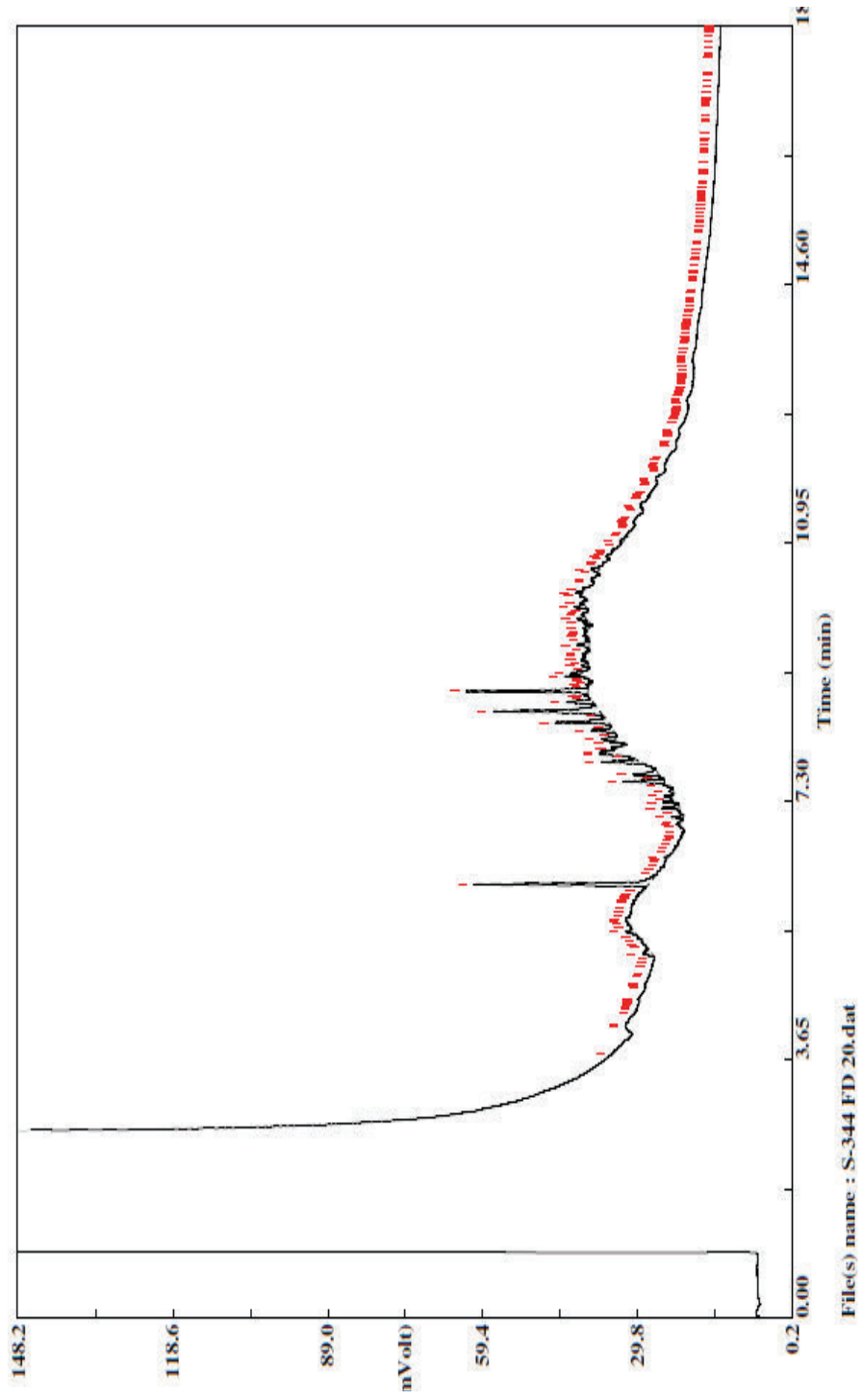
CARACTERIZACION INICIAL



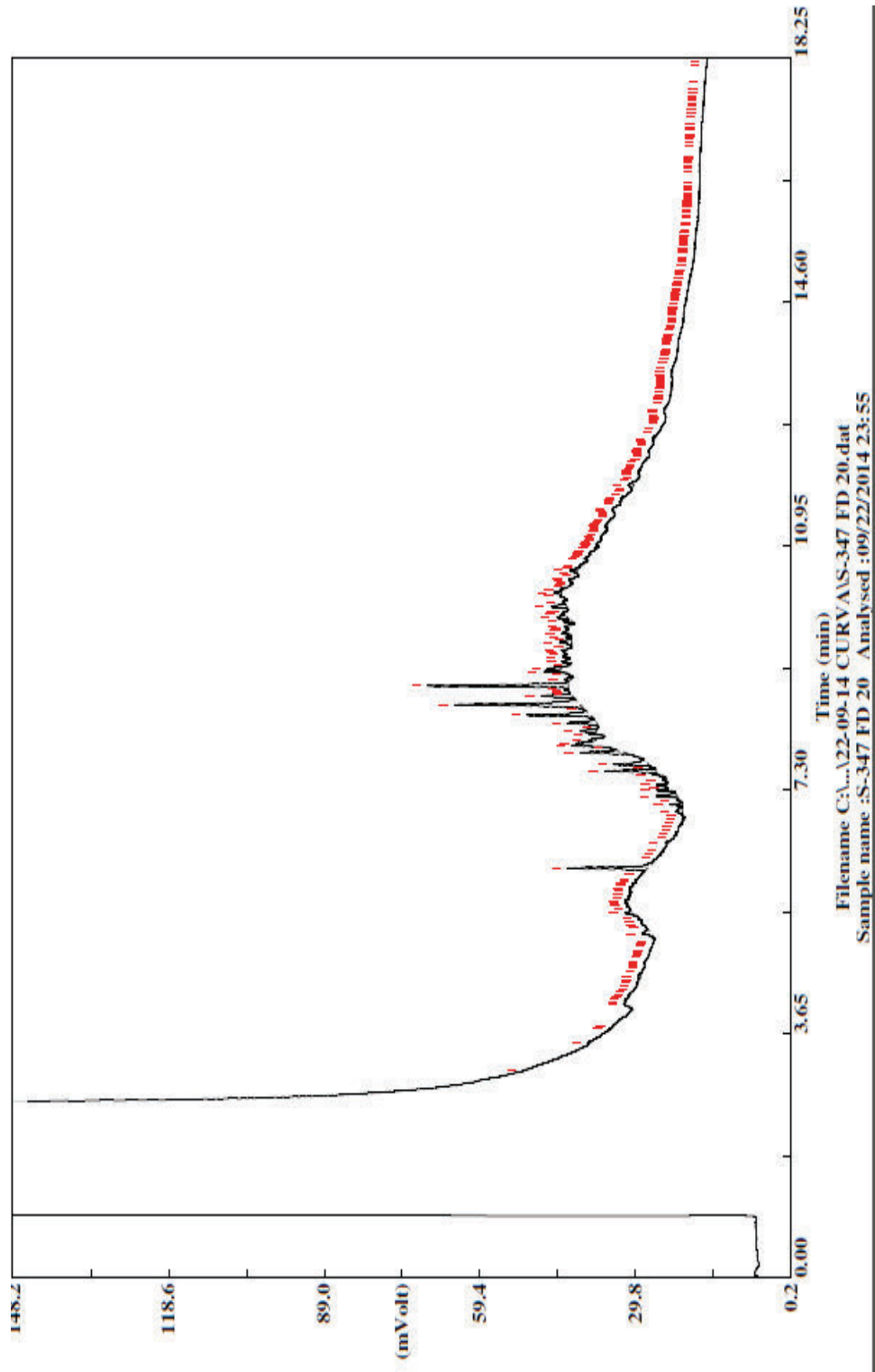
CARACTERIZACIÓN INICIAL Y LUEGO DE PRE-TRATAMIENTO



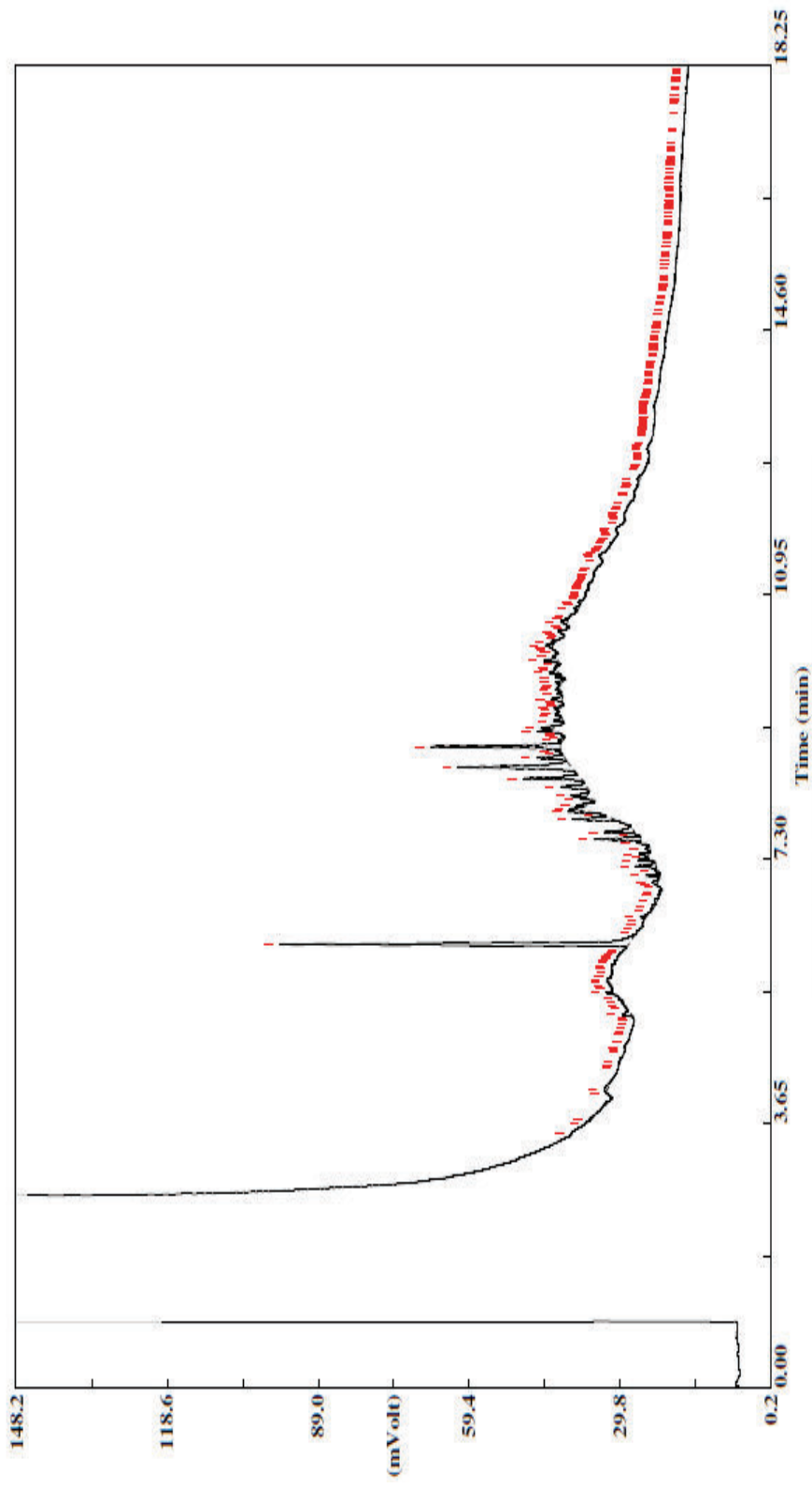
TRATAMIENTO
T1A1R1



TRATAMIENTO T1A1R2

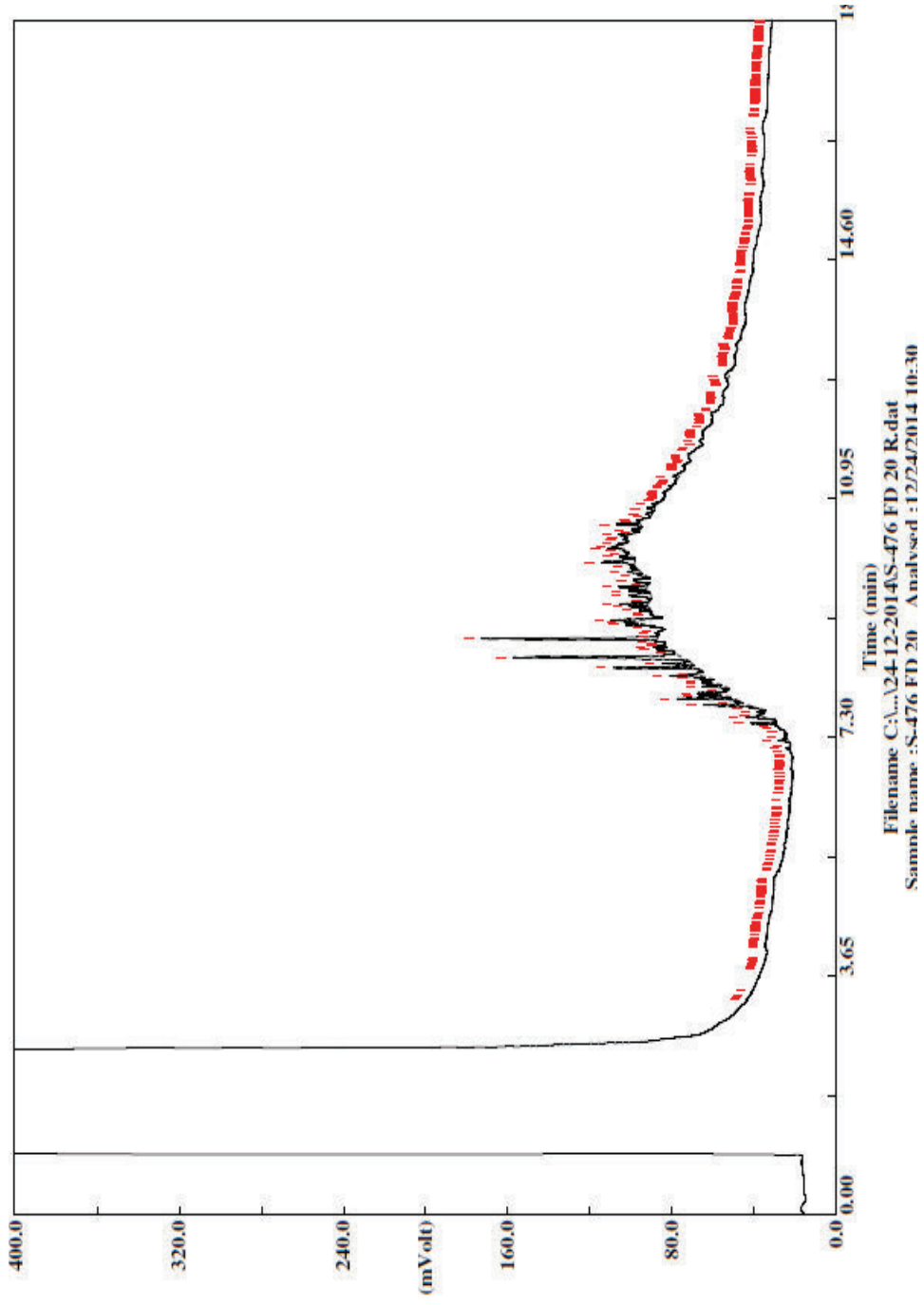


TRATAMIENTO T1A1R3

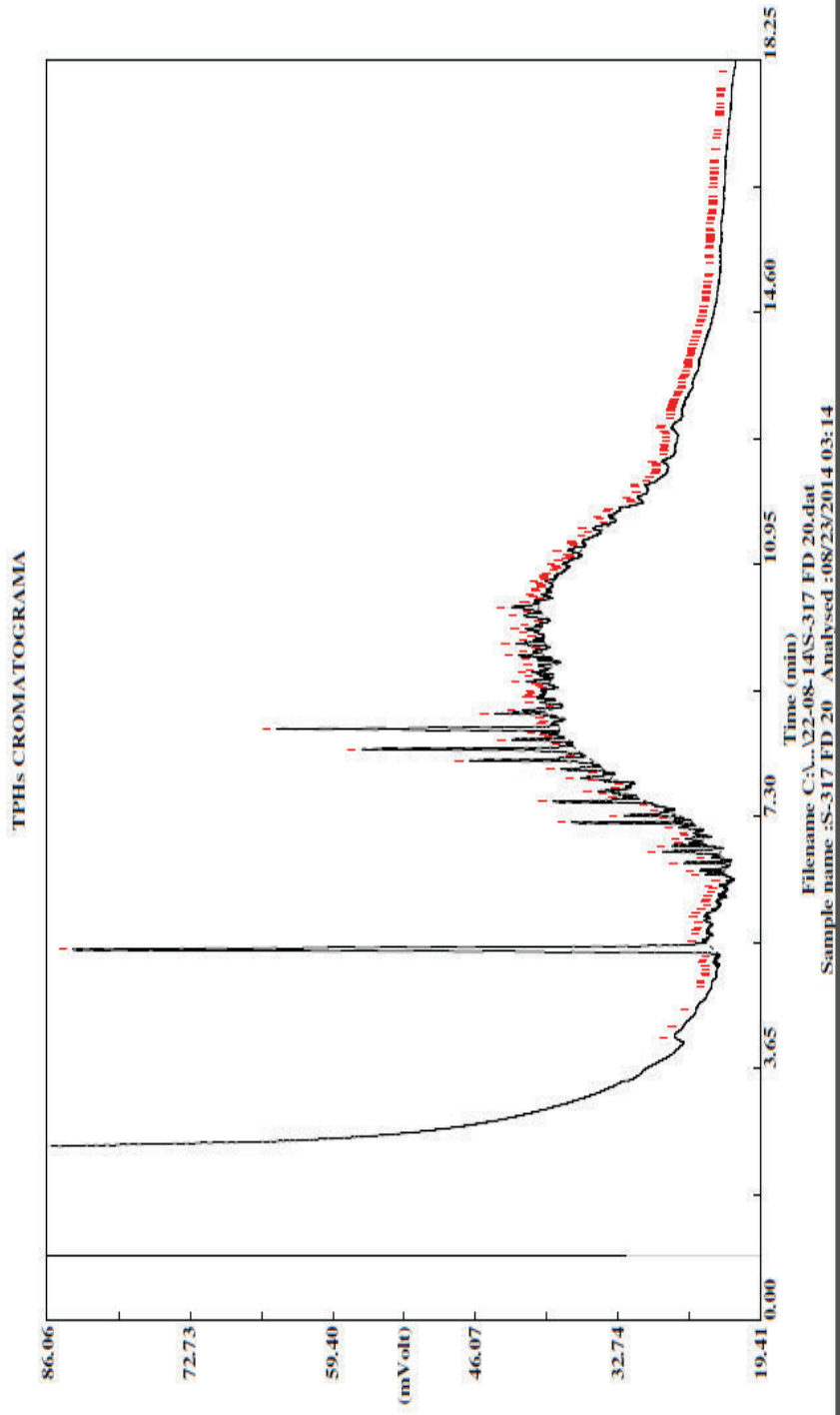


Filename C:\A...A22-09-14 CURVAIS-348 FD 20.dat
Sample name :S-348 FD 20 Analyzed : 09/23/2014 00:23

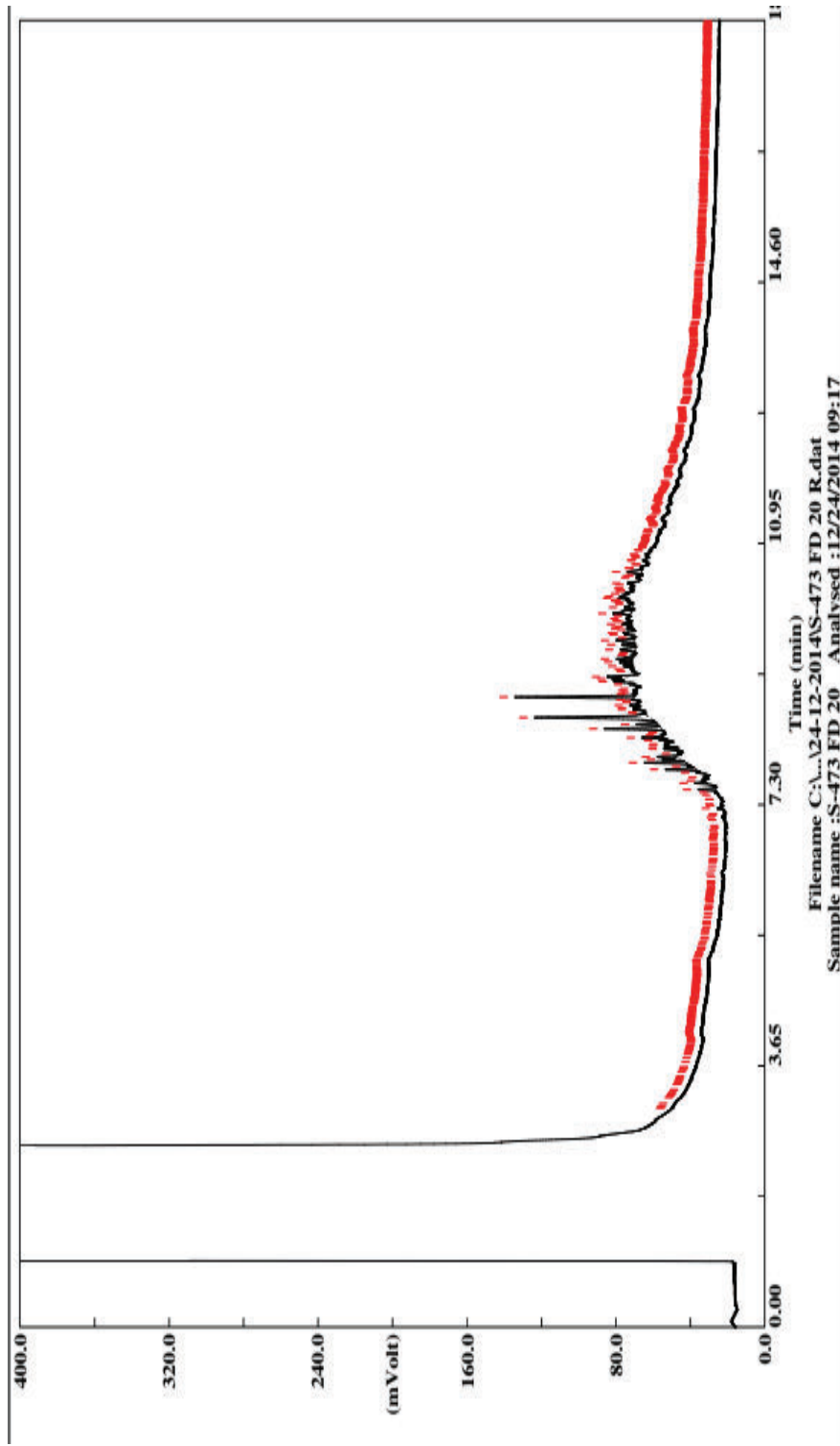
**TRATAMIENTO
T1A2R1**



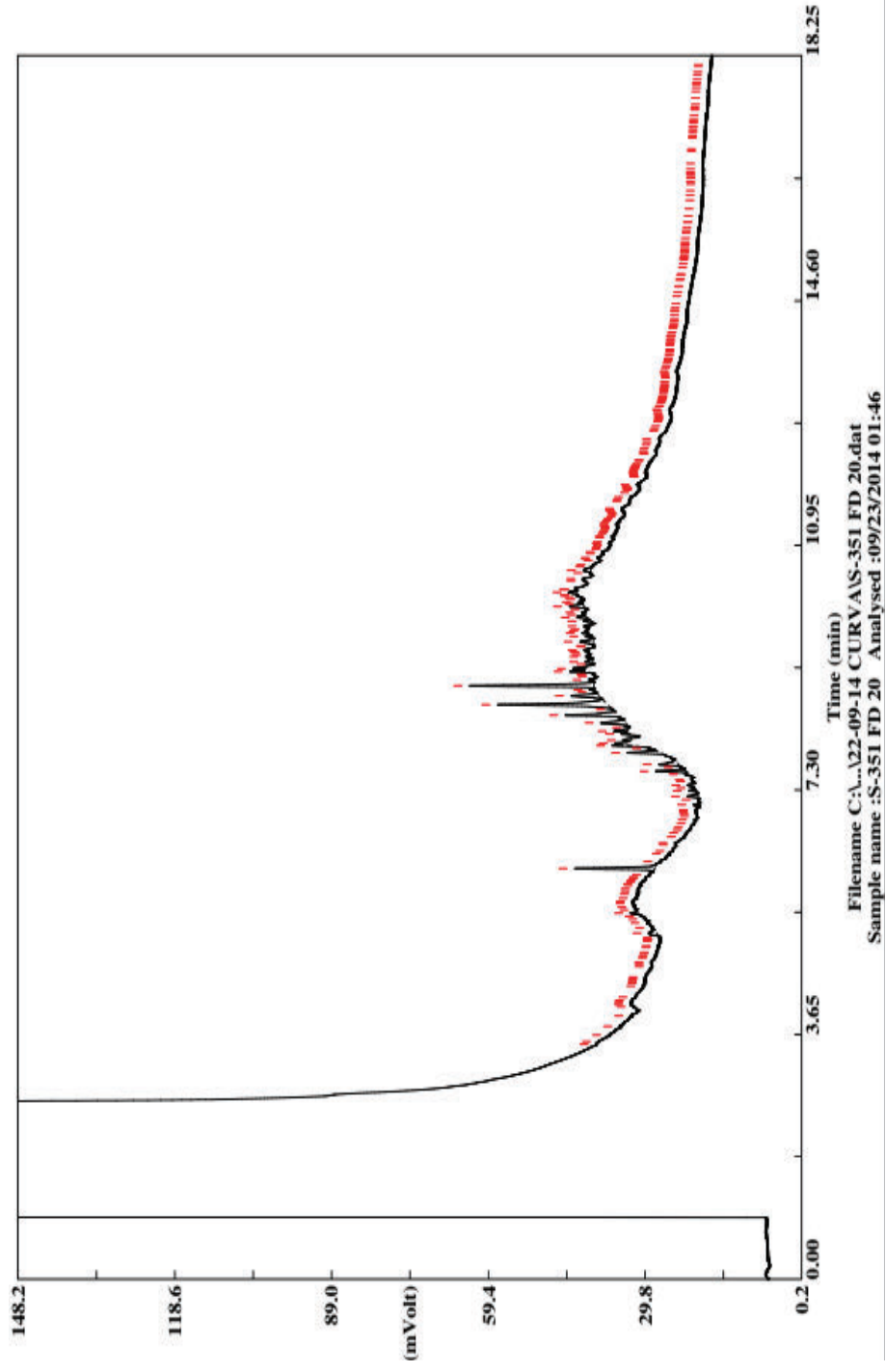
TRATAMIENTO T1A2R2



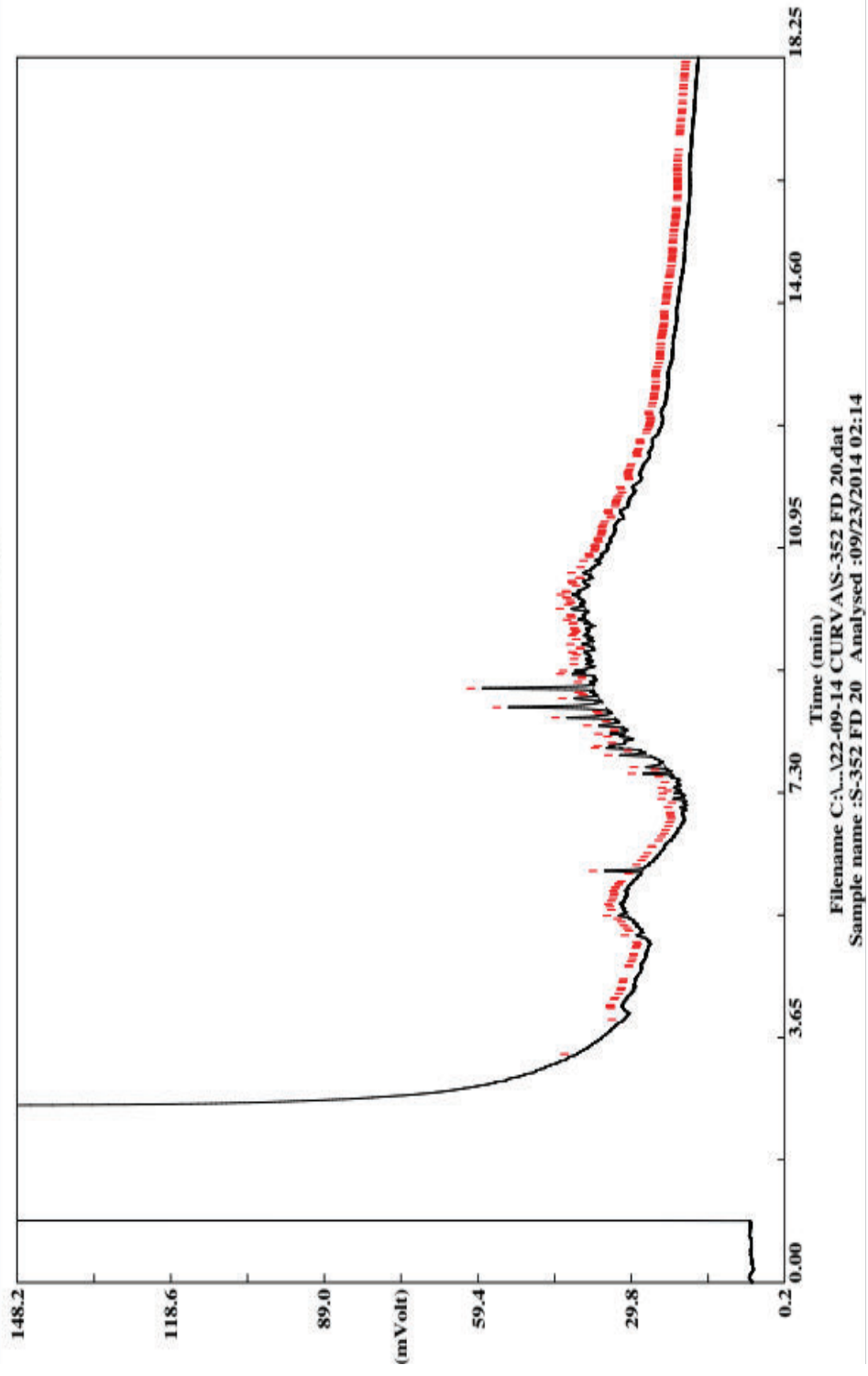
TRATAMIENTO
T1A2R3



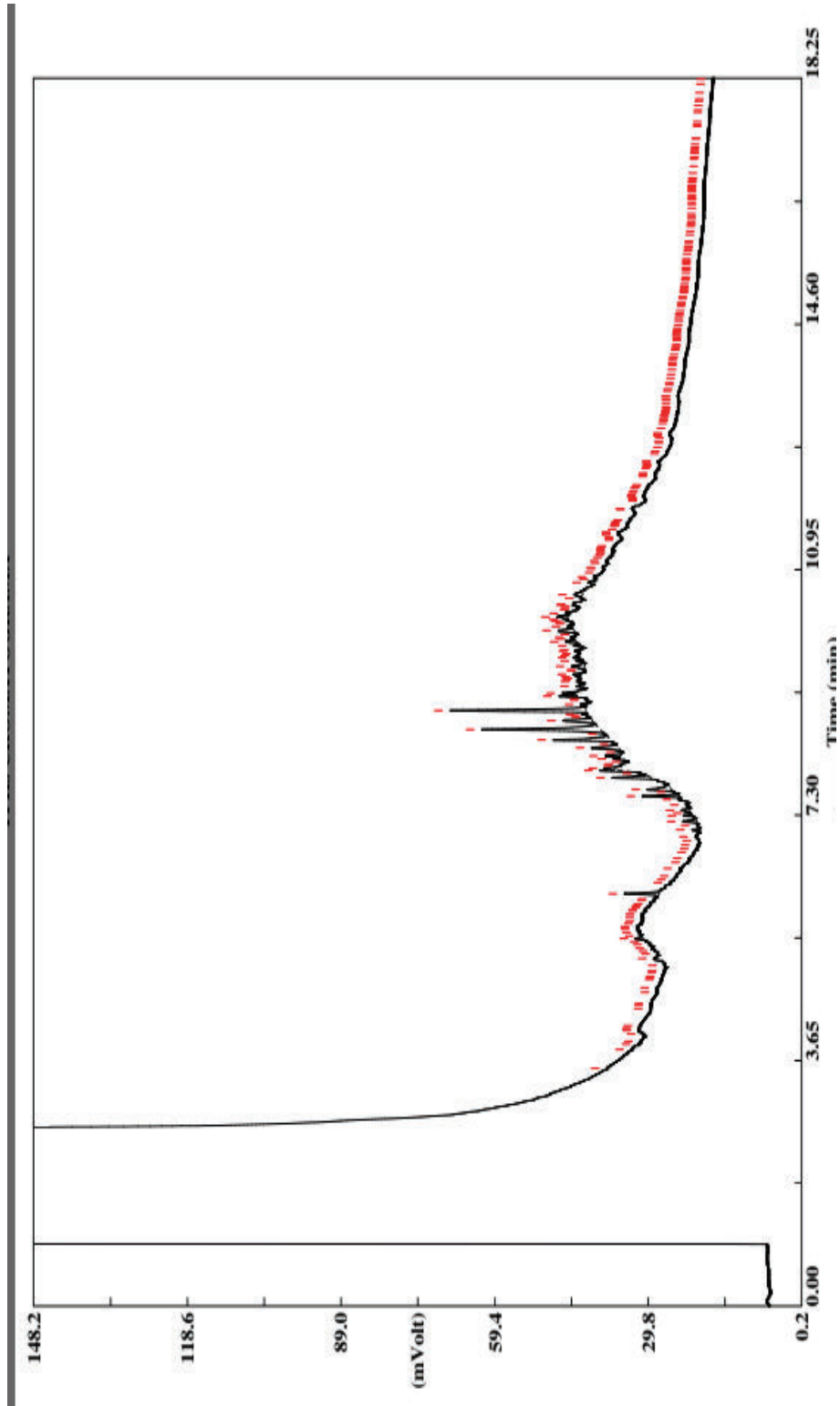
TRATAMIENTO T2A1R1



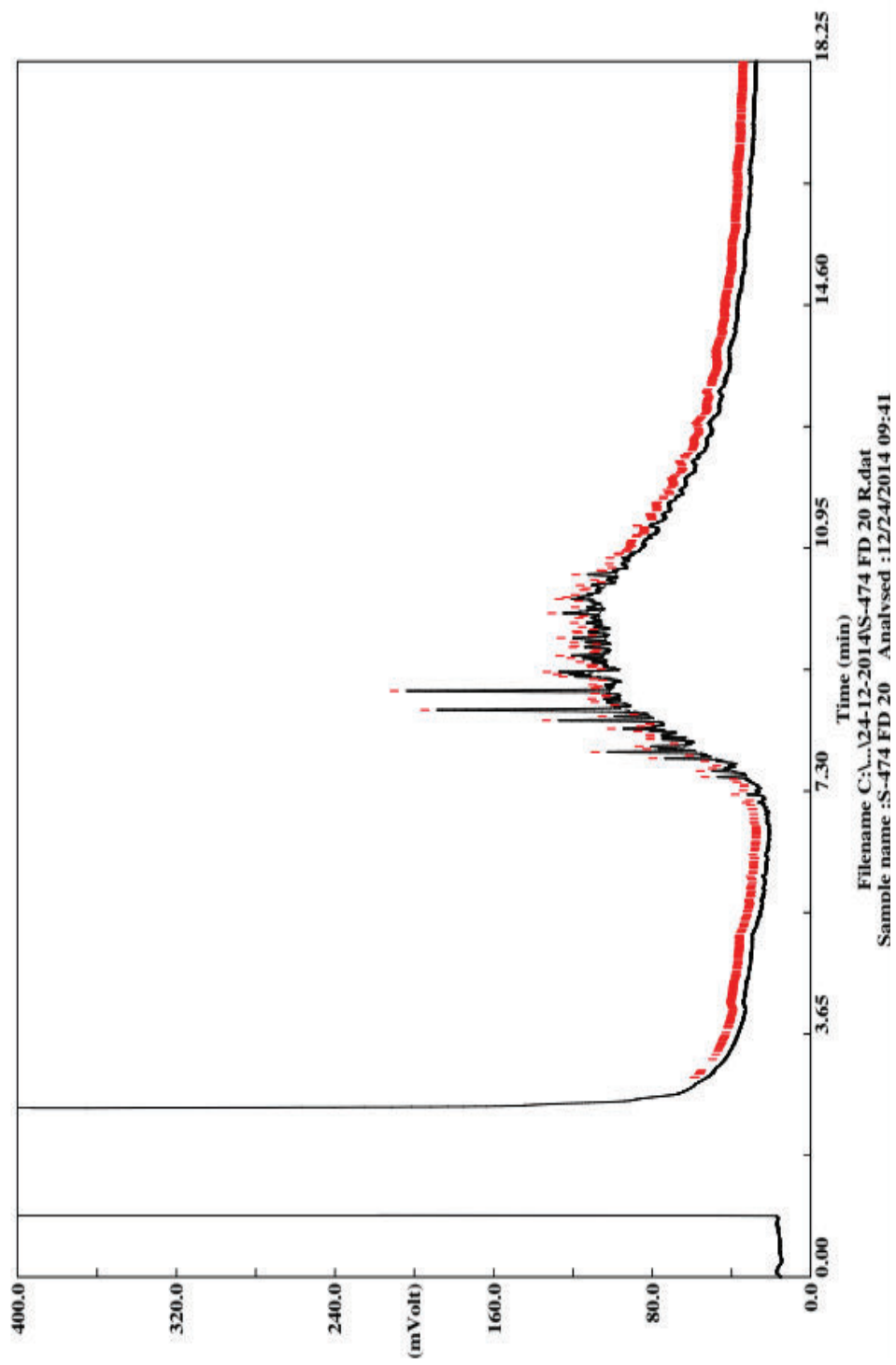
TRATAMIENTO T2A1R2



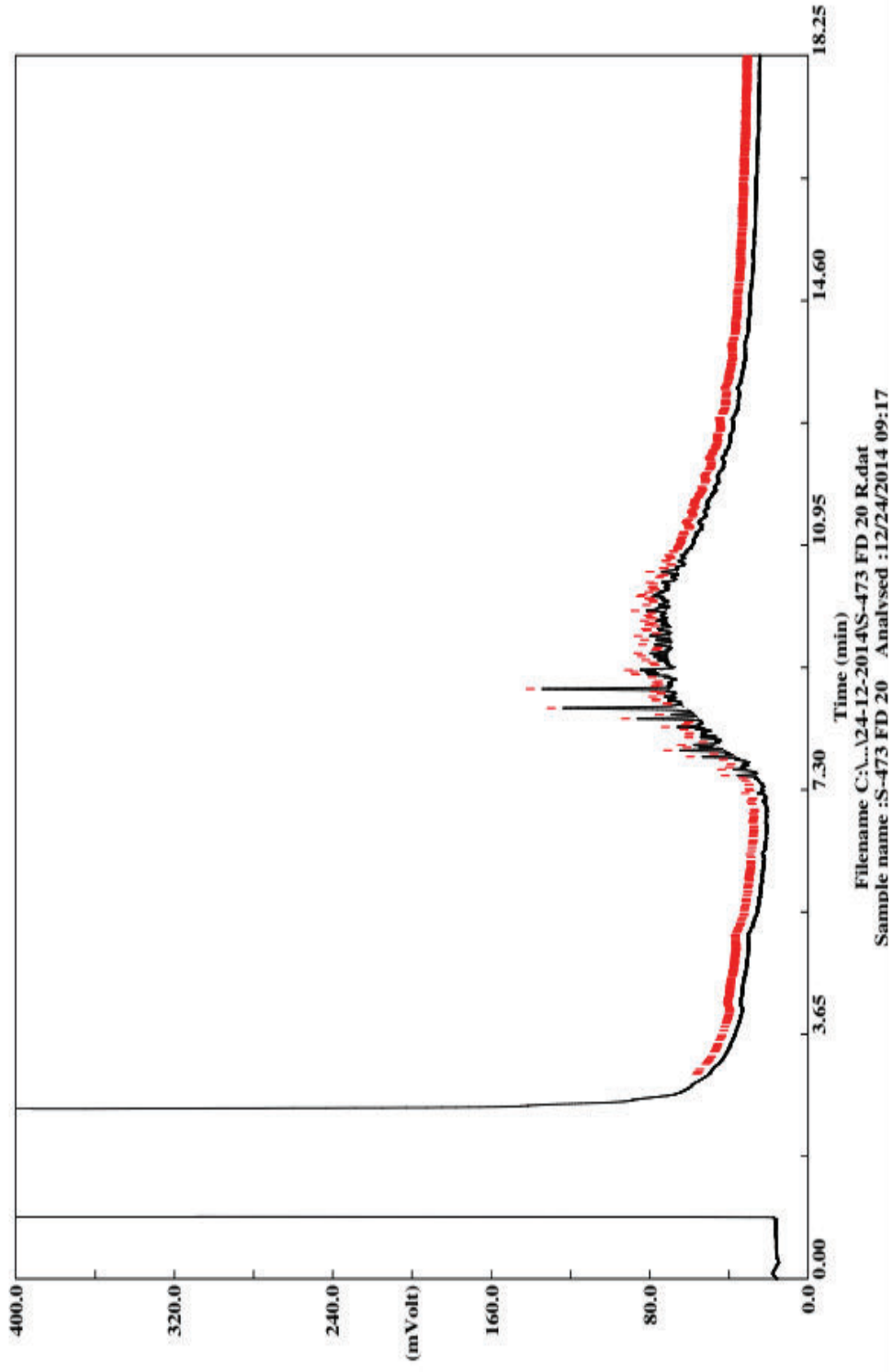
TRATAMIENTO
T2A1R3



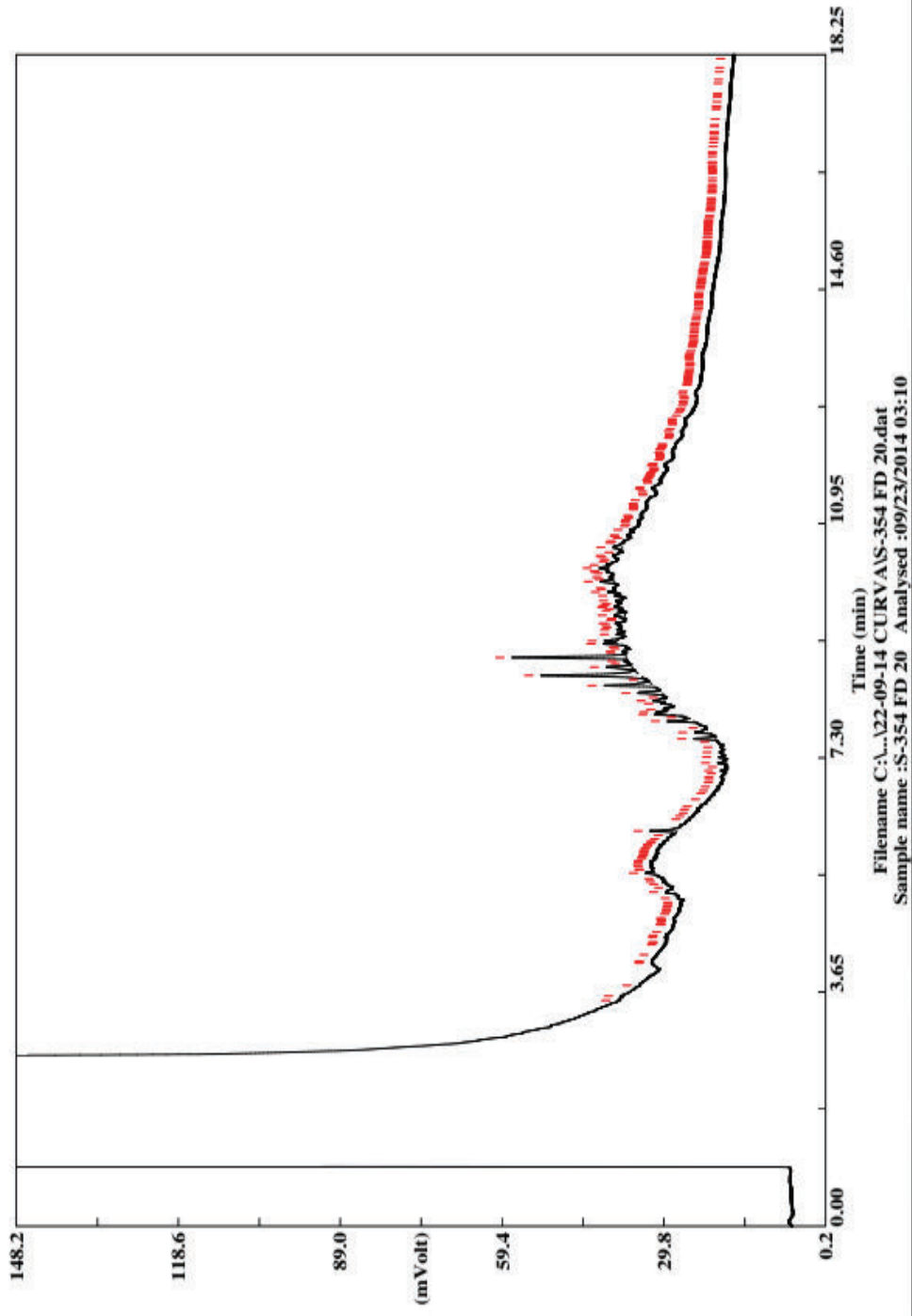
TRATAMIENTO
T2A2R1



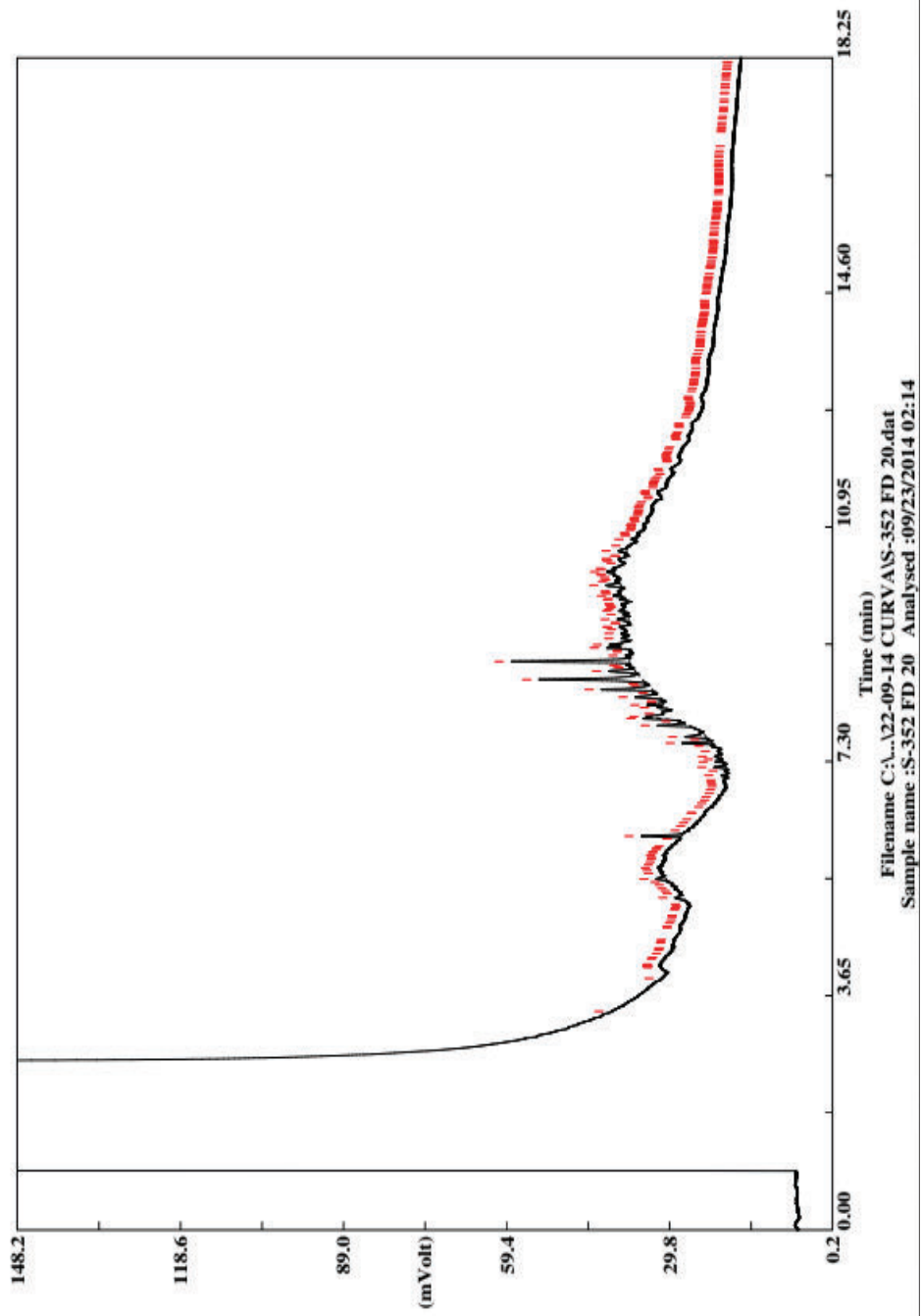
TRATAMIENTO
T2A3R1



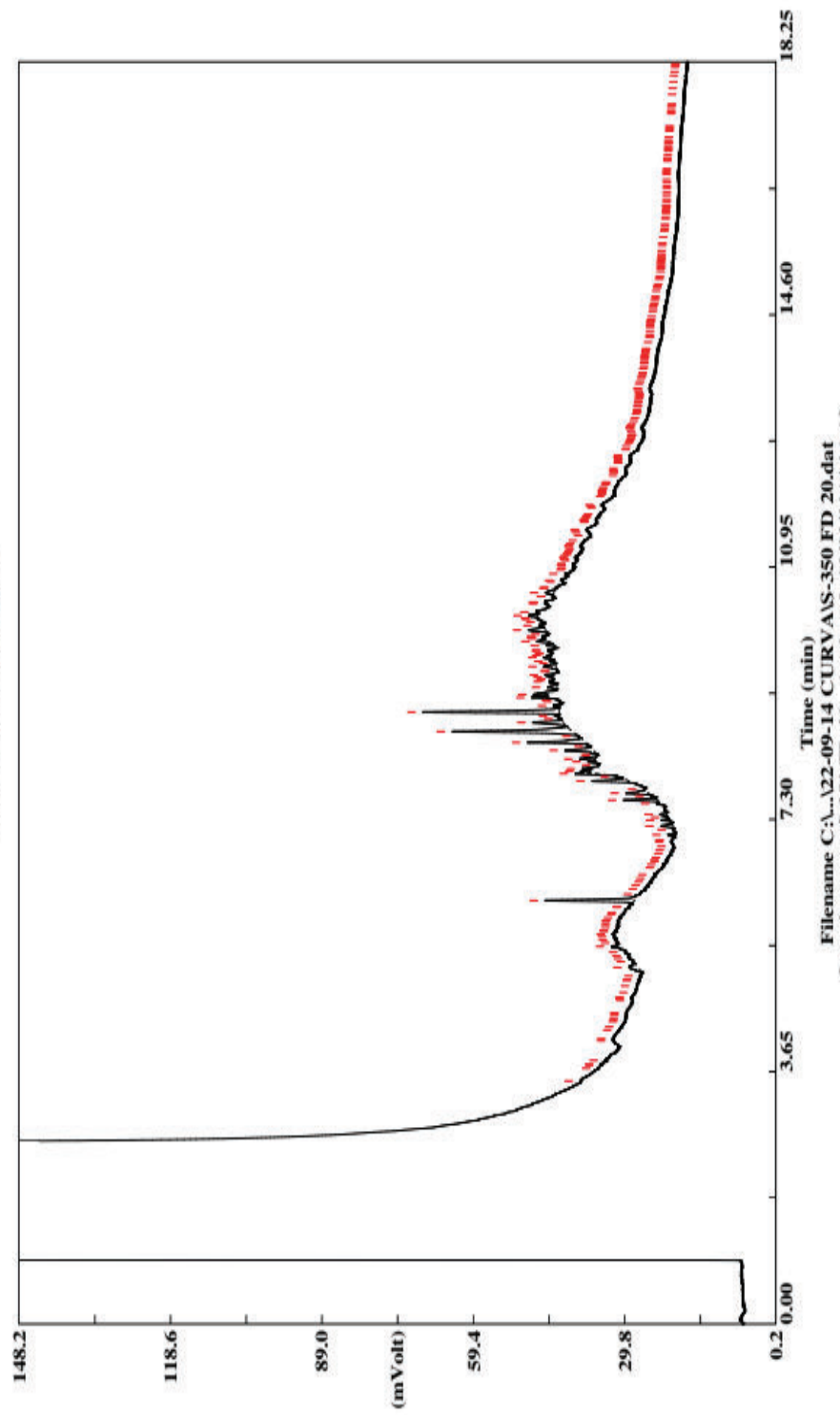
TRATAMIENTO T3A1R1



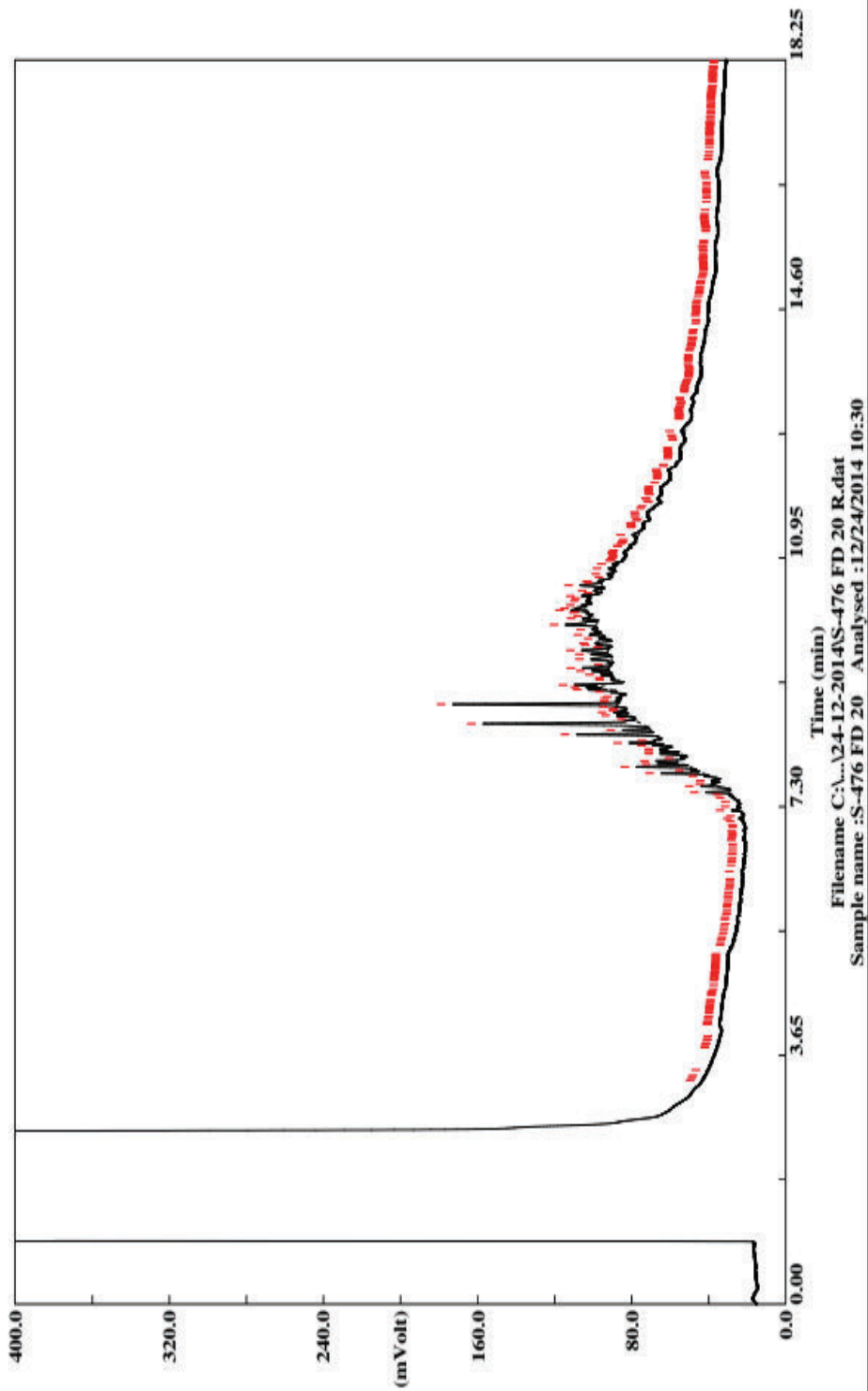
TRATAMIENTO T3A1R2



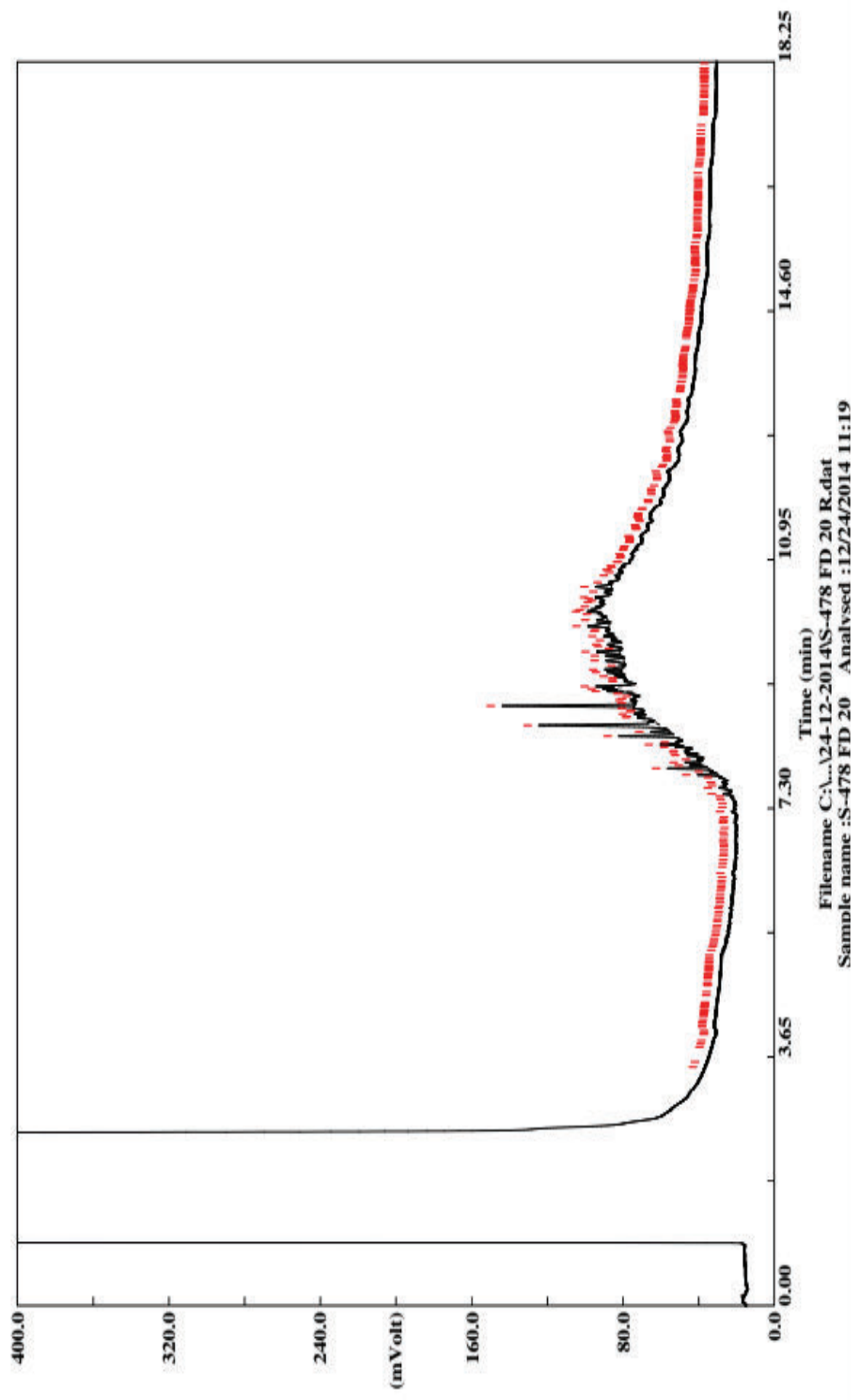
TRATAMIENTO T3A1R3



TRATAMIENTO
T3A2R1



TRATAMIENTO T3A3R1



ANEXO 2

LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE TPH

(RAOHE 1215, 2001)

Parámetro	Expresado en	Unidad ¹⁾	Uso Agrícola ²⁾	Uso Industrial ³⁾	Ecosistemas Sensibles ⁴⁾
Cadmio	Cd	mg/kg	<2	<10	<1
Níquel	Ni	mg/kg	<50	<100	<40
Plomo	Pb	mg/kg	<100	<500	<80
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	HAPs	mg/kg	<2	<5	<1
Hidrocarburos totales de petróleo	TPH	mg/kg	<2500	<4000	<1000

(RAOHE, 2001)

- 1) Expresado con base en sustancia seca (gravimétrico; 105° C, 24 horas).
- 2) Valores límites permisibles enfocados en la protección de suelos y cultivos.
- 3) Valores límites permisibles para sitios de uso industrial (construcciones, etc.)
- 4) Valores límites permisibles para la protección de ecosistemas sensibles tales como Patrimonio Nacional de Áreas Naturales y otros identificados en el correspondiente Estudio Ambiental.

ANEXO 3

ESPECIFICACIONES DE NEOFLOAT®

Casa comercial	Biosistal S.A.
Apariencia	Líquido claro amarillento
Olor	Naranja
pH	6.5 – 8.5
Densidad	0.95 g/cm ³ (25°C)
Punto de Inflamación	Soluble en agua
Almacenamiento	Vidrio, acero inoxidable-
Dilución	1:5, 1:10, 1:20