

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**DISEÑO Y APLICACIÓN DE CELDAS ELECTROQUÍMICAS EN
PROCESO DE RECUPERACIÓN DE SUELOS, PURIFICACIÓN DE
BIODIESEL Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. MÓDULO:
PURIFICACIÓN, SEPARACIÓN Y LAVADO DE BIODIESEL**

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Saúl Andrés Escalante Guevara, Otto Rigoberto Hurtarte Aguilar, Eddy René Meléndez Mendizábal e Irene Alejandra Reyes Guzmán, para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química

Guatemala,

2013

**DISEÑO Y APLICACIÓN DE CELDAS ELECTROQUÍMICAS EN
PROCESO DE RECUPERACIÓN DE SUELOS, PURIFICACIÓN DE
BIODIESEL Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. MÓDULO:
PURIFICACIÓN, SEPARACIÓN Y LAVADO DE BIODIESEL**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**DISEÑO Y APLICACIÓN DE CELDAS ELECTROQUÍMICAS EN
PROCESO DE RECUPERACIÓN DE SUELOS, PURIFICACIÓN DE
BIODIESEL Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. MÓDULO:
PURIFICACIÓN, SEPARACIÓN Y LAVADO DE BIODIESEL**

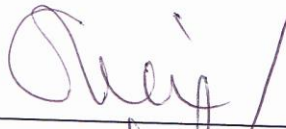
Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Saúl Andrés Escalante Guevara, Otto Rigoberto Hurtarte Aguilar, Eddy René Meléndez Mendizábal e Irene Alejandra Reyes Guzmán, para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química

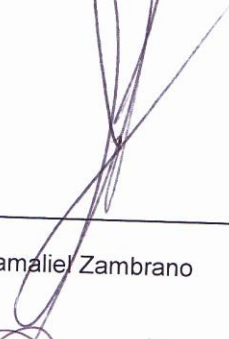
Guatemala,

2013

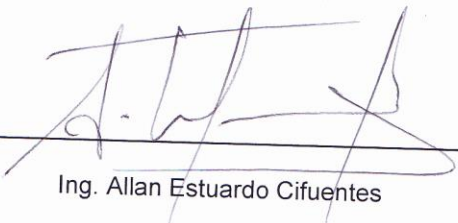
Vo. Bo. :

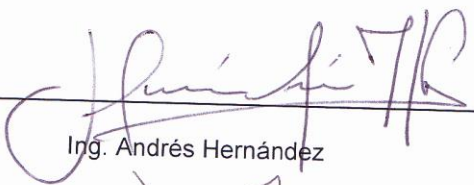
(f) 
Ing. Cristian Rossi

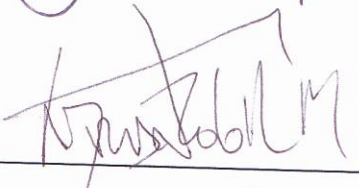
Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano

(f) 
Ing. Cristian Rossi

(f) 
Ing. Allan Estuardo Cifuentes

(f) 
Ing. Andrés Hernández

(f) 
Dr. Adrián Gil Méndez

Fecha de aprobación: Guatemala, 19 de noviembre del 2013.

PREFACIO

En el siguiente trabajo se presentan al lector procesos de tratamiento utilizando celdas electroquímicas, para eliminar sustancias metálicas contaminantes en medios hídricos y edáficos y como un método catalizador en el proceso de separación de glicerina y biodiésel, a través de la aplicación de corriente. Ésta es una práctica nueva en Guatemala, que no ha sido implementada a nivel industrial, por lo que el trabajo se vio delimitado por la falta de desarrollo de materiales e investigación en este campo. Por esta razón este trabajo presenta algunas de las bases y fundamentos de la práctica de estos procesos al nivel más simple posible, fundamentando la construcción y diseño de la celda en los fundamentos presentados en el diagrama 1.

En primer lugar, se procedió a realizar el diseño a escala del laboratorio de celdas electroquímicas que permitan el tratamiento de dichas sustancias contenidas en ambos medios, para facilitar su remoción, así como la reducción del tiempo de separación entre glicerina y biodiésel.

Se efectuaron pruebas experimentales a nivel de laboratorio con la finalidad de establecer la eficacia de las celdas electroquímicas en la redistribución de sustancias metálicas contaminantes en medios hídricos y edáficos así como en la reducción de tiempo de separación entre glicerina y biodiésel, variando parámetros previamente establecidos.

El presente trabajo se limitó al uso de celdas electroquímicas de dos electrodos de placa, alternando entre tres materiales diferentes; cobre, hierro y aluminio, para determinar la efectividad de la combinación de los distintos materiales para llevar a cabo los procedimientos, se comprobó la efectividad de los tratamientos de los distintos procesos a dos valores de corriente distintos.

ÍNDICE

PREFACIO.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	4
III. JUSTIFICACIONES.....	5
IV. MARCO TEÓRICO	7
V. METODOLOGÍA Y MATERIALES	83
VI. RESULTADOS	100
VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	117
VIII. CONCLUSIONES	134
IX. RECOMENDACIÓN.....	138
X. BIBLIOGRAFÍA	141
XI. ANEXOS	143
XII. GLOSARIO	170

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los parámetros indicadores de la calidad del agua.....	19
Tabla 1 Métodos analíticos utilizados para los compuestos presentes en el agua.....	21
Tabla 3. Diagrama de la celda que se utilizó para la primer proceso de tratamiento de aguas residuales.	100
Tabla 4. Diagrama de la celda que se utilizó para el segundo proceso de tratamiento de aguas residuales.	101
Tabla 5. Diagrama de la celda que se utilizó para el tercer proceso de tratamiento de aguas residuales.	102
Tabla 6. Diagrama de la celda que se utilizó para la primer proceso de tratamiento de medios edáficos	106
Tabla 7. Diagrama de la celda que se utilizó para el segundo proceso de tratamiento de medios edáficos	107
Tabla 8. Diagrama de la celda que se utilizó para la primer proceso de tratamiento de reducción de tiempo necesario para la separación de biodiésel y glicerina.....	111
Tabla 9. Diagrama de la celda que se utilizó para la primer proceso de tratamiento de reducción de tiempo necesario para la separación de biodiésel y glicerina.....	112
Tabla 10. Diagrama de la celda que se utilizó para la primer proceso de tratamiento de reducción de tiempo necesario para la separación de biodiésel y glicerina.....	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Celda electroquímica para el tratamiento de aguas residuales con ánodo de aluminio y cátodo de cobre antes del tratamiento electroquímico.....	164
Figura 2: Celda electroquímica y fuente de poder marca DC Power Supply para el tratamiento de aguas residuales con ánodo de aluminio y cátodo de cobre antes del tratamiento electroquímico.....	164
Figura 3: Celda electroquímica y fuente de poder marca DC Power Supply para el tratamiento de aguas residuales con ánodo de aluminio y cátodo de cobre despues del tratamiento electroquímico.....	165
Figura 4: Reactor de la celda electroquímica para el tratamiento de aguas residuales con ánodo de aluminio y cátodo de cobre despues del tratamiento electroquímico.....	165
Figura 5: Proceso de homogeneización de la mezcla (glicerina biodiésel) en el reactor de la celda electroquímica para el tratamiento de reducción de tiempo necesario para la separación de glicerina y biodiésel	166
Figura 6: Proceso de operación de la celda electroquímica para el tratamiento de reducción de tiempo necesario para la separación de glicerina y biodiésel	166
Figura 7: Formación final del área interfacial y definición del limite entre las dos fases luego de el tratamiento electroquímico para la separación de glicerina y biodiésel usando ánodo de aluminio y cátodo de cobre con una corriente de 2 amperios a 20 voltios.....	167
Figura 8: Separación final del área interfacial y definición del limite entre las dos fases luego de el tratamiento electroquímico para la separación de glicerina y biodiésel usando ánodo de aluminio y cátodo de cobre con una corriente de 3 amperios a 30 voltios	167
Figura 9: Celda electroquímica y fuente de poder marca DC Power Supply para el tratamiento de medios edáficos con ánodo de aluminio y cátodo de cobre.....	168
Figura 10: Celda electroquímica y fuente de poder marca DC Power Supply para el tratamiento de medios edáficos con ánodo de aluminio y cátodo de cobre.....	168
Figura 11: Toma de muestras para la celda electroquímica y fuente de poder marca DC Power Supply para el tratamiento de medios edáficos con ánodo de aluminio y cátodo de cobre.....	169
Figura 12: Muestra de Terratec utilizado para mejorar la conductividad del suelo en el tratamiento electroquímico de medio edáficos	169

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto fue el diseño y construcción de celdas electroquímicas capaces de redistribuir espacialmente, en los reactores, contaminantes con propiedades metálicas para facilitar su remoción, con el fin de usarlas en el tratamiento de residuos; así como la reducción del tiempo requerido para la formación de fases en el proceso de separación de biodiésel y glicerina. Debido a los objetivos del proyecto se diseñaron celdas por lotes o batch para tener un mejor control de la caracterización de las propiedades de las sustancias a procesar.

Para el proceso de tratamiento de medios hídricos se construyó la celda utilizando un vaso de precipitados de 4L como recipiente para el reactor del proceso, la celda consistió de dos electrodos de placa con dimensiones 6cm de ancho, 10 cm de largo y 1 mm de espesor, los materiales para los electrodos fueron un cátodo de cobre y ánodos de hierro y aluminio, para el sistema se utilizó una fuente de poder marca *DC Power Supply* para suministrar la energía a los electrodos y llevar a cabo la reacción, además de un agitador magnético para ayudar a promover la separación de los contaminantes, los contaminantes de referencia para este medio fueron Zn y Mg

Para el proceso de tratamiento de medios edáficos se construyó la celda utilizando un contenedor rectangular de 13cm de profundidad, 19cm de ancho y 45 cm de largo como reactor del proceso, la celda consistió de dos electrodos de placa con dimensiones 13cm de ancho, 19 cm de largo y 1 mm de espesor. Los materiales para los electrodos fueron un cátodo de cobre y ánodos de hierro y aluminio. Para el sistema se utilizó la misma fuente de poder, además del uso de agua para aumentar la humedad del medio, y EDTA para promover la migración de los contaminantes en el medio, el contaminante de referencia para este medio fue Pb.

Para el proceso de tratamiento de medios biodiésel se construyó la celda utilizando un beaker de 2L como reactor del proceso, la celda consistió de dos electrodos de placa con dimensiones 6 cm de ancho, 10 cm de largo y 1 mm de espesor los materiales para los electrodos fueron un cátodo de cobre y ánodos de hierro y aluminio. Para el sistema se utilizó la misma fuente de poder marca *DC Power Supply* para suministrar la energía a los electrodos y llevar a cabo la reacción ya que para este proceso la referencia era el tiempo de separación del biodiesel y la glicerina. Para todos los procesos se utilizó un volumen de 700 ml de mezcla, con una relación de 6:1 entre el biodiésel y la glicerina.

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente proyecto fue el diseño y construcción de celdas electroquímicas con el fin de usarlas en el tratamiento de residuos, en medios edáficos e hídricos, así como la reducción del tiempo requerido para la formación de fases en el proceso de separación de biodiésel y glicerina, debido a los objetivos del proyecto se diseñaron celdas por lotes o batch para tener un mejor control de la caracterización de las propiedades de las sustancias a procesar.

En la actualidad la búsqueda de nuevos procesos de tratamiento de desechos y de optimización de procesos es una rama de la ciencia que ha tenido un gran impulso, sobre todo en el campo de investigación aplicada, desde donde se busca encontrar formas alternas para alcanzar estos objetivos.

En este trabajo se presentan, de forma teórica y práctica, alternativas basadas en el uso de reacciones electroquímicas para dar tratamiento de diversos procesos, específicamente el tratamiento de aguas residuales, el tratamiento de contaminantes en medios edáficos y la optimización en la reducción del tiempo en el proceso de separación de glicerina y biodiésel.

Las celdas electroquímicas son sistemas que constan, fundamentalmente, de una fuente de poder, electrodos, un ánodo y un cátodo conectados individualmente a uno de los polos de la fuente de poder; y un medio o solución electrolítica, que cierra el circuito eléctrico formado por la fuente de poder y los electrodos, ofreciendo un medio para que se lleve a cabo un intercambio iónico entre los electrodos.

Se realizaron pruebas para los distintos procesos a tratar, variando algunos parámetros, como la cantidad de corriente aplicada al sistema, el voltaje del sistema, los materiales de los electrodos, para determinar tanto la efectividad del método como la influencia de algunas de las variables en el sistema.

Todos los diseños para las celdas se fundamentaron en el diseño de las celdas para el tratamiento de aguas residuales, debido a que es el campo más desarrollado y del proceso del cual se encontró más información, los materiales analizados en el funcionamiento de las celdas fueron cátodos de cobre y ánodos de hierro y aluminio, debido a que estos son los materiales más utilizados según la literatura debido a sus propiedades electroquímicas.

Se variaron distintas características para cada proceso analizado, sin embargo, debido a la gran variedad de factores que influyen en la configuración de la celda, se limitaron los diseños a celdas de dos electrodos de placas con una separación entre placas constantes para cada proceso analizado, 6 cm para el tratamiento de aguas residuales y optimización del proceso de separación de glicerina biodiésel, y 40cm para el tratamiento de medios edáficos.

Se comprobó la efectividad del uso de las celdas electroquímicas para el tratamiento de aguas residuales midiendo la concentración de Zn y Mg en la solución antes y después del tratamiento electroquímico, comprobando en efecto que el método redistribuyó los iones de Zn y Mg de la solución, separándolos en una suspensión y reduciendo su concentración en la fase líquida, facilitando así el uso de tratamientos secundarios para la remoción de los contaminantes y facilitando el proceso de tratamiento de aguas residuales.

Para este proceso se realizaron pruebas con dos materiales diferentes para los ánodos, y se realizaron pruebas con 2 amperajes diferentes, esto para comprobar el efecto de estas variaciones en el proceso de tratamiento

Se comprobó la efectividad del uso de las celdas electroquímicas en el proceso de tratamiento medios edáficos mediante análisis de variables relacionadas con los procesos de migración de iones en medios edáficos, para este proceso se utilizó un contenedor diferente al de los otros procesos para poder realizar un perfil de concentración del contaminante en la celda, el contaminante analizado fue el plomo, desafortunadamente no se pudo realizar el análisis de concentración de plomo debido a que el instrumento necesario para realizar el análisis no se encontraba en funcionamiento.

Se realizaron las pruebas con el mayor área posible para los electrodos, utilizándose electrodos de cobre y aluminio debido a que fueron los materiales más eficientes en el tratamiento de aguas residuales, se comprobó el método analizando los cambios de pH en distintos sectores del reactor de la celda, los tiempos de operación para estos procesos fueron de 24 y 48 horas para efecto del proceso.

Se comprobó la efectividad de la celda para la reducción del tiempo de separación de biodiésel y glicerina mediante la comparación del tiempo necesario para que se dé la separación del mismo volumen, y las mismas proporciones de mezcla de glicerina y biodiésel sin tratamiento electroquímico, es decir, solo por efecto de la diferencia de densidades y del campo gravitacional terrestre, y con tratamiento electroquímico.

Se comprobó una reducción del tiempo necesario para que se lleve a cabo la separación al utilizar procesos electroquímicos en el proceso, se realizaron variaciones de material para el

cátodo y de voltaje para comprobar los efectos de las variaciones de estas variables en la celda, comprobando que con un mayor voltaje se da una mayor reducción del tiempo.

No se conoce exactamente el fenómeno por el cual se da este cambio en el tiempo necesario para que se lleve a cabo la separación, sin embargo se proponen algunas teorías, expuestas en el área de análisis de resultados.

Se comprobó la efectividad de todos los métodos propuestos para el tratamiento de los procesos propuestos, sin embargo, se realizaron todos los análisis manteniendo la mayor simplicidad posible en las configuraciones de las celdas manteniendo el diseño a dos electrodos de placa y una fuente de poder, por lo que se recomienda realizar más investigación de la variación de otras variables como la adición de más de dos electrodos, variaciones en la separación de los electrodos, variaciones de temperatura en los procesos, etc.

II. OBJETIVOS

A. General

1. Diseñar celdas electroquímicas para mejorar el proceso de separación de biodiesel, purificación de agua y purificación de suelos, con un aumento en la eficiencia y reducción en el impacto ambiental del mismo.

B. Específicos

1. Diseñar tres celdas electroquímicas a nivel laboratorio que permitan aislar en determinados sectores, en un medio, la concentración de sustancias con propiedades metálicas, para facilitar su remoción y tratamiento posterior, como tratamiento alternativo, para mejorar la eficiencia de distintos procesos y reducir el impacto ambiental de los mismos, tomando como base el tratamiento de aguas residuales, electro remediación de suelos y tratamiento de biodiésel.

2. Evaluar técnicamente un sistema electroquímico dentro de un proceso de tratamiento de aguas residuales con metales pesados.

3. Implementar un sistema de separación de biodiesel y glicerina en un proceso a escala laboratorio para reducir drásticamente el tiempo de separación y evitar o reducir el consumo de aguade lavado utilizado. Empleando biodiesel producido en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, utilizando el método de coalescencia electrostática.

4. Determinación de viabilidad del método de electrodeposición como tratamiento de suelos, con el diseño y construcción de la celda para realización de electrólisis.

III. JUSTIFICACIONES

Se realizó el presente trabajo para comprobar la validez de las celdas electroquímicas como una forma de tratamiento alterna en determinados procesos, específicamente, tratamiento de aguas residuales, tratamiento de suelos contaminados y proceso de producción de biodiesel. Para ello se hicieron pruebas con configuración de 2 electrodos debido a que la variedad de arreglos posibles de las celdas electroquímicas es muy amplia y se buscó trabajar con las configuraciones más elementales. En el diagrama 1, se presenta la forma más elemental de las celdas electroquímicas para llevar a cabo un proceso electroquímico, utilizando electrodos de placa, con igual área, con un ánodo y un cátodo en paralelo, separados a una distancia constante. Se realizaron pruebas con 2 materiales distintos para los ánodos y a dos voltajes diferentes debido a que se desea tener datos comparativos entre los efectos de los materiales y condiciones para tratar un volumen determinado de substancia. Se procuró controlar la mayor cantidad de variables en la configuración de la celda que pudiesen afectar el proceso durante las pruebas, manteniendo las variaciones en la configuración de las celdas al nivel más elemental posible por razones de simplicidad.

Se llevaron a cabo las pruebas con volúmenes a nivel laboratorio para tener una primera aproximación de la efectividad de los fenómenos de las celdas electroquímicas en los distintos procesos y tener un mejor control de las condiciones que pudieran afectar los procesos durante las pruebas, además, según la literatura, eran los comunes más apropiados para realizar las pruebas debido a la capacidad máxima de corriente que era capaz de suministrar la fuente de poder.

Se utilizó hierro y aluminio como materiales para los ánodos y cobre como material para los cátodos debido a que son los más utilizados para las pruebas de electrocoagulación, que era el proceso del cual se disponía de mayor información. No se usaron los materiales propuestos para los electrodos de tratamiento de medios edáficos debido a que por la complejidad de los materiales, y la falta del desarrollo de esta tecnología en Guatemala no se encontró un proveedor capaz de suministrar los materiales.

Justificaciones medios hídricos, se utilizó agitación durante el proceso de tratamiento de aguas residuales debido a que la turbulencia aumenta la eficiencia de operación de la celda, las dimensiones y la distancia de separación se tratan a mayor profundidad en la sección de análisis de resultados, medio hídrico (tratamiento de aguas residuales).

Justificaciones medios edáficos, se realizó un esparcimiento, previo al tratamiento electroquímico, de agua y solución EDTA 0.1M para mejorar la difusividad del plomo en la tierra y mejorar los fenómenos de transporte, este fenómeno se discute a mayor profundidad en la sección de análisis de resultados, medios edáficos.

Justificaciones de tratamiento de biodiésel, se realizó un proceso de homogeneización de las soluciones antes de cada prueba para asegurar las condiciones iniciales de las soluciones a tratar antes de cada proceso, además se utilizó glicerina y biodiésel nuevo para cada prueba, esto debido a la posibilidad de que el tratamiento previo pudiese afectar el reproceso de las muestras, la teorización de este fenómeno se discute a mayor profundidad en la sección de análisis de resultados, tratamiento de biodiésel.

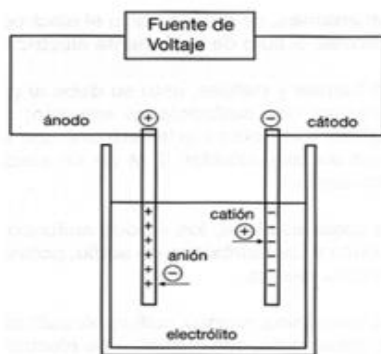
IV. MARCO TEÓRICO

A. Electroquímica

La electroquímica es el estudio de la relación entre la energía eléctrica y las reacciones químicas, en especial, las reacciones que involucran directamente un intercambio directo de electrones entre especies químicas se conocen como reacciones de óxido-reducción, en estas reacciones una especie pierde electrones (se oxidan) y otra gana electrones (se reduce), estos intercambios de electrones tienen diversos usos, por ejemplo el almacenamiento de energía eléctrica como en las baterías, para tratamiento de desechos como los proceso de electrotratamiento y muchos otros.

(D.R Crow, 1998)

(Diagrama 1)



B. Celdas electroquímicas

Una celda electroquímica es un arreglo de objetos que aprovecha las propiedades electroquímicas de los materiales que la componen para llevar a cabo una reacción de óxido-reducción como parte de un proceso

Las celdas electroquímicas más simples constan de una fuente de poder que suministra corriente al sistema de manera directa, dos electrodos, un ánodo y un cátodo, y un medio conductor o solución que conecta los dos electrodos, la fuente de poder es la proveedora de electrones a la celda, los cuales entran a la solución mediante el cátodo, estos viajan a través de la solución por el movimiento de iones hasta el ánodo, electrodo por el cual entran los electrones y regresan a la fuente de poder, completando así un circuito eléctrico. (Duncan A. MacInnes, 1961)

Al cerrar el circuito, los iones negativos o aniones, migran hacia el ánodo en donde se oxidan, mientras que los iones positivos o cationes van hacia el cátodo en donde se reducen. Como estas partículas están cargadas, su movimiento constituye una corriente eléctrica al cerrar el circuito a través de la solución que funciona como medio de transporte. Los aniones se mueven hacia el ánodo y de aquí que los electrones son transportados por estos iones desde el cátodo. De nuevo, como el transporte de electricidad positiva hacia el cátodo puede considerarse un flujo de electricidad negativa hacia el ánodo, la migración de los cationes hacia el cátodo es equivalente al flujo de electrones en dirección opuesta. En consecuencia, el resultado neto de la migración es un desplazamiento de los electrones por la solución en la dirección de la corriente y cada ion transporta una parte de la corriente total de electricidad a través de la solución. El proceso del paso de corriente por un conductor electrolítico con todos los cambios químicos y migratorios asociados, se denomina electrólisis.

Existen muchos fenómenos involucrados en el proceso de manejo de electrones por una celda electroquímica, la deposición de masa es uno de ellos y es descrita por las leyes de Faraday. (Duncan A. MacInnes, 1961)

La Primera Ley de Faraday dice: "La masa de un elemento depositado en cualquiera de los electrodos durante la electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de carga eléctrica que pasa a través del electrolito".

$$m = \epsilon q = \epsilon \cdot i \cdot t$$

(Ecuación 1)

Donde:

i: corriente eléctrica (A)

t: tiempo (s)

La Segunda Ley de Faraday dice: "Las masas de diferentes sustancias producidas por el paso de una corriente son directamente proporcionales a sus pesos equivalentes", el peso equivalente es la relación entre el peso atómico de una sustancia y su número de equivalentes químicos (cantidad de iones que libera al disociarse completamente).

$$W = \frac{i \cdot t \cdot M}{n \cdot F}$$

(Ecuación 2)

Donde:

W: cantidad de material de electrodo disuelto (g de Metal cm⁻²)

t: tiempo (s)

M: peso molecular del electrodo concerniente

n: número de electrodos en la reacción de óxido reducción

F: constante de Faraday (96500 C/mol)

Además de estas, otros modelos se utilizan para dar mejor descripción a los procesos de las celdas electroquímicas, por ejemplo: Número de transporte o transferencia, conductancia electrolítica, conductancia equivalente, movilidades iónicas, etc. (D.R Crow, 1998)

C. Generalidades del agua

1. Composición del agua. El agua se compone de dos partes de hidrógeno y una de oxígeno. Los componentes tienen tanta importancia como sus contaminantes. En una reacción química, estaríamos satisfechos con un rendimiento alto, por ejemplo del 99.5% de pureza. Sin embargo, en el caso del agua este nivel de impurezas es inaceptable. Para esta sustancia,

niveles de contaminantes que normalmente se consideran insignificantes pueden echar a perder la calidad del producto y su posible uso (Russell, 2006).

Por ejemplo puede mencionarse la salinidad o NaCl disuelto, pues si se halla este compuesto a una concentración de 500 ppm o superior, el agua no será potable. También puede mencionarse la presencia de cantidades tan pequeñas como 1 ppm de plomo, 10 ppm de nitrato, 10 ppm de sólidos residuales, o 5 ppm de detergentes harían el agua inservible. (Russell, 2006)

2. Iones y sales presentes en el agua. Existe una gran variedad de sales solubles en agua. La sal más común en el agua es el cloruro de sodio (NaCl). Se puede obtener la concentración aproximada de los principales elementos disueltos en el agua de mar, como se muestra en la siguiente tabla. (Russell, 2006)

Tabla 2: Concentración aproximada de los principales elementos disueltos en el agua de mar.

Elemento	Coficiente de concentración (mg/L)	Elemento	Coficiente de concentración (mg/L)
Oxígeno	8.57E+05	Potasio	3.80E+02
Hidrógeno	1.08E+05	Bromo	28.00
Cloro	1.90E+04	Estroncio	8.10
Sodio	1.05E+04	Boro	4.60
Magnesio	1.35E+03	Silicio	3.00
Azufre	8.85E+02	Flúor	3.00
Calcio	4.00E+02	Argón	0.60

Fuente: Handbook of Chemistry and Physics – 89 ed.

3. Principales iones y contaminantes presentes en el agua y métodos de medida.

Para conocer las concentraciones de los posibles contaminantes del agua, es necesario conocer los diferentes métodos de química analítica que se utilizan para la cuantificación de los contaminantes. Actualmente existen dos referencias fundamentales, el más antiguo es el "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" publicada por la Asociación Americana del Estudio del Agua, y la Asociación Americana de la Salud Pública. La segunda referencia es el "SW-846 Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods", cuya importancia radica en el prestigio de la organización que la publicó, sino también en su contenido, pues se enfoca en residuos peligrosos e incluye muchos métodos aplicables en acuíferos y aguas residuales. Este último método fue publicado por la Agencia para la protección medioambiental de los Estados Unidos. (Russell, 2006)

Tabla 3 Métodos analíticos utilizados para los compuestos presentes en el agua.

Elemento	Método de medida	Elemento <i>n</i>	Método de medida
Aluminio	Cromatografía de gases	Carbonato (CO ₃)	Cálculo
Antimonio	Cromatografía de gases	Cloro (Cl)	Gravimétrico
Arsénico	Cromatografía de gases	Cianuro (CN)	Colorimétrico
Calcio	Cromatografía de gases	Flúor (F)	Gravimétrico
Cromo	Cromatografía de gases	Hidroxilo (OH)	pH
Cobre	Cromatografía de gases	Hipoclorito (HClO ₂)	pH
Hidrógeno	pH	Hipocloroso (ClO ₂)	pH
Hierro	Cromatografía de gases	Nitrato (NO ₃)	Colorimétrico
Plomo	Cromatografía de gases	Nitrito (NO ₂)	Colorimétrico
Magnesio	Cromatografía de gases	Sulfato (SO ₄)	Colorimétrico
Manganeso	Cromatografía de gases	Sulfito (S)	Colorimétrico
Mercurio	Cromatografía de gases	OTROS	
Potasio	Cromatografía de gases	Alcalinidad	Colorimétrico
Silicio	Cromatografía de gases	Carbono org. total	Gravimétrico
Plata	Cromatografía de gases	O ₂ disuelto	Valoración con azida o test
Sodio	Cromatografía de gases	Nitrógeno orgánico	Kjeldahl
Zinc	Cromatografía de gases	DQO	Digestión/valoración
Amoniaco	Kjeldahl o Nesslerización	DBO	Diferencia en la cantidad consumida de oxígeno
Bicarbonato (HCO ₃)	Cálculo		

4. Recursos hídricos

a. Acuíferos. Los recursos acuíferos abastecen a la mayoría de las pequeñas comunidades en todo el mundo, proporcionándoles agua potable. Se caracterizan por tener minerales naturales a concentraciones moderadas a bajas. Los acuíferos son habitualmente ignorados y se olvida la necesidad de protegerlos. Los regímenes de circulación del agua subterránea son lineares, y el flujo a través de un medio poroso es análogo a la transferencia de calor a través de un medio sólido. Las ecuaciones globales utilizadas en el cálculo de dichos regímenes de circulación son las ecuaciones de Darcy, las cuales asumen que el flujo es laminar. La ecuación # 1 se expresa en unidades del SI. (Russell, 2006)

$$Q = \pi * \frac{K [H^2 + h^2]}{\log_e\left(\frac{D}{r}\right) / \left[\frac{d}{2}\right]} \quad (\text{Ecuación \# 1})$$

La constante K se conoce como coeficiente de permeabilidad y está dado en unidades de velocidad, en galones por día por pie cuadrado o en unidades m³/día/m². La Ecuación # 1 constituye el modelo más sencillo entre los existentes, pues el suelo no es un medio homogéneo. (Russell, 2006)

b. Aguas superficiales. Las aguas superficiales se originan en los acuíferos y manan directamente del suelo. Las aguas superficiales pueden contener cualquier cosa, desde sólidos en suspensión hasta bacterias o desde nutrientes hasta troncos y partes de carros. (Russell, 2006)

Estas aguas requieren un estudio en detalle cuando se planifica un vertido. Los permisos para las instalaciones de vertido a las aguas superficiales a menudo se registran de acuerdo a un vertido “neto” o a un promedio, que representa un peligro potencial para la planta de tratamiento. Los ingenieros sólo utilizan un tipo de distribución: la distribución regular o normal. Mientras que los eventos hidrológicos tales como las lluvias y las emanaciones no están distribuidos normalmente. (Russell, 2006)

Existen abundantes pruebas de que los eventos hidrológicos, que influyen en el caudal de los ríos y la calidad de sus aguas, se pueden modelar mediante una distribución logarítmica normal o una distribución tipo Weibull III. (Russell, 2006)

c. Aguas pluviales. Las aguas pluviales se componen de lluvia, nieve fundida, granizo y otros tipos de precipitaciones atmosféricas. Limpia la atmósfera y transfiere los contaminantes del aire a la lluvia. Por ello, las aguas pluviales a menudo contienen carbonatos y sulfatos si se recogen en un área industrial de aire poluto. La lluvia ácida es realmente nociva, y puede afectar al funcionamiento de la planta de tratamiento. (Russell, 2006)

En el entorno de la planta, se debe considerar el diseño del sistema de alcantarillado y el tiempo de respuesta a eventualidades pluviales. En general, si se monitorea el sistema de alcantarillado de la planta, se detecta un aumento espectacular de la contaminación en la planta de tratamiento debido al fenómeno de “primer lavado”. (Russell, 2006)

d. Calidad del agua. A menudo el agua se clasifica por su calidad. Sin embargo, existen muchas medidas diferentes de la calidad del agua, y la calidad del agua frecuentemente depende de su uso. El agua utilizada para beber, tiene un buen gusto si no contiene pequeñas cantidades de minerales y oxígeno disuelto en ella. Sin embargo, la misma agua que es buena para beber es malísima para la utilización en una caldera por las posibles incrustaciones. Así mismo, cantidades moderadas de sulfato en el agua potable provocarían diarrea osmótica en individuos sensibles así como corrosión en una caldera.

El oxígeno disuelto corroe las tuberías de una caldera, y las sales de calcio se depositarán en los tubos, reduciendo el rendimiento de la transferencia de calor. (Russell, 2006)

Generalmente, el agua potable contiene una concentración total de sales de sodio por debajo de 200 ppm. Concentraciones de sal mayores de 70 ppm confieren al agua sabor salado, y por encima de 5000 ppm de sodio, se considera que el agua es salobre y puede provocar problemas en los seres humanos debido a la presión osmótica. Cuando la concentración de sodio supera las 100 ppm hay un ligero riesgo para aquellas personas más sensibles al sodio, por lo que las varias agencias reguladoras han sugerido una concentración máxima de sodio para el agua potable entre 100 y 160 ppm. (Russell, 2006)

La calidad del agua, especialmente la del agua dulce, a menudo, se clasifica por los diferentes usos que pueda dársele: para beber, pescar, recreativa y de vertido. Es importante conocer el uso que se hace del agua corriente arriba y corriente abajo debido a que el uso del agua corriente abajo dictamina con frecuencia la calidad global del agua, lo que a su vez afectará a la gestión del vertido del agua. (Russell, 2006)

5. Tratamiento de aguas residuales

a. Proceso de tratamiento de agua

1) Tratamiento preliminar. El objetivo principal del tratamiento preliminar es la remoción de sólidos gruesos y otros materiales grandes que se encuentran en las aguas residuales. La remoción de estos materiales es necesaria para mejorar la operación y mantenimiento de las unidades subsecuentes de tratamiento. Entre las operaciones de

tratamiento preliminar se encuentra remoción de materia por cribas, remoción de arenilla y la trituración de objetos grandes (Pescod, 1992).

2) Tratamiento primario. El tratamiento primario es el primer proceso en la planta de tratamiento de agua, se realiza para remover una fracción significativa de los sólidos suspendidos orgánicos. Estos sólidos suspendidos contribuyen a la demanda bioquímica de oxígeno del agua residual; por lo que el remover los sólidos suspendidos también reduce la DBO5. Este proceso es importante ya que la reducción de los sólidos suspendidos y la DBO5 reduce la demanda de oxígeno, reduce la tasa de consumo de energía y reduce los problemas operacionales en los procesos de tratamiento biológico. El tratamiento primario también sirve para la remoción de la capa de suciedad y partículas inertes que no fueron removidas en los filtros iniciales. La capa de suciedad consiste de grasa, aceite, plásticos, trapos, pelos y otras materias flotantes. La forma principal de tratamiento primario es la sedimentación. Consecuentemente a este proceso muchas veces se le conoce como sedimentación primaria. (Davis, 2010).

3) Secundario. El objetivo del tratamiento secundario es el tratamiento adicional del efluente obtenido del tratamiento de agua primario para remover las partículas orgánicas residuales y sólidos suspendidos. En la mayoría de casos el tratamiento secundario sigue el tratamiento primario e involucra la remoción de materia orgánica biodegradable disuelta y coloidal utilizando un proceso aeróbico. El tratamiento aerobio biológico se realiza en la presencia de oxígeno por microorganismos aerobios que metabolizan la materia orgánica presente en el agua residual, produciendo así más microorganismos y subproductos inorgánicos (principalmente CO_2 , NH_3). Los microorganismos deben ser separados del agua residual tratada para obtener un efluente secundario clarificado. Para esto se usan tanques de sedimentación similares a los tanques de sedimentación usados en el tratamiento primario. Entre los procesos de tratamiento secundario se pueden encontrar el tratamiento con lodos activados, filtros de goteo o biofiltros, diques de oxidación y contactores biológicos de rotación. (RBC, por sus siglas en inglés) (Pescod, 1992).

4) Coagulación y floculación. La coagulación y floculación son componentes esenciales de sistemas convencionales de tratamiento de agua, están diseñados para: remover agentes infecciosos, remover compuestos tóxicos que han sido adsorbidos a la superficie de las partículas y remover precursores a la formación de desinfección por subproductos. El agua superficial contiene partículas orgánicas e inorgánicas. Las partículas orgánicas pueden incluir algas, bacterias, quistes de protozoos y desechos de vegetación que han llegado al agua. La erosión produce partículas inorgánicas de arcilla, arena y óxidos minerales. (Davis, 2010)

El agua superficial también incluye materia orgánica disuelta y en partículas, conocida como materia orgánica natural (NOM, por sus siglas en inglés), que es un producto de la descomposición y filtrado de detritus orgánico. (Davis, 2010)

Las partículas encontradas en precipitados y agua superficial se clasifican como suspendidos y coloidales. Las partículas suspendidas pueden tener un diámetro de 0.1 μm hasta 100 μm . Las partículas coloidales tienen un rango de tamaño que se encuentra entre las partículas disueltas y partículas suspendidas. Se encuentran en estado sólido y pueden ser removidas del líquido utilizando medios físicos. Las partículas coloidales son demasiado pequeñas para ser removidas por sedimentación o por filtración con arena. (Davis, 2010)

El objetivo de la coagulación (y subsecuentemente floculación) es convertir las partículas pequeñas en partículas más grandes llamadas flóculos, ya sea como precipitados o partículas suspendidas. Los flóculos se remueven en el proceso posterior de sedimentación. La coagulación se refiere a la adición de uno o más químicos para condicionar las partículas pequeñas para el proceso subsiguiente de floculación. La floculación es el proceso de agrupación de las partículas desestabilizadas y productos de precipitación. La clave de una coagulación eficiente es el mezclado del agente coagulante con el agua de alimentación. La floculación eficiente requiere de mezclado para que las partículas entre en contacto unas con otras. (Davis, 2010)

Tabla 4 Coagulantes inorgánicos utilizados frecuentemente.

Coagulante	Masa molar (g/mol)	Datos relevantes
Sulfato de Aluminio	594	Contaminación por mercurio puede ser preocupación
Aluminato de Sodio	164	Provee alcalinidad y control de pH
Cloruro de Aluminio	133.5	Utilizado en mezclas con polímeros
Cloruro Polialumínico	Variable	Es utilizado cuando la contaminación por mercurio es una preocupación
Sulfato Polialumínico	Variable	Es utilizado cuando la contaminación por mercurio es una preocupación
Cloruro poliférrico	Variable	
Cloruro Férrico	162.5	
Sulfato férrico	400	

(Davis, 2010).

El mezclado es el factor físico más importante que afecta la eficiencia del coagulante, la floculación es el factor más importante para la eficiencia de la remoción de partículas. El objetivo de la floculación es hacer que las partículas entren en contacto de manera que colisionen, se peguen, y crezcan aumentando su tamaño a uno que se pueda sedimentar o filtrar. Se debe tener suficiente mezclado para que los flóculos entren en contacto. (Davis, 2012, pág. 230, 234)

Sin embargo, demasiado mezclado puede causar la separación de las partículas, resultando en flóculos pequeños y dispersos. La floculación se logra utilizando uno de los tres siguientes sistemas: turbina vertical de mezclado, floculador de palas o una cámara con baffles. (Davis, 2012, pág. 230, 234)

5) Sedimentación. Uno de los objetivos de la coagulación y floculación es aumentar el tamaño de la partícula para que se puedan sedimentar en un período de tiempo razonable. Una vez formadas las partículas y precipitados, el medio más común para removerlos del agua es por sedimentación por gravedad en un tanque de sedimentación también conocido como clarificador. (Davis, 2010:355)

6) Filtración granular. Los niveles de turbidez del agua pueden interferir con el proceso de desinfección del agua, es por esto que es necesario reducirlo a límites en los que se pueda trabajar. Para reducir la turbidez a estos límites aceptables generalmente se utiliza un proceso de filtración. El proceso de filtración más común es la filtración granular en donde las impurezas coloidales o suspendidas se separan del agua transcurrida a través de un medio poroso. El medio generalmente consta de un lecho de arena u otros materiales poroso como carbón (llamado antracita), carbón activado o granate. Los filtros granulares generalmente se conocen como filtros de profundidad ya que las partículas en el agua penetran el filtro a la vez que se acumulan en la superficie. La parte inferior del filtro consiste de un medio de soporte y un sistema de recolección del agua. El medio de soporte está diseñado para mantener el medio de filtrado dentro del filtro y evitar que se incorpore al agua filtrada. Tradicionalmente se utilizan capas de grava graduada (tamiz grande abajo, pequeño arriba). El agua que contiene las partículas suspendidas se agrega por la parte superior del filtro. Cuando los filtros se llenan de partículas es necesario efectuar limpieza o sustitución del medio de filtrado. (Davis, 2010:399-400)

6. Metas del tratamiento de aguas residuales. La meta tradicional del tratamiento de aguas residuales es la de ofrecer que las aguas de desecho sean tratadas de una manera segura, eliminando todo peligro para la salud y evitando la contaminación de las fuentes de agua o causando perjuicio. (Templeton, 2011)

El tratamiento de aguas residuales también se lleva a cabo para recuperar energía, nutrientes, agua y otros recursos valiosos presentes en los efluentes de agua de desecho. (Templeton, 2011)

7. Composición del agua de desecho. El agua de desecho, también llamada efluente, es mayormente agua con un 99.9% en masa. Los contaminantes del agua de desecho incluyen sólidos suspendidos, compuestos orgánicos biodegradables, sólidos inorgánicos, nutrientes, metales y microorganismos patogénicos. (Templeton, 2011)

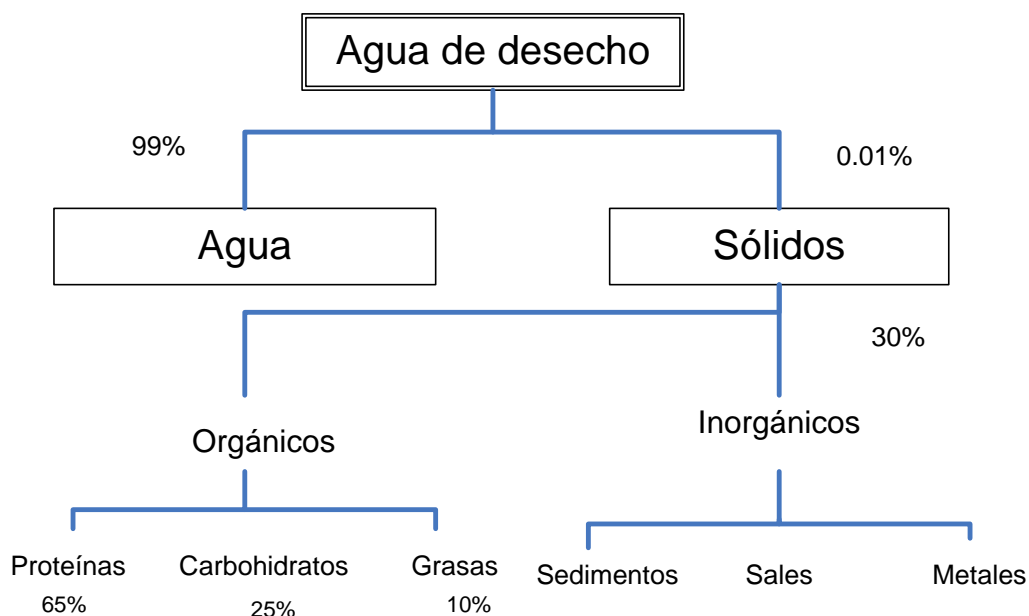
Los sólidos suspendidos en el agua de desecho son partículas orgánicas primarias, compuestas de:

- Desechos del cuerpo.
- Desechos alimenticios.
- Papel de baño.

Los sólidos inorgánicos en los efluentes incluyen sólidos superficiales, tierra y también sales y metales. La remoción de sólidos suspendidos es esencial para descargar el agua y así evitar que la misma sedimente en las fuentes de agua. (Templeton, 2011)

El grado en que los sólidos suspendidos deben ser removidos de aguas de desecho depende del tipo de agua que se reciba y el efluente donde es descargado. Por ejemplo, la Unión Europea (UE) en su división de tratamiento de agua de desecho urbano, requiere que el efluente contenga no más de 35 ppm de sólidos suspendidos con un 95% de conformidad, mientras que la directiva de peces de agua dulce exige un nivel de 25 ppm. Una meta común para los sólidos suspendidos en la descarga final del efluente en el Reino Unido es de 30 ppm, aunque el regulador puede imponer normas más estrictas con el límite de trabajo establecido, llamándose consiente de descarga. (Templeton, 2011)

Figura 1: Composición aproximada de los efluentes caseros.

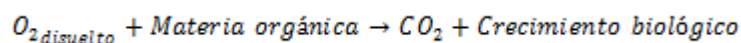


Los compuestos orgánicos biodegradables en las aguas de desecho se componen mayormente de:

- Proteínas (aminoácidos).
- Carbohidratos (azúcares, celulosa).
- Lípidos (grasas, aceites).

Todos estos contienen carbono y pueden ser convertidos a dióxido de carbono de una forma biológica. Las proteínas también contienen nitrógeno. Estos compuestos orgánicos biodegradables deben ser eliminados de los efluentes o van a ejercer una demanda de oxígeno en las fuentes de agua receptoras. (Templeton, 2011)

La materia orgánica es típicamente medida por la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) o por la demanda química de oxígeno (COD). El DBO es un parámetro ampliamente utilizado para cuantificar la contaminación del agua. El DBO es la medición del oxígeno disuelto que es usado por microorganismos en la oxidación bioquímica de materia orgánica. (Templeton, 2011)



Las mediciones del DBO son usadas para:

- Determinar la cantidad de oxígeno requerida para la reacción con materia orgánica.
- Determinar el dimensionamiento en la planta de tratamiento de agua.
- Medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento.
- Determinar la conformidad de las descargas de efluentes y los permisos.

Los pasos en el laboratorio para la medición del DBO son:

- Medir una porción de una muestra de efluente en una botella DBO de 300 mL.
- Agregar microorganismos, si se requieren.
- Llenar la botella, airearla y diluirla con agua.
- Medir el oxígeno disuelto inicial.
- Incubar la botella a 20°C por 5 días en la oscuridad.
- Medir el oxígeno disuelto final.
- Calcular la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

Algunos efluentes también contienen nutrientes como el Nitrógeno y el Fósforo. Ambos deben ser removidos por diferentes razones:

- La demanda de oxígeno ejercida en las fuentes receptoras de agua.
- Preocupaciones por toxicidad en los seres humanos.
- Preocupaciones por toxicidad en peces.
- Eutrofización en fuentes receptoras de agua.

También existen microorganismos patogénicos en los efluentes de desecho, que incluyen bacterias, protozoarios, y virus. Estos microorganismos son transmitidos por personas infectadas y son un peligro directo para la salud pública. No resulta práctico monitorear todos los tipos de microorganismos en los efluentes de agua, por lo que existen indicadores de los microorganismos que pueden ser catalogados como sustitutos. (Templeton, 2011)

El indicador de microorganismos más común y en total son los coliformes fecales, de los cuales según los estándares de agua de baños, se tolera como 10^4 coliformes totales por cada 100 mL con un 95% de confianza. (Templeton, 2011)

8. Procesos unitarios en el tratamiento de aguas residuales. Los procesos unitarios son opciones individuales de tratamiento de aguas residuales.

- Fuerzas físicas.
- Reacciones biológicas.
- Reacciones químicas.

Un tratamiento completo consiste en la combinación de estos procesos unitarios diseñados para reducir la cantidad de contaminantes en los efluentes a niveles aceptables. Existen muchas configuraciones y combinaciones de los procesos unitarios, pero existe un buen número de estándares que validan el uso de cada uno. (Templeton, 2011)

Existe un tratamiento preliminar donde se remueven pequeñas o grandes cantidades de escombros al inicio del proceso. Un tratamiento primario puede ser considerado como la remoción de partículas suspendidas orgánicas e inorgánicas, usualmente por sedimentación. (Templeton, 2011)

Un tratamiento secundario es la conversión biológica de compuestos orgánicos y coloidales en biomasa y una remoción siguiente de biomasa por sedimentación. (Templeton, 2011)

El tratamiento terciario es la remoción más a fondo de sólidos suspendidos o nutrientes y/o desinfección del efluente después de descargarlo y recibirlo en las fuentes receptoras de agua. (Templeton, 2011)

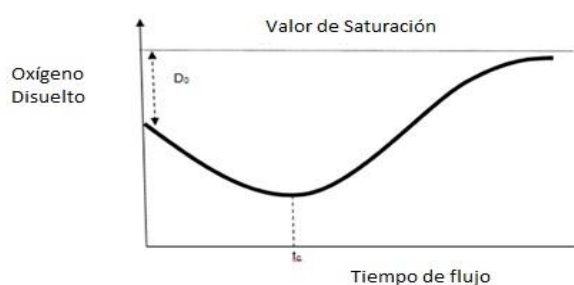
9. Selección de procesos y consideraciones de diseño. El escoger que tipo de unidad de procesos incluir en el tratamiento de agua, se lleva a cabo tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Requerimientos de energía
- Efectividad en la remoción de partículas contaminantes
- Generación de desechos
- Complejidad
- Confiabilidad
- Flexibilidad
- Operación y mantenimiento debido a costos
- Requerimientos personales
- Costos de construcción
- Costos totales

10. Impacto de los efluentes de agua de desecho con oxígeno en las fuentes receptoras de agua. Cualquier material orgánico restante en los efluentes de agua tratada es utilizado por bacterias que están naturalmente presentes en las fuentes receptoras de agua, por lo tanto consumen el oxígeno disuelto. Esta reducción en el oxígeno disuelto puede tener efectos perjudiciales en las formas de vida más grandes en la vida acuática. (Templeton, 2011)

Mientras que el tratamiento de aguas residuales agrega una demanda de oxígeno, el oxígeno disuelto es continuamente reemplazado por el agua de la superficie que está en contacto con la atmósfera. Hay por lo tanto una desoxigenación y una re-aireación, resultando en lo que se conoce como la curva de hundimiento de oxígeno disuelto. (Templeton, 2011)

Figura 2: Curva de hundimiento de oxígeno disuelto.



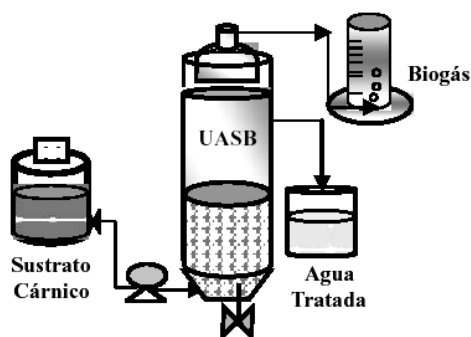
11. Diseño de plantas de tratamiento anaeróbico de agua. El tratamiento anaeróbico se refiere a la remoción de materia orgánica del agua residual sin la inyección de aire. El metabolismo de las bacterias anaeróbicas es muy lento por lo que se necesitan mayores tiempos de residencia del agua residual a tratar en un proceso anaeróbico que en uno aeróbico lo que se traduce en una baja tasa de crecimiento celular. Ello implica que sólo una pequeña fracción del residuo orgánico biodegradable es transformada en nuevas células, la mayor parte es convertida en metano, un gas combustible, lo que convierte en un producto final útil. Esto significa que se tiene una menor acumulación de lodo producido por el proceso de digestión anaeróbica. (Cámara, 2004)

La conversión anaeróbica de materia orgánica hasta productos finales inofensivos es compleja, resulta de un gran número de reacciones interdependientes y simultáneas. El proceso de digestión puede ser clasificado en cuatro etapas principales íntimamente relacionadas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. (Cámara, 2004)

La bacteria fermentadora realiza las dos primeras etapas de degradación de la materia orgánica. Un segundo grupo de bacterias acetogénicas, sintetiza los productos de la acidogénesis, dando lugar principalmente al acetato entre otros compuestos como dióxido de carbono e Hidrógeno. La bacteria metanogénica convierte el acetato y el Hidrógeno en metano consumiendo CO_2 para ello. También transforma otros compuestos como metanol, formato, monóxido de carbono y metilaminas, que son de menor importancia en la mayoría de los procesos de digestión anaeróbica. (Cámara, 2004)

12. Reactor anaeróbico. Se puede utilizar un reactor de tipo UASB donde el efluente es bombeado hacia el sistema de distribución interno, entrando en contacto con la cama de lodo anaeróbico. Cada ramal tiene aperturas a través de las cuales fluye el efluente. Estos recorren todo el fondo del reactor. La reducción del DQO provoca la expansión o fluidización de la cama de lodo que es elevada por la velocidad ascendente producto de la generación de biogás. (Cámara, 2004)

Figura 3: Reactor UASB



13. La electroquímica. La electroquímica es una ciencia que nace a finales del siglo XVIII con los trabajos de Galvani y Volta, y ha tenido desarrollos y aplicaciones en múltiples áreas. Se puede ejemplificar el arranque de los motores en los carros, en procesos de síntesis química y métodos para la eliminación de algunos contaminantes.

a. Historia de la electrocoagulación. La electrocoagulación ha sido una tecnología que floreció en 1906, donde se realizó la primera patente en el país de Estados Unidos. Existieron ciertos problemas para que se utilizara cierta técnica, pues existieron declives en los sistemas financieros y en la regulación de incentivos. Desde el siglo XIX, exactamente en 1888, se efectuó el primer ensayo reportado en el país de Inglaterra, en Londres, fue llevado a cabo por Webster. Tal proceso utilizaba ánodos de hierro soluble, con una caída de potencial de 1.8

vacios entre los electrodos, distantes una pulgada y una corriente anódica de 0.6 A/pie^2 . (Mejía, 2006)

En 1893, un personaje de apellido Wolf electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y soda cáustica, que utilizaba para esterilizar aguas negras en Brewster, Nueva York. (Mejía, 2006)

En 1896 se usó el Louisville Kentucky, una modificación del proceso de Webster para coagular agua cenagosa del río Ohio, proceso en el que se utilizaron ánodos de hierro y aluminio. En 1908 el proceso de Webster se utilizó en Santa Mónica con reducciones de 40% de materia orgánica. (Mejía, 2006)

En 1914 se utilizó en New York una modificación del proceso Webster llamado Landreth. En el cual se añade cal para mejorar la conductividad del electrolito.

En 1932 fue utilizada la electrocoagulación en Alemania, con eficiencias del 50% en reducción de la DBO de aguas residuales. La falla de estos procesos se dio por el alto costo de la energía y la necesidad de recambiar los electrodos. (Mejía, 2006)

En 1947, en URSS, se utilizó el proceso con electrodos de hierro para formar hidróxido ferroso, obteniendo remociones de 70% al 80% para la DBO. Unos años más tarde, en 1958, el profesor Mendía, de la Universidad de Nápoles, utilizó esta técnica para desinfectar las aguas negras de ciudades costeras. En este proceso se mezcló 25% al 30% en volumen de agua de mar antes de la electrólisis.

En Noruega, Föyn combinó 20% de agua de mar con las aguas residuales en la electrólisis para la remoción de fosfato, utilizando electrodos de carbón. Aunque la eficiencia del proceso fue buena, hubo problemas de corrosión. (Mejía, 2006)

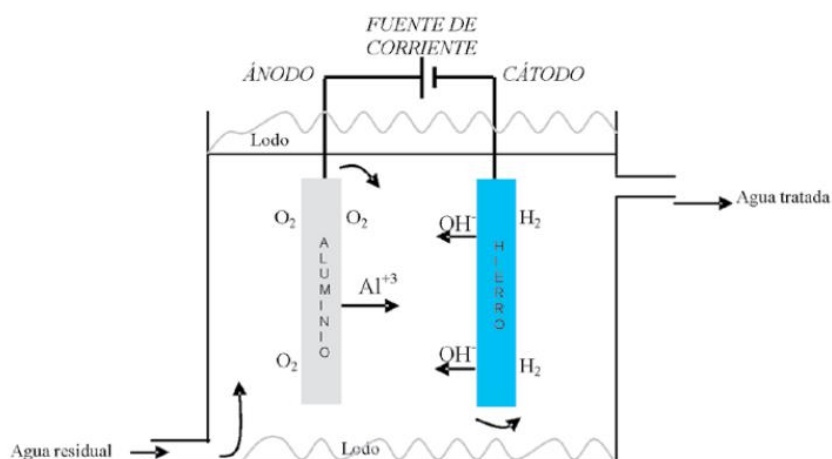
Durante las últimas décadas se han reportado trabajos en donde se utiliza el proceso de remover partículas dispersas de aceite, grasa y petróleo en el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos de electroplateado, textiles y en procesos de potabilización del agua misma, entre otros. (Mejía, 2006)

b. La electrocoagulación. La electrocoagulación es una técnica utilizada para el tratamiento de las aguas residuales. Los contaminantes de muy diversos efluentes son removidos aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se hace uso de un coagulante químico (cuya función es llevada a cabo por corriente eléctrica la cual se aplica al medio líquido contaminado). (Mejía, 2006)

La electrocoagulación se define como un proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo hierro y el aluminio los más utilizados. (Mejía, 2006)

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Por lo general ese estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Cuando esto ocurre los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados. (Mejía, 2006)

Figura 4: Sistema de electrocoagulación utilizando un ánodo de aluminio y cátodo de hierro. (Arango, 2005).



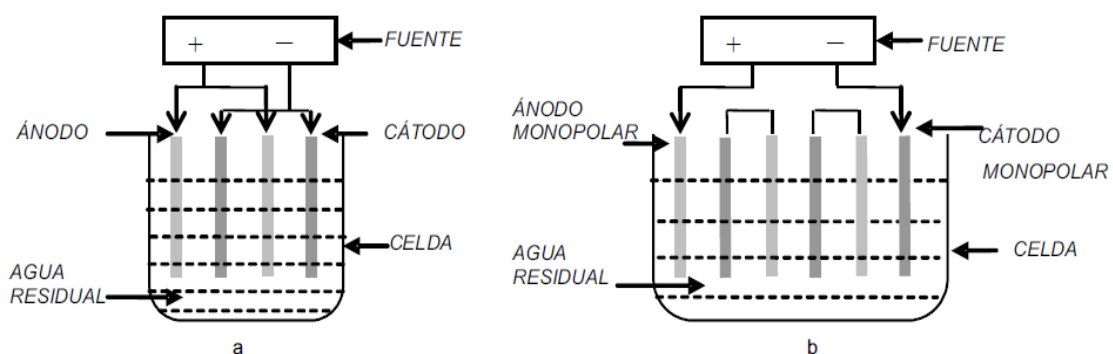
c. Reactores para la electrocoagulación. El reactor utilizado para realizar la electrocoagulación en una operación por lotes o de tipo "batch", de la forma más sencilla posible, es formando una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical y conectados a una fuente de energía externa. El material anódico se corroe eléctricamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo. (Arango, 2005)

El diseño formado por un par de electrodos no es el más adecuado a la hora del proceso ya que para obtener una cantidad adecuada de disolución del metal se requiere de electrodos que tengan un área superficial alta, por esta razón se utilizan las celdas con electrodos que sean monoplares en paralelo o conectados en serie. (Arango, 2005)

El sistema para la electrocoagulación requiere de una fuente de corriente directa, un regulador de densidad corriente y de un multímetro para leer los valores de la corriente. (Arango, 2005).

Figura 5: Reactor para electrocoagulación por lotes con electrodos monopolares en paralelo (a).

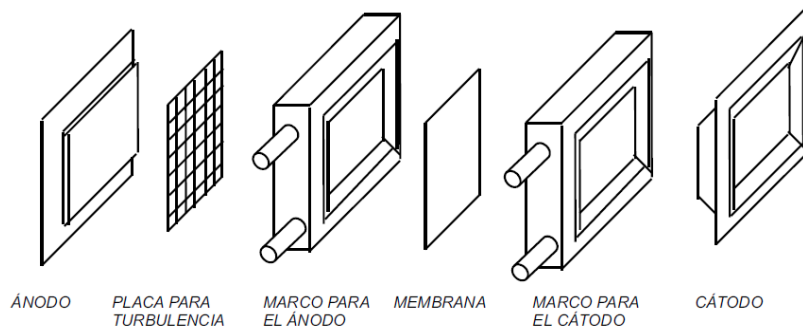
Figura 6: Reactor para electrocoagulación por lotes con electrodos monopolares en serie (b).



(Arango, 2005).

Existen otros arreglos de reactores para la electrocoagulación, el más popular es el tipo filtro prensa, el cual está formado por una cobertura en forma de caja con un ánodo, un cátodo y una membrana. El sistema hace que su operación y mantenimiento sea relativamente simple (Arango, 2005).

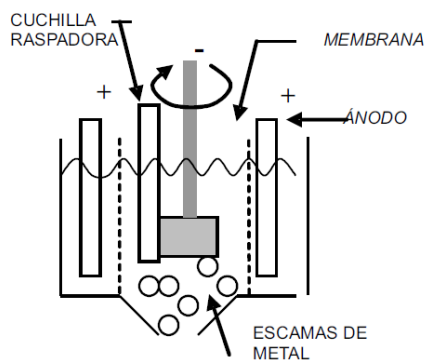
Figura 7: Reactor tipo filtro prensa



(Arango, 2005).

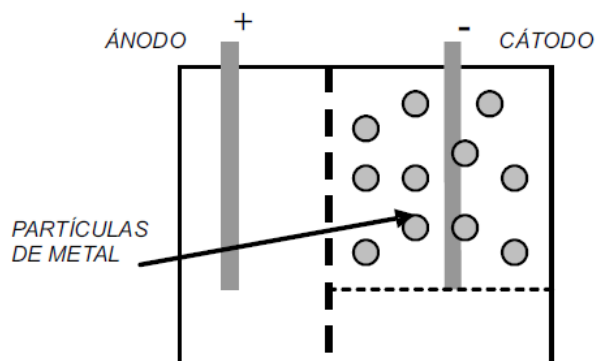
Para la remoción de metales se usa el reactor de electrodo cilíndrico rotativo en el cual el cátodo gira en el centro de la celda y el ánodo se encuentra fijo (ver Figura #8). Esta disposición permite aumentar la transferencia de masa en los electrodos y remover partículas de metal del cátodo. Finalmente, también es usado para la remoción de metales, un reactor de lecho fluidizado, el cual permite aumentar el área superficial específica y aumenta la eficiencia del proceso (Ver Figura # 9) (Arango, 2005).

Figura 8: Reactor de electrodo cilíndrico rotativo.



(Arango 2005)

Figura 9: Reactor de lecho fluidizado.



(Arango, 2005)

Los materiales que se utilicen en el ánodo tienen que ser estables en su dimensionamiento, por ejemplo el acero utilizado en la recuperación de metales. Los electrodos más modernos son hechos de titanio y tienen una pequeña capa de óxidos de metales nobles. Aunque el material más utilizado es el aluminio. El cátodo puede ser de metal, grafito, fibras de carbón, acero o titanio. (Arango, 2005)

d. Proceso de la electrocoagulación. Durante la electrólisis ocurren una serie de procesos físicos y químicos; el lado positivo sufre reacciones anódicas, mientras que el negativo sufre reacciones catódicas. (Arango, 2005)

Las placas de metal, tales como hierro o aluminio son utilizadas como electrodo de sacrificio o placa consumible que aporta iones al sistema. Estos iones liberados neutralizan las cargas de las partículas desestabilizando los sistemas de suspensión de los contaminantes dando inicio a una coagulación. (Arango, 2005)

Los iones liberados remueven contaminantes, por reacción química y precipitación o agregando algunos materiales coloidales, también pueden flotar o precipitarse. Además, como el agua contiene partículas coloidales, aceites u otros contaminantes, éstos se mueven en el campo eléctrico que se aplica y se ionizan, algunos pueden sufrir reacciones de electrólisis o de hidrólisis, o formar radicales libres que alteran las propiedades físicas y químicas del agua y de los contaminantes, resultando en un estado reactivo y excitado lo cual se da por la liberación, destrucción o insolubilidad de los contaminantes. (Arango, 2005)

Para aumentar la eficiencia de la remoción de los iones indeseables, se puede hacer pasar el agua residual a través de una serie de celdas que tienen electrodos compuestos de varios metales. Los parámetros como pH, conductividad y potencial de óxido –reducción deben ser ajustados de acuerdo al tipo de contaminante. (Arango, 2005)

e. Factores que afectan la electrocoagulación

1) Densidad de corriente. El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación va a determinar qué cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierro Fe^{+2} liberados por los respectivos electrodos. Cuando se usa una corriente demasiado grande, hay una transformación de energía eléctrica en energía calórica que calienta el agua. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente puede realizarse teniendo en cuenta los parámetros de operación de pH y temperatura. (Arango, 2005)

2) Presencia de Cloruro de Sodio. La sal aumenta la conductividad del agua residual. Se ha encontrado que los iones de cloruro reducen los efectos adversos de iones como HCO_3^- y SO_4^- pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a que se precipite Calcio y Magnesio, produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos, con ello se aumentaría el potencial entre los electrodos y la eficiencia disminuiría en la corriente. Se recomienda mantener las cantidades de Cloro en un 20% para una electrocoagulación normal. (Arango, 2005)

3) pH. El efecto del pH en la electrocoagulación se refleja en la eficiencia de la corriente y se relaciona con la disolución del hidróxido del metal, se ha encontrado que el rendimiento del proceso depende de la naturaleza del contaminante y la mejor remoción se da en pH cercano al neutro. Aunque en el pH neutral, existe un alto consumo de energía, pues varía la conductividad. Si la conductividad es alta, el efecto del pH no es significativo. El pH después de la electrocoagulación puede aumentarse para aguas residuales ácidas y disminuir para aguas alcalinas. (Arango, 2005)

4) Temperatura: Se ha encontrado que la eficiencia en la corriente incrementa inicialmente hasta llegar a 60°C , el cual a esta temperatura se hace máxima y luego empieza a decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura se atribuye al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio en la superficie del electrodo. (Arango, 2005)

f. Ventajas y desventajas de la electrocoagulación. Existen varias ventajas de la utilización de electrocoagulación para trabajar directamente con aguas residuales, las ventajas son:

- Los costos de operación son menores que los de procesos convencionales usando polímeros. (Arango, 2005)
- Requiere de equipos simples y fáciles de operar, con la suficiente libertad operacional para manejar los problemas encontrados en un funcionamiento. (Arango, 2005)
- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras. (Arango, 2005)
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos. (Arango, 2005)
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad, que involucra menor problemática de disposición de los mismos. (Arango, 2005)

- Los flóculos formados en el proceso son similares a los producidos químicamente, pero de mayor tamaño, contienen menos agua ligada, son antiácidos y más estables, pueden ser separados rápidamente por filtración. (Arango, 2005)
- No existe presencia de magnesio en los lodos por la no utilización del mismo en el proceso. (Arango, 2005)
- Gran efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes. (Arango, 2005)
- Purifica el agua y permite el reciclaje. (Arango, 2005)
- Reduce la contaminación en las fuentes receptoras de agua. (Arango, 2005)
- Produce efluentes con menor cantidad de sólidos totales comparados con los tratamientos químicos, si el agua se reusa, los bajos niveles de sólidos totales contribuye a disminuir los costos de tratamiento de aguas. (Arango, 2005)
- Remueve partículas coloidales más pequeñas, pues el campo eléctrico las pone en movimiento más rápidamente y facilita la coagulación. (Arango, 2005)
- Las burbujas del gas que se producen llevan el contaminante a la superficie y puede ser recuperado y removido más fácilmente. (Arango, 2005)

Las desventajas de la electrocoagulación son las siguientes:

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio. (Mejía, 2006)
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio por el material del electrodo de sacrificio utilizado. (Mejía, 2006)
- Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica es alto. (Mejía, 2006)
- El óxido formado en el ánodo puede en muchos casos formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo la eficiencia en el proceso. (Mejía, 2006)

D. Matriz de aspectos ambientales

Para la evaluación de aspectos ambientales es necesario evaluar la cantidad o frecuencia, la gravedad del impacto, y la permanencia del impacto de cualquier aspecto ambiental, utilizando la siguiente matriz se catalogaron como significativo y no significativo.

A. Cantidad o frecuencia		B. Gravedad del impacto		C. Permanencia del impacto	
Nivel de Valoración	Puntuación	Nivel de Valoración	Puntuación	Nivel de Valoración	Puntuación
Despreciable	10	Despreciable	10	No relevante	10
Bajo	20	Bajo	20	Facilmente reversible	20
Medio	40	Medio	40	Medianamente reversible	40
Alto	80	Alto	80	No reversible	80

	A+B+C ≥ 160	Aspecto Ambiental Significativo	→	implementar acciones
	A+B+C < 160	Aspecto Ambiental No Significativo	→	analizar posibles areas de oportunidad

E. Límites permisibles de descarga de aguas residuales

Además, para evaluar aspectos ambientales, y la correcta disposición de los efluentes se siguió la normativa del Acuerdo Gubernamental 236-2006 que utiliza los siguientes parámetros y límites máximos permisibles para la descarga de efluentes:

Tabla 5: Límites máximos permisibles según el Acuerdo Gubernamental 236-2006.

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 ⁶	< 1x10 ⁵	< 1x10 ⁵	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

1. Electroquímica en medios edáficos. Fundamentalmente el método de electrólisis se refiere a la separación de los elementos de un compuesto o sustancia utilizando la electricidad por medio de la captura de electrones por un cátodo, y la liberación de electrones por un ánodo en reacciones de reducción y oxidación respectivamente. A menudo, se acumulan en la capa superficial del suelo pueden ser absorbidos por las raíces de las plantas y cultivos. (Reddy, 1997)

a. Metales pesados en suelos y sedimentos. Los materiales húmicos (unos de los principales componentes de las sustancias húmicas, las cuales son los constituyentes principales del humus, materia orgánica del suelo. Contribuyen a la calidad físico-químicas del mismo y también son precursores de combustibles fósiles.) Tienen una gran afinidad por los cationes de metales pesados. El enlace de los cationes metálicos ocurre en gran parte por la formación de complejos entre estos y los grupos carboxilo (-COOH) de los ácidos húmicos y fúlvicos. (Sepúlveda, 2005)

Normalmente, los ácidos húmicos dan lugar a la formación de complejos que son insolubles en agua, mientras que los complejos con los ácidos fúlvicos, que son más pequeños, sí son solubles. (Sepúlveda, 2005)

Los metales pesados se retienen en el suelo por medio de tres vías:

- Por adsorción en la superficie de las partículas minerales.
- Complejación con las sustancias húmicas en partículas orgánicas.
- Por reacciones de precipitación.

Existe preocupación por que cultivos de alimentos que crezcan en suelo fertilizado con lodos de aguas residuales y los metales pesados puedan ser incorporados. (Sepúlveda, 2005)

La absorción de plomo por la lechuga es particularmente elevada. La concentración de arsénico en suelos agrícolas aumenta mucho si se aplican a estos los pesticidas a base de este metal y los cultivos plantados absorben algo del arsénico de en las partículas edáficas. (Sepúlveda, 2005)

Actualmente, el desarrollo de nuevas tecnologías de toda índole depende de los elementos que se obtienen por actividades minero-metalúrgicas o del reciclaje de otros materiales, ya que muchos de los componentes de los nuevos equipos (computadoras, instrumentos analíticos y teléfonos celulares, entre otros) están fabricados de metales como el hierro, cobre, cadmio, oro, plomo, plata y otros elementos como el silicio. (Sepúlveda, 2005)

La excavación de minas, la remoción de minerales y el proceso y la extracción de metales puede causar daños ambientales y, en casos extremos, destruir el ecosistema; por ejemplo, se pueden dañar tierras de cultivo, favorecer la erosión y contaminar cuerpos de agua con sales solubles de elementos potencialmente tóxicos (EPT) tales como As, Se, Pb, Cd y óxidos de S, entre otros. (Sepúlveda, 2005)

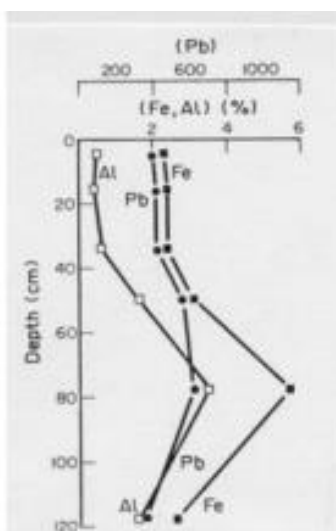
b. Fuentes naturales. Se deben, principalmente, a la meteorización que deposita en el suelo los elementos pesados retenidos por las rocas de la corteza terrestre y se originan partículas de pequeño tamaño que pueden ser fácilmente transportadas o solubilizadas. (Sepúlveda, 2005)

1) Plomo. La principal fuente natural es el PbS, por meteorización es oxidado. El Pb^{2+} ($r_i=119$ pm) también forma parte de feldespatos y pegmatitas por sustitución isomórfica de K^+ (138 pm), Sr^{2+} (118 pm), Ba^{2+} (135 pm), Ca^{2+} (100 pm) y Na^+ (102 pm). El plomo se encuentra más enriquecido en suelos orgánicos que en los minerales. En éstos últimos, se acumula principalmente en las arcilla hinchables del tipo illita y montmorillonita. (Sepúlveda, 2005)

El Pb^{2+} puede sufrir varios procesos químicos tales como absorción en arcillas, materiales orgánicos y/u óxidos de Fe/Mn, precipitación como compuesto insoluble y/o formar complejos con ligandos orgánicos e inorgánicos (caso de la relación de EDTA para la remoción en suelos)

Algunos compuestos de plomo insoluble son $Pb(OH)_2$, $PbCO_3$, PbS , PbO , $PbSO_4$. La especie que predomine dependerá del pH, potencial, fuente que lo produzca y aniones presentes. (Sanchez, 2008)

Figura 10. Perfiles de plomo, hierro y aluminio en suelos formados por meteorización de granitos.



(Sanchez, 2008)

2) Cadmio. Este metal está más concentrado en suelos arcillosos y pizarrosos. La gran estabilidad del ión Cd^{2+} en un amplio rango de pH hace que sea fácilmente retirado de suelos altamente lixiviados. (Sepúlveda, 2005)

3) Mercurio. Existe una fuente adicional a la meteorización de rocas y la emanación de Hg (g) a partir de la actividad volcánica de la corteza terrestre. (Sepúlveda, 2005)

4) Arsénico. Se encuentra en más de 200 minerales distintos en la corteza terrestre siendo aproximadamente el 60% como AsO_4 : presente en todos los suelos, y niveles más elevados en los de origen sedimentario. (Sepúlveda, 2005)

5) Selenio, Teluro, Indio y Talio. El selenio suele aparecer en rocas sedimentarias originadas por actividad volcánica. Los niveles de teluro en el suelo son muy bajos debido a su poca abundancia en la corteza terrestre (≈ 0.005 ppm). Indio y talio se encuentran más concentrados en rocas magmáticas, y para el talio la concentración aumenta con la acidez de las rocas y el contenido de arcilla de las rocas sedimentarias. (Sepúlveda, 2005).

c. Fuentes antropogénicas. Las fuentes primarias son aquéllas que se derivan de la adición de sustancias al suelo, fundamentalmente agrícolas. Las fuentes secundarias contaminan indirectamente el suelo por el vertido de sustancias de desecho procedentes de industrias cercanas. (Sanchez, 2008)

Tabla 6. Fuentes de elementos pesados que contaminan los suelos.

Fuente	Elementos
<i>Fuentes primarias</i>	
Fertilizantes	Cd, Pb, As
Abonos Estiercol	As, Pb, Se
Pesticidas	Pb, As, Hg
Aguas residuales	Cd, Pb, As
Riegos	Cd, Pb, Se
<i>Fuentes secundarias</i>	
Aerosoles de automóviles	Pb
Fundiciones	Pb, Cd, Sb, As, Se, In, Hg
Incineración de basuras	Pb, Cd
Áreas mineras	Pb, Cd, As, Hg
Desgaste de neumáticos	Cd
Pinturas (meteorización)	Pb, Cd
Depósitos de basura	Pb, Cd, As
Aerosoles	Pb, As, Cd, Se
Combustión de carbón	As, Se, Sb, Pb
Pilas cloroalcalinas	Hg

(Sanchez, 2008)

Tabla 7. Niveles de elementos pesados en fuentes primarias añadidas al suelo en agricultura ($\mu\text{g/g}$).

<i>M</i>	<i>Fertilizante fosfatado</i>	<i>Fertilizante nitrogenado</i>	<i>Abonos</i>	<i>Aguas residuales</i>	<i>Estiercol</i>	<i>Agua de riego</i>	<i>Pesticidas</i>
As	1 - 1200	2 - 120	0.1 - 24	2 - 30	1 - 25	< 10	3 - 30
Bi				1 - 100			
Cd	0.1 - 190	0.1 - 9	0.05 - 0.1	2 - 3000	0.1 - 0.8	< 0.05	
Hg	0.01 - 2	0.3 - 3		1 - 56	0.01 - 0.2		0.6 - 6
In					1.4		
Pb	4 - 1000	2 - 120	20 - 1250	2 - 7000	0.4 - 16	< 20	11 - 26
Sb	1 - 10			2 - 44	0.1 - 0.5		
Se	0.5 - 2.5		<0.1	1 - 17	0.2 - 2.4	< 0.05	
Te	20 - 23				0.2		

(Sanchez, 2008)

Destaca la elevada concentración de Pb, As y Hg originada por el empleo de pesticidas tales como arseniato de plomo, arseniato y arsenito de calcio, HgCl_2 y compuestos organomercuriados. Los fertilizantes fosfatados son una fuente de As, Cd y Pb debido a los altos niveles de estos elementos en las rocas de fosfatos. (Sanchez, 2008)

El estudio de las entradas y salidas de elementos pesados en suelos ha mostrado que el Pb, Cd y As tienden a acumularse en el suelo. (Sanchez, 2008)

Esta desigualdad de comportamientos se debe a los múltiples factores que afectan a la distribución, tales como la naturaleza de la fuente natural, el contenido de materia orgánica, arcilla y minerales conteniendo Fe, pH, potencial, topografía, etc. (Sanchez, 2008)

d. Composición física del suelo. El suelo, como un todo, está difícilmente en equilibrio ya que continuamente sufre alteraciones en sus propiedades físicas como: cambios mecánicos (expansión o contracción), movimiento de su fase líquida, transporte de solutos, variaciones térmicas, etc. Dichas alteraciones se deben principalmente al contenido de agua en el suelo (humedad). Conocer el contenido de humedad en el suelo y los efectos en sus propiedades físicas es de gran importancia para distintas líneas de investigación que abordan el tema. (Zamora, 2008)

El suelo es un sistema heterogéneo y poroso, compuesto por partículas muy pequeñas e independientes, cuyo arreglo determina el volumen del espacio poroso, en el cual se transmite o se retienen el agua y el aire. La separación entre partículas está relacionada con su tamaño. Los suelos se dividen en grupos dependiendo del diámetro promedio de partícula. En la tabla siguiente se muestra tal clasificación. (Zamora, 2008)

Tabla 8. Clasificación del suelo según su diámetro promedio de grano.

Suelo	Diámetro de grano [mm]
arena muy gruesa	2.00-1.00
arena gruesa	1.00-0.50
arena media	0.50-0.25
arena fina	0.25-0.10
arena muy fina	0.01-0.05
limo	0.05-0.002
arcilla	menores a 0.002

(Zamora, 2008)

Al volumen relativo de poros en el suelo se le conoce como porosidad y se define como la relación entre el volumen ocupado por los poros (V_p), respecto al volumen total del suelo (V_T). (Zamora, 2008)

$$\phi = \frac{V_p}{V_T} = \frac{V_g + V_l}{V_s + V_g + V_l},$$

(Ecuación 3)

Donde V_l es el volumen ocupado por el líquido, V_g es el volumen ocupado por el gas y V_s es el volumen ocupado por los sólidos. Los suelos con un diámetro de partícula grande tienen menor porosidad que suelos con un diámetro de grano pequeño, aunque el tamaño medio de los poros individuales sea mayor en los primeros (granos grandes) que en los segundos (granos pequeños). En los poros es precisamente donde el agua se almacena. El almacenamiento de agua en el suelo nos lleva a otro importante concepto, humedad, definida como el contenido relativo de agua en el suelo. La humedad se puede expresar de varias maneras, relación de peso (gravimétrica), relación de volumen (volumétrica) o con relación al volumen de poros ocupados por agua (grado de saturación). En este trabajo la relación usada es la gravimétrica, que se expresa como:

$$\theta = \frac{m_l}{m_s},$$

(Ecuación 4)

Es decir la relación entre el peso del agua en el suelo (m_l) con respecto al peso del suelo seco (m_s). (Zamora, 2008).

e. Relación del campo eléctrico con la porosidad del suelo. El Campo eléctrico tiende a presentarse en el suelo mediante los micro-poros debido a la resistencia eléctrica menor de estos y por lo tanto la corriente eléctrica afectará exactamente donde se encuentran depositados principalmente los metales pesados. Esto significa que los métodos electroquímicos son particularmente útiles para el suelo de grano fino donde las tecnologías o métodos de lavado de suelo son poco prácticos o imposibles de usar. (Lens, 2005)

Los métodos en los que un campo eléctrico se aplica a un suelo para eliminar las especies químicas son llamados, electrocinética-remediación, electro-recuperación, la extracción electrocinética, el proceso del suelo electrocinética, electroquímica descontaminación o métodos electrodiálítica-remediación para la eliminación de metales pesados de los suelos contaminados. Algunos de estos métodos son los resultados del estado o la aplicación e importante de ambos experimentos de laboratorio y la prueba realizada sobre el terreno. (Lens, 2005)

f. Fracción fina del suelo. La gran área de superficie específica o el suelo de grano fino proporcionan numerosos sitios activos para la formación de complejos de superficie y la adsorción de oscilación vertical metales. Por lo tanto, es importante que los métodos electroquímicos también puedan movilizar los metales pesados de la fracción fina del suelo. Muchos de los experimentos de laboratorio con electroquímica remediación de suelos se han llevado a cabo con caolinitas pinchos y los buenos resultados obtenidos. (Lens, 2005) Por ejemplo:

- 75-95% de Pb (inicialmente 118-145 mg / kg) (Hame *et al.*1991);
- 92-100% Cd (inicialmente 112 mg / kg) (Acar *et al.* 1994.);
- 85-100% Cd, Co, Ni y Sr (inicialmente entre 395 y 1.084 mg / kg) (Pamukcu y Wittle 1992.

Yeung *et al.* (1996) llevó a cabo experimentos con la eliminación de Pb a partir de dos tipos de caolinita; un caolinita altamente pura (Georgia) y un caolinita que contenía aproximadamente 4,3% de óxidos de hierro y otras impurezas, tales como SiO₂ y TiO₂ (Milwhite). En comparación con la caolinita Georgia, las impurezas en el Milwhite caolinita causaron un aumento de la capacidad de tamponamiento contra la acidificación del suelo y un revés en la dirección de flujo electro-osmótico (es decir, el flujo electro-osmótico fue desde el ánodo al cátodo en el Georgia caolinita, pero desde el cátodo al ánodo en el Milwhite caolinita).

La caolinita es un mineral natural común, pero rara vez se presenta en su estado puro. Caolinita se asocia más con las arcillas más tensioactivos por la orientación de sus grupos

carboxilos como grupos hidrófilos para facilitar la formación de ligandos, como esmectitas o illitas. (Lens, 2005)

Mientras tanto, los suelos con alto contenido de carbonato también la capacidad amortiguadora contra la acidificación. Esto significa que la parte delantera ácida se desarrolla lentamente durante la electro-remediación y por lo tanto se disminuye la velocidad de eliminación de metales pesados. Esto se demostró experimentalmente por Hansen *et al.* (1997) con un suelo franco arenoso con un contenido de carbonato de alrededor de 3,5%, donde se demostró que el calcio se elimina de la tierra antes de Cu, Pb y Zn. Cuando se acidifica el suelo calcáreo, la corriente se desperdicia en el transporte de iones de Ca a través del suelo.

En Ottosen *et al.* (1998) Los experimentos fueron reportados en un suelo arenoso con un contenido de carbonato del 11% y se concluyó que era necesario añadir un agente de desorción a esta tierra real con el fin de remediar con un tiempo de recuperación aceptable. (Lens, 2005)

2. Estudios electroquímicos en diferentes tipos de suelos. Los estudios con electro-remediación principalmente se han realizado a escala de laboratorio, donde el objetivo ha sido a menudo para probar el procedimiento para la recuperación de un suelo específico y para optimizar los parámetros del proceso. Ensayos a escala piloto y de campo también se han realizado, sin embargo, en un número limitado. Mientras tanto, no todas las pruebas de campo y pruebas piloto han sido reportadas en los documentos públicos y por lo tanto más de éstos se han llevado a cabo que se hace referencia aquí (Mary, 2002).

a. Fundamento de la técnica. 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 (De la Rosa, *et al.* 2007).

De forma general la electrorremediación ha demostrado su aplicación exitosa en campo, aunque de manera restringida debido a que cada caso representa un reto tecnológico único, el cual deberá de ser evaluado para seleccionar las tecnologías más adecuadas para su remediación (De la Rosa, *et al.* 2007).

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. De esta manera se podrán desarrollar en el futuro mejores técnicas híbridas que aprovechen las capacidades de la electroremediación y obtener altas eficiencias de remoción en campo (De la Rosa, *et al.* 2007).

Las medidas de resistividad del suelo pueden ser realizadas sobre el terreno para no perturbar el material o en el laboratorio donde se debe controlar los valores de humedad y compactación para tener una muestra representativa de la situación real. En medidas sobre terreno se emplea normalmente el método de Wenner, o de los 4 electrodos. En este procedimiento se emplean 4 barras metálicas separadas a una distancia constante y que se hallan situadas sobre una línea recta. Se hace pasar corriente eléctrica a través de los electrodos exteriores midiendo la diferencia de potencial entre los electrodos interiores. (De la Rosa, *et al.* 2007)

Las medidas de resistencia en suelos resultan de utilidad para realizar estudios para evaluar el grado de contaminación por diversos agentes.

En el laboratorio puede analizarse la variación de la resistencia de los suelos sometidos a tratamiento electrocinético mediante el monitoreo de la corriente durante el proceso de remodelación. En este caso se considera la porción de suelo bajo estudio como un conductor eléctrico. (De la Rosa, *et al.* 2007)

Para este tipo de estudio, se deben identificar las características principales del suelo evaluado (arena, limo, arcilla, pH, materia orgánica, etc.) así como realizar un secado a una temperatura determinada para eliminar los excesos de agua y de preferencia llevar a un análisis de granel para tener una distribución uniforme de tamaño de partícula. (De la Rosa, *et al.* 2007)

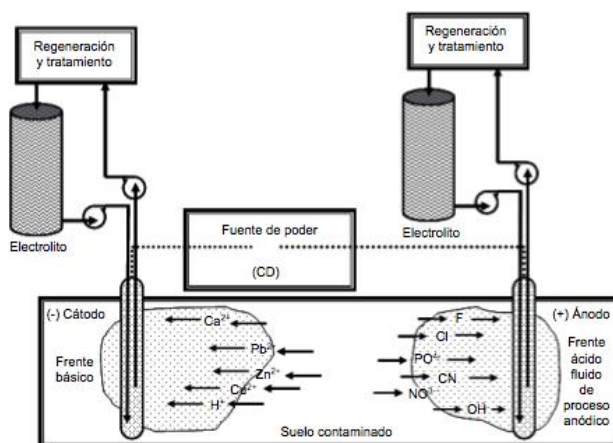
Para el estudio electrocinético se debe emplear una celda de dos electrodos de grafito que actúan como ánodo y cátodo, respectivamente; así como aplicar un potencial constante entre los electrodos durante al menos 8 horas. (De la Rosa, *et al.* 2007)

Una de las posibilidades experimentales para reducir la influencia de los frentes ácido y alcalino creados es el empleo de un flujo constante de agua sobre las cámaras de los electrodos. De esta manera es posible remover continuamente los productos de la electrólisis. Por otra parte la eliminación de especies iónicas en las cercanías puede afectar la eficiencia del proceso

electroquímico. Una manera de evaluar esto es analizando de qué manera se modifica la resistencia eléctrica que ofrece el suelo cuando se le aplica la diferencia de potencial. Dada esta posibilidad las cámaras de electrodos deben poseer sendas entradas y salidas que permitan mantener un flujo continuo de la solución de lavado que puede ser agua destilada para obtener un mejor análisis de las pruebas de laboratorio. (Sugerencia de las pruebas con agua potable para determinar desviaciones del método.) Este flujo debe ser mínimo en un intervalo de tiempo, ya que se busca la eficiencia del método y la optimización de los recursos por lo que de acuerdo a la teoría se puede establecer en 130-150 mL/h, lo cual puede variar. (De la Rosa, *et al.* 2007)

Se deberá proceder a la contaminación de la muestra de suelo -se evalúa la opción de obtener una muestra ya contaminada de un suelo nacional para verificación de viabilidad del método- esta contaminación, de presentarse, se efectuará con baterías gastadas de vehículos que se depositarán por un intervalo de tiempo establecido para luego hacer un análisis de laboratorio de metales presentes en el suelo contaminado. (De la Rosa, *et al.* 2007)

Figura 11. Esquema básico del proceso de electrorremediación, las especies iónicas migran por la acción del campo eléctrico. El frente ácido se forma en el ánodo y migra hacia el cátodo



(De la Rosa, *et al.* 2007).

b. Fundamentos de cálculo y relaciones adimensionales. En un simple reactor electrolítico por lotes, con un volumen constante de electrolito V_T , el reactivo se transferirá de la concentración inicial de $C(0)$ a un valor $C(t)$ en el tiempo t provocando un aumento de la concentración en el cátodo. La tasa de cambio de la concentración de reactante es (Rajeshshwar y Ibáñez, 1997)

$$\frac{dC(t)}{dt} = -kC(t)$$

(Ecuación 3)

Si se supone que la reacción presenta una cinética de primer orden con respecto a la sustancia reaccionante. Un balance de masa en el reactor puede ser descrito al relacionar $dC(t)/dt$ a la corriente de la celda, como sigue:

$$-\frac{dC(t)}{dt} = \frac{i(t)}{nFV_T}$$

(Ecuación 4)

Donde, $i(t)$ es la corriente instantánea en el momento t y, bajo el control de transporte de masa y, por definición del coeficiente de transporte de masa, k_m (Pletcher *et al.* 1991a),

$$i(t) = i_m = k_m AnFC(t)$$

(Ecuación 5)

Con n , A y F siendo el número de electrones cambiado, el área del electrodo y la constante de Faraday, respectivamente. Donde i_m , es la limitación de corriente. La sustitución de la ecuación 5 en la ecuación 4 y la integración da:

$$C(t) = C(0) \exp\left(-\frac{k_m A}{V_T} t\right)$$

(Ecuación 6)

$$\text{Donde } k = (k_m A)/V_T$$

La ecuación 6 describe la concentración del reactivo como una función del tiempo de electrólisis, y puede ser aplicable al caso de un reactor de paso único ya que t es considerado como el tiempo de residencia y se expresa como $t = V_T/Q$ donde Q es la velocidad de flujo. Por lo tanto, la ecuación 6 puede ser reescrita como:

$$C(t) = C(0) \exp\left(-\frac{k_m A}{Q}\right)$$

(Ecuación 7)

La solución se bombea desde el depósito de solución de catolito a la celda, como se ha descrito previamente (Widner *et al.*, 1998;.. Bertazzoli *et al.*, 1997). El volumen del reservorio (V_T) es mucho mayor que el volumen interior celular (V_C), de tal manera que $V_T / V_C = 37$. Si se considera que el volumen V_T pasa a través del reactor n veces como una cascada de reactores, el término exponencial en la ecuación 7 se multiplica por n que es igual a $Q t / V_T$. La sustitución de n en la ecuación 7, se convierte en la ecuación 6 de nuevo. Esto demuestra que el presente sistema puede ser modelado muy satisfactoriamente como un reactor discontinuo simple y no hay necesidad de utilizar un modelo de proceso por lotes-de reciclaje. A medida que el reactor electrolítico diseñado para este estudio utiliza un cátodo poroso de tres dimensiones, el área total del electrodo se considera que es:

$$A = A_e V_e$$

(Ecuación 8)

Donde, A_e es el área de superficie específica, o el área activa por unidad de volumen del cátodo y V_e es el volumen del electrodo, de tal manera que la ecuación 6 se convierte en:

$$C(T) = C(0) \exp\left(\frac{k_m A_e V_e}{V_T} t\right)$$

(Ecuación 9)

Datos de transporte de masas se correlacionan con la siguiente relación adimensional válido para una gran variedad de diseños de reactores electrolíticos (Rajeshwar e Ibanez, 1997):

$$Sh = m Re^n Sc^{0.33}$$

Donde los números de Sherwood (Sh), Reynolds (Re) y Schmidt (Sc) son definidos por:

$$Sh = \frac{k_m l}{D}$$

(Ecuación 10)

$$Re = \frac{\rho lv}{\mu}$$

(Ecuación 11)

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$$

(Ecuación 12)

v , ρ , μ y D_{AB} son la velocidad de flujo lineal, la densidad del fluido, la viscosidad del fluido y el coeficiente de difusión, respectivamente. La longitud característica, o diámetro hidráulico, l , se basan en las dimensiones del canal, calculado de la siguiente manera:

$$l = \frac{2WT}{(W + T)}$$

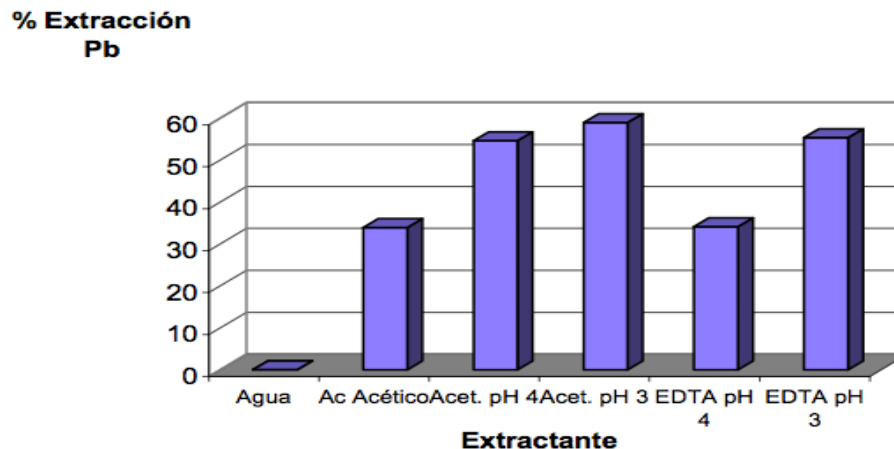
(Ecuación 13)

W y T son la anchura y el grosor de la canal que también son las dimensiones del cátodo. Las ecuaciones 10, 11, 12, 13 muestran que los parámetros físicos pueden ser cambiados para la optimización de la velocidad de eliminación.

c. Efectos del extractante. El plomo no se puede extraer del suelo cuando se utiliza solamente agua. Sin embargo, cuando se utilizan los otros extractantes se pueden alcanzar concentraciones importantes en la solución que van del orden de 2000 mg/L cuando se utiliza ácido acético, 3500 mg/L para el acetato y valores mayores a 3000 con el EDTA.

Considerando la cantidad de muestra de suelo y extractante, así como las concentraciones de plomo en el extracto, se pueden calcular los porcentajes de extracción. Los resultados se resumen en la figura 3 y muestran que se pueden lograr alcanzar una extracción del 60% cuando se utiliza acetato de sodio (a pH 3 y 4) y valores mayores al 55% cuando se utiliza EDTA.

Figura 12. Porcentajes de extracción del Pb con diferentes agentes extractantes.



(Meas, *et al.* 2010)

Debido a la efectividad de las muestras experimentales y la viabilidad del agente quelante, se utilizara el EDTA como agente extractante para la remoción de plomo en los suelos contaminados y su posterior tratamiento por electroremediación.

A. Tipos y mecanismos de remoción

Los mecanismos principales por los cuales el campo eléctrico conduce los contaminantes hacia los electrodos son: electromigración, electroósmosis y electroforesis. Siendo los dos primeros los que ejercen la mayor influencia en el transporte del contaminante. A continuación se describe cada uno. (Vasquez, *et al.* 2004)

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. (Vásquez, *et al.* 2004)

Típicamente, los valores de movilidad en suelos se encuentran alrededor de $3 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$ (excepto para H^+ ó OH^- , que tienen movilidad con un orden de magnitud de 10^7). Si el contaminante es un compuesto inorgánico y la fuerza iónica es grande, entonces el potencial z (ζ) es pequeño y por lo tanto los fenómenos de transporte son conducidos principalmente por electromigración (Yeung 1990, Baraud *et al.* 1997).

Electroósmosis. Es un fenómeno de transporte en el cual el líquido saturante 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) (Virkutyte *et al.* 2002).

La tasa de este flujo es proporcional al producto de la fuerza del campo eléctrico aplicado y al potencial ζ de la interface 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 (Yeung 1990).

Por ejemplo, con un gradiente de potencial eléctrico de 100 V/m^{-1} , los valores típicos de potencial ζ están entre ≈ 10 y ≈ 100 mV, lo cual causa que el agua fluya hacia el cátodo a una velocidad que puede alcanzar 10 cm-día^{-1} ; bajo estas condiciones algunas pruebas de laboratorio han demostrado una eficiente remoción de compuestos orgánicos insolubles, los cuales tienen cargas iónicas parciales, por lo que las cargas iónicas totales resultan ser muy débiles y no lograrían moverse solo por electromigración (Yeung 1990, Martínez 2001).

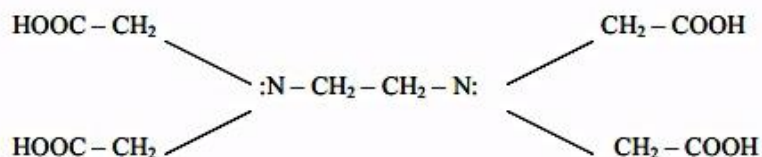
Electroforesis. Este mecanismo se observa cuando hay partículas o coloides con carga eléctrica, de forma que los contaminantes ligados a este material particulado pueden ser transportados por el campo eléctrico (Virkutyte *et al.* 2002).

En principio se espera que la aplicación de la electroremediación 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. (Vasquez, *et al.* 2004)

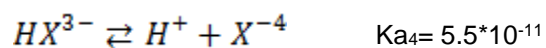
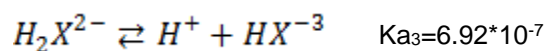
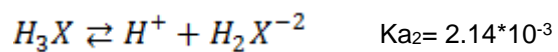
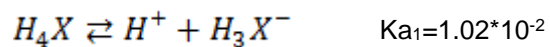
3. Valores constantes para remoción de plomo con extracción de EDTA. El ácido etilendiaminotetracético (EDTA) es un titulante hexadentado complejométrico muy utilizado.

Peso Molecular del EDTA: 292 g/mol

Fórmula condensada: $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_8\text{N}_2$



Propiedades ácidas:



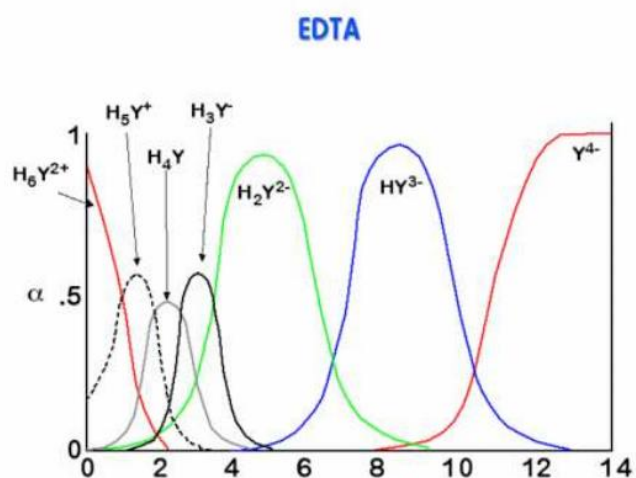
(Mallen, 2007)

El H_4X y la sal $Na_2H_2X \cdot 2H_2O$ se pueden obtener fácilmente en el comercio. El primero puede servir como patrón primario secándolo tres horas a $140^\circ C$ y luego se disuelve con sosa para obtener la sal. Las aguas de hidratación de la sal no son problema debido a que el peso con ellas es reproducible. (Mallen, 2007)

Ventajas de usar EDTA:

- Reaccionan con los cationes 1:1 independientemente de la carga del metal.
- Forma quelatos muy estables con la mayoría de los metales. (Mallen, 2007)

Figura 13. Composición de las soluciones de EDTA en función del pH.



(Mallen, 2007)

El ion plomo forma complejos orgánicos con los diferentes iones del EDTA; estos complejos EDTA-Pb, se expresan como H₄X donde la X denota el ion de EDTA⁴⁻. Se puede expresar las variaciones de pH de la muestra directamente con la llamada constante de estabilidad condicional para la formación de dichos complejos.

Las constantes de formación condicional o efectiva o formal son constantes de equilibrio dependientes del pH que únicamente se aplican a un solo pH. La designación de "constantes condicionales" significa que su valor permanecerá constante en la medida en que se mantengan constantes las condiciones de reacción; en otras palabras, en la medida que no sufran cambios de importancia el pH. (Masakazu, *et al.* 2008)

El ligando tiene propiedades ácido-base por lo que la especie varía con el pH. También, los iones de forma metálica forman complejos metal-hidróxido y complejos de metal-ligando. Por lo tanto, estas reacciones se deben considerar como reacciones secundarias para la determinación de la constante de estabilidad condicional de la reacción principal. (Masakazu, *et al.* 2008)

La constante de estabilidad condicional está relacionada con la constante de estabilidad real al considerar las reacciones secundarias, y tiene un máximo a un determinado pH. Este es el pH en el que el ligando forma el complejo con el ion metal de una manera más efectiva. Por lo tanto, la región de pH en el que el ligando forma el complejo más estable se estima a partir del valor de la constante de estabilidad condicional. En este estudio, las reacciones ácido-base de ligando, formaciones de complejos de plomo-hidróxido y complejos de plomo-ligando se consideraron como el reacciones secundarias. (Masakazu, *et al.* 2008)

La constante de estabilidad condicional para el complejo Plomo-EDTA está definida por la siguiente ecuación:

$$K_{PbX} = \left(\frac{\alpha_{PbX}}{\alpha_{Pb}\alpha_X} \right) \cdot K_{PbX}$$

(Ecuación 14)

Donde K_{PbX} denota la estabilidad constante de PbX²⁻ y α denota el coeficiente de reacción secundaria, y cada α es definida por las siguientes ecuaciones: (Masakazu, *et al.* 2008)

$$\alpha_{PbX} = \frac{[PbX^{2-}] + [PbHX^{-}]}{[PbX^{2-}]} = 1 + K_{PbHX} [H^{+}]$$

(Ecuación 15)

$$\alpha_{Pb} = \frac{([Pb^{2+}] + [PbOH^{+}] + [Pb(OH)_2] + [Pb(OH)_3^{-}])}{[Pb^{2+}]} = 1 + \frac{\beta_1 K_W}{[H^{+}]} + \frac{\beta_2 K_W^2}{[H^{+}]^2} + \frac{\beta_3 K_W^3}{[H^{+}]^3}$$

(Ecuación 16)

$$\begin{aligned} \alpha_X &= \frac{([X^{4-}] + [HX^{3-}] + [H_2X^{2-}] + [H_3X^{-}] + [H_4X])}{[X^{4-}]} \\ &= 1 + \frac{[H^{+}]}{K_{HX}} + \frac{[H^{+}]^2}{K_{HX}K_{H_2X}} + \frac{[H^{+}]^3}{K_{HX}K_{H_2X}K_{H_3X}} + \frac{[H^{+}]^4}{K_{HX}K_{H_2X}K_{H_3X}K_{H_4X}} \end{aligned}$$

(Ecuación 17)

Donde K_{PbHX} , K_w , β_n ($n=1-4$) y K_{HnX} ($n=1-4$) denotan la estabilidad constante de $PbHX^{-}$, el ion producto del agua, la estabilidad constante del complejo Plomo-hidróxido y la constante de disociación ácida del EDTA respectivamente. (Masakazu, *et al.* 2008)

Figura 14. Relación entre el pH y las constantes de estabilidad condicional para los complejos plomo-EDTA (PbX^{2-}) plomo-EDDS (PbY^{2-}) y plomo-citrato (PbL^{-})

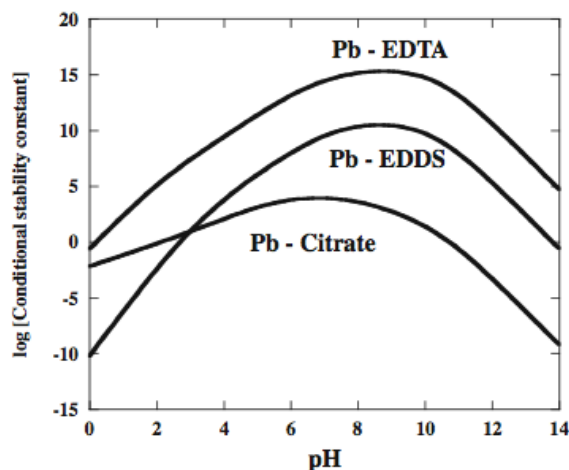
(Masakazu, *et al.* 2008)

Tabla 9. Constantes de estabilidad y constantes de disociación ácidas usadas para el cálculo de constantes de estabilidad condicional

Constantes de estabilidad de complejos Pb-EDTA	$\log K_{PbX}$	18
	$\log K_{PbEDX}$	2.8
Constantes de disociación ácida de EDTA	$\log K_{HX}$	-10.3
	$\log K_{H2X}$	-6.24
	$\log K_{H3X}$	-2.75
	$\log K_{H4X}$	-2.07
Constante de estabilidad de complejos Pb-EDDS	$\log K_{PbY}$	12.7
Constantes de disociación ácida de EDDS	$\log K_{HY}$	-9.8
	$\log K_{H2Y}$	-6.8
	$\log K_{H3Y}$	-3.9
	$\log K_{H4Y}$	-2.4
Constante de estabilidad de complejos Pb-citratos	$\log K_{PbL}$	4.08
	$\log K_{PbHL}$	8.15
	$\log K_{PbH2L}$	10.85
Constantes de disociación ácida de ácido cítrico	$\log K_{HL}$	-5.82
	$\log K_{H2L}$	-4.35
	$\log K_{H3L}$	-2.85
Constantes de estabilidad de complejos Pb-hidroxido	$\log \beta_1$	6.2
	$\log \beta_2$	10.3
	$\log \beta_3$	13.3

(Masakazu, *et al.* 2008).

4. Costos. Los costos asociados a la aplicación en campo de la electroremediación 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. (De la Rosa, *et al.* 2007)

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 electroremediación 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 kilowatt por hora de US\$ 0.03 y una separación de electrodos entre 1 y 1.5 m (USAEC 1997).

5. Factores que influyen en el proceso de electroremediación. 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 explican a continuación.

6. Factores de campo eléctrico y reacciones en el electrodo. La velocidad de eliminación de los metales pesados en el proceso electroquímico-remediación depende del campo aplicado. Viadero *et al.* (1998) demostró que en dos series o pruebas en las que se aplicó 30V y 60V para el suelo, respectivamente, se obtuvo aproximadamente el mismo porcentaje de remediación, pero la tasa de eliminación fue más alta en 60V. El aumento de la densidad de corriente de 0,1 mA/cm² a 0.2mA/cm² ha demostrado aumentar la tasa de eliminación para el Cu a partir de una arena arcillosa aproximadamente el doble. Por lo tanto el aumento de la corriente significa un aumento en la eliminación de la tasa, pero esto sólo es válido hasta un cierto límite, depende entre otros de la velocidad máxima en que los iones de metales pesados se puedan mover. Si se aplica una corriente demasiado alta, la energía se transforma en calor. Optimización de la corriente / tensión, es beneficioso con el fin de tener una recuperación tan rápido como sea posible.

La corriente de electrólisis viene dada por:

$$i = nFSv$$

(Ecuación 18)

Donde n es el número de Faradays F que intervienen en la reacción, S la superficie del electrodo y v la velocidad de transporte de los iones reaccionantes hacia el electrodo. En el caso de que el experimento se realice de modo que no intervengan la migración y la convección estará controlada exclusivamente por la difusión, que a la vez es función del gradiente de concentración entre el seno de la disolución y la superficie del electrodo. La velocidad de difusión para el caso de una difusión lineal viene dada por:

$$v = -\frac{\delta c}{\delta t} = D \frac{\delta^2 c}{\delta x^2}$$

(Ecuación 19)

Y en el caso de una difusión esférica viene dada por:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \frac{\delta^2 c}{\delta r^2} + \frac{2\delta c}{r\delta r}$$

(Ecuación 20) (Almagro, 2005)

La velocidad de difusión y las concentraciones son función de la distancia al electrodo y del tiempo de electrólisis. Para el cálculo de estas ecuaciones diferenciales se establecen unas condiciones en el límite. Estas son:

$$C(x, t) = C^\circ \quad \text{al principio de la electrólisis (4)}$$

$$C(0, t) = 0 \quad \text{Cuando } t > 0 \text{ (5)}$$

$$C(x, t) = C^\circ \quad \text{Cuando } x \rightarrow \infty \text{ (6)}$$

La solución de la ecuación total depende también, como veremos, del estado de equilibrio en el electrodo, y de aquellas magnitudes que lo determinan como la velocidad de reacción electroquímica entre otras. (Almagro, 2005)

a. Métodos experimentales en el cálculo de parámetros cinéticos. La ecuación que relaciona la sobretensión con la densidad de corriente viene dada por la expresión de Tafel.

$$\eta = a + b \log(i)$$

(Ecuación 21) (Almagro, 2005)

Donde a y b son constantes que dependen de una serie de factores entre los que se encuentran las velocidades de reacción en el electrodo. Esta ecuación es la base para el método clásico de determinación de los parámetros cinéticos de las reacciones electroquímicas, es decir, el coeficiente de transferencia electrónica, α , y la constante de velocidad, k. (Almagro, 2005)

No siempre es posible utilizar el método clásico, debido generalmente a que no da buenos resultados para valores de la constante de velocidad demasiado grandes. Para estos casos se han desarrollado modernamente otros métodos llamados de «relajación», que consisten esencialmente en separar el electrodo de las condiciones de equilibrio (por variación del potencial o de la corriente) y se estudia luego el comportamiento de este electrodo durante un cierto tiempo. Los principales métodos de relajación son los siguientes: método potencioestático o

a potencial controlado, método galvanostático o a corriente controlada, y método de superposición de corriente alterna. (Almagro, 2005)

De un modo aproximado podemos aceptar que el método clásico es útil para valores de $k < 10^{-5}$, y los métodos de relajación para $k > 10^{-5}$ cm/s. El método de corriente alterna superpuesta es más útil para valores de $k > 10^3$. (Almagro, 2005)

1) Método potenciométrico o a potencial controlado. Este método consiste esencialmente en cambiar bruscamente el potencial del electrodo que inicialmente se encuentra en el potencial de equilibrio, y se registra la corriente resultante de esta perturbación. Se suele utilizar como aparato de medida un oscilógrafo debido a que esta variación es muy rápida e interesan además las primeras fracciones de la misma. Este método fue desarrollado primeramente por H. Gerischer y colaboradores.

Inmediatamente después de esta perturbación, la corriente que fluye está controlada casi exclusivamente por la velocidad de reacción en el electrodo, y conforme aumenta el tiempo se va haciendo mayor la influencia de la polarización de concentración hasta que finalmente resulta controlada principalmente por la difusión. (Almagro, 2005)

Para tiempos suficientemente cortos y para sobretensiones que no excedan de unos pocos milivoltios, se desarrolla la fórmula en serie con la adopción de términos que da:

$$i = i_o \left(\frac{C_A}{C_A^0} \right) \exp\left(-\frac{\alpha n F (E - E_e)}{RT}\right) - \frac{C_B}{C_B^0} \exp\left(\frac{(1 - \alpha) n F (E - E_e)}{RT}\right)$$

(Ecuación 22)

Donde

$$i_o = n F K C_A^{(1-\alpha)} C_B^{\alpha}$$

(Ecuación 23) (Almagro, 2005)

Se representa gráficamente $\log i$ frente a la sobretensión $(E - E_e)$ que da una línea cuya pendiente es i_o . Representando después $\log i_o$ frente al logaritmo de la concentración de A ó B,

permaneciendo la de uno de ellos constante, da una línea recta cuya pendiente nos da la constante cinética K (suponiendo $\alpha = \text{constante} = 1/2$).

$$i = \frac{i_o V}{i_o R_t + RT/nF} \left(1 - \frac{2\lambda t^{\frac{1}{2}}}{\pi^{\frac{1}{2}}}\right)$$

(Ecuación 24)

Donde V es la variación de tensión, R la resistencia total del circuito

$$\lambda = \frac{i_o}{nF} * \frac{RT}{i_o R_t + \frac{RT}{nF}} \left(\frac{1}{D_A^{\frac{1}{2}} C_A^o} + \frac{1}{D_B^{\frac{1}{2}} C_B^o} \right)$$

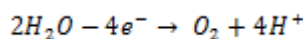
(Ecuación 25) (Almagro, 2005)

Si ponemos en una gráfica los valores de la corriente para los correspondientes valores de $t^{1/2}$ obtenemos una línea recta cuya intersección con el eje $t = 0$ da directamente la densidad de corriente de intercambio, i_o .

Para hallar el coeficiente α se hace uso de la fórmula (9) representando gráficamente $\log i_D$ frente a la concentración de la sustancia A ó B, permaneciendo la concentración de la otra constante. Del valor de la pendiente se halla el coeficiente α ; el parámetro K se puede hallar de la misma ecuación (9). (Almagro, 2005)

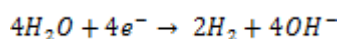
7. Efectos del pH. Los cambios de pH promueven reacciones de los metales con otras sustancias que se encuentran en el suelo de forma natural, este factor regula la movilidad de los contaminantes en el proceso de electroremediación. La hidrólisis del agua produce una disociación que genera iones hidrógeno (H) en el ánodo e iones hidroxilo (OH^-) en el cátodo, liberando oxígeno e hidrógeno respectivamente (reacciones 1 y 2). (Acar y Alshwabken 1993, Hicks y Tondorf 1994, Virkutyte *et al.* 2002).

Reacción de hidrólisis que genera iones de hidrógeno en el Ánodo:



$$(1) \quad E^\circ = +1.23 \text{ V}$$

Reacción de hidrólisis que genera iones hidroxilo en el Cátodo:



$$(2) E^{\circ} = -0.83 \text{ V}$$

E° = diferencia de potencial en el electrodo.

La aplicación de un campo eléctrico de corriente directa (DC) a los electrodos inertes sumergidos en agua da como resultado la electrólisis del agua. En el ánodo, la oxidación ocurrirá por la generación de ácido, y la reducción al cátodo se producirá por la reducción de la generación de la base. (Lens, 2005)

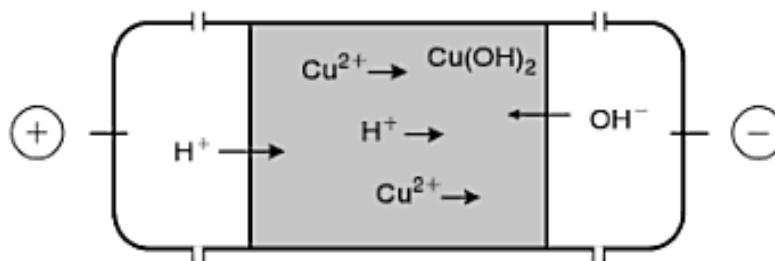
Dependiendo de la concentración de las especies de metal disponibles (Me^{n+}) en la solución de electrolito, también la reducción de los metales en el cátodo va a ocurrir:

Cátodo:



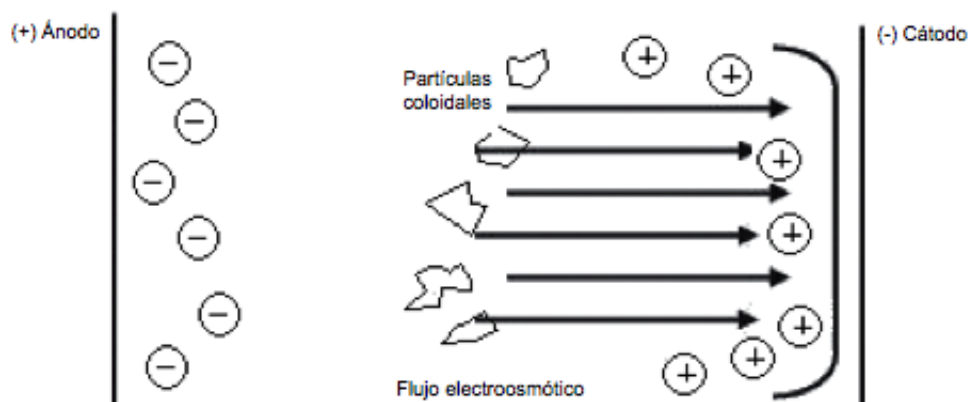
En la primera etapa de electro-remediación, los procesos de electrodos en las reacciones (1) y (2) se encontró que el valor del pH afecta en gran medida en el suelo de acuerdo con Acar *et al.* (1990. Hamed *et al.* (1991) o Probsteyn y Hicks 1993. Desde el extremo del ánodo, se forma un frente ácido en el suelo y desde el extremo del cátodo se forma (o desarrolla) un frente alcalino. Los metales pesados en el suelo se retirarán de la zona con un pH bajo, pero luego se acumulan en la posición exacta del salto de pH. La razón es que los metales pesados investigados (por ejemplo, Cu) podría electromigrarse como iones en el agua del suelo a pH bajo, pero a pH más altos los metales pesados tienden a adsorber a los sólidos del suelo o sedimento con otros iones disueltos en el agua del suelo. Esto significa que en el sistema no mejorado, descrito en la figura 6 y que representa el esquema básico de la electromigración, prácticamente no hay metales pesados que se retiren del suelo en su conjunto. Este principio se ilustra a continuación, dicho sistema de no mejorada electroquímica-remediación ha sido modelada por Alshawabkeh Acar 1996 y Vereda-Alonso *et al.* (2004). (Lens, 2005)

Figura 15. El principio de sistema no mejorada de electroquímica, recuperación de suelos iones H^+ producidos en el ánodo va a pasar en el suelo y movilizar los metales pesados. En el otro extremo de la tierra, los iones OH^- producidos en el cátodo pasarán en el suelo y los metales pesados se precipitarán y no electromigrarán más.



(Lens, 2005)

Figura 16. Esquema básico del fenómeno de electroósmosis, las especies iónicas migran por la acción del campo eléctrico, las partículas en suspensión migran junto con el electrolito hacia uno de los polos eléctricos.



(De la Rosa, *et al.* 2007)

La disociación genera un pH ácido cerca del ánodo y alcalino cerca del cátodo. Debido a la mayor movilidad del ión H^+ sobre el ión OH^- , el frente ácido viaja con mayor velocidad y por lo tanto el flujo electrosmótico se dirige preferencialmente hacia el cátodo. En el caso de existir metales adsorbidos, estos son solubilizados por el frente ácido y transportados hacia el cátodo (Acar *et al.* 1991).

Cuando no se aplica lavado en los pozos, el frente alcalino penetrará a una velocidad menor a la del frente ácido y cuando ambos frentes se encuentran se genera una zona en donde el pH cambia bruscamente (zona de transición), dando como resultado una frontera con un marcado cambio de pH (de 2 a 13 en menos de 0.5 cm), en esta zona los contaminantes se acumulan debido a que frecuentemente precipitan como hidróxidos metálicos. Después de un tiempo, se observa que el suelo se acidifica, excepto en la región cercana al cátodo.

Existiendo algunas excepciones cuando:

- El suelo es muy alcalino
- Cuando existen sustancias amortiguadoras como fosfatos y carbonatos (Reddy *et al.* 1997)
- Cuando los electrodos están hechos de materiales reactivos (electrodos de hierro) (Haran *et al.* 1996).

Una remoción exitosa dependerá de mantener el contaminante inorgánico en solución evitando los cambios súbitos de pH; en el caso de algunos contaminantes orgánicos (como ácidos y fenoles, entre otros) las condiciones óptimas de remoción serán aquellas en las que el pH logra desplazar el equilibrio de disociación de la sustancia hacia la forma disociada (Shapiro y Probstein 1993).

8. Contenido de agua. El movimiento del electrolito por electroósmosis es función del contenido de agua; por lo tanto, el grado de saturación del suelo es un factor indispensable para llevar a cabo el proceso electrocinético. 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 electroosmótico irregulares. Por tanto es necesario mantener una humedad adecuada agregando electrolito a la misma tasa electroosmótica 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 (Shapiro y Probstein 1993).

9. Temperatura. En el caso de las acciones de remediación o fuera de la puerta, es importante conocer el efecto de la temperatura en la remediación. La mayoría de los experimentos se han llevado a cabo en el laboratorio a aproximadamente 20°C. Algunos experimentos preliminares (Krause y Tarmann 1995) con la eliminación de Cr de caolinita como resultado la observación de que el aumento de temperatura de proceso puede resultar en un tiempo de recuperación más corto en condiciones saturadas. Kristensen (1999) mostró claramente que las constantes de velocidad de eliminación en la remediación del suelo por métodos electroquímicos para el Cu, Zn y Pb en caolinita se incrementó al aumentar la temperatura de 4°C a 20°C y aún más cuando la temperatura se aumentó a 40°C. Se presume que el aumento de la tasa se debió principalmente a la disminución de la viscosidad del agua de los poros del suelo. No se han reportado estudios sobre el efecto de la temperatura sobre la velocidad de eliminación de varios metales pesados en diferentes suelos contaminados. (Lens, 2005)

En algunos estudios en una planta piloto fuera de una puerta pequeña utilizada para electrodiálisis-remediación se encontró que el suelo, que estaba en una caja por encima de la superficie del suelo, no se congeló a pesar de que la temperatura del aire está por debajo del punto de congelación durante aproximadamente 2 semanas. En este caso, las soluciones en las unidades de electrodo se almacenaron en la puerta con el fin de evitar la congelación de estos (Hansen y Kliem 1999). Por lo tanto, incluso cuando la temperatura está por debajo del punto de congelación, la electro-remediación puede ocurrir, pero la remediación se puede esperar que ocurra más rápido a temperatura más alta. (Lens, 2005)

10. Conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica es diferente para cada tipo de suelo, está definida 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, ASTM 1994). En electrorremediación, los cambios de pH del suelo modifican la conductividad global del medio por lo que se forman perfiles de voltaje. 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 (Acar y Alshwabken, 1996).

11. 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 (Lorenz 1969). 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. (Acar y Alshawabken 1996)

En trabajos donde se incluye una descripción del efecto del pH sobre el potencial ζ se utilizó kaolinita contaminada artificialmente; sin embargo no todas las arcillas se comportan igual, por ejemplo los suelos ílíticos y bentónicos no muestran efectos derivados de los cambios en las concentraciones iónicas del fluido saturante (Gray y Mitchel 1967).

12. Naturaleza y química del suelo. La electrorremediación 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 (Virkutyte *et al.* 2002).

En la cinética de remoción del contaminante influyen las siguientes características del suelo: la capacidad de adsorción, intercambio iónico y de amortiguamiento del pH; en el caso de suelos arcillosos y limosos, estos ofrecen mayor superficie de contacto, por lo que los metales y sustancias iónicas (sulfato, nitrato, amonio) pueden ser adsorbidos con mayor facilidad en sus superficies, lo cual dificulta su remoción. Por otro lado, la mayoría de las arcillas exhiben carga superficial negativa y retienen por atracción iónica la mayoría de los contaminantes metálicos. En otros trabajos se ha considerado la cantidad de materia orgánica y la concentración de óxidos de hierro (Cox *et al.* 1996).

Un suelo tratado por electrorremediación puede exhibir cambios en su granulometría, contenido de materia orgánica, cantidad de sales solubles, conductividad eléctrica. Un suelo electroremediado generalmente tiende a acidificarse y a disminuir o perder su contenido de sales inorgánicas como nitrato, fosfato y sulfato, por lo que se pudiera reducir o nulificar su fertilidad. Por esta razón, y dependiendo del uso de suelo, se puede recomendar su regeneración ya sea por fertilización o mejoramiento con materia orgánica o composta (Reddy *et*

al. 1997).

a. 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 sorbidos 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 (Suer *et al.* 2003).

b. 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 cobre (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, (Alshawabken *et al.* 1999a, 1999b) han modelado arreglos mono dimensionales (un par de electrodos) y arreglos bidimensionales (varios electrodos); sin embargo, al ser la electrorremediación un sistema multivariable, no se han encontrado estrategias universales para aplicarse a gran escala. La principal limitación en la elección del tipo de electrodos es el costo, seguido de la facilidad de fabricación y su robustez, sin embargo los estudios previos a la remediación a gran escala son determinantes en la selección y viabilidad del tipo de material a utilizar.

13. Biodiésel. Se define como un biocombustible líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales, las cuales se extraen de fuentes de aceite vegetal y grasas animales. Se utiliza el proceso de transesterificación, el cual sustituye de forma total o parcial del petrodiesel. Debido a la materia prima de donde se obtiene biodiésel, en Guatemala se puede obtener de parte de los residuos de grasas utilizadas para la elaboración de comida rápida en restaurantes. (Piedmontbiofuels, 2012)

La Industria del biodiésel tuvo su origen en el área de Europa, principalmente en Austria, país que colocó estándares de calidad y de producción, para su elaboración en la ciudad de AschachanDonau en el año de 1991 se realizó la construcción de la primera planta de producción a nivel industrial, lo cual lo acompañó la determinación del primer estándar de calidad de metilésteres de ácidos grasos. Hoy en día se cuenta con producciones a nivel mundial con diversas materias primas, entre las más conocidas se tiene el aceite de soya, la cual es utilizada mayormente en los Estados Unidos, ya que en países tropicales se emplea palma aceitera y en países mediterráneos se tiene el girasol, sin embargo para la selección de la materia prima es necesario tener triglicéridos que pueden ser renovables. (Piedmontbiofuels, 2012)

a. Ventajas de la utilización de biodiesel. Posee ventajas importantes con efectos principales, la cual son disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente el CO₂, en los cuales se puede reducir los contaminantes y emisiones tóxicas. En el caso del diésel y el biodiésel producen cantidades similares de CO₂, pero las diferencias que la mayor parte de las emisiones de CO₂ emitirán hasta que ya es biodiésel. (Acosta, 2008)

Diversos estudios señalan que el biodiésel emite menos CO₂ que el proceso de fotosíntesis por estas mismas plantas oleaginosas. Por esto, es posible afirmar que sustituyendo o complementando el diésel con el biodiésel se puede combatir el gran problema del cambio climático. (Acosta, 2008)

El biodiésel es un combustible oxigenado y no contiene azufre, este tiene una combustión más completa que el derivado de petróleo y tiene una composición notablemente mejor en sus emisiones, por otro lado al tener al mezclar tan solo 10% de biodiésel con 90% , se logra una reducción de monóxido de carbono CO, de óxido de azufre SO_x y compuestos aldehídos, con respecto a las emisiones de benceno en su totalidad, eliminando compuesto cancerígeno, disminuyendo los riesgos de salud pública y conservación del ambiente. (Acosta, 2008)

b. Propiedades del Biodiésel

1) Propiedades auto inflamables. Esta es una de las propiedades más importantes que debe considerarse en el diésel. Esto se mide con el número de cetanos. Esta prueba compara la autoignición del combustible con una mezcla de dos combustibles de referencia, hexadecano, y heptametilnonano. La mayoría de biodiésel tiene mayor número de cetanos que el diésel ordinario. El punto de autoinflamación comúnmente denominado como flashpoint significa que es la temperatura a la cual el combustible entrega suficiente vapor para

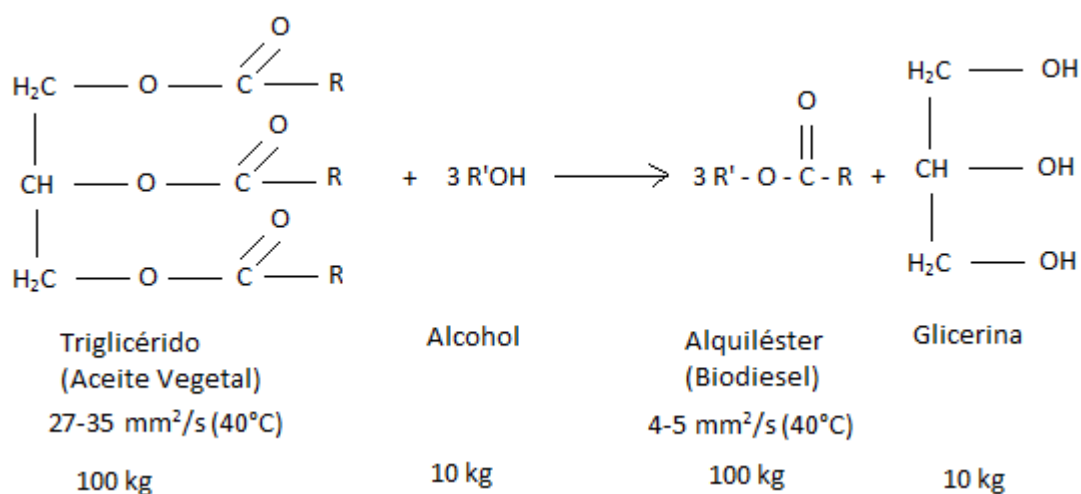
producir una mezcla inflamable. El diésel común tiene un flashpoint entre 52°C-66°C, mientras que el biodiésel tiene un flashpoint de 150°C. (Knothe *et al.*, 2010)

a) Viscosidad. Esta característica, según ASTM D975, tiene un rango bajo de aceptabilidad, entre 1.9 y 4.1 cSt. La especificación para el biodiésel en ASTM D6751 requiere que el biodiésel 100% tenga una viscosidad entre 1.9 y 6.0 cSt. Si el biodiésel tiene una viscosidad muy elevada, los inyectores en el motor sufrirán desgaste y se producirá humo color negro. (Knothe *et al.*, 2010)

b) Corrosión. Los motores diésel de sistema de inyección están hechos de acero, el cual está condenado a la corrosión cuando entra en contacto con el agua. Por lo cual esto tendrá como resultado una falla en el sistema de inyección. En este punto radica la importancia de la máxima remoción de agua que pueda haber en el biodiésel, debido que se han hecho estudios en donde el petrodiesel contiene en promedio 50 ppm de agua disuelta, mientras que el biodiésel alrededor de 1500 ppm (Van Gerpen *et al.*, 1997). Sin embargo, las pruebas de oxidación se realizan sumergiendo tiras de cobre para verificar su capacidad de oxidación y el biodiésel supera esta prueba con facilidad (ASTM D 130).

c. Reacción de producción de biodiésel. Las reacciones más importantes para la producción de biodiésel a partir del aceite vegetal son: el mezclado de petrodiesel, transesterificación, microemulsificación y pirolisis, a nivel industrial la más utilizada es la transesterificación gracias a su incremento de eficiencia. La reacción que se puede observar es la siguiente: (Knothe *et al.*, 2010)

Imagen 1: Proceso de transesterificación.



(Knothe *et al.*, 2010)

El agua es impedimento para la realización del biodiésel, por lo tanto los modelos de comportamiento de la reacción de la elaboración de biodiésel. En este caso se puede ver que la etapa inicial de la formación de alquil ésteres que tiene la capacidad de formar mono acilglicéridos y diacilglicéridos que pueden ser intermediarios de la transesterificación. En el método de transesterificación tiene dos formas de producir, ya sea con una catálisis ácida o básica, al comparar ambos procesos se puede ver que la catálisis alcalina tiene una eficiencia mayor, para realizar una reacción con una eficiencia mayor es necesario tomar en cuenta la humedad y los ácidos grasos libres (FFA). (Knothe *et al.* 2010)

1) Proceso de producción. Los orígenes de la utilización de la biomasa en motores diésel se dio en los años de 1900 en donde se observó la utilización de aceite de maní para el funcionamiento de un motor de diésel, tratando de promover la autosuficiencia de las colonias africanas con respecto al consumo de los combustibles. (Acosta, 2008)

Con este tipo de pruebas se demostró que no se puede utilizar la biomasa como combustible directo en los motores, ya que poseen altos índices de viscosidad y baja volatilidad, principalmente con el factor de inyección directa, ya que la viscosidad de los aceites extraídos es demasiado alta y la atomización es difícil para el chorro, esto provoca un elevado punto final de la curva de destilación, en conjunto de una pobre atomización del combustible con una evaporación incompleta y un procesos de mezclado que da como resultado una combustión deficiente, al alcanzar temperaturas muy elevadas puede darse una descomposición térmica justo antes que se provoque la combustión, por lo tanto se propone un combustible convencional. (Acosta, 2008)

La materia prima utilizada en la elaboración de biodiésel es importante que cuente con los siguientes componentes:

Tabla 10: Componentes principales de la materia prima utilizada para la elaboración de combustible.

<i>Tipo de compuesto</i>		<i>Nombre</i>
Mayoritarios		Triacilglicéridos (triglicéridos)
Minoritarios	Material saponificable	Diacilglicéridos
	Glicéridos neutros	Monoacilglicéridos
		Ácidos grasos libres
	Gomas	Fosfolípidos o fosfoglicéridos
	Material insaponificable	Colesterol
	Esteroles	Fitosterol
	Terpenos y otros hidrocarburos	Polímeros del isopreno (2-metil-1,3-butadieno)
	Vitaminas	Tocoferoles Tocotrienoles
	Colorantes	Carotenos Xantofilas
	Metales	Hierro Cobre

(Acosta, 2008)

Tabla 11: Ácidos grasos saturados de mayor ocurrencia en aceites y grasas.

<i>Nombre común</i>	<i>Nombre técnico</i>	<i>Fórmula</i>		<i>Punto de fusión (°C)</i>	<i>Punto de ebullición (°C)</i>
Láurico	Dodecanoico	$C_{12}H_{24}O_2$	12:0	44,2	130
Mirístico	Tetradecanoico	$C_{14}H_{28}O_2$	14:0	54,4	149
Palmitico	Hexadecanoico	$C_{16}H_{32}O_2$	16:0	63,0	167
Esteárico	Octadecanoico	$C_{18}H_{36}O_2$	18:0	69,4	184
Araquídico	Eicosanoico	$C_{20}H_{40}O_2$	20:0	76,0	204
Behénico	Docosanoico	$C_{22}H_{44}O_2$	22:0	79,9	306
Lignocérico	Tetracosanoico	$C_{24}H_{48}O_2$	24:0	84,2	-
Cerótico	Hexacosanoico	$C_{26}H_{52}O_2$	26:0	87,7	-

(Acosta, 2008)

Tabla 12: Continuación de listado de Ácidos grasos saturados.

<i>Nombre común</i>	<i>Nombre técnico</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Punto de fusión (°C)</i>	<i>Punto de ebullición (°C)</i>
Lauroleico	9-dodecenoico	$C_{12}H_{22}O_2$ 12:1	-	-
Miristoleico	9-tetradecenoico	$C_{14}H_{26}O_2$ 14:1	-4,5	-
Palmitoleico	9-hexadecenoico	$C_{16}H_{30}O_2$ 16:1	0,5	210
Oleico	9-octadecenoico	$C_{18}H_{34}O_2$ 18:1	16,3	286
Linoleico	9,12-octadecadienoico	$C_{18}H_{32}O_2$ 18:2	-6,5	229,5
α -Linolénico	9,12,15-octadecatrienoico	$C_{18}H_{30}O_2$ 18:3	-12,8	231
Gadoleico	11-eicosenoico	$C_{20}H_{38}O_2$ 20:1	24	-
Araquidónico	5,8,11,14-eicosatetraenoico	$C_{20}H_{32}O_2$ 20:4	-49,5	170
EPA	5,8,11,14,17-eicosapentaenoico	$C_{20}H_{30}O_2$ 20:5	-53,5	-
Erúxico	13-docosenoico	$C_{22}H_{42}O_2$ 22:1	33,4	265

(Acosta, 2008)

Tabla 13: Materias primas para la elaboración de biodiésel.

Materia prima	Ejemplos		Referencias	
	Nombre común	Nombre científico		
Origen vegetal	Aceites convencionales	Colza	<i>Brassica napus</i>	Mittelbach et ál. (1983) Peterson y Scarrah (1984) Mittelbach y Enzelsberger (1999)
		Soya	<i>Glycine max</i>	Freedman, Butterfield y Pryde (1986) Noureddini y Zhu (1997)
		Girasol	<i>Helianthus annuus</i>	Vicente, Martínez y Aracil (1998) Antolín et ál. (2002)
		Palma	<i>Elais guineensis</i>	Yoo et ál. (1998) May, Ngah y Basiron (1995) Darnoko y Cheryan (2000a y 2000b) Benjumea, Agudelo y Cano (2004)
	Aceites alternativos	Cardo	<i>Cynara cardunculus</i>	Encinar et ál. (1999) Vicente, Martínez y Aracil (2006)
		Piñón	<i>Jatropha curcas</i>	Foidl et ál. (1996) Pramanik (2003) Tiwari, Kumar y Raheman (2007)
		Mostaza etíope	<i>Brassica carinata</i>	Cardone et ál. (2002)
		Camelina	<i>Camelina sativa</i>	Fröhlich y Rice (2005)
		Caucho	<i>Hevea brasiliensis</i>	Ikwaagwu, Ononogbu y Njoku (2000) Ramadhas, Jayaraj y Muraleedharan (2005)
		Coco	<i>Cocos nucifera</i>	Jitputti et ál. (2006)
		Higuerilla	<i>Ricinus communis</i>	N. D. L. da Silva et ál. (2006) Conceicao et ál. (2007)
		Cártamo o alazor	<i>Carthamus tinctorius</i>	Meka, Tripathi y Singh (2007)
			<i>Pongamia pinnata</i>	Meher, Dharmagadda y Naik (2006)

(Acosta, 2008)

Tabla 14: Materias primas para la elaboración de biodiésel.

	Linaza	<i>Linum usitatissimum</i>	Varma y Madras (2007)
			Zhang et ál. (2003)
		Aceites de fritura usados (aceites fritos)	Y. Wang et ál. (2006)
Origen vegetal		Subproductos de la industria de aceites comestibles	Jin et ál. (2008) Haas (2005b)
		Subproductos de la industria papelera	Altiparmak et ál. (2007) Miao y Wu (2006)
		Aceite de microalgas	Xu, Miao y Wu (2006)
			Chisti (2007)
Origen animal			Ma, Clements y Hanna (1998) Lee, Foglia y Chang (2002)
		Cebo de res, manteca de cerdo, aceite de pescado y subproductos de la industria avícola	Nelson y Schrock (2006) Joshi y Pegg (2007)

(Acosta, 2008)

d. Clasificación y composición. Según los estudios realizados desde que se empezó la producción de biodiésel se puede ver que cualquier fuente renovable de triglicéridos es materia prima apta para la producción de biodiésel, comúnmente se puede observar la clasificación entre las grasas dependiendo de su origen, ya sea vegetal o animal. En el caso de los aceites vegetales convencionales, que son de disponibilidad local, son utilizadas en países como Austria, Alemania, Francia, España y demás países de la unión europea, partiendo del aceite de semillas oleaginosas, entre los cuales se pueden observar las semillas colza, girasol, aceite de soya y aceite de fruto de palma. Sin embargo es importante mencionar que la industria como tal se dio con el aceite de colza, la materia prima que fue primeramente utilizada a nivel mundial, ya que tiene como característica principal la obtención de muchos aceites monoinsaturados combinados con ácidos grasos saturados y poliinsaturados, esto es importante ya que provee un balance entre su estabilidad química y un comportamiento muy importante a bajas temperatura. (Knothe, *et al.*, 2010)

Aun cuando se cuentan con una gran cantidad de materia prima que se puede utilizar para la obtención de biodiésel, todas las materias primas son muy importantes y competitivas en el ámbito alimenticio, por lo que hoy en día se prueban alternativas nuevas como los aceites de fritura usados, este tipo de materia prima es muy conveniente principalmente por costos. Este

tipo de semillas son de producción masiva y se encuentre en competencia en el mercado. Alimenticio, por lo tanto presenta un elevado costo ya que al ser comparado con combustibles como el petróleo crudo o diésel convencional, posee un alto costo. (Knothe, *et al.*, 2010)

e. Componentes básicos para la realización. Se cuenta con un tanque de almacenamiento de aceite que puede ser un cilindro de metal que cuenta con una tapadera que se coloca sobrepuesta, un tanque en el cual se almacena metanol, cuidando que no tenga fugas o fuentes de ignición. En el momento de la reacción se tiene un reservorio de menor capacidad para que se pueda manejar metóxido y de esta forma se pueda catalizar, empleando un agitador y soporte e presión, con el cual al darse un calentamiento se puede producir satisfactoriamente la transesterificación. (Knothe, *et al.*, 2010)

Es importante que en una planta de biodiésel se empleen bombas centrífugas una que los rangos de viscosidad de operación para evitar cualquier arreglo. Por otro lado en el aspecto de la seguridad es importante contar con instrumentos de seguridad como lo son las válvulas de seguridad, termómetros de contacto. (Knothe, *et al.*, 2010)

Un cálculo muy importante en un proceso donde no existe acumulación de materiales es la siguiente ecuación:

Ecuación 1: Balance de masa realizado para el sistema de biodiésel.(Himmelblau, 1997)

$$\text{entradas} = \text{salidas}$$

Esto es muy importante ya que permite conocer la separación de materiales y finalmente su eficiencia o la composición de las sustancias por sus fracciones molares o fracciones masa.

Debido que algunas reacciones químicas necesitan recibir energía en forma de calor o dar energía en forma de calor al ambiente, existen diferentes formas de calcular estos cambios.

Una ecuación general es:

Ecuación 2: Balance de energía del sistema. (Himmelblau, 1997)

$$\Delta E = \Delta U + \Delta P + \Delta K = Q + W$$

Donde los términos U, P y K se refieren a la energía interna, potencial y cinética, así como Q y W se refieren a calor y trabajo.

Una generalidad del balance de energía es la siguiente:

Acumulación de energía dentro del sistema
 = transferencia de energía al sistema
 – transferencia de energía afuera del sistema + generación de energía
 – consumo de energía del sistema.

1) Transferencia de calor. Para fines de diseño se utilizan comúnmente las ecuaciones de transferencia de calor que involucran conducción, convección y radiación de un cuerpo gris.

Para conocer la cantidad de energía que se necesita transferir por unidad de tiempo a una cierta cantidad de materia, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$q = \dot{m}_i C_{p_i} \Delta T$$

Ecuación 3: Determinación de calor. (McCabe, 2007)

Para medir la velocidad de transferencia de calor a través de una pared se puede utilizar la ecuación general:

$$\frac{q}{A} = \frac{\Delta T}{R}$$

Ecuación 4: Relación de calor. (McCabe, 2007)

Donde $R = x/k$, donde k es la conductividad térmica del material y x el grosor del material.

En cuanto a los cálculos de calor en donde existe transferencia de calor por convección, se tiene que:

$$q_{\text{convección}} = h_i A \Delta T$$

Ecuación 5: Calor de convección determinada en el proceso. (McCabe, 2007)

Donde h se denomina coeficiente de convección. Este puede encontrarse en la literatura o calcularse de la siguiente forma según la ASHRAE:

$$h = 2.39 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{1/4}$$

Ecuación 6: Determinación de altura el sistema. (ASHRAE, 2002)

Otra forma de transferencia de calor es la radiación, la cual juega una menor proporción en cuanto a la transferencia de calor de un cuerpo a otro pero no dejando de ser significativa:

$$q_{\text{radiación}} = \sigma A \varepsilon (T_1^4 - T_2^4)$$

Ecuación 7: Calor de radiación. (McCabe, 2007)

Donde σ es la constante de Boltzmann 5.6697×10^{-8} W/m²s y ε es una constante para diferentes materiales. La literatura muestra 0.08 para metales pulidos.

Cuando existe un intercambio de fase que involucra cambio de estado, se sabe que el calor demandado para que esto ocurra está dado por:

$$q_{\text{vap}} = \dot{m} \lambda = \dot{m} (H_v - H_l)$$

Ecuación 8: Calor de vaporización. (McCabe, 2007)

2) Proceso industrial. Debido a los cambios de eficiencia y de condiciones óptimas de operación, los procesos industriales pueden variar de forma significativa, sin embargo el proceso en la planta piloto se describe de la siguiente forma: (Knothe, *et al.*, 2010)

- Ingreso de metanol, aceite, catalítico reactor.
- Entrar a un proceso de separar y salen metil ésteres a donde es necesario que pasen a un proceso de neutralización y remoción de metanol en donde se recibe ácido.
- Se obtiene una separación de agua de lavado con biodiésel, en esta parte ingresa agua para lograr una mejor separación entre el biodiésel y la glicerina, durante este sale agua de lavado como residuo.
- Se tiene un proceso de secado para obtener el biodiésel final.

- Con el subproducto del proceso se tiene glicerina a la cual se ingresa ácido y en el proceso de acidificación se tiene una liberación de ácidos grasos libres, para evitar cualquier pérdida es necesario que se tenga metanol crudo al 85% para poder almacenar lo que se utilizó. (Knothe, *et al.*, 2010)

Sabiendo las partes más importantes del proceso se cambia las condiciones en las cuales se agita la mezcla durante una hora a 60°C, esta planta tiene la capacidad de 4 millones de litros al año utilizan flujos continuos de producción. Las reacciones se llevan a cabo con un 80% de alcohol y catalizador son agregados al aceite en el reactor que tiene agitación, el otro 20% de metanol y el catalizador, en este caso se tiene una reacción completa para utilizar una cantidad de alcohol de una sola etapa. (Knothe, *et al.*, 2010)

En la segunda etapa la glicerina es removida el metil éster, dándose una separación de la glicerina y el biodiésel, esta extracción puede realizarse por decantación, es necesario que se tome en cuenta que el exceso del metanol actúa como un solubilizante, que en este caso la separación puede tardar más tiempo. En este proceso de separación no es recomendable que se extraiga el metanol ya que el proceso de transesterificación puede agregar agua a la mezcla y aumentar la separación de glicerina. (Knothe, *et al.*, 2010)

Posteriormente se tiene un proceso de neutralización y recuperación de metanol antes que se dé el lavado con agua, en este caso se agrega ácido al biodiésel que en este caso se puede neutralizar cualquier residuo de catalizador y separa el jabón que pudo haberse formado durante la reacción. Las sales que se obtengan en este paso se retirarán incluyendo lavado con agua y los ácidos grasos permanecerán en el biodiésel, es aquí donde se logra remover cualquier cantidad de hidróxido de sodio jabón, sales, metanol o glicerina que puedan permanecer en el biodiésel. En el caso del método de neutralización se puede reducir la cantidad de agua que se utiliza y se puede realizar con evaporación empleando vacío. (Knothe, *et al.*, 2010)

Al caracterizar la glicerina es necesario tomar en cuenta que este compuesto posee 50% de otros componentes como metanol, base y jabón, debido a esta cantidad de se puede obtener los ácidos grasos que subirán a la superficie en donde ellos puedan ser removidos y reciclados, para tener una recuperación. (Knothe, *et al.*, 2010)

$$\Delta E = \Delta U + \Delta P + \Delta K = Q + W$$

Ecuación 9: Balance de masa (Knothe, *et al.*, 2010)

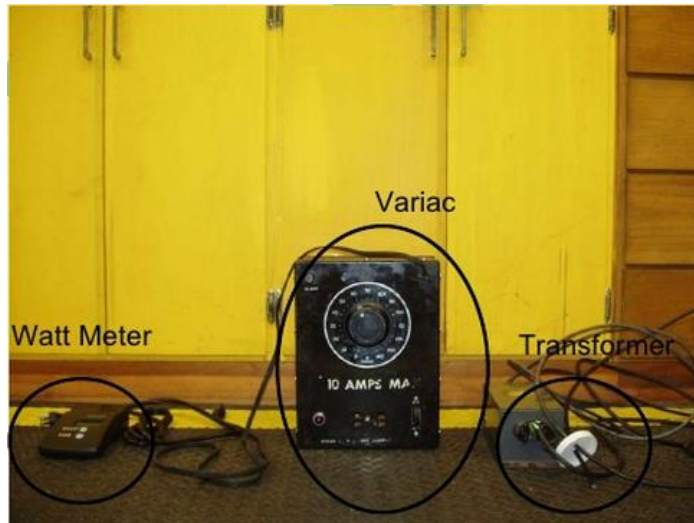
En este caso los términos de U, P y K dan referencia a la energía interna, potencial y cinética, se hace la constancia que la acumulación de energía dentro del sistema se da por 3 factores entre los cuales se puede ver la suma de transferencia de energía al sistema y la generación de energía restando la cantidad de consumo del sistema. Condiciones de operación de planta de biodiésel utilizada en laboratorio de operaciones unitarias de la UVG.

f. Mejoras en el proceso de elaboración de biodiesel. Uno de los principales problemas con respecto a la producción de biodiésel son los problemas con los residuos obtenidos, siendo esta la presencia de glicerina en el biodiésel como producto terminado. Este subproducto es un líquido viscoso incoloro, inodoro, higroscópico y dulce, tiene un punto de ebullición de 290°C y es miscible con el agua y el etanol. (Piedmontbiofuels, 2012)

g. Método de separación del biodiésel y glicerina utilizando voltajes altos. Se han realizado varias pruebas en las que se comprueban que la tecnología de altos voltajes logran una separación del 99.7% en un flujo de 4L/min, este tipo de tecnología es bastante eficiente debido al principio teórico que sigue, ya que se sabe que el subproducto de glicerina posee partículas cargadas, las cuales al tener contacto con una corriente eléctrica las mismas se alinean y logran agruparse, ya agrupadas logran precipitar en la solución. (Piedmontbiofuels, 2012)

En las pruebas realizadas con anterioridad se puede ver cómo es importante la caracterización de la conductividad de la glicerina y el biodiésel utilizando un transformador, se tiene un electrodo que es espaciado aproximadamente 1 "horizontalmente del contenedor de la solución. Cuando la caracterización es lograda es necesario identificar las limitaciones y condiciones para la separación de ambos componentes con un voltaje alto, esto se ha realizado empelando electrodos que logran responder a un voltaje mínimo de prueba y una resistencia de poder. El equipo necesario para las pruebas son los siguientes: (Piedmontbiofuels, 2012)

Imagen 2: Equipo utilizado para la metodología.



(Piedemonte biofuels, 2012)

De la misma forma en la que se midió la cantidad adecuada de voltaje y el comportamiento de la solución con este tipo de voltaje y corriente, se puede medir el tiempo necesario para poder ver la eficiencia del método y tecnología, en este caso varios estudios han logra comprobar que en 90 segundos se logra separar el 90% de la solución. (Piedemonte biofuels, 2012)

Por lo tanto, se pueden tomar en cuenta variables importantes para la realización de este método y medir su eficiencia, como el voltaje, tiempo, distancia del electrodo o celda electrolítica empelada, configuración de la misma, contenedor utilizado, concentración de productos secundarios como jabón, contenido de ácidos grasos libres (FFA) y concentración iónica.(Piedmontbiofuels, 2012)

Los resultados más importantes de los experimentos realizados denotaron que el voltaje alto es efectivo en la técnica de separación con una separación de 90% en menos de 1 minuto, voltajes del orden de 2000 V logra encontrar el nivel de separación indicada, esto comprobó que la glicerina posee el doble de conducción que el biodiésel, utilizando el control con un variac la cual se obtiene la cantidad de conductividad total. Con respecto a la utilización del Variac, la configuración más eficiente era la posicionada en 5, en donde se transforman voltajes utilizados en voltajes con rangos mucho más altos. Con respecto a las distancia de cada electrodo decrece con el tiempo para poder alcanzar una mejor separación, en las investigaciones realizadas se tomar una distancia del rango de 5.1 a 8.0 cm para un 0% de FFA, en donde se

logró concluir que el tiempo de separación tiende a crecer mientras la distancia del electrodo desciende. Por otro lado para un nivel bajo en el porcentaje de FFA muestra una separación con mayor velocidad que si se cuenta con niveles altos de FFA, por lo tanto los experimentos realizados comúnmente se realizan a un porcentaje de 0% y 2%. (Piedmontbiofuels, 2012)

Por lo tanto el alto voltaje en este caso es la solución al problema de separación, ya que en los observado con los experimentos pasados para comprobar esta técnica se puede observar formación de glóbulos en la glicerina y esto minimiza la resistencia, provocando una precipitación al fondo del recipiente, explicando como la corriente de alto voltaje en este tipo de compuestos. (Piedmontbiofuels, 2012)

h. Pruebas de calidad. Se realizan antes que el biodiésel empiece a ser utiliza en un automóvil, ya que tiene muchos puntos en juego para el desempeño del sistema del automóvil, tomando en cuenta que puede ser posible el deterioro de los inyectores del motor. Hay un sinnúmero de métodos dedicados de medir la calidad de biodiésel involucrado en la calidad del combustible, como el empleo de método sofisticado como cromatógrafo de gas, espectrómetro de masa, sin embargo hay mediciones rápidas que no dependen de equipos demasiados costos. De esta forma se empieza con la comparación con los demás lotes, sin embargo es necesario cuantificar los datos importantes y características importantes de biodiésel como las pruebas siguientes: (Bornstein y Bowen, 2010)

- Prueba para jabón y catalizador: Es necesario para evitar corrosión de inyectores de combustible y frecuentemente el contenido de jabón se usa como un indicador de la calidad de un lote de biodiésel, este método parte de la reacción que tiene los jabones con el ácido para la formación de sales, así como la reacción con cualquier residuo de catalizador, se puede realizar una titulación con dos indicadores de pH diferentes y de esta forma cuantificar la cantidad de catalizador y de jabón que se encuentra en el biodiésel, empleando un indicador base como lo es la fenolftaleína con un pH de 8.3 – 10, hasta lograr una neutralización, por lo que todo el catalizador reaccionar{a para formar agua, manteniendo un estado intacto para los jabones, partiendo de la titulación anterior se puede llegar a pH 3-0 a 4-6 con un indicador de bromo fenol, en donde se puede ver la presencia de ácidos grasos. Todo este procedimiento puede ser realizado empleando un electrodo de un potenciómetro para encontrar los pH necesarios. (Bornstein y Bowen, 2010)
- Prueba de densidad: Se compara teniendo en cuenta la densidad del biodiésel, el cual es un parámetro bastante marcado en diferencia el agua o glicerina, sin embargo esto funciona siempre y cuando se realice de la misma aceite. Los pasos más importantes

para realizar la prueba de densidad es medir la cantidad precisa de agua dentro de un recipiente, de preferencia un picnómetro, el cual debe ser un recipiente y pesarlo, realizar la medición con el biodiésel puro, como los valores de densidad y peso del agua se puede calcular el volumen del recipiente utilizado y de esta forma con el volumen y peso conocido del biodiésel se tiene una densidad determinada. En ciertos casos se puede realizar con ayuda de aceite se puede emplear el factor de conversión siguiente: (Bornstein y Bowen, 2010)

$$\% \text{ de conversión} = 100 \times \frac{(\text{peso de la muestra} - \text{peso del aire})}{(\text{peso del biodiesel} - \text{peso del aceite})}$$

Ecuación 10: Factor de conversión de densidad empelando aceite. (Bornstein y Bowen, 2010)

Tiene limitantes ya que es sensible a impurezas y se tiene un cambio de densidad muy pequeño mientras que si se tiene el mismo tipo de aceite para cada muestra lo que puede indicar una reacción incompleta o impurezas dentro del biodiésel, como presencia de glicerina. (Bornstein y Bowen, 2010)

i. Teoría de lavado del biodiesel. Algunas impurezas solubles en agua quedan en el biodiésel, estas se encuentran en todo el biodiésel fabricado artesanalmente, independientemente de la calidad de la reacción de aceite, la mayoría de contaminantes pueden ser jabones, en una pequeña cantidad residuos de metanol, lejía y glicerina libre, el agua puede remover estos contaminantes, sin embargo aún quedan los mono y di glicéridos que provienen de una reacción incompleta. Sin embargo el lavado puede tener como ventajas detener el resto de la reacción lenta y evitar que la glicerina siga sentándose durante un periodo de meses o semanas, lo cual puede detenerse al retirar el metanol, siendo influyente en el control de calidad del combustible. (Fernández, M., 2011)

La temperatura es un factor importante para realizar el lavad, ya que trabajar con agua y biodiésel a una temperatura mayor a la temperatura ambiente es más difícil, se tiene más oportunidades para provocar una emulsión que si se utilizan fría, es necesario evitar lavar el biodiésel ya que representa un costo más en el proceso. El tiempo de asentamiento entre el biodiésel y la glicerina es determinante para un mejor y más fácil proceso de lavado. (Fernández, M., 2011)

1) Métodos de lavado

- **Lavado con burbujas:** Se añade agua gentilmente al biodiésel, agregar una piedra de aire de acuario y luego colocar una bomba de aire en la porción de agua que logre burbujear el aire a través del agua. Estas burbujas de aire recogen una cantidad diminuta de agua y se da un transporte a través del biodiésel, se crea una agitación en el cual se remueve jabones y otros contaminantes. En la parte superior se deja caer el agua recogida lo cual absorbe más contaminantes a medida que baja por la solución. (Fernández, M., 2011)
- El tiempo de saturación dependerá de la cantidad de agua se use, la cantidad de lavados que se han hecho y el sistema de burbujeo. Se debe de continuar lavando con burbujas hasta que el agua de lavado se mantenga transparente durante el lavado. Otro parámetro importante para ver la calidad de lavado es utiliza pH antes y después de lavado, si se mantiene igual significa que ya no hay más contaminantes que remover. (Fernández, M., 2011)
- **Lavado mediante atomización:** Se utiliza más agua y un equipo más complicado, se emplear un atomizador suspendido sobre un recipiente de biodiésel. Las minúsculas gotas de agua que rocía el atomizador caen y pasan lentamente por el biodiésel, agitando el combustible menos que el lavado con burbujas y remueve los contaminantes gradualmente, la agitación más gentil de menos lugar a los jabones, monos y di glicéridos que forman una emulsión. (Fernández, M., 2011)
- **Lavado estático:** Es la forma más gentil de lavado, el cual no requiere de equipo y necesita muy poco trabajo. Consiste en verter agua a temperatura elevada en un tanque de biodiésel y dejar que los líquidos reposen juntos. El contacto que se da entre la capa de agua base y la de biodiésel crea un efecto de limpieza lento, esto debido a la polaridad del agua y a las corrientes de convección creadas a medida que la temperatura se equilibra, siendo el lavado inicial por excelencia. El tiempo que se toma para que el agua se satura depende principalmente de su temperatura, cantidad de agua y el tipo de tanque de lavado que se utilice, este lavado tiene la capacidad de realizarlo por lote como los anteriores, sin embargo puede tardarse varias semanas entre el lavado de un lote con otro. (Fernández, M., 2011)
- **Lavado con agitación:** Es el lavado más efectivo, aun cuando se da la mezcla mecánica se tiene el riesgo de tener la formación de una emulsión si el biodiésel no ha terminado de reaccionar, este variará dependiendo del clima y la estrategia que se utilice para realizar la mezcla, teniendo como características que es más violenta y más larga, siendo esto determinante para la formación de emulsión. (Fernández, M., 2011)

2) Emulsiones. Sistemas de al menos dos fases en las cuales un líquido se encuentra disperso en otro líquido en la forma de glóbulos o gotitas pequeñas. Desde el punto de vista termodinámica no poseen estabilidad, ya que al tener un aumento en el área en el proceso de emulsificación, ya que tiene un incremento en la entalpía libre de Gibbs. Esto se describe con la siguiente ecuación:

$$\Delta G = \gamma \Delta A$$

γ = Tensión superficial

ΔA = Área de emulsificación

Ecuación 11: Incremento de entalpía libre de Gibbs. Hernández, M., 2009)

Se utiliza un agente surfactante para encontrar la estabilidad relativa de la emulsión, se tiene un período de tiempo suficientemente largo. (Hernández, M., 2009)

Componentes de las emulsiones:

- Fase dispersa (discontinua)
- Fase dispersante (continua)
- Emulsionante

(Hernández, M., 2009)

Las emulsiones forman parte de una clase más genérica con sistemas de dos fases que reciben el nombre de coloides, ya que implican que tanto la fase dispersa como la continua son líquidos. Las emulsiones son sistemas termodinámicos inestables por el valor de energía libre de Gibbs es mayor a cero y tiene una tendencia espontánea en la separación de fases. (Hernández, M., 2009)

La tensión superficial de las emulsiones es generalmente del orden 1 a 10 mN/M, se tienen una entropía de formación de emulsión que es relativamente pequeña, con gotas pequeñas y numerosos y permiten la inestabilidad termodinámica de la emulsión. Gracias a los surfactantes se puede tener emulsiones cinéticamente estables debido a la adsorción de la interface. (Hernández, M., 2009)

a) Emulsionantes. Son partículas sólidas insolubles, que se encuentran finamente divididas en la fase dispersa y el medio dispersantes, son solubles por lo menos en una de las fases, los cuales se describen como tensoactivos. (Hernández, M., 2009)

Es necesario tomar en cuenta el límite entre la zona polar y no polar, en donde se da el cambio entre las características hidrofóbicas o hidrofílicas. Si se tiene una fase de características acuosas y oleosas se puede tener un valor de balance hidrofílico- lipofílico (HLB). En donde se tiene emulsiones que consisten en moléculas que combinan ambos grupos polares y no polares. (Hernández, M., 2009)

b) Surfactante. Contracción de la expresión de agente de actividad superficial, tiene como objetivo principal es facilitar la extensión de la interfase durante el proceso de emulsión retardando la coalescencia de las gotas de fase dispersa. (Hernández, M., 2009)

c) Tipos de emulsiones. El tipo de emulsión se determina por la medición de conductividad eléctrica, ya que es proporcional a la conductividad de la fase continua o externa al porcentaje volumétrico de dicha fase en la emulsión. (Hernández, M., 2009)

Existen alrededor de tres tipos de emulsiones inestables, entre los cuales tenemos:

- Floculación: Formación de masa de las partículas de la fase dispersa
 - Cremación: Concentración de partículas que se concentran en la superficial, esto va a depender de la densidad de las fases involucradas.
 - Coalescencia en donde las partículas se funden y forman una capa de líquido. (Hernández, M., 2009)
- **Emulsiones simples.** Son mezclas formadas en solubilidad de aceite en agua (Oil in Water) o de aceite dispersas en agua (Water in oil). (Hernández, M., 2009)
 - **Emulsiones múltiples.** Sistemas líquido – líquido con una fase interna es una emulsión, puede darse la mezcla de del tipo de agua en aceite en agua, es posible que las pequeñas gotas que se encuentran en la fase interna sean de un líquido diferente a la externa. (Hernández, M., 2009)
 - **Bioemulsión.** Mezcla de dos emulsiones semejantes con fase externa idénticas o compatibles, se trata de una emulsión en la que se encuentre dos tipos de gotas

dispersas en una fase externa, si las mismas son del mismo líquido, en este caso se atribuye al tamaño de la gota, sin embargo si las gotas tiene naturaleza diferentes puede tender a coalescer. (Hernández, M., 2009)

- **Coalescencia.** Fenómeno de carácter binario en el que un gas y un líquido o ambos líquidos se aglomeran para formar dos capas de la solución. En el estudio de este fenómeno se toman en cuenta muchos factores como la transferencia en una dirección específica, viscosidad, área de contacto interfacial, difusividad, tensión superficial y los gradientes de concentración. (Hernández, M., 2009)

Entender los fenómenos de coalescencia tiene importancia en la optimización de sistemas químicos de distinta naturaleza, este tipo de fenómeno desarrollado en las emulsiones puede analizar procesos de formación de slurry, ya que se involucran directamente en la transferencia de masa de los reactantes y productos. Otro de los fenómenos en los que pueden ser aplicados en la coalescencia se puede aplicar en los procesos de filtración de pequeños contaminantes disueltos en el combustible y los aceites lubricantes. (Hernández, M., 2009)

La coalescencia no afecta únicamente de manera positiva en los procesos ya que puede producir un mayor costo operativo al proceso, ya que en procesos de transferencia de masa por ejemplo en burbujas, esto disminuye la transferencia de masa y así la eficiencia del reactor, en el caso de la separación de las emulsiones el tiempo de separación es determinante para la continuación de los procesos de producción. (Hernández, M., 2009)

Por el fenómeno de separación se utilizan sistemas en los que se pueda tener percepción visual de la formación de dos fases, este tipo de estudios se realizan para determinar los parámetros de medición. (Hernández, M., 2009)

Este fenómeno se da cuando las gotas alcanzan un espesor de orden de 200 Å, en donde son susceptibles a romperse y provocan la coalescencia y la formación de un volumen de fase separado. (Hernández, M., 2009)

d) Estabilidad de emulsiones. La aplicación de una diferencia de potencial entre los electrodos situados en una solución electrolítica, se da una atracción de los iones por los electrodos y genera una corriente eléctrica, este sistema está sujeto a las geometrías de la celda y de los electrodos, así como de la resistencia eléctrica del medio. (Mancilla, O., 2008)

El sistema más utilizado se puede desarrollar con electrodos planos y rectangulares de superficial S y una distancia L , dando una resistencia eléctrica dada por:

$$R = \rho L/S$$

Ecuación 12: Resistencia de electrodos utilizados. (Mancilla,O., 2008)

La resistividad del medio es el constante dentro de la celda y se relaciona por medio de la Ley de Ohm que relaciona lo siguiente:

$$R = \frac{V}{I}$$

Ecuación 13: Resistencia del sistema en función del voltaje y amperaje utilizado. (Mancilla,O., 2008)

Con esto se puede relacionar el inverso de la resistencia, la cual recibe el nombre de Conductancia en unidad de $1/\Omega$, se puede encontrar el inverso con la conductividad en unidades de $1/\Omega$ cm. La conductividad de las emulsiones es aproximadamente del mismo orden de magnitud de la conductividad de las soluciones salinas correspondientes con soluciones de del mismo orden de magnitud de la conductividad de la solución salina, mientras que las emulsiones pueden tener una relación de dos hasta tres órdenes de magnitud menores medidas en microSiemens/ cm. (Mancilla,O., 2008)

La estabilidad es una propiedad de fácil apreciación en los casos extremos en los que la emulsión coalesce completamente en algunos minutos o sin ningunas separación visible por varios meses. Se tiene una única medición de estabilidad de una emulsión la cual es la variación del número de gotas presentes en una muestra de emulsión en función del tiempo, esto no se puede obtener experimental mediante variación de la distribución de tamaño de gota en el tiempo, lo cual implica una perturbación o destrucción de la muestra. (Mancilla,O., 2008)

Un buen criterio de estabilidad es tomar el tiempo requerido para la separación de cierta fracción de la fase que coalesce, dando una clarificación primero, por otro lado se puede tomar el volumen porcentual no- separación de fase interna después de un tiempo fijo. Se puede tomar de base una curva de volumen de separación en relación del tiempo que tomar en realizarse dicha separación, en donde se puede ver al principio de las corridas no se separa ningún tipo de volumen, siendo el periodo de iniciación correspondiente a las gotas y el drenaje de la fase eserna hasta alcanzar una emulsión compactada. (Mancilla,O., 2008)

Imagen 3: Fracción de volumen coalescido en una emulsión, en función del tiempo.

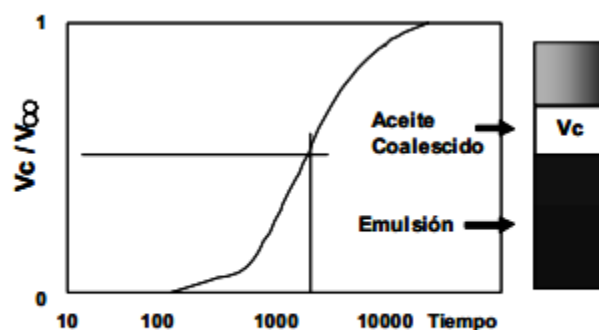


Figura 1.5 Fracción de volumen coalescido en función del tiempo.

(Mancilla,O., 2008)

e) Mecanismo de separación de emulsiones. La separación de una emulsión se da en un proceso de multietapa en donde se tiene tres etapas:

- Etapa 1: Acercamiento macroscópico de las gotas. Corresponde al acercamiento de dos gotas más o menos grandes con diámetros de 1 a 100 μm , debido al fenómeno de sedimentación gravitacional, esto viene dado por la ley de Stokes, en donde se supone gotas esféricas o de Hadamard en donde se considera el movimiento interno en las gotas y el efecto en la viscosidad de las mismas. Se puede hacer uso de calor para aumentar la velocidad de las gotas, en donde se da una reducción de la fase externa y aumenta la diferencia de densidad entre los fluidos. (Mancilla,O., 2008)

- Etapa 2: Drenaje de la película intergota. Deformación de las gotas en donde se da un adelgazamiento del orden de 0.1 micra o menos, se genera una película con un espesor alrededor de 500 A, dando el punto el inicio a la segunda etapa del proceso en donde se puede ver que están involucrados fenómenos interfaciales relacionados con la presencia de surfactantes adsorbidos. (Mancilla,O., 2008)

j. Ley de Stokes. Se refiere a la fuerza de fricción por objetos esféricos en un fluido viscoso con régimen laminar con número de Reynolds bajos, es válida para el movimiento de partículas esféricas pequeñas moviéndose a velocidad bajas, esto implica un flujo laminar lo cual puede traducir por velocidad muy pequeñas. Sigue la siguiente expresión

$$V = \frac{2r^2g(\rho_p - \rho_f)}{9\mu}$$

Donde:

V = Velocidad de la partícula

r = Radio equivalente de la partícula

g = gravedad

ρ_p = Densidad de la partícula

ρ_f = Densidad del fluido

μ = Viscosidad del Fluido

Ecuación 14: Ley de Stokes

1) Métodos de separación de emulsiones

a) Separadores gravitacionales. Se lleva a cabo en grandes recipientes o estructurales con el nombre de tanques, sedimentadores, tanques de lavado y eliminadores de agua libre, son utilizados con baffles para direccionar el flujo y platos de coalescencia, la emulsión es separada por gravedad y esta provoca ahorros en el uso de combustible, ya que no es necesario calentar, ya la alentar puede provocar problemas de incrustación y el uso adicional de tratamiento químico costoso para prevenir la incrustación. Los tanques de lavado pueden recibir el nombre de Gun Barrels, estos recipientes usualmente operan con media parte de agua y otra parte con el líquido en mezcla, como puede ser combustibles. (Mancilla, O., 2008)

Ingresan la emulsión en el área de desgasificación y se produce la liberación de gas remanente por un sistema de venteo, en donde la fase líquida desciende por el tubo desgasificador y entra en la zona del agua de lavado a través de un distribuidor, en donde se encarga de esparcir la emulsión lo más eficiente y de esta forma aumentar el área de contacto entre el agua de lavado y la emulsión, esto favorece la coalescencia de las partículas de agua. (Mancilla, O., 2008)

La emulsión fluye a través del agua en el interior del tanque de lavado siguiendo la trayectoria forzada por baffles internos que permiten incrementar el tiempo de residencia. Las limitantes de este sistema es el tiempo de residencia el cual puede alcanzar hasta 36 horas. A nivel industrial se mencionan los tanques de lavado tipo helicoidal, tanques de tipo rasurado, concéntrico o araña. (Mancilla, O., 2008)

b) Calentadores. Se encuentran de tipo directo e indirecto en función de la forma en que se aplica el calor. Los que son de tipo directo el calor es transferido por contacto directo de la corriente alimentada con la superficie interna del calentador. Presenta

limitantes como problemas de sedimento y corrosión, se puede tener un manejo de mayores volúmenes de fluido o menor gasto de combustible que los calentadores indirectos, es necesario aplicarlo a fluidos que no son muy corrosivos. (Mancilla,O., 2008)

Industrialmente se utilizan calentadores de fuego directo con cajas de fuego de tipo vertical, las ventajas de este tipo de calentadores en la utilización del crudo caliente obtendrán para poder calentar la emulsión ingresada por medio de un intercambiador de calor, sin embargo no es recomendable aplicar calor para eliminar grandes cantidades de agua libre de una emulsión. (Mancilla,O., 2008)

Para prevenir la deposición de los sedimentos se puede instalar “hidrojets” que operan a una presión constante de 30 psi que va por arriba de la presión de operación del calentador, esto ayuda a remover los sedimentos para su posterior drenado por la parte inferior del recipiente o utilizar inhibidores de corrosión. (Mancilla,O., 2008)

En los calentadores de tipo indirecto, el proceso de transferencia de calor se efectúa mediante un baño de agua caliente en donde la tubería que transporta la emulsión se encuentra sumergida y transporta la emulsión. Es posible que se dé la recuperación de calor como lo es el gas de salida de las turbinas. (Mancilla,O., 2008)

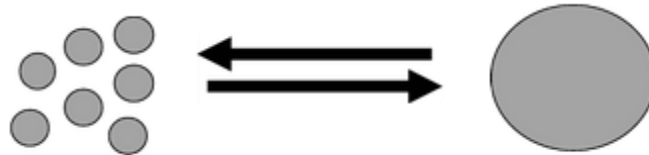
c) Coalescedores electrostáticos. Consiste en someter a la emulsión a un campo eléctrico intenso, el cual es generado por un alto voltaje entre dos electrodos. Tiene muchas características similares a los equipos de separación mecánica presurizados, estos equipos funcionan con altos voltajes, con la aplicación de un campo eléctrico sobre la emulsión y se da la formación de un dipolo eléctrico de las gotas de agua, esto origina atracción entre las gotas, produciendo un incremento en su contacto y posterior coalescencia, esto provoca un aumento en el tamaño de las gotas, lo cual permite el proceso de sedimentación por gravedad. (Mancilla,O., 2008)

Entre las ventajas de este sistema es una mayor flexibilidad, menor tiempo de residencia, menor dimensión de equipo, mejor calidad de la emulsión separada, se tienen variaciones en los volúmenes de producción utilizados. Se puede utilizar cuando se tienen emulsiones que las velocidades de asentamiento por gravedad es muy lenta, debido a la ley de Stokes. (Mancilla,O., 2008)

Con la presencia de un campo eléctrico se logra incrementar la coalescencia por el incremento de la polaridad y las gotas adquieren una carga eléctrica neta, con una distribución al

azar d elas gotas de agua en el interior de la emulsión, esto provoca una alineación con la carga positiva, la cual está orientada al electrodo con carga negativa. Como resultado se tiene fuerzas electrostáticas mucho más fuertes que la gravedad, aplicando un gradiente eléctrico típico de 5 kV/in. (Mancilla,O., 2008)

Imagen 4: Efecto de la coalescencia en las gotas.



V. METODOLOGÍA Y MATERIALES

1. Materiales a utilizar. Los materiales a utilizar para llevar a cabo las pruebas de las celdas electroquímicas son:

Tabla 2. Materiales requeridos para el proyecto.

Material	Cantidad	Dimensiones	Capacidad	Especificaciones
Beaker	1		4L	Pyrex
Beaker	1		2L	Pyrex
Contenedor	1	45 cm de largo 13 cm de profundidad 19 cm de ancho	11.2L	Vidrio
Lámina de aluminio	1	1m de largo 1m de ancho	Grado industrial	1mm \pm 0.005 de espesor
Lámina de hierro	1	1m de largo 1m de ancho	Grado industrial	0.9mm \pm 0.005de espesor
Lámina de cobre	2	1m de largo 1m de ancho	Grado industrial	1.01mm \pm 0.005 de espesor
Cables	2	50 cm de largo		
Conectores de lagarto	4			
Soportes universales	2			
Agitador magnético	1			
Cronometro	2			
Agua destilada	2	2L		
EDTA	2	2L		0.1M
Fuente de poder				DC Power Supply
Terratec	1	Saco de 25lb		

2. Medios hídricos

a. Diseño de la celda. La celda utilizada para el tratamiento de aguas residuales y la eliminación de metales por electrocoagulación consistió en un Beaker de 4000 ± 200 mL. Se llenó a 2500 ± 200 mL para poder sumergir los diferentes electrodos.

Los electrodos se realizaron de placas de aluminio, hierro y cobre. Las láminas tenían 10 cm de largo y 6 cm de ancho.

Además, fue necesario tener una fuente de poder, de 0 a 30V y una corriente de 0 a 3A y acoplar electrodos de hierro, cobre y aluminio todos con separaciones de 10 cm, la distancia se midió en un pequeño tubo utilizado para acoplar los electrodos, y las marcas de acople estaban a 10 cm una de la otra. Ver Anexos, Figura No. 19 Diseño de la celda electroquímica.

b. Toma de muestras. Se realizó tres tomas de muestras de aguas residuales de una planta de producción de baterías, que está ubicada en la zona 6 capitalina. En la planta se tomó tres muestras en tres días diferentes de la pileta número 1 de agua residual, lugar donde se encuentra la solución saliente del proceso en la producción de baterías de tipo cinc carbón y alcalinas. Esta pileta contiene el agua más contaminada de la planta, pues no ha sido tratada de ninguna forma. Se tomaron 4 L de muestra utilizando para cada corrida.

Las muestras fueron refrigeradas inmediatamente después de tomarlas para evitar cambios en su composición.

c. Caracterización de las condiciones de operación de las celdas. Las variables necesarias a medir durante el proceso de electrocoagulación serán:

- Concentración de manganeso.
- Concentración de cinc.

Según información por parte de la empresa, la utilización de un reactivo electrolítico dentro del proceso es el mayor contaminante del agua de proceso, contiene casi un tercio de su composición en manganeso, la mitad en cinc y el resto son aditivos químicos. Por ello se enfocó el estudio en estos dos metales y la medición de eficiencia en base a estos dos componentes.

d. Manipulación de variables a analizar. Se tendrán como variable en el proceso de electrocoagulación, las diferentes configuraciones posibles para los electrodos, con una separación no definida. Las posibles configuraciones son:

- Operación de electrodo de cobre y electrodo de aluminio.
- Operación de electrodo de cobre y electrodo de hierro.

Además, se tendrá como variable la corriente a usar y se tomaron dos mediciones durante el proceso. Las corrientes utilizadas fueron de 2 y 3 amperios.

e. Toma de muestras para medición de eficiencia. Se tomarán muestras de agua residual al inicio del proceso y una hora y media después de iniciado el proceso. Se analizará la diferencia en las propiedades caracterizadas para la celda en la fase de caracterización.

f. Sistema. El diagrama del sistema de electrocoagulación a utilizar se encuentra en la Figura # 5.

g. Método de medición de concentración de Manganeso. Para la medición de la concentración de Manganeso se utilizó el equipo Hach Datalogging Colorimeter DR/890, utilizando el programa número 41, el equipo es un colorímetro que realiza reacciones químicas y realiza la medición por absorbancia según la intensidad del color. El método de Manganeso, utiliza un rango de medición entre 0 y 20 mg Mn/L. Para este método validado se llevó a cabo los siguientes pasos:

- Encender el equipo y presionar el # 7 "Program".
- Colocar el número 41, para la medición de Manganeso en el rango de 0-20 mg/L.
- Preparar en una celda del equipo 10 mL de la muestra a analizar (blanco).
- Colocarlo dentro del equipo, cerrarlo y presionar el botón "Zero".
- Agregar un sobre del reactivo "Powder Cytrate Pillow".
- Agitarlo hasta que ambas sustancias estén mezcladas.
- Agregar un sobre del reactivo "Sodium Periodate Pillow".
- Agitarlo hasta que ambas sustancias estén mezcladas, un color rosado marcará la presencia de Manganeso.
- Luego debe presionarse Time Reaction y luego Enter.
- Inicialmente una reacción de 2 minutos.
- Al terminar el tiempo debe colocarse la celda del equipo, cerrarlo y presionar "Read".
- La pantalla mostrará la concentración de Manganeso en mg/L.

h. Método de medición de concentración de cinc. Para la medición de la concentración de Cinc se utilizó el equipo Hach Datalogging Colorimeter DR/890, utilizando el programa número 97, el equipo es un colorímetro que realiza reacciones químicas y realiza la medición por absorbancia según la intensidad del color. El método de Cinc, utiliza un rango de medición entre 0 y 3 mg Mn/L.

Antes de seguir con los pasos descritos por el manual del equipo, se procedió a realizar una dilución de la solución de agua residual, pues en la primera prueba se obtuvo que la concentración de cinc superaba los límites establecidos por el equipo.

Para esta dilución se utilizó un mL de solución de agua residual en 99 mL de agua destilada y luego de esta alícuota se tomaron las muestras para las mediciones.

Para este método validado se llevó a cabo los siguientes pasos:

- Encender el equipo y presionar el # 7 “Program”.
- Colocar el número 97, para la medición de Cinc en el rango de 0-3 mg/L.
- Preparar en una celda del equipo 20 mL de la muestra a analizar.
- Agregar un sobre del reactivo “Zyncover 5”.
- Agitarlo hasta que ambas sustancias estén mezcladas, un color anaranjado debería mostrarse para confirmar la presencia de Cinc entre el rango de medición, algún otro color como café o azul marcará que la medición está fuera de rango.
- Tomar 10 mL de la celda inicial y colocarlo en otra celda del equipo.
- A la segunda celda, agregar 0.5 mL de Ciclohexanona.
- Agitarlo de una manera fuerte durante 30 segundos.
- Luego debe presionarse Time Reaction y luego Enter.
- Inicialmente una reacción de 3 minutos.
- Al terminar el tiempo debe colocarse la celda inicial del equipo que no contiene ciclohexanona, cerrarlo y presionar “Zero”.
- En la pantalla deberá aparecer 0 mg/L.
- Luego debe colocarse en el equipo la segunda celda y presionar Read.
- La pantalla mostrará la concentración de Cinc en mg/L.
- El resultado debe multiplicarse por 99, para obtener la concentración real inicial para las mediciones iniciales.

3. Estudio de factibilidad medioambiental. Para la realización del estudio de impacto ambiental, se utilizó una matriz de aspectos ambientales significativos. Con la misma se evaluaron únicamente los aspectos ambientales significativos negativos, tomando en cuenta aspectos generales como el consumo de energéticos, agua, generación de desechos, emisiones al suelo, emisiones al aire, etc. Se cuantificó el impacto conforme a la cantidad o frecuencia, gravedad del impacto y la permanencia del impacto. Teniendo calificaciones de 10, 20, 40 y 80, siendo bajo, medio, medio alto y alto respectivamente. Los aspectos ambientales que tuvieran una sumatoria mayor o igual a 160 en estos tres aspectos fueron considerados como significativos. Ver anexo, figura Matriz de Aspectos ambientales.

4. Medios edáficos. Fase de estudio de suelos a tratar:

- Se determinó el tipo de contaminante que se va a tratar por electro remediación, esto es un contaminante metálico que puede extraerse fácilmente con la aplicación del método que económicamente viable.
- La toma de muestras de los suelos se realizó con base en estos análisis y se llevó al laboratorio para determinar las concentraciones del metal a trabajar, el cual será plomo (Pb) y su concentración en el suelo contaminado se tomará como punto de partida para determinar la eficiencia de las celdas. Estas muestras se darán en concentraciones de ppm por porción de tierra analizada a en fracciones peso.
- Se realizaron curvas características con base en las concentraciones de pH y números adimensionales de transferencia de masa contra el tiempo, para relacionar la efectividad de las variables controladas contra la disminución teórica de la concentración de plomo en la muestra contaminada.
- Se realizaron curvas de concentración respecto al tiempo que se determinarán a lo largo de la electrodeposición de los metales contaminantes.
- La toma de muestras se realizó en el laboratorio de operaciones unitarias de la universidad del valle de Guatemala con el suelo previamente analizado y utilizando porciones del volumen de la celda que se dejara en reposo para evitar la variabilidad de la concentración.
- La toma de resultados se realizó periódicamente una vez por semana para la medición de las eficiencias de la celda por un intervalo de operación de 3 horas obteniendo los valores de pH por cambios en la concentración de iones metálicos en el laboratorio de análisis instrumental en el transcurso de la semana para determinar las variaciones en las diferentes muestras.

5. Diseño de celda. Para el diseño de las celdas se utilizó un contenedor de vidrio rectangular de 13 cm de alto, 19 cm de ancho y 45 cm de profundidad, una fuente de poder, se utilizaron electrodos de placa, rectangulares de aluminio, cobre y hierro de 1mm de espesor con 13 cm de alto por 19 cm de ancho.

Se utilizó una porción de tierra conductora marca terratec en las esquinas de la celda electroquímica, esta tierra es un producto conductor a base de cemento, tienen una superficie conductora mayor a los sistemas convencionales y, por lo tanto, disminuyen la impedancia de descarga y la resistencia del terreno.

Las condiciones de operación y que será necesario medir durante el proceso de electrodeposición serán:

- pH. (constantes de estabilidad EDTA): Utilizando los valores de las constantes de estabilidad enunciadas por los experimentos de Masazuke, *et al.* Se planteará un modelo utilizando concentraciones conocidas de EDTA en la muestra y aplicando un modelo de cinética de reacción en la celda encontrar las concentraciones ideales de remoción a un pH óptimo.
- Temperatura.
- Concentración de iones metálicos (Plomo).
- Caudal de agua de fluidización de electrodo.

6. Manipulación de variables a analizar.

- Se tuvo como variable en el proceso de electrocoagulación, las diferentes configuraciones posibles para los electrodos, con una separación no definida con los electrodos de aluminio y cobre de 1 mm de espesor.
- Se tuvo como variable en el proceso la granulometría y propiedades químicas del suelo que presentan variación con los potenciales de electrodo y los métodos de electrorremediación.
- Se tuvo como variable controlada la concentración de EDTA en la muestra.
- Se tuvo como variable controlada el pH óptimo de estabilización para los iones PbX^{4-} obtenidos matemáticamente en el punto máximo de pH para asegurar el funcionamiento óptimo de la celda.
- Se tuvo como variable controlada del proceso la fluidización del agua en las paredes conductoras de electrodos para mejorar la transferencia de los iones metálicos.
- Además se tuvo como variable 3 voltajes diferentes a utilizar durante el proceso.

7. Caracterización de las condiciones de operación de las celdas. Se determinaron las condiciones iniciales de la muestra a tratar con la celda antes y después de llevar a cabo el proceso.

a. Manipulación de variables a analizar. Se analizó una configuración para los electrodos de la celda con distintos tiempos de operación, para analizar el efecto de los electrodos en el plomo contaminante en el reactor.

- Se utilizaron 2 electrodos, uno de cobre y uno de aluminio ubicados a 2.5 cm de cada extremo de la celda, con una separación entre los electrodos de 40 cm.
- Se utilizó una capa de 2cm de terratec para aumentar la difusividad y conductividad del

medio para conectar los electrodos con la tierra.

- Se agrega una cantidad de 800 ml de agua destilada distribuida uniformemente en la tierra del reactor.
- Se agrega una cantidad de 300 ml de EDTA 0.1 Na distribuida uniformemente en la tierra del reactor.
- La fuente de poder se mantendrá a corriente constante de 20 voltios y a 2 amperios durante 48 horas.

b. Toma de muestras

- Se analizará una muestra “aleatoria” representativas en sectores específicos de la celda, cerca de los electrodos y a la mitad de la distancia entre los electrodos, tomadas al final del proceso, analizando la diferencia en las propiedades caracterizadas para la celda en la fase de caracterización.

c. Tratamiento de biodiesel

Tabla 15: Equipo utilizado para realizar metodología de coalescencia electrostática y decantación por gravedad.

Cantidad	Equipo	Capacidad	Marca
3	Vaso de precipitados	250 mL	Pyrex
1	Vaso de precipitados	4000 mL	Pyrex
6	Placa de cobre 2' x 8' espesor 0.5 mm	-	-
6	Placa de aluminio 4' x 8' espesor 1 mm	-	-
1	Pipeta volumétrica	50 mL	Merck
2	Pinzas doble nuez	-	-
33	Tubos de ensayo de centrífuga($\varnothing=16$ mm)	10 mL	Pyrex
1	Agitador magnético	-	Thermolyne

Continuación - Tabla 16: Equipo utilizado para realizar metodología de coalescencia electrostática y decantación por gravedad.			
1	Barra de agitación	-	-
1	Soporte universal	-	.
2	Cables con lagartos de largo de 40 cm	-	-
1	Fuente de poder de CD (ver tabla 25)	-	-
1	Tijeras para cortar metal	-	-
1	Rollo de masking tape	-	-
2	Palillos de plástico de 20 cm de largo	-	-
2000 mL	Mezcla de biodiésel-glicerina al 20%	-	-
1	Multímetro digital ES 480 Fluke-87- 5	-	-
1	Cronómetro digital CASIO	-	-
1	Ampollo de decantación	500 mL	Fisher
1	Atomizador de agua	1000 mL	-
1	Hoja de papel milimetrado	-	-
1	Picnómetro	25 mL	Brand Duran Germany
1	Electrodo para medición de pH(ver tabla 26)	-	-

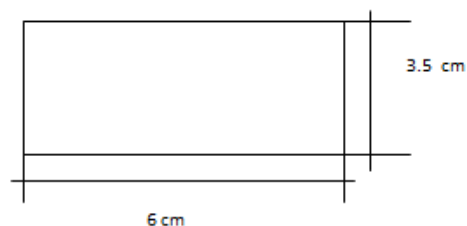
8. Metodología de determinación de tiempo de separación entre la fase de biodiésel y glicerina

a. Procedimiento

- Se cortaron las placas que se utilizaron para la metodología de coalescencia electrostática, se utilizó dos placas para los electrodos del mismo material, las dimensiones son proporcionadas por el módulo de megaproyecto de diseño de decantador electrostático. Para esta metodología se utilizan dos placas de

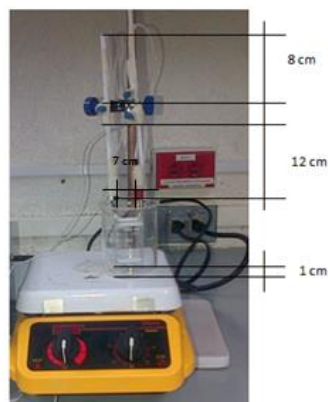
aluminio y dos placas de cobre, utilizando las tijeras para cortar metal., cortadas en las dimensiones indicadas en la siguiente imagen.

Imagen 5: Dimensiones de las placas de metales utilizadas como electrodos.



Se realizó el montaje de la base del decantador empleando un agitador magnético, soporte universal en donde se colocó las placas de metal del mismo material con los cables lagartos adheridos a los palillos de plástico utilizando masking tape, las celdas se introducen en el beaker de 250.00 ± 0.05 mL, lo cual se puede observar en la siguiente imagen.

Imagen 6: Sistema de decantador electrostático.



Después de la medición de las dimensiones del sistema se movieron los electrodos hacia arriba para agregar el volumen de emulsión a tratar, utilizando las pinzas doble nuez para subir y bajar el sistema.

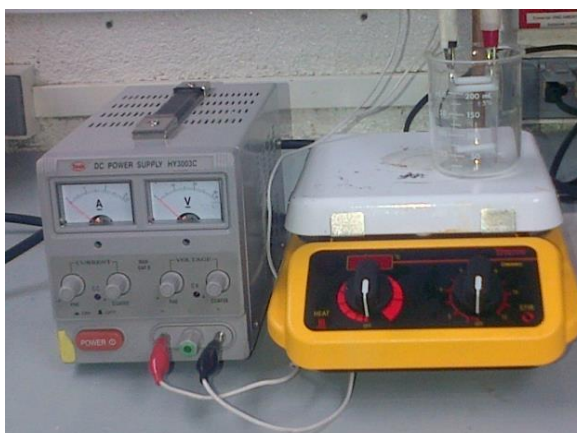
Paralelo al proceso de montaje del sistema de coalescencia electrostática se colocó la mezcla biodiésel- glicerina en agitación constante para evitar la separación de la emulsión, la agitación se regula en el nivel 8 y se mantiene en agitación durante toda la medición, según la siguiente imagen.

Imagen 7: Sistema de agitación de emulsión (biodiésel – glicerina) utilizando un beaker de 4 L.



- Antes de introducir las placas de metal (electrodos) se comprobó el paso de corriente, esto se puede realizar utilizando un multímetro para ajustar la corriente necesaria en la fuente de poder , en este caso se utilizó 2.00 ± 0.05 A. Posterior al ajuste se procede a conectar los cables lagartos . (Importante tener apagada la fuente de poder hasta que todo el sistema esté listo para las mediciones de tiempo)

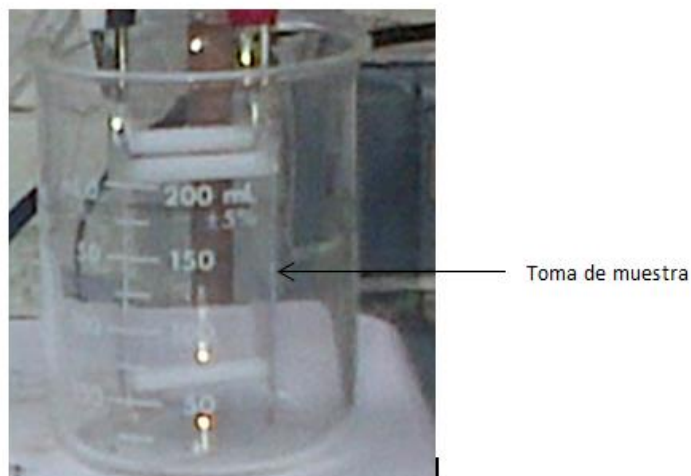
Imagen 8: Conexión del sistema de coalescencia electrostática a la fuente de poder de corriente directa.



- Se introdujo 200.00 ± 0.05 mL de la mezcla de biodiésel –glicerina utilizando una pipeta volumétrica de 50 ± 0.05 mL hasta llegar al volumen establecido en el beaker de 250 mL.
- Al tener el volumen total de la emulsión a tratar, se aplicó agitación dentro del beaker de 250 mL durante 1 minuto, para evitar la separación de fases antes de dar comienzo a la medición.
- Se Colocó 11 tubos de ensayo, para poder agregar los volúmenes de la mezcla tratada, esta cantidad de tubos de ensayo son necesarios para los sistemas de aluminio-aluminio y cobre- cobre.
- Con ayuda de un cronómetro Casio se realizaron las mediciones, la primera medición se tomó pasados 30 segundos y posteriormente se realizaron mediciones cada minuto hasta llegar a 10 minutos.
- Se bajó las celdas a la distancia de 1 cm con el fondo del beaker, como aparece en la imagen 6, se presionó el botón “power” para empezar las mediciones y toma de muestra.

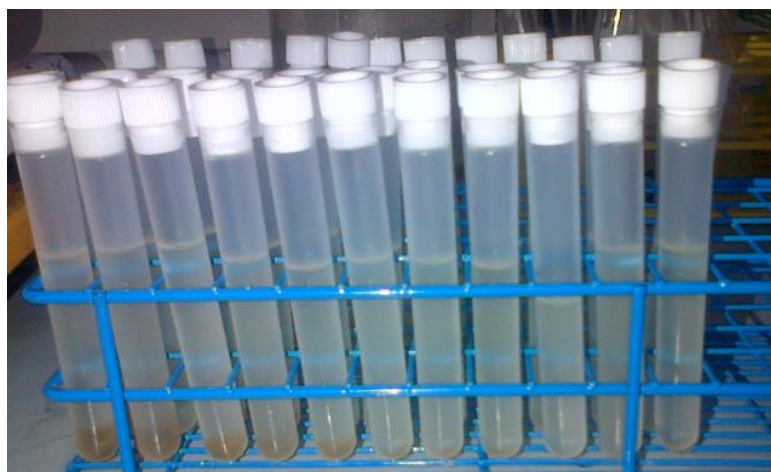
Con cada medición se tomó una muestra de 5.00 ± 0.05 mL con una pipeta graduada, la muestra se tomó a la mitad de la altura de las placas de metales para poder evaluar el volumen decantado de glicerina, según la siguiente imagen.

Imagen 9: Punto de toma de muestra, tomando de referencia la mitad de la altura de los electrodos.



- Se tomó 5.00 ± 0.05 mL de la emulsión tratada en el decantador electrostático, es necesario volver a ingresar 5.00 ± 0.05 mL de la emulsión agitándose constantemente en el beaker de 4 L. Antes de agregar de nuevo los 5.00 ± 0.05 mL se levantó de nuevo el sistema de electrodos y se paró el cronómetro, ya que se volvió a aplicar agitación por 1 minuto.
- Después de la agitación se colocó de nuevo los electrodos en contacto con la emulsión y realizar la medición de tiempo hasta llegar a 1 minuto, realizar el mismo procedimiento cada minuto hasta llegar 10 minutos. Cada muestra de 5.00 ± 0.05 mL se agrega en un tubo de ensayo.
- Las muestras en el tubo de ensayo se dejan decantar por 24 horas, para poder determinar el volumen de glicerina separado, según la siguiente imagen.

Imagen 10: Tubos de ensayo utilizados para colocar las muestras de separación.



- La metodología anteriormente descrita se repite de la misma forma con los electrodos de cobre-cobre.
- Con la metodología de decantación por gravedad se realiza el mismo procedimiento que la coalescencia electrostática, con la condición que no se utiliza el sistema del decantador electrostático y se realizan las mismas mediciones de tiempo y toma de muestras.
- Posterior a realizar las mediciones de tiempo, tomar la emulsión separada hasta los 10 minutos de separación y realizar las pruebas de calidad de glicerina y pH, descritas en la página 39. Estas pruebas se hacen con un volumen total de 50 mL, lo cual es suficiente para el volumen utilizado en el picnómetro y en la medición de pH, estas pruebas se

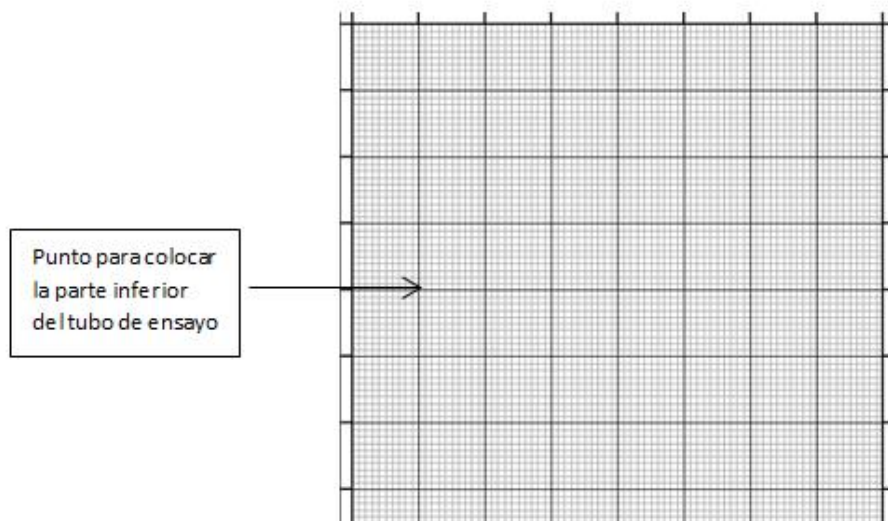
realizan para la metodología de coalescencia con electrodo aluminio-aluminio, cobre-cobre y la metodología de decantación por gravedad.

- Cuando se tienen estas pruebas se procede a realizar el lavado de las muestras, para esto se utiliza el 10% del volumen de la muestra tratada, la cual son 150 mL de biodiésel tratado, se aplica el agua con el atomizador, importante estandarizar el número de atomización que corresponde al 10% del volumen de agua utilizado.
- Se realiza el primer lavado y se deja decantar, hasta que se dé la formación de fases y se procede a decantar el volumen de agua, con este primer lavado se realizan las pruebas de calidad correspondientes para evaluar la calidad del biodiésel obtenido.
- Posteriormente se procede a realizar un segundo lavado, esto con la finalidad de comparar la calidad del biodiésel obtenido, aplicando la metodología de coalescencia electrostática y decantación por gravedad.

Medición del nivel de glicerina presente en las muestras depositadas en tubos de ensayo.

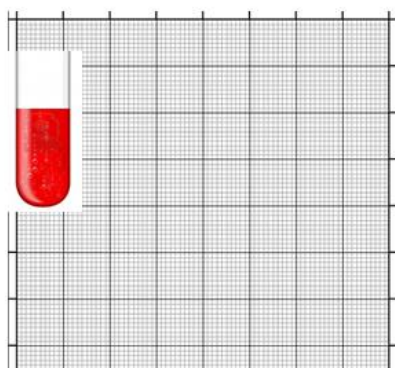
- Se hace uso de una hoja de papel milimetrado como escala de medición, en donde cada centímetro de la hoja equivale a 1 mililitro.
- Se toma el tubo de ensayo y se coloca en un punto de base conocida, de esta forma determinar el nivel de glicerina en centímetros y poder ver el volumen de glicerina presente en la muestra. Esto se puede ver en la siguiente imagen.

Imagen 11: Hoja milimetrada utilizada para la medición de volumen de glicerina separada de la emulsión.



- Se coloca el tubo de ensayo como se puede ver en la siguiente imagen, la medición nos otorga una cifra significativa.

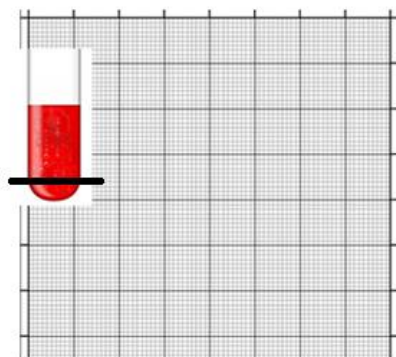
Imagen 12: Medición de volumen de separación de glicerina comparando el nivel separado en el tubo de ensayo con la escala del papel milimetrado.



Lo más importante fue el punto de calibración de la medición, que como se estableció en el inciso 1 la relación de 1 centímetro de la hoja milimetrada equivale 1 mililitro del tubo de ensayo,, sin embargo el tubo de ensayo tiene una parte crítica con bordes redondeados como se puede ver en la siguiente figura, en donde se tiene una reducción de 0.15 , por lo que en esta área se estableció una relación de 1 mL es equivalente a 0.85 cm, esta conversión se tomó en

cuenta a partir de mediciones de alturas iguales o menores de 0.6 cm del nivel de glicerina tomado en relación al papel milimetrado.

Imagen 13: Calibración del área inferior del tubo de ensayo, con la escala de medición del papel milimetrado.



9. Metodología de análisis de calidad de biodiésel

a. Metodología de determinación de densidad (López, 2013)

Materiales

- 1 picnómetro limpio y seco
- Balanza analítica
- Agua destilada

Procedimiento

1. Pesar el picnómetro limpio y seco.
2. Llenar con agua destilada y volver a pesar, para obtener la masa de agua contenida en el picnómetro.
3. Vaciar y llenar con el líquido problema, es necesario lavar una o dos veces con el líquido problema.
4. Pesar nuevamente el picnómetro para obtener la masa del líquido problema.
5. Se puede calcular el volumen del picnómetro sabiendo la masa y densidad del agua destilada medida.
6. Posteriormente se puede obtener la densidad del líquido problema donde se sabe el volumen del picnómetro y el peso del líquido problema. (López, 2012)

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Ecuación 15: Determinación de volumen partiendo de densidad. (López, 2012)

$$\rho_L = \frac{w_p}{V}$$

Ecuación 16: Determinación de densidad del líquido problema. (López, 2012)

b. Metodología de determinación de pH (López, 2013)

1) Calibración

- Se utiliza el sistema AB 15 para realizar la medición de pH, el cual debe ser calibrado con los siguientes pasos:
- Presionar la tecla “mode” y soltar hasta que la pantalla digital indique el modo de pH. Esta tecla cambia entre los modos de pH, mV y mV Rel.
- Presione el botón “setup” dos veces y después presiones “enter”, para eliminar una estandarización ya existente.
- Sumergir los electrodos dentro del buffer del grupo seleccionado.
 - o 3.1. Agitar moderadamente.
- Presionar “std” para acceder al modo de estandarización.
 - o El grupo de buffer seleccionado aparece brevemente
 - Para seleccionar el tipo de buffer a utilizar, presione la tecla “setup” para acceder al menú de estandarización de pH, luego debe presionar nuevamente la tecla “setup” para desplegar el icono de “clear buffer” junto con los buffers introducidos previamente.
 - Presionar la tecla “enter” para eliminar los buffers existentes.
 - Presionar la tecla “enter” para confirmar la selección, o la tecla “mode” para salir de la selección, o la tecla “setup” para acceder a otras opciones de setup.
 - Para seleccionar el grupo de pH buffer, se debe acceder desde la pantalla de mediciones de pH, presionando el botón “setup” y se desplegará la pantalla de “buffer select”.
 - Presionar “enter” para aceptar el grupo y regresar a la pantalla de mediciones o presionar “setup” hasta que aparezca el grupo de buffers que se desea.
 - Esperar para que se establezca la lectura.

- Presionar “std” nuevamente para inicial la estandarización.
- El potenciómetro regresa de una vez a la pantalla de medición.
- Presionar “mode” mientras está en el modo de normalización, para volver a las mediciones, sin aceptar la calibración.

2) Procedimiento

- Introducir el electrodo en la solución muestra.
 - Agitar moderadamente
 - Asegurarse que el potenciómetro está en modo de medición.
- Cuando el potenciómetro sienta que la lectura se ha estabilizado al ver el icono “stable” aparecerá debajo de la lectura.

*La agitación con un agitador magnético proporciona una respuesta más rápida del electrodo.

- Reportar la lectura del potenciómetro.

VI. RESULTADOS

1. Medios hídricos

Tabla 3. Diagrama de la celda que se utilizó para la primer proceso de tratamiento de aguas residuales.

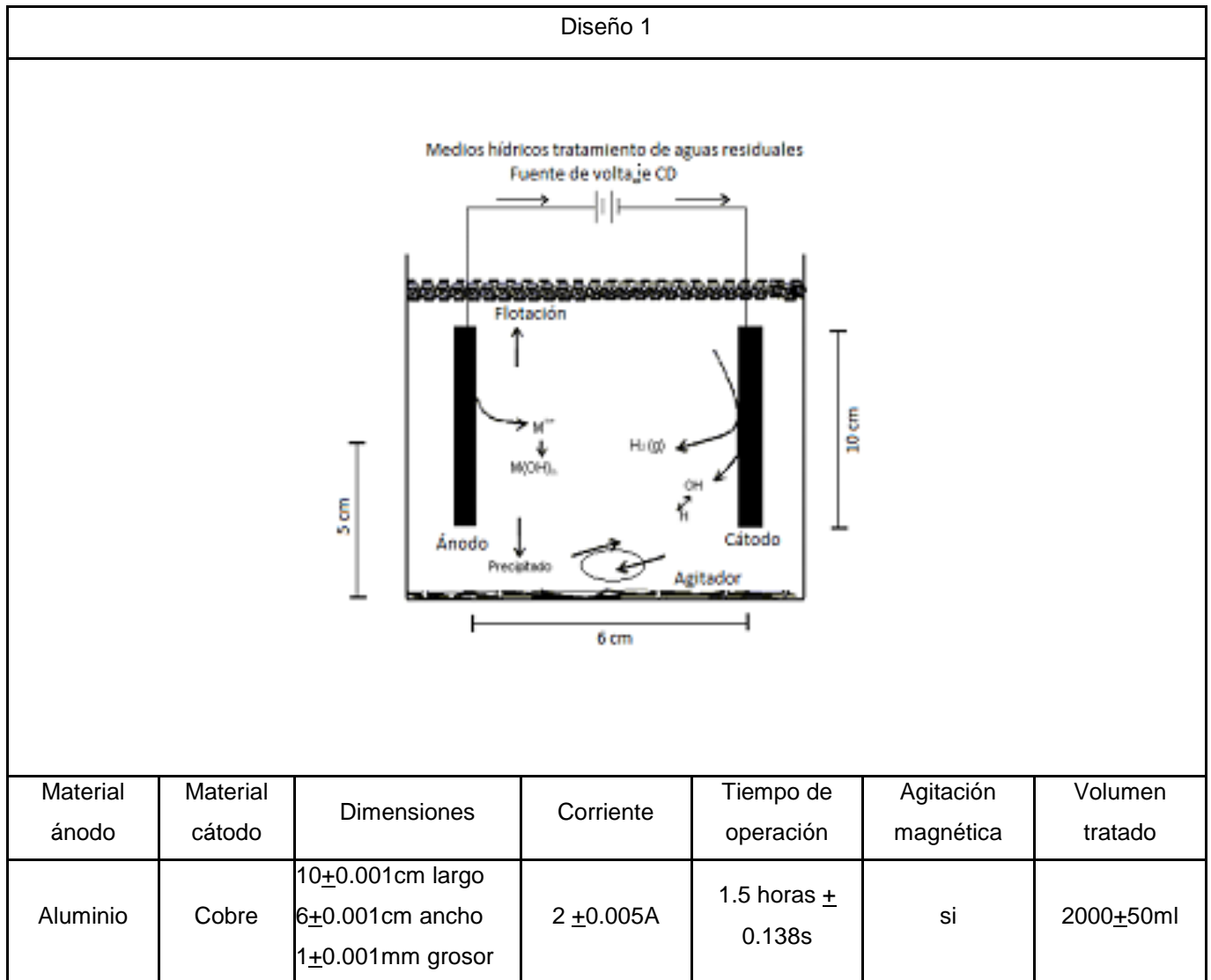


Tabla 4. Diagrama de la celda que se utilizó para el segundo proceso de tratamiento de aguas residuales.

Diseño 2						
<p style="text-align: center;">Medios hídricos tratamiento de aguas residuales Fuente de voltaje CD</p> <p style="text-align: center;">Flotación</p> <p style="text-align: center;">Ánodo Cátodo</p> <p style="text-align: center;">Precipitado</p> <p style="text-align: center;">5 cm 10 cm 6 cm</p>						
Material ánodo	Material cátodo	Dimensiones	Corriente	Tiempo de operación	Agitación magnética	Volumen tratado
Hierro	Cobre	10±0.001cm largo 6±0.001cm ancho 1±0.001mm grosor	2 ±0.005A	1.5 horas	no	2000±50ml

Tabla 5. Diagrama de la celda que se utilizó para el tercer proceso de tratamiento de aguas residuales.

Diseño 3						
<p>Medios hídricos tratamiento de aguas residuales Fuente de voltaje CD</p>						
Material ánodo	Material cátodo	Dimensiones	Corriente	Tiempo de operación	Agitación magnética	Volumen tratado
Aluminio	Cobre	10±0.001cm largo 6±0.001cm ancho 1±0.001mm grosor	3 ±0.005A	1.5 horas	si	2000±50ml

Tabla 17 Concentración inicial y final promedio en mediciones de manganeso en las diferentes muestras y porcentaje de reducción promedio de las mismas, utilizando un electrodo de aluminio y cobre para la muestra 1, electrodos de hierro y cobre para la muestra 2 y electrodos de aluminio y cobre para la muestra 3.

Muestra	Inicial [Mn]	Final [Mn]	Reducción
1	20.5 ± 0.7 mg/L	1.2 ± 0.6 mg/L	93.9 ± 8.8%
2	8.10 ± 0.17 mg/L	0.80 ± 0.20 mg/L	90.12 ± 11.88%
3	2.63 ± 0.21 mg/L	0.77 ± 0.20 mg/L	71.03 ± 4.18%

Tabla 18 Concentración inicial y final promedio de cinc en muestra 1 y porcentaje de reducción promedio del mismo, utilizando un electrodo de aluminio y cobre para la muestra 1, electrodos de hierro y cobre para la muestra 2 y electrodos de aluminio y cobre para la muestra 3.

Muestra	Inicial [Zn] (±5.1 mg/L)	Final [Zn] (±0.2 mg/L)	% Reducción (±10.9%)
1	34.0 ± 5.1 mg/L	0.9 ± 0.2 mg/L	97.3 ± 10.9%
2	32.01 ± 7.94 mg/L	2.19 ± 0.2 mg/L	97.30 ± 4.25%
3	36.30 ± 7.94 mg/L	1.39 ± 0.2 mg/L	95.95 ± 14.81%

Tabla 19 Costos de operación de la celda electroquímica a escala laboratorio.

Costo (Q/L agua)	0.73
------------------	------

Tabla 20 Ecuación de diseño para dimensionamiento de reactor a escala industrial con variable en el flujo en un reactor de tanque agitado con un orden de reacción de 2.

Ecuación de diseño Manganeso	$V = \frac{990 \frac{mg}{L} * \frac{m}{h}}{k \left(\frac{mg}{L * s} \right)}$
Ecuación de diseño Cinc	$V = \frac{45.62 \frac{mg}{L} * \frac{m}{h}}{k_1 \left(\frac{mg}{L * s} \right)}$

Tabla 21 Evaluación de aspectos ambientales significativos del tratamiento de aguas residuales.

Actividad	Aspecto ambiental	Descripción	Evaluación del riesgo			
			Cantidad ó Frecuencia	Gravedad del impacto	Permanencia del impacto	
Tratamiento de aguas ordinario	Uso de materiales	1. Consumo de agua 2. Consumo de Químicos	80	80	40	Significativo
	Uso de energéticos	Consumo de Energía eléctrica	80	40	20	No significativo
	Emisiones al aire	Dispersión de reactivos químicos	40	80	80	Significativo
	Descarga de agua residual	Descarga de aguas después de tratamiento	80	20	20	No significativo
	Emisiones al suelo	Derrame de aguas en piletas	80	80	40	Significativo
	Residuos peligrosos	Residuos químicos de floculantes Lodos producidos	40	80	40	Significativo
	Residuos no peligrosos	Restos de desechos provenientes del agua	80	20	20	No significativo
	Afectación al entorno natural	Ruido por mayor utilización de motores para bombas	40	20	20	No significativo

Tabla 22 Evaluación de aspectos ambientales significativos del tratamiento electroquímico.

Actividad	Aspecto ambiental	Descripción	Evaluación del riesgo			
			Cantidad ó frecuencia	Gravedad del impacto	Permanencia del impacto	
Tratamiento electroquímico	Uso de materiales	1. Uso de electrodos (hierro, cobre, aluminio) 2. Uso de agua	80	20	20	No significativo
	Uso de energéticos	Consumo de energía eléctrica	80	40	40	Significativo
	Descarga de agua residual	Descarga de aguas después de tratamiento	80	20	20	No significativo
	Residuos peligrosos	Lodos y emulsiones producidas	40	80	40	Significativo
	Residuos no peligrosos	Restos de los electrodos	80	40	40	Significativo

Tabla 7. Diagrama de la celda que se utilizó para el segundo proceso de tratamiento de medios edáficos

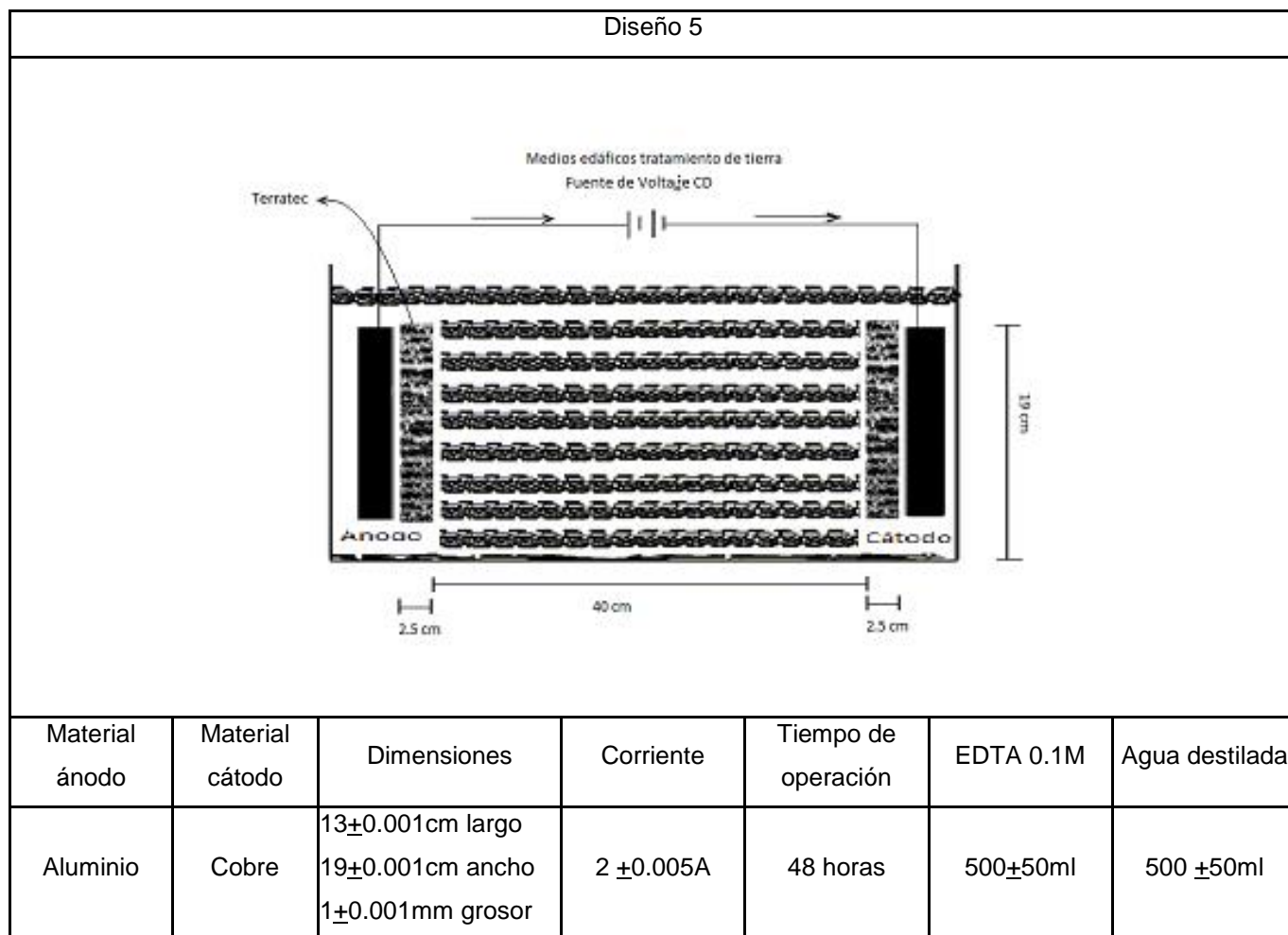


Tabla 23. Análisis granulométrico para el tipo de suelo utilizado (Ver gráfica en anexos)

Mesh	Peso (g)			Porcentaje
20	648.16	±	0.05	21.61%
30	486.39	±	0.05	16.21%
45	420.77	±	0.05	14.03%
60	366.39	±	0.05	12.21%
80	360.09	±	0.05	12.00%
100	296.17	±	0.05	9.87%
R	422.03	±	0.05	14.07%

Tabla 24. Constantes de Transferencia de Masa para ligandos Plomo-EDTA a flujos completamente laminares en función del área del cátodo.

Área A_e (cm^2)	K_m ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}^3$)
11.2	2.66
27.2	2.65
37.4	2.15
51.2	2.75
247	3.08713

Tabla 25. Constantes de estabilidad condicional Pb-EDTA para las diferentes corridas del electrodo y sus variaciones de pH.

Muestra	pH	log K_{pbx}	K_{pbx}
1A	5.55	11.3	1.9953E+11
1B	6	11.1	1.2589E+11
1 Cátodo	5	11.5	3.1623E+11
2A	5	11.5	3.1623E+11
2B	4.5	11.5	3.1623E+11
2 Cátodo	4.75	10.5	3.1623E+10

Tabla 26. Constantes de transferencia de masa, eficiencia de remoción y costo de operación para la celda en función teórica y de concentraciones por espectrometría.

	Concentración Inicial (g Pb/cm ³)	Concentración en Electrodo (g Pb/cm ³)	Constante de Transferencia K _m (cm/s)	Tiempo óptimo de operación (min)	Porcentaje de Eficiencia	Consumo Energía (kW·h)
Modelo de Cinética	0.003087045	0.00092295	3.08713	68	29.90%	0.045332

Figura 17. Modelo de comportamiento de las constantes de transferencia de masa para ligandos Pb-EDTA.

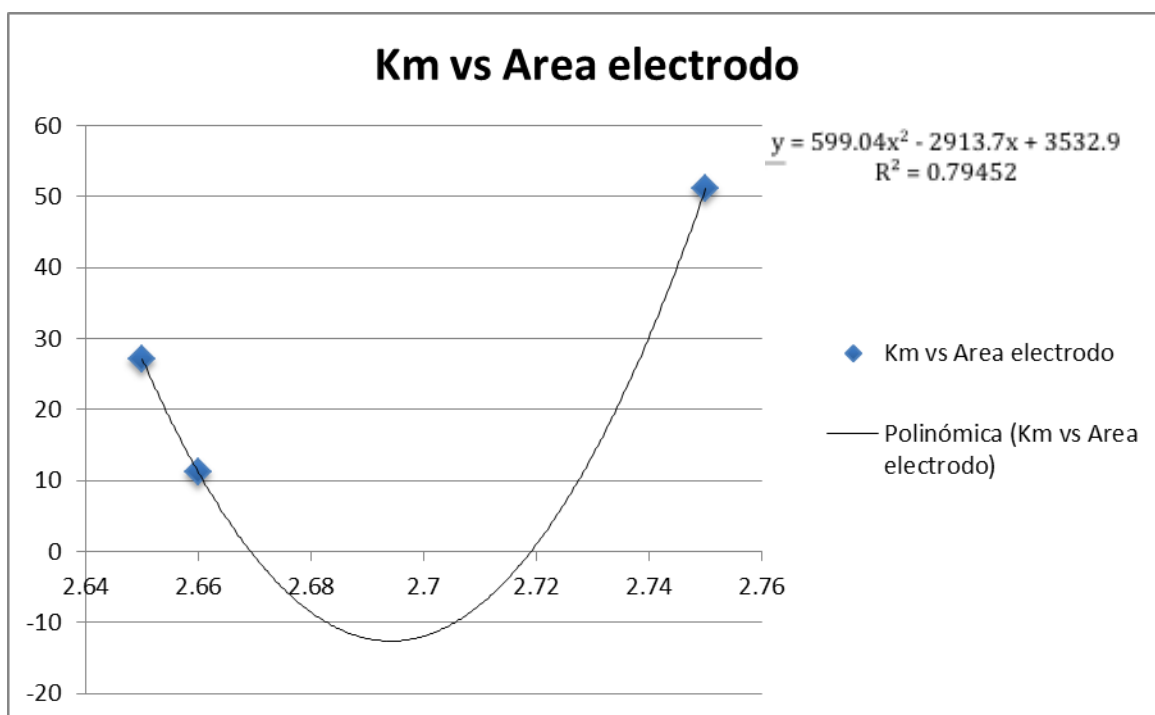


Figura 18. Valores de constante de estabilidad condicional para ligando Pb-EDTA obtenidos mediante el análisis de pH a partir de la tabla de comportamiento de ligandos obtenida por Masakazu, *et al.*

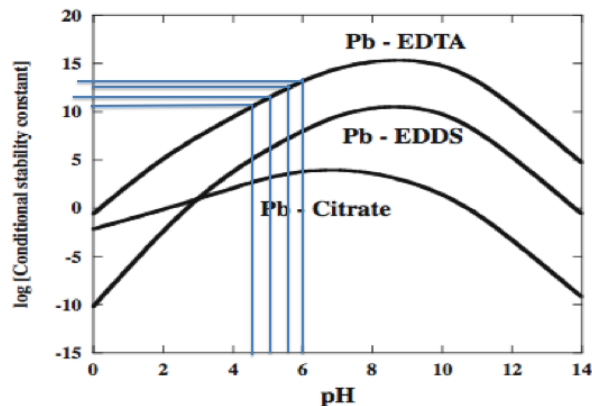


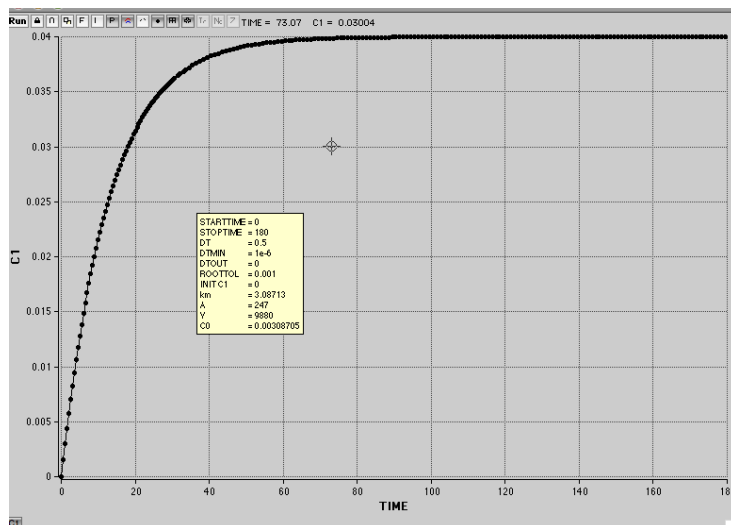
Figura 19. Modelo de cinética de reacción y grafica de comportamiento de cambio de concentración de Pb en el electrodo respecto al tiempo para condiciones de 20 V y K de transferencia 3.08 a flujo electro osmótico y temperatura ambiente.

METHOD RK4

STARTTIME = 0
 STOPTIME = 172800
 DT = 0.5

$d/dt (C1) = (C0) \cdot \exp(-((km \cdot A)/V) \cdot \text{Time})$

km = 3.08713
 A = 247
 V = 9880
 C0 = .0030870459
 INIT C1 = 0



3. Tratamiento de biodiésel

Tabla 8. Diagrama de la celda que se utilizó para la primer proceso de tratamiento de reducción de tiempo necesario para la separación de biodiésel y glicerina.

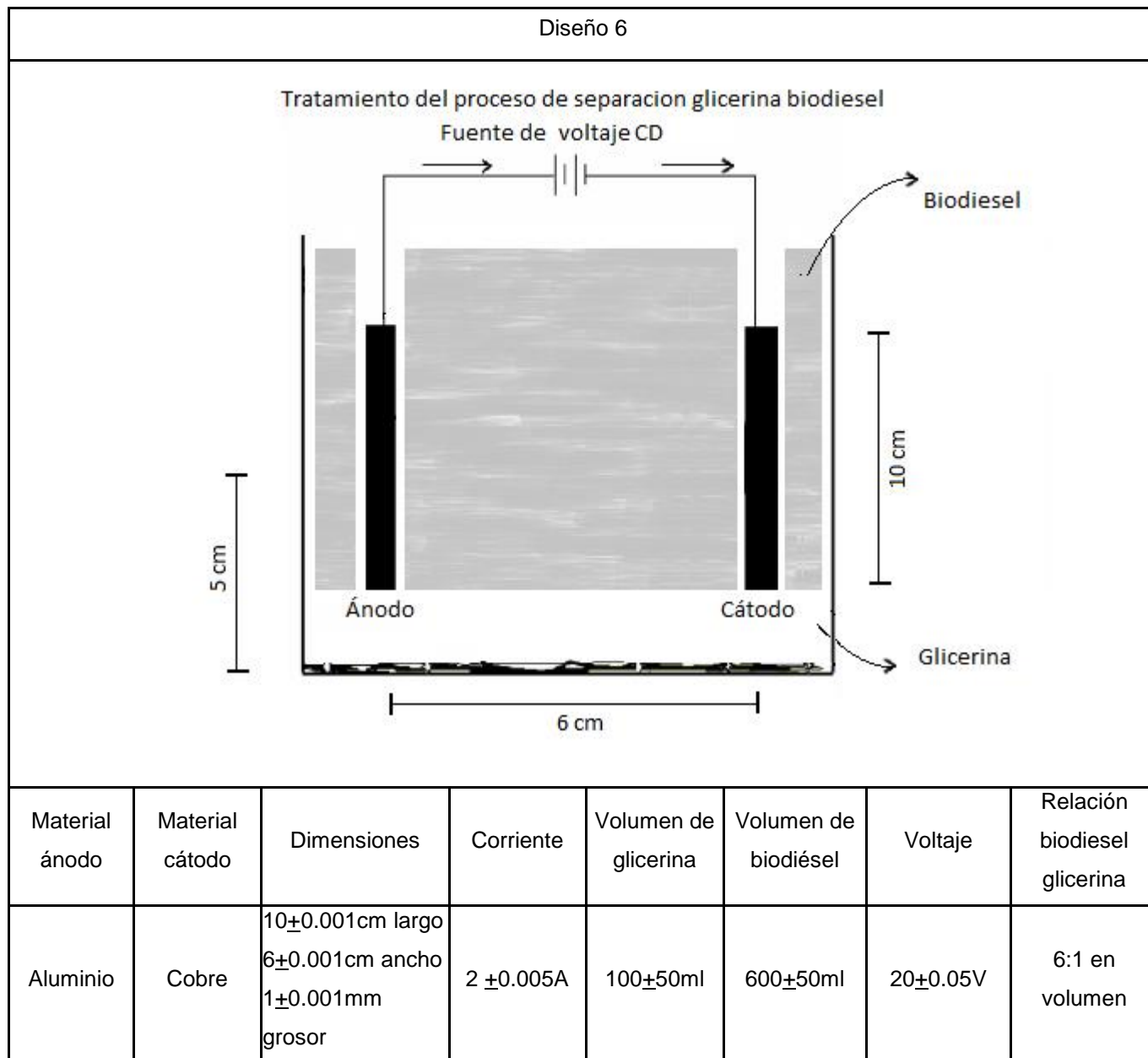


Tabla 9. Diagrama de la celda que se utilizó para la primer proceso de tratamiento de reducción de tiempo necesario para la separación de biodiésel y glicerina.

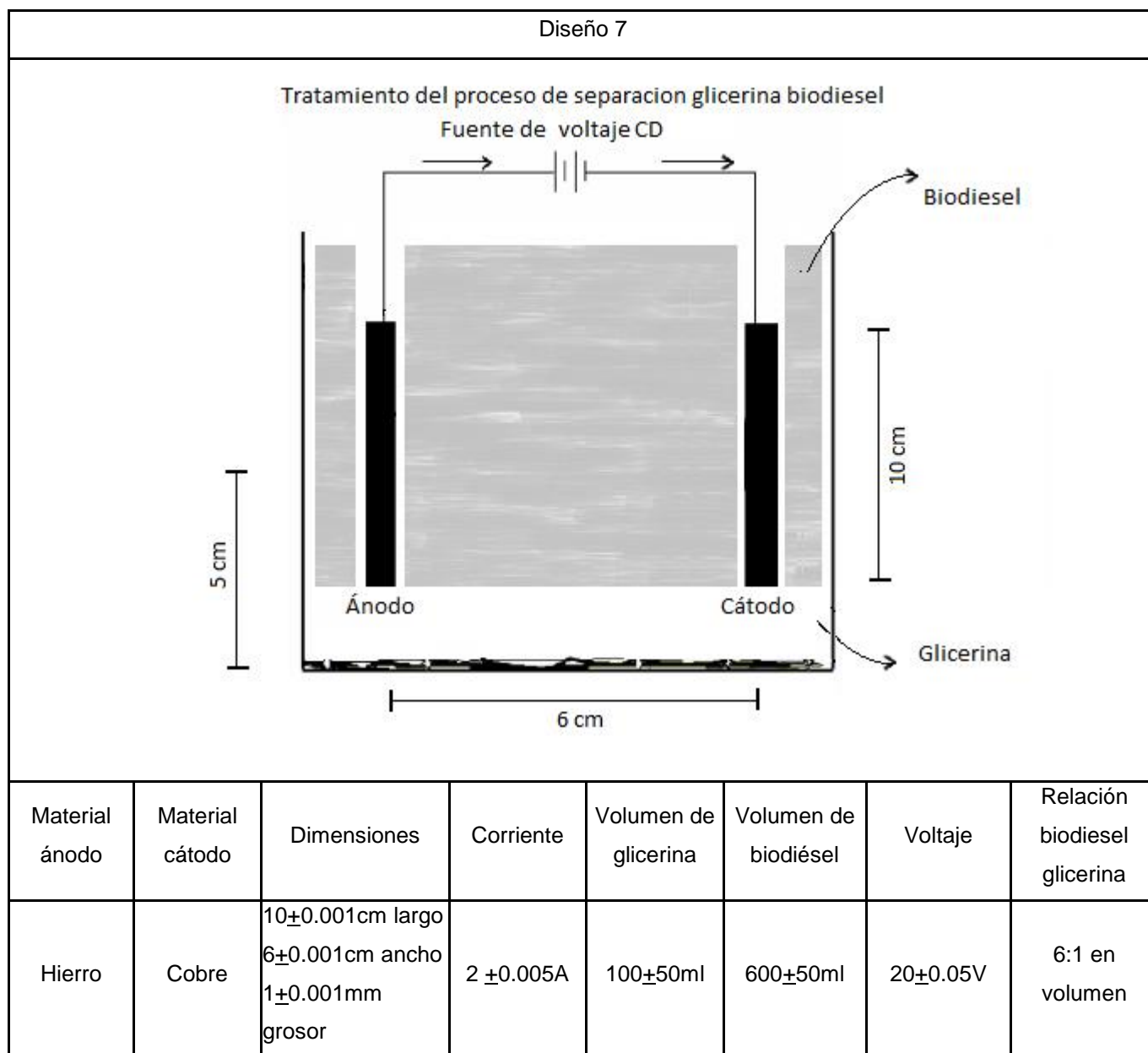


Tabla 10. Diagrama de la celda que se utilizó para el primer proceso de tratamiento de reducción de tiempo necesario para la separación de biodiésel y glicerina.

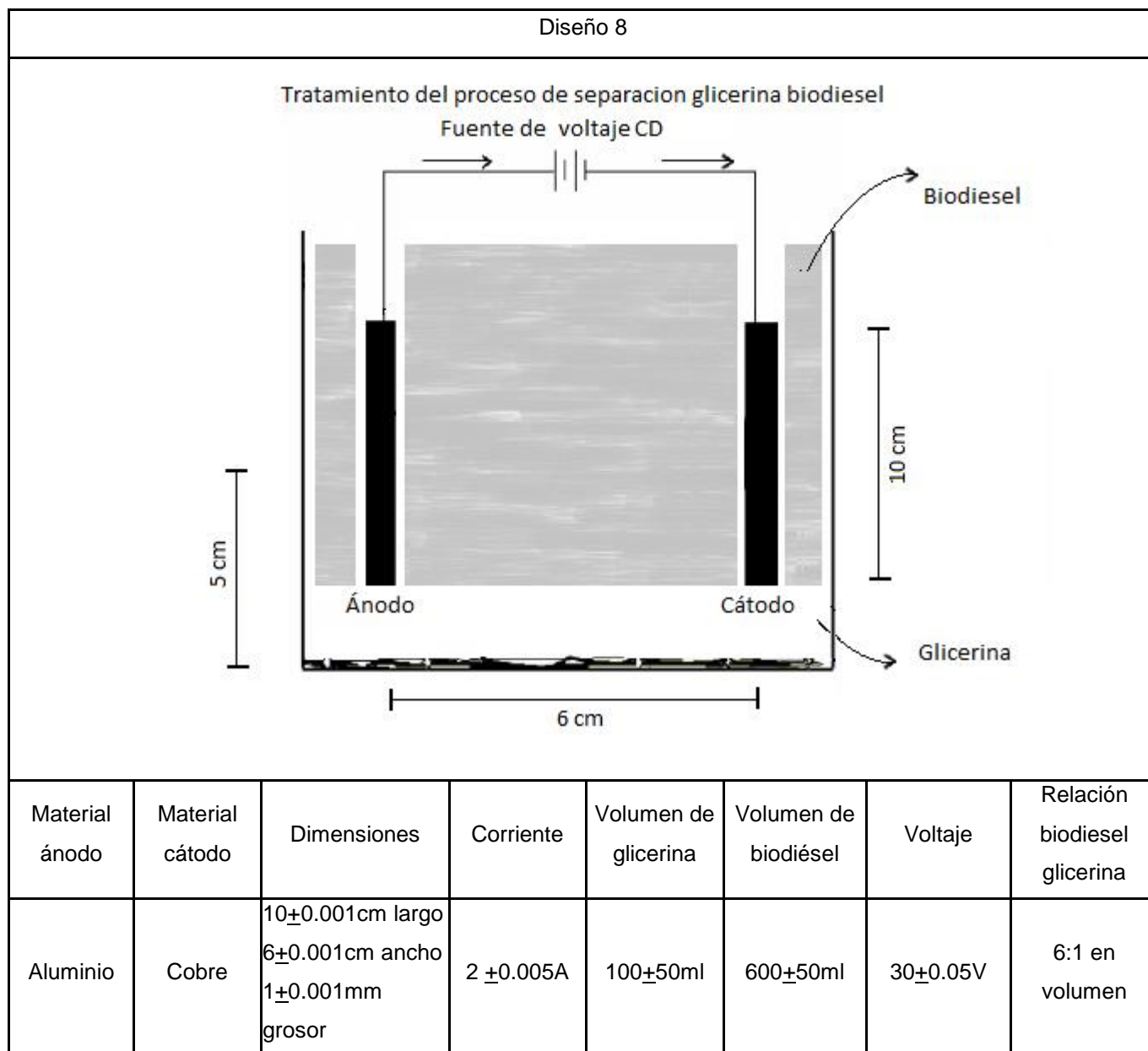


Tabla 27: Densidad obtenida de las muestras de biodiésel después del tratamiento de lavado, empelando la metodología de coalescencia electrostática y decantación por gravedad.

No. de lavado	Densidad de la muestra de biodiésel tratado con electrodo aluminio-aluminio (g/mL)	Densidad de la muestra de biodiésel tratado con electrodo cobre-cobre (g/mL)	Densidad de la muestra de biodiésel tratado con decantación por gravedad (g/mL)
1	0.872±0.503	0.878±0.507	0.964±0.556
2	0.857±0.495	0.846±0.489	0.857±0.495
Sin lavar	1.100±0.635	1.076±0.621	1.123±0.648

Tabla 28: pH obtenido de las muestras de biodiésel después del tratamiento de lavado, empelando la metodología de coalescencia electrostática y decantación por gravedad.

No. de lavado	pH de la muestra tratada con electrodo aluminio-aluminio	pH de la muestra tratada con electrodo cobre-cobre	pH de la muestra tratada con decantación por gravedad
1	7.010±0.014	7.035±0.021	8.080±0.028
2	6.600±0.010	6.950±0.010	6.200±0.020
Sin lavar	9.985±0.163	10.475±0.035	10.975±0.106

Tabla 29: Volumen de glicerina separado en función de tiempo para la metodología de coalescencia electrostática y la metodología de decantación por gravedad.

Tiempo (±0.05min)	Volumen de glicerina separado con electrodo aluminio-aluminio (±0.05 mL)	Volumen de glicerina separado con electrodo cobre-cobre. (±0.05 mL)	Volumen de glicerina separado con método de decantación por gravedad. (±0.05 mL)
0.50	1.200	1.300	2.300
1.00	1.100	1.000	1.600
2.00	0.800	1.000	1.600
3.00	0.700	0.700	1.600
4.00	0.510	0.553	0.765
5.00	0.340	0.510	0.765
6.00	0.255	0.340	0.510
7.00	0.255	0.255	0.340
8.00	0.170	0.170	0.255
9.00	0.085	0.085	0.255
10.00	0.085	0.077	0.255

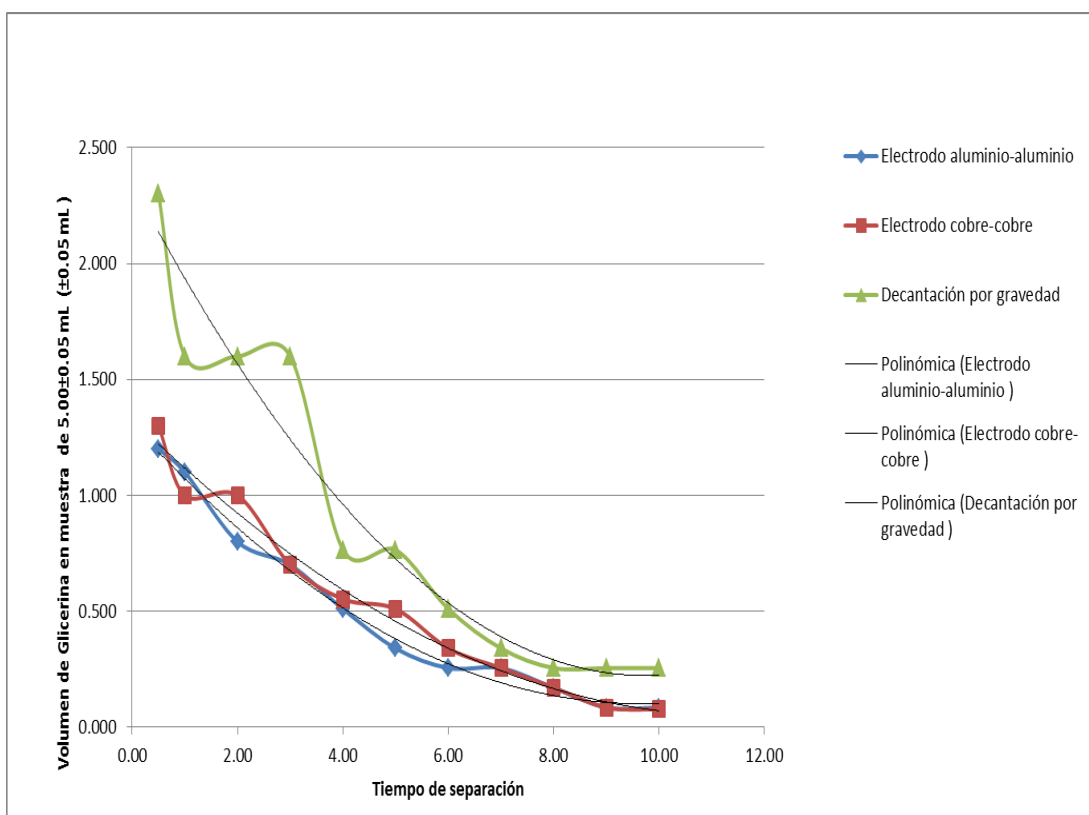
Tabla 30: Ecuación del gráfico obtenido a partir del volumen de glicerina separado (x) con metodología de coalescencia electrostática y decantación por gravedad en función del tiempo de separación (y).

Metodología	Ecuación	R ²
Coalescencia electrostática con electrodo aluminio-aluminio	$y = 0.0098 \pm 0.012x^2 - 0.2241 \pm 0.012x + 1.3322 \pm 0.0711$	0.9805
Coalescencia electrostática con electrodo cobre - cobre	$y = 0.013 \pm 0.010x^2 - 0.2509 \pm 0.010x + 1.3099 \pm 0.0617$	0.9916
Decantación por gravedad	$y = 0.0224 \pm 0.0267x^2 - 0.4372 \pm 0.0267x + 2.3510 \pm 0.1587$	0.9391

Tabla 31: Porcentaje de volumen de glicerina presente en la muestra de 5 mL tomada para la metodología de coalescencia electrostática y metodología de decantación por gravedad después de 10 minutos de separación.

Metodología	Volumen de glicerina presente (± 0.05 mL)	Porcentaje de glicerina presente en la muestra	Incremento en la capacidad de producción
Coalescencia electrostática con electrodo aluminio-aluminio	0.085	1.70%	30.00%
volumen glicerina separado cobre-cobre	0.077	1.53%	33.33%
volumen glicerina separado decantación	0.255	5.10%	-

Gráfica 1: Volumen de separación de glicerina en función del tiempo con la metodología de coalescencia electrostática con electrodos aluminio-aluminio y cobre –cobre, en comparación con la metodología de decantación por gravedad.



VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo de este módulo fue realizar el diseño de 3 celdas electroquímicas a nivel laboratorio que permitan redistribuir la concentración de sustancias con propiedades metálicas, para facilitar su tratamiento posterior, como tratamiento alternativo, para mejorar la eficiencia de distintos procesos y reducir el impacto ambiental de los mismos, tomando como base el tratamiento de aguas residuales, electroremediación de suelos y tratamiento de biodiésel.

Para el diseño de las celdas electroquímicas se implementaron los fundamentos principales para el diseño de celdas para tratamiento de agua, específicamente de electrocoagulación, tomando en cuenta las leyes de Faraday, por lo tanto, los factores más importantes a considerar son los de minimizar el sobrepotencial entre los electrodos y maximizar la transferencia de masa entre los electrodos.

Las dimensiones de los electrodos se determinaron según el tamaño del reactor en el cual se iba a trabajar, tomando como referencia las consideraciones necesarias para el diseño de celdas electroquímicas para el tratamiento de electrocoagulación y tamaños de electrodos comunes encontrados en la literatura, debido a que no se encontró información específica acerca del dimensionamiento de los electrodos para el tratamiento de medios edáficos ni referencias para el tratamiento en el proceso de separación de biodiesel, debido a que el espesor del material utilizado para los electrodos fue menor a 0.2mm. se consideró aceptable la aproximación de trabajar bajo la suposición que el espesor de los electrodos era de 1mm exacto, por lo que no se espera variaciones considerables en el desempeño de las celdas por estas desviaciones

Se decidió utilizar los electrodos de cobre, hierro y aluminio debido a que son los materiales más utilizados en la práctica de la electrocoagulación por su resistencia química y propiedades electroquímicas.

A continuación, se discutirán resultados, procesos experimentales y condiciones propias de cada medio analizada antes, durante y después del proceso electroquímico resultado de utilizar las celdas.

Las suposiciones consideradas para el dimensionamiento de la celda y su comportamiento considerando los factores de transferencia de masa modelando la celda como un reactor batch de volumen constante de electrolito y una relación y tomando como variable la concentración de plomo en el suelo como la tasa de cambio para el cálculo de la cinética y los factores de transferencia de masa y determinar así el tiempo ideal de reacción para el voltaje de las celdas,

para efectos este megaproyecto se realizaron diferentes pruebas con el tiempo de trabajo de 48 horas continuas dado la relación directa del voltaje y concentración respecto del tiempo expresado en la sección en las ecuaciones 3 a la 6 en el fundamento de cálculo.

La consideración general en cuanto al tipo de suelo se basó en los estudios realizados en el tipo de suelo caolinita por lo que una de las fuentes principales de error se debe a la experimentación con otro tipo de suelo con una contaminación forzada de plomo, como se puede ver en la Tabla #4 la remoción de plomo utilizando EDTA se ha utilizado únicamente en suelos arcillosos de lo que se tiene referencia; la adsorción proporcionada por los granos finos de los suelos arcillosos facilita la formación de complejos Pb-EDTA y por tanto beneficia la transferencia de masa en la celda para el óptimo desempeño de la remoción de los contaminantes, esto se diferencia en la granulometría de mayor diámetro de partícula para el tipo de suelo estudiado y la formación de grumos lo que disminuye la adsorción en la partícula y dificulta la formación de los complejos y ligandos Pb-EDTA

Modelo de reactor: en principio teórico para modelar el comportamiento de la transferencia de electrones en el cátodo la celda por medio de la transferencia de masa de los iones de plomo, la principal suposición como se mencionaba es el volumen constante teniendo en consideración la falta de un flujo aplicable al interior de la celda se delimita la aplicación de la ecuación cinética a los valores conocidos para el área del electrodo, la concentración inicial de plomo, t igual al tiempo constante de la corrida de 48 horas para la celda y el volumen total de reservorio para la celda de operación y utilizando la ecuación número 5 de la sección 5.4.1 del presenta trabajo quedan únicamente como incógnitas la variación de la concentración en el tiempo, así como la constante de transferencia de masa para el plomo en un reactor batch.

Utilización de la constante de estabilidad condicional: Esta constante de estabilidad fue obtenida a partir de las curvas de relación del logaritmo de dichas constantes en función del pH para ligandos de Pb-EDTA para los diferentes valores de las muestras obteniendo el punto máximo a un pH de 4.75 con un valor de $K_{Pb-X} = 3.1623E+11 \pm 1.0544 \times 10^9$ Este es el pH en el que el ligando forma el complejo con el ion metal de una manera más efectiva. Por lo tanto, la región de pH en el que el ligando forma el complejo más estable lo que beneficia a la efectividad de la extracción de los iones metálicos obteniendo así un valor de pH controlado para el funcionamiento óptimo de la celda en cuanto a sus constantes de formación de ligandos.

Al analizar los estudios efectuados por Bertazzoli, *et al.* Se determina un coeficiente de transferencia de masa para la disociación de plomo en un reactor batch como la fuente teórica y el valor empleado para este estudio por lo que la ecuación dada por Rajesshwar e Ibáñez para la tasa de cambio de concentración de reactante en simple reactor electrolítico se vuelve aplicable para cada corrida de la celda evaluada, esta suposición se hace de acuerdo a los factores que

rigen la electromigración dadas en las investigaciones de Yeung, 1990 en el que el contaminante inorgánico que en nuestro caso es el plomo expuesto a un campo de fuerza iónica grande en comparación con la concentración del contaminante, el cual es el caso del estudio teórico de un reactor por lotes de Bertazzoli como el caso de la celda utilizada para el megaproyecto.

Asumiendo el mismo gradiente de difusión lineal explicado en la sección 5.7.1 y con un potencial z (ζ) pequeño se determina la relación directa de la constante experimental de transferencia de masa, naturalmente esto conlleva a un error en el cálculo de la variación de la concentración y es una de las principales fuentes de error en la comparación de resultados contra las concentraciones reales en las muestras por análisis de absorción atómica.

Una vez determinados los factores teóricos el primer paso en el análisis de las variaciones de concentración en la celda se encontró por medio del modelo de ecuación de cinética de reacción para el plomo en el reactor, este modelo depende directamente del volumen total del reservorio $V_t = 9,880 \text{ cm}^3$ y el área del cátodo de cobre de 247 cm^2 y una concentración inicial teórica para la celda en función del peso del plomo no diluido en el volumen total de tierra, el plomo utilizado para la contaminación de la muestra proviene de una batería de motocicleta utilizando el componente de plomo de la misma esparcido homogéneamente en la muestra para tener una contaminación constante a lo largo del reactor y poder validar la toma de muestras.

La concentración se tomó inicialmente para la parte práctica como la masa de plomo utilizada en la contaminación contra el volumen total de la celda por lo que este resultado es muy teórico y no se puede tomar como bases de concentración inicial, únicamente se utiliza como la base de cálculo de los factores de transferencia de masa y la aproximación para el cambio de concentración; esta concentración fue de $0.00308705 \pm 1.02413 \times 10^{-7} \text{ g(Pb)/cm}^3$ y el valor de K_m para la transferencia de masa en un fluido completamente laminar considerado únicamente a escala molecular y por formación de ligandos de plomo-EDTA se obtiene una curva característica relacionada directamente proporcional al cátodo como se mencionó anteriormente por los estudios de Bertazzoli, dicha constante de transferencia de masa se aplicaba a una celda porosa por lo que las relaciones de Área y Volumen debían modificarse considerando los factores de diseño y geometría de la celda, que en el caso de este estudio se anula al tener un área superficial plana de un objeto con geometría conocida por lo que estas ecuaciones se simplifican y en relación directa con el área del electrodo obtenemos la constante por medio de la ecuación 2 de la sección de resultados y la Figura número 12 se obtiene un valor de K_m igual a 3.08713 ± 0.07631 .

Este factor de transferencia de masa también viene dado por varias suposiciones teóricas ya que la transferencia beneficiada por un flujo dentro del electrodo no se aplicó por el que el único movimiento de partículas se da a nivel molecular y para efectos del modelo se asume con

transferencias del ligando de experimentos con condiciones similares representando una gran fuente de error al momento de la comparación con el comportamiento real y adicionalmente al modelarlo como un reactor de transferencia de masa lo hace muy dependiente a la aplicación de un flujo continuo que pueda ser medido para beneficiar la transferencia de masa y poder aplicar las ecuaciones deseadas; una vez analizados estos factores se procedió a calcular por medio de un simulador de cinéticas de reacción el cambio en la concentración en el electrodo basándose en su área y transferencia iones de plomo, a partir de la concentración inicial se obtuvo el modelo para la cinética utilizando un simulador con variaciones del tiempo para la corrida de 48 horas.

En los primeros análisis efectuados en la celda se obtienen los valores de pH para las diferentes corridas de la celda estos oscilan en un rango decreciente conforme se aumentaba el tiempo de operación de la celda, obteniendo los valores de 5.51 ± 0.5 para las primeras 48 horas de tratamiento, 4.75 ± 0.25 para las siguientes 48 horas, lo que demuestra en principio el aumento de la eficiencia de la remoción de plomo por variación de pH conforme aumenta el tiempo de electroremediación, estos resultados se justifican y comparan en los fundamentos teóricos con las pruebas realizadas por centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica para la remoción de plomo utilizando agentes quelantes sobre todo observando el comportamiento de la Gráfica no. 7 de los efectos del pH sobre la extracción la cual tiene una tendencia de comportamiento en la región de pH de 3 a 6 con valores cercanos al 30% de eficiencia lo que expone los primeros indicios de comparación para este estudio.

Adicionalmente, los valores de pH se utilizan también para la asociación directa para los factores de transferencia de masa en base a la constante de estabilidad condicional K_{PbX} determinada por Mazakasu, *et al.* Para el tratamiento de plomo en el cual la región de pH igual a 4 refleja el menor porcentaje de eficiencia en los experimentos; los valores de pH se utilizan utilizando los valores de la Figura no. 5

Al obtener todas las variables para construir el modelo de la cinética de reacción se utilizó el simulador Berkeley Madonna para obtener el comportamiento de la concentración de plomo en el cátodo; el resultado obtenido expresa el modelo logarítmico para el cambio de concentración a partir de la contaminación inicial de gramos de plomo por obteniendo una concentración removida de $9.229 \times 10^{-4} \pm 1.024 \times 10^{-7}$ g(Pb)/cm³ en el cátodo lo que representa una eficiencia de remoción del 29.9% respecto a la concentración inicial en la celda. Estos valores representan en total la efectividad del método para la concentración máxima esperada teóricamente con las variaciones de los tipos de tierra y fluidez ya que en cuanto a la constante de transferencia de masa esta se ve muy afectada por el flujo que se pueda presentar en la celda. El valor de eficiencia de remoción es aceptable basado en los antecedentes de estudios con remoción utilizando EDTA ya que con base en el análisis de pH en la celda y haciendo

referencia a la figura 7 se espera un porcentaje de remoción de 30 a 35% para los rangos de pH de 4 a 6 verificando la validez de las teorías así como los porcentajes bajos esperados a un pH de 4 representados por Masakazu en la Figura 10 lo que define el modelo de cinética como acertado en cuanto a los resultados esperados para este tipo de análisis, claro está que estos factores son teóricos y no pueden variarse en función del pH ya que la constante de estabilidad condicional no denota los factores de transferencia de masa que ocurren en la celda con la cinética modelada para este reactor, luego de tomar en cuenta estas consideraciones se concluye un buen resultado del modelo teórico a pesar de los impedimentos y se presentan a continuación las limitantes de este modelo.

Limitantes del factor de modelo de cinética. Las mayores limitantes de la efectividad de remoción determinada por un modelo de cinética de reacción se deben fundamentalmente a la falta de un flujo externo continuo de solución EDTA ya que esto no permite obtener valores de constante muy altos ya que con flujos turbulentos, números de Reynolds altos ligados a una velocidad constante se beneficiaría la transferencia de masa que es el principio fundamental de la transfusión de electrones en la electroremediación de la celda. El tipo de suelo en el que se realizó el experimento ya que los valores teóricos relacionados se dan únicamente al tipo de suelo Caolinita que cumple con las características de un tipo de suelo arcilloso beneficiando considerablemente la transferencia de masa por adsorción debido a su porosidad.

La mayor limitante de este estudio fue la comprobación real de la eficiencia por el cambio en la concentración obtenida por espectrometría, esta proporciona las variaciones reales en la concentración de plomo en la celda que se atribuirían directamente al electrodo por medio del balance de masa y de esta manera con la aplicación del modelo de cinética para la celda obtener los valores reales de K_m respecto al tiempo para las diferentes corridas, sin embargo un atraso de varios meses en cuanto a factores de equipo conllevó a la falta de resultados de concentración para la eficiencia del reactor lo que impidió el cumplimiento de uno de los objetivos de este trabajo.

En cuanto al análisis económico se presenta como método viable la aplicación de una corriente continua de 20 V para la remoción esperada en base al modelo de cinética que predice el tiempo óptimo de operación efectivo en 68 minutos lo que representa un costo de operación de Q. 0.10 expresados únicamente por consumo de kWh para este tipo de suelo, debe ser tomado en cuenta el costo de la solución de EDTA que debe aplicarse en proporciones volumétricas y su uso por kg de suelo es de 0.054 ml por kg de tierra contaminada para fines de este megaproyecto el cual puede variar al momento de aplicar un flujo continuo dependiendo de la recirculación que se le pueda dar, adicionalmente los costos del electrodo que debe estimarse para cambios grandes al variar la constante de transferencia de masa para que puedan ser removidos al terminar su vida útil con base en el modelo de cinética, estos no fueron removidos

por tener la primera fase experimental y solo se utilizó una placa por electrodo de cobre y de aluminio, adicionalmente se utilizó tierra conductora para enriquecer el suelo y permitir una extracción más eficaz, el costo de esta fue de Q. 50.00 para la bolsa de 10 libras obteniendo así el desglose de costos a considerar para el desarrollo del proyecto.

Medios hídricos (tratamiento de aguas residuales). El objetivo del módulo de este proyecto, consistió en la utilización de un sistema electroquímico capaz de purificar y remover metales pesados por un método de electrocoagulación de aguas residuales obtenidas de una planta de producción de baterías, en este sistema se buscó comparar el aspecto técnico y ambiental con una planta de tratamiento de aguas convencional.

Inicialmente, se tenía pensado utilizar una celda diseñada para tratar aproximadamente 30 L de agua residual, la celda tenían las siguientes dimensiones: 40 cm de largo, 40 cm de ancho y 50 cm de profundidad. La celda tenía forma de paralelepípedo (caja abierta) y funcionaba semejante a una pecera, su volumen de llenado total era de 60 L. Fue imposible utilizar esta celda porque requería un gran volumen de agua residual para su funcionamiento, la celda debía sumergir en su totalidad los electrodos de cobre, aluminio y hierro, conociendo que existe una relación entre el área de los electrodos y la efectividad de la transferencia de electrones, no era deseable reducir el tamaño de los electrodos y utilizar una cantidad de agua residual más baja.

Por este inconveniente se analizó la mejor forma de reducir el tamaño de la celda y poder utilizar una menor cantidad de agua residual. Se concluyó que el tamaño de la celda podía ser menor siempre y cuando los electrodos estuvieran sumergidos y tuvieran un tamaño mayor para ampliar su área superficial. Se utilizó un Beaker de 4000 ± 200 mL como celda para poder tratar un volumen de 2500 ± 200 mL de agua residual. Se realizó el dimensionamiento de este recipiente para obtener una relación entre un experimento a nivel laboratorio y el tratamiento electroquímico a nivel industrial, el mismo se obtuvo con la relación de volúmenes entre ellos. Este coeficiente, permite utilizando una tendencia lineal, poder calcular fácilmente el costo extra de energía para un volumen mucho más grande. Se mantiene la misma relación entre los electrodos del Beaker y los electrodos que se utilizarían a nivel industrial.

Se utilizaron electrodos en la celda, fueron láminas de distintos materiales, siendo cobre, hierro y aluminio. Cada lámina tenía 10 cm de largo y 6 cm de ancho y 1 mm de espesor. El cambio de los electrodos fue una de las variables utilizadas, para poder encontrar los electrodos que obtuvieran una mejor eficiencia de remoción de metales. Las corridas se realizaron utilizando la combinación de electrodos de cobre y aluminio con una corriente de 2 A, cobre y hierro a 2 A amperios, y de nuevo cobre y aluminio con una corriente de 3 A. Se utilizaron estas dos corrientes pues la fuente de poder tiene un rango ya limitado así que se utilizó una corriente

media y una corriente alta con las mismas condiciones que la primer corrida para encontrar la relación entre el amperaje, tiempo de funcionamiento y tipo de electrodos utilizado.

Como puede observarse en la Tabla # 5 y # 6, la primera corrida con electrodos de cobre y aluminio a 2 A de corriente, mostró la mejor remoción de metales, con un $97.3 \pm 10.9\%$ de remoción de cinc y un $93.9 \pm 8.8\%$ de remoción de manganeso. Como puede observarse en los resultados, existen concentraciones finales más bajas de metales, pero la primera corrida fue la que presentó una mayor reducción en la concentración de metales, en base a la concentración del agua residual inicial. El agua muestreada de la primera corrida tenía mayor contaminación y presencia de cinc y manganeso. La primera muestra tenía una concentración promedio de 20.5 ± 0.7 mg/L de manganeso y 33.9 ± 5.0 mg/L de cinc, en comparación que las demás que en promedio tenían inicialmente una concentración más baja de cinc y manganeso, siendo 8.1 ± 0.2 mg/L y 32.0 ± 2.2 mg/L respectivamente. Por ello un agua residual altamente contaminada de metales tendrá una eficiencia alta, porque necesitará un tiempo menor para separar casi la misma cantidad de metales que otra muestra. Además la transferencia de masa de la solución hacia la emulsión producida será mayor por la alta diferencia de concentraciones entre las soluciones.

Durante la primera corrida se verificó el método de electrocoagulación, el cual enuncia que el ánodo liberará electrones que serán transportados hacia el cátodo, en el caso de la primera corrida el cobre liberaba electrones siendo el ánodo y el aluminio los recibía. Como confirmación del transporte de electrones satisfactoria, se pudo observar que efectivamente según el método el cátodo sería el electrodo de sacrificio, empezando a consumirse poco a poco y produciendo burbujas de hidrógeno y oxígeno, el hidrógeno y oxígeno es liberado porque el agua residual se electroliza debido a la corriente y la solución produce iones Hidroxilos, que se separan en moléculas gaseosas de hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno y oxígeno liberado forma una espuma en la parte superior de la solución de agua residual, la misma espuma es la encargada de atraer los diferentes contaminantes en el agua y se sabe que es la encargada de tomar los metales como el cinc y el manganeso, porque las muestras finales tomadas fueron de la solución inferior de la celda, ver Figura # 12. La celda operó durante 1.5 horas.

Durante la segunda corrida se realizó con electrodos de hierro y cobre, a una corriente de 2 A. En la segunda corrida se esperaba que el hierro fuera el electrodo de sacrificio, y éste se consumiera por la transferencia de electrones del cobre hacia el hierro. La transferencia de electrones se realizó pero el cobre también fue afectado por la corriente, puesto que se consumió de la misma forma que el electrodo de sacrificio, el cual era el hierro, esto se debe a que las láminas utilizadas como electrodos no son metales puros, y no se poseía información técnica de las láminas, por lo mismo pudo haber existido una diferencia de electronegatividades, produciendo que él también se consumiera en gran parte. A pesar de este fenómeno, la

remoción de metales en la celda fue satisfactoria, durante esta corrida se obtuvo un promedio de $90.12 \pm 11.88\%$ de remoción de Manganeso y un $97.30 \pm 4.25\%$ de remoción de Cinc. La diferencia con la primera corrida fue la concentración inicial de Manganeso y Cinc, la cual fue bastante menor, tomando en cuenta que se tomó la muestra en la misma pileta de tratamiento de agua en la planta de producción de baterías, pero en un punto distinto del contenedor. El agua residual muestreada poseía menor cantidad de Manganeso (8.1 ± 0.2 mg/L) y una cantidad similar de cinc (32.01 ± 7.8 mg/L).

A pesar de la gran eficiencia de remoción de metales durante el tratamiento electroquímico se observó de la misma forma que en la primera corrida la formación de la espuma, con la diferencia que la espuma tomaba cierto color rojizo, esto es debido a la formación de óxidos de hierro al liberar los electrones del mismo. Esto no es deseable porque podría contaminar en una mayor forma el agua residual produciendo elementos ferrosos en la solución. Esto no puede resolverse, ya por la transferencia del hierro al cobre, se liberan iones ferrosos que aumentan la concentración del hierro en el agua.

Durante la tercera corrida, luego de ver las diferencias entre la combinación de electrodos: aluminio-cobre y hierro-cobre, se decidió realizar la tercera corrida con la combinación de electrodos entre aluminio y cobre con una corriente de 3 A. El agua muestreada para esta corrida poseía también una menor concentración inicial de Manganeso y Cinc. Su concentración inicial promedio era de 2.6 ± 0.8 mg/L y 36.3 ± 11.6 mg/L de Cinc. La celda electroquímica operó durante 2.5 horas y obtuvo un porcentaje de remoción de $71.0 \pm 4.18\%$ para Manganeso y un porcentaje de $95.9 \pm 14.8\%$ para Cinc. Durante esta corrida al aumentar la corriente eléctrica se pudo observar que el electrodo de sacrificio, el cual era el aluminio, se consumió en menos tiempo que la corriente menor, esto se debe a que al aumentar la corriente se favoreció la transferencia de electrones del cobre al aluminio y el mismo produjo más hidrógeno y oxígeno gaseoso. La reducción de concentración de Manganeso no fue tan grande como las otras corridas, esto se debe a que la muestra de agua residual tomada poseía inicialmente una concentración más baja de metales. La celda electroquímica reducirá considerablemente la concentración de metales pero será hasta un punto límite y no en su totalidad, esto se debe a que cuando el electrodo de sacrificio pierda sus propiedades la transferencia de electrones ya no será efectiva.

La celda fue satisfactoria y cumple con la factibilidad técnica de la purificación de agua residual, específicamente contaminada con metales pesados, como el Cinc y Manganeso. Según lo observado en las tres diferentes pruebas se logró reducir en un porcentaje mayor al 90% los metales de manganeso y cinc, presentes en mayor concentración por el reactivo electrolítico utilizado durante el proceso de producción de baterías.

La celda electroquímica cumple la teoría de remoción de metales planteada durante este proyecto y se considera viable a utilizar durante los diferentes procesos industriales que utilizan reactivos electrolíticos y utilizan diferentes metales en su proceso de producción.

Durante dos pruebas fue utilizado un agitador magnético durante el tratamiento electroquímico, el agitador fue satisfactorio porque aumentaba el movimiento de las partículas contaminantes hacia la superficie de la solución. Durante la prueba # 2 se realizó sin un agitador magnético, el cambio en el proceso es que las soluciones no se separan fácilmente y es difícil lograr observar las dos fases y es más complicado formar la emulsión y espuma en la parte superior de la solución. Logró separar de una mejor manera las dos fases que eran fácilmente visibles y evitó que ciertos contaminantes se depositaran en el fondo de la celda.

Durante la segunda corrida entre los electrodos de hierro y cobre, fue imposible utilizar el agitador magnético, esto debido a la atracción de la lámina de hierro con el agitador que generaba demasiado movimiento del electrodo, evitando que ambos se encontraran frente a frente en la prueba. Puede mejorarse utilizando un contenedor que tenga una mayor altura, evitando que los electrodos se encuentren cerca del agitador magnético causando el campo magnético entre ambos. Si el agitador magnético se encuentra en el fondo de un recipiente mayor y los electrodos a una distancia considerable no existirá problema con la agitación y este tipo de electrodos.

Las muestras tomadas para las pruebas son de la piscina de recepción de agua residual de proceso, por lo que es agua sin ningún tipo de tratamiento de purificación. Con ello se concluye que el lugar ideal para su implementación es al inicio del proceso durante la recepción de agua. Pues se comprobó en las pruebas que la reducción de metales es mucho mayor, cuando la concentración inicial de metales es alta, durante el tratamiento la concentración de metales disminuirá considerablemente hasta un valor mínimo de concentración, por esta razón se prefiere el agua directa de proceso, pues es la que mayor concentración de metales posee, esto mismo aumentará la eficiencia de la celda.

Para el mejor funcionamiento de la celda, la misma debería de trabajar con un proceso de remoción de la capa superior de espuma que atrae todos los contaminantes, esto con el fin de separar la fase tratada y eliminar los residuos de la espuma. Además debe utilizarse un filtro después del tratamiento para remover partículas sólidas y sólidos suspendidos en el agua residual tratada, puesto que se pueden observar restos en la fase tratada durante las pruebas, esto con el fin de cumplir con las normativas del acuerdo 236-2006. En la planta de producción de baterías, se cuenta con un sistema de filtros, los cuales seguirían estando en uso para la remoción de los sólidos suspendidos y partículas en la solución de agua tratada electroquímicamente.

En comparación con la ley de descarga de agua residual el acuerdo gubernativo 236-2006, únicamente se tiene un dato de descarga para la concentración de Cinc, la cual debe ser de 10 mg/L durante todas las etapas para poder descargar el agua residual. Las muestras de agua residual inicial, contenían aproximadamente una concentración de 35 mg/L de Cinc, valor que no cumple el acuerdo gubernativo y no es posible descargar las aguas de proceso. Para su reducción puede utilizarse el tratamiento electroquímico y poder lograr remover los metales.

Con el análisis anteriormente descrito, se concluye que la celda de tratamiento electroquímico es factible técnicamente, utilizando electrodos de aluminio y cobre en su utilización, para la remoción de metales como cinc y manganeso en plantas de producción de baterías y aplicaciones que utilicen metales durante su proceso de producción. Se eligió esta combinación, porque a pesar de la posible formación de óxidos de aluminio que son más contaminantes que los óxidos de hierro, es mucho más sencillo recuperar, separar y reciclar el aluminio en comparación al hierro, por lo que trae beneficios ambientales al reducir la cantidad de energía y recursos necesarios para eliminarlo.

Las pruebas realizadas para la medición de concentración de metales como cinc y manganeso fueron realizadas con métodos validados con el equipo de medición Hach Data logging Colorimeter DR/890. Para la prueba de cinc, fue necesario diluir la mezcla y realizar una alícuota de menor concentración porque la muestra inicial de agua residual superaba la concentración máxima de lectura del equipo, por lo mismo se realizó una dilución en un balón aforado de 100 mL, tomando 1 mL de la muestra inicial de agua residual.

Además, se obtuvo un diseño de un reactor para llevarlo a escala industrial, el mismo se dimensionó tomando la suposición que la reacción llevada a cabo es de tipo elemental, esto consiste en que la molecularidad en la estequiometría coincide con el orden de reacción que puede obtenerse de pruebas en el laboratorio con mediciones de concentración en relación al tiempo de tratamiento. Se prefirió utilizar un reactor de tanque agitado o CSTR, puesto que es un reactor continuo que tiene la eliminación y salida de los componentes contaminantes de la solución, por lo

que sería una buena alternativa para el proceso. El modelo de diseño busca la conversión del 99% de los metales pesados que se encuentran en la solución y se realizó con un promedio de las concentraciones iniciales de Manganeso, debe evaluarse las diferentes concentraciones iniciales que se poseen y variar la constante obtenida en la memoria de cálculo (Ver cálculos de muestra, cálculo D), para el mismo modelo es necesario conocer el flujo másico de entrada de agua residual y la densidad de la misma. Se realizó el mismo procedimiento para la reacción de cinc.

El costo obtenido para la escala laboratorio fue de Q0.73/L de agua residual, el costo calculado incluye todas las variables, el costo de energía eléctrica promedio tomado de Q1.50/kWh, los electrodos de cobre y aluminio preferiblemente, pues fueron los electrodos de mayor resultado en el tratamiento y tiene mayor facilidad para su recuperación, se calculó el costo por cm de lámina de aluminio y cobre que fueron los más satisfactorios y es de Q0.025/cm². Estos costos son utilizados para una corrida de tratamiento de agua de 2.5 L dentro del Beaker de 4000 ± 200 mL.

El tratamiento electroquímico no sería bien visto en lugares donde el costo de la energía eléctrica es mayor al costo de los floculantes químicos, pues para su operación la electricidad es el único ámbito que genera un costo, además de la sustitución de los electrodos, de los cuales uno será sacrificado y deberá de ser cambiado durante cada cierto tiempo. Se concluye que para un tratamiento electroquímico de aguas residuales, es viable económicamente, siempre y cuando el agua residual inicial posea en su composición metales pesados que puedan ser eliminados con el procedimiento.

El procedimiento actual de la planta cuenta con un proceso de aireación, floculación por medio de químicos y un sistema de filtros. Se consultó con el gerente de la planta de producción de baterías y concluyó que el sistema sería bueno para utilizar en un lavado de la solución inicial para la recuperación de metales. Comparando con el tratamiento de aguas de la planta de Empagua, Lo de Coy, donde el costo de limpieza se divide en el producido en invierno y en verano. En invierno se tiene un total de 43.33 horas y verano 30 horas, el costo promedio anual de sueldos de limpieza es de Q 35,614.96, este costo más los floculantes químicos utilizados para remover las partículas metálicas y otros contaminantes generan un costo mayor por el hecho de la compra de reactivos. El sulfato de aluminio tiene un costo promedio de Q40/kg, y al utilizarlo a nivel industrial en una planta de tratamiento de aguas su costo es elevado.

Como se comprobó anteriormente, la remoción de metales es efectiva técnicamente, y un proceso efectivo genera ganancias económicas y beneficios ambientales.

En comparación con el tratamiento convencional de aguas residuales, la diferencia radica en que el costo principal de la operación electroquímica es únicamente la electricidad y la utilización de electrodos que pueden ser trozos metálicos de aluminio, cobre o hierro, y en el tratamiento de

aguas convencional, es necesario utilizar floculantes químicos. El costo extra de estos reactivos químicos se suma a la energía eléctrica utilizada para los motores de las bombas y otros equipos utilizados.

Es conveniente decir que el tratamiento electroquímico sería ideal para su utilización donde la electricidad fuera generada por una fuente renovable, no únicamente por el ahorro económico que resultaría, sino por la reducción del impacto ambiental negativo que pudiera tener la generación de electricidad de combustibles fósiles.

El impacto ambiental asociado al tratamiento electroquímico radica especialmente en el impacto obtenido por la energía eléctrica y la utilización de reactivos químicos como floculantes. Cómo puede observarse en la tabla No.10 y No. 11, se realizó una matriz de aspectos ambientales con el fin de evaluar la cantidad de los mismos que serían significativos a criterio personal. Se utilizó una ponderación en cuanto a la frecuencia, gravedad del impacto y permanencia del impacto. La valoración de la matriz se cuantificó con los números: 10, 20, 40 y 80, siendo bajo, medio bajo, medio y alto respectivamente. Se analizó y concluyó que los aspectos ambientales que tuvieran una sumatoria mayor o igual a 160 serían considerados significativos. Además se consideró significativo los aspectos ambientales que tienen requerimientos de ley.

Como puede observarse en la tabla No. 8 y No. 9, el tratamiento de aguas residuales convencional tiene una mayor cantidad de aspectos ambientales significativos en el consumo de químicos, posibles derrames de los mismos y producción de lodos específicamente.

Mientras que el tratamiento electroquímico, tiene como aspecto significativo la producción de lodos o la capa de solución contaminante depositada en el superior del tanque y la generación frecuentes de los desechos de electrodos por su descomposición.

Uno de los mayores impactos ambientales producido en la celda electroquímica es la gran utilización de energía eléctrica, la cual en Guatemala aún es producida en su mayoría por combustibles fósiles, que a su vez generan gases de efecto invernadero. La alternativa sería utilizar energía de fuentes renovables como las hidroeléctricas o energía solar obtenida por paneles solares. Con estas opciones se reduciría el costo de operación del tratamiento, además de la huella de carbono por los gases de efecto invernadero producidos.

El análisis estadístico realizado, muestra datos de dispersión como la varianza y la desviación estándar, los cuales pueden observarse a partir de la tabla No. 12 para cada una de las pruebas. La varianza de las muestras de cinc, esalta en comparación con las demás, esto se debe a que, la concentración varía por falta de homogenización y la dilución para la medición afecta la concentración final. Las demás pruebas poseen una varianza pequeña, lo cual enuncia que los datos no se encuentran dispersos y existe alguna relación entre los mismos. Se calculó el

coeficiente de asimetría, lo cual en algunos casos como puede observarse en las tablas de análisis estadístico, los valores son negativos y positivos. Los valores positivos enuncian que la mayoría de datos tomados se encuentran a la derecha de la media calculada, la magnitud de los valores también da que tan alejados estuvieron, el de mayor magnitud es de 1.7 a la izquierda del valor de la media en la concentración inicial de Manganeso para la segunda corrida para los electrodos de hierro y cobre. Las dispersiones en los datos se debe a que en la segunda corrida donde se operó con electrodos de hierro y cobre, no se utilizó un agitador magnético porque el mismo interfería con el electrodo de hierro moviéndolo mucho dentro de la celda, el hecho de la falta de agitación provocó que la concentración en el recipiente no fuera homogénea, y al momento de tomar alícuotas para las pruebas químicas éstas no fueran tan similares.

Las fuentes de error producidas durante la experimentación se basan en errores sistemáticos por la medición de los equipos y sus incertidumbres, errores humanos por parte del analista y errores aleatorios. Los errores sistemáticos se produjeron durante el llenado de la celda, el manejo de la fuente de poder y las pruebas de concentración de metales. Los errores sistemáticos se deben tomar en cuenta puesto que los equipos siempre poseen una incertidumbre en su medición y nunca vamos a lograr obtener un valor exacto en las pruebas. Los errores humanos son producidos al momento de realizar soluciones, agregar volúmenes y operar los equipos. Por último los errores aleatorios, el principal observado durante la experimentación fue que los electrodos utilizados eran mezclas metálicas y no se conocía las especificaciones de los materiales, pudiendo variar la electronegatividad de las láminas.

Tratamiento de biodiésel. El objetivo general del módulo de purificación, separación y lavado de biodiésel era el diseño de celdas electroquímicas para mejorar el proceso de separación de biodiésel, purificación de agua y purificación de suelos, con un aumento en la eficiencia y reducción en el impacto ambiental del mismo.

Para el cumplimiento del objetivo se planteó una comparación utilizando la metodología de colaescencia electrostática con la metodología de decantación por gravedad, con esta comparación se buscó determinar la reducción de tiempo de separación de biodiésel y glicerina, así como la calidad del biodiésel obtenido.

La metodología descrita se realizó a partir de una mezcla de biodiésel glicerina realizada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias a partir de aceite ideal, la cual fue realizada con fines experimentales a escala laboratorio, mientras que para la producción a escala piloto se realiza de aceite residual.

La mezcla utilizada de biodiésel- glicerina es clasificada como emulsión, en la cual la separación de fases sigue la ley de Stokes, con velocidad muy pequeñas describiendo un flujo

laminar, haciendo que la separación de las fases tome mucho tiempo. Partiendo de este principio se puede aplicar decantadores electrostáticos para acelerar este proceso, según investigaciones realizadas por la Universidad de Salamanca la aplicación de voltaje en la emulsión producen un campo eléctrico, haciendo que las gotas del emulsionante se polaricen y se logra una lineación de las mismas, en donde por el aumento del tamaño en las gotas produce una decantación más rápida.

Lo anterior se comprueba con la metodología planteada, en donde se busca tener una medición de tiempo de separación a cada minuto, comparando la coalescencia electrostática y la decantación por gravedad, para esto se realizó el montaje del decantador electrostático siguiendo las especificaciones y dimensiones proporcionadas por el módulo de diseño dentro del megaproyecto, en donde se estableció una cantidad de 200.00 ± 0.05 mL de muestra utilizada y electrodos de placas de dos materiales, aluminio-aluminio y cobre – cobre, ambas placas dentro del sistema son del mismo material, para poder propiciar solo el traspaso de electrones sin ninguna reacción presente en el sistema que pueda contaminar al biodiésel de los metales utilizados, esto ya que al tener contacto con motores de combustión interna, pueden provocar el daño del vehículo.

El proceso de experimentación se realizó con una corriente de 2.00 ± 0.05 , un voltaje de 30.00 ± 0.05 V, muestreo inicial en los primeros 30 segundos y posteriormente cada minuto, en donde se tomó un volumen de 5.00 ± 0.05 mL con un pipeta graduada y de esta forma se llenaron los 11 tubos de ensayo para lograr una relación de volumen de glicerina en función del tiempo de separación.

Evaluando esta comparación en la Gráfica No. 1 en la página 44, en donde se puede ver que la separación con ambas metodologías, determinando que la metodología de coalescencia electrostática alcanza una separación más rápida que con la decantación por gravedad. Como se puede observar en dicha gráfica en los tres casos la separación sigue un comportamiento polinomial de grado 2, con una ecuación de la gráfica para la metodología por coalescencia electrostática con electrodos de aluminio-aluminio de $y = 0.0098 \pm 0.012x^2 - 0.2241 \pm 0.012x + 1.3322 \pm 0.0711$ con un R^2 de 0.9805, con electrodo de cobre –cobre se tiene la siguiente ecuación $y = 0.013 \pm 0.010x^2 - 0.2509 \pm 0.010x + 1.3099 \pm 0.0617$ con un R^2 de 0.9916 y por último con la metodología aplicando decantación por gravedad se cumple la siguiente ecuación $y = 0.0224 \pm 0.0267x^2 - 0.4372 \pm 0.0267x + 2.3510 \pm 0.1587$ con un R^2 de 0.939, al observar el R^2 de 0.9391, tomando el eje x como tiempo de separación y el eje y como el volumen de glicerina presente. Con todas las ecuaciones se puede ver que la tendencia es polinomial ya que se acercan bastante a la unidad y hay puntos en donde la decantación se da en un proceso más lento, sin embargo con la metodología de coalescencia electrostática tiene una separación

uniforme ya que no se ven cambios de concavidad tan pronunciados en el gráfico como lo que pasa con la metodología de decantación por gravedad.

Por otro lado al comparar el comportamiento de la separación entre la aplicación de electrodos de aluminio- aluminio se pueden ver ciertos cambios, al final logran tener una separación en la misma proporción, sin embargo al comparar el volumen de glicerina presente en la muestra se puede ver que para los 10 minutos de la medición de la separación con el electrodo de aluminio-aluminio se tiene 1.70% de glicerina, mientras que al aplicar el electrodo de cobre-cobre se tiene un 1.53% de glicerina, por lo que se puede ver una separación más eficiente con cobre, esto se puede dar a la capacidad de ionización y de transferencia de electrones entre una placa y la otra, sin embargo en las experimentaciones realizadas con anterioridad se utiliza acero inoxidable ya que tiene una mayor capacidad de conducción y se puede evitar la corrosión en contacto con el biodiésel.

Con respecto al tiempo de separación con 10 minutos en cada una de las metodologías aún no se había logrado la separación completa de la emulsión, ya que aún se tenía presencia de glicerina en la muestra de alrededor de 2% en relación a la muestra total tomada de 5.00 ± 0.05 mL que fue mencionada anteriormente. Posterior a la medición de tiempo se procedió a realizar el proceso de lavado para las tres muestras con metodología de coalescencia electrostática con electrodo de aluminio-aluminio y cobre-cobre y la metodología de decantación por gravedad. Según los resultados obtenidos en la determinación de biodiésel se pudo ver que tanto con los electrodos de aluminio-aluminio como de cobre-cobre se tiene una densidad que entra en el rango de conformidad proporcionada por la ASTM siendo esta de 0.872 ± 0.503 g/mL y 0.878 ± 0.507 g/mL respectivamente, mientras que para la metodología por decantación se alcanza dicha conformidad hasta el segundo lavado, ya que en el primer lavado se tienen una densidad de 0.964 ± 0.556 g/mL, lo cual sobrepasa el rango de conformidad que es de 0.86 – 0.90 g/mL, esto determina que con la coalescencia electrostática se reduce el uso de agua en un 50% para realizar el proceso de lavado.

Tomando en cuanto la densidad en las muestras tratadas con ambas metodologías, lo mismo ocurre con las pruebas de pH, en donde se obtiene un pH de 7.010 ± 0.014 y 7.035 ± 0.021 para electrodos de aluminio-aluminio y cobre-cobre respectivamente, aun cuando sobre pasan el rango de 6 -7 establecido por la ASTM, la cantidad mayor a la del rango no es significativa, lo cual no ocurre en el caso de la metodología de decantación por gravedad la cual se tiene un pH de 8.080 ± 0.028 . Esto comprueba de igual forma que solo es necesario un lavado con esta metodología.

Por último, para ver la rentabilidad de la metodología se orientó en la incrementación de la capacidad de producción utilizando la metodología de coalescencia electrostática, la cual tuvo un

incremento de 30.30% para los electrodos de aluminio – aluminio, mientras que para se tiene una incremento de 33.33% para los electrodos cobre-cobre. Con este incremento en la capacidad de producción se tiene un incremento en los ingresos por ventas, ya que se puede producir un volumen mayor de biodiésel en una menor cantidad de tiempo.

Con respecto a las limitaciones de la metodología realizada estaban orientadas a la fuente de poder utilizada, ya que según experimentaciones realizadas con anterioridad el método es mucho más eficiente con aplicación de voltajes grandes, pero la fuente de poder utilizada tiene una capacidad máxima de 30 V, siendo esta la principal razón para que no se pudiera ver una diferencia mayor en el tiempo de separación ya que en la literatura se recomienda voltajes del orden de 2000 V. Por otro lado la separación de la emulsión antes de empezar las mediciones siempre pueden ser consideradas como fuentes de error, ya que se puede tener valores de separación que no son confiables, para prevenir esto la emulsión fue mezclada en todos los puntos de experimentación antes de comenzar las mediciones de tiempo, la agitación antes de realizar las mediciones de tiempo se estandarizaron, aplicando agitación durante 1 minuto en todas las muestras.

También, debe considerarse que todas las estimaciones y cálculos se realizaron para láminas de 1mm de espesor, sin embargo el espesor de los electrodos varía con las características del fabricante por lo que debe tomarse en cuenta el efecto que tiene el grosor de los metales en los procesos de conductividad por el electrodo, así como la capacidad de transferencia de masa y la vida útil de los electrodos y el sistema, estos efectos pueden variar dependiendo del proceso que se esté trabajando con la celda, por ejemplo, el cambio en la vida útil del sistema será más evidente en el tratamiento de aguas residuales debido a que en este proceso existe un electrodo de sacrificio que se corroe con el uso de la celda.

VIII. CONCLUSIONES

- La porosidad del suelo dada por análisis granulométrico afecta a la adsorción de la solución EDTA para favorecer la transferencia de masa beneficiando el flujo electroosmótico en la celda en la formación de ligandos de Pb aumentando la efectividad de la celda a mayor porosidad por lo que es necesario conocer la porosidad del suelo analizado.
- La constante de estabilidad condicional para el ligando formado en la celda en 96 horas de utilización fue de $3.1623E+11 \pm 1.0544 \times 10^9$ denotando la región de pH igual a 5 más estable para la celda electroquímica.
- La constante de transferencia de masa para el flujo completamente laminar de los ligandos es de 3.08713 ± 0.07631 . Este valor debe ser comprado mediante análisis directo simplificando su obtención con el modelo de cinética de reacción y un valor conocido de concentración final.
- La concentración teórica en el cátodo de cobre para la remoción es de $9.229 \times 10^{-4} \pm 1.02413 \times 10^{-7}$ g (Pb)/cm³ resultado que depende directamente de la constante de transferencia representada por la formación de ligando y la falta de un flujo de remoción continuo en la celda lo cual no favorece la transferencia de masa.
- La efectividad de remoción teórica es de 29.9% para la concentración de plomo en el cátodo lo cual cumple con los resultados esperados por análisis de pH y utilización de agente de remoción EDTA.
- Se presenta como método viable la aplicación de una corriente continua de 20 V para la remoción esperada en base al modelo de cinética que predice el tiempo óptimo de operación efectivo en 68 minutos lo que representa un costo de operación de Q. 0.10 expresados únicamente por consumo de kWh para este tipo de suelo.
- La celda electroquímica de dos electrodos de placa, un cátodo de cobre y ánodo de aluminio, con dimensiones de 10cm de largo y 6cm de ancho, colocados en paralelo a una distancia de 6cm con una corriente de 2 amperios, funcionó para reducir la cantidad de cinc y manganeso en solución en una cantidad de 2L de agua residual del proceso de tratamiento de agua de una planta de producción de baterías.

- La celda electroquímica de dos electrodos de placa, un cátodo de cobre y ánodo de hierro, con dimensiones de 10cm de largo y 6cm de ancho, colocados en paralelo a una distancia de 6cm con una corriente de 2 amperios funcionó para reducir la cantidad de cinc y manganeso en solución en una cantidad de 2L de agua residual del proceso de tratamiento de agua de una planta de producción de baterías.
- El proceso de la celda electroquímica de dos electrodos de placa, un cátodo de cobre y ánodo de aluminio, con dimensiones de 10cm de largo y 6cm de ancho, colocados en paralelo a una distancia de 6cm con una corriente de 3 amperios funcionó para reducir la cantidad de cinc y manganeso en solución en una cantidad de 2L de agua residual del proceso de tratamiento de agua de una planta de producción de baterías.
- Al utilizar la celda electroquímica de dos electrodos de placa, un cátodo de cobre y ánodo de aluminio, con dimensiones de 13cm de largo y 19cm de ancho, colocados en paralelo a una distancia de 40cm con una corriente de 2 amperios funcionó para redistribuir la concentración de plomo en el reactor con un tiempo de operación de la celda de 24 horas
- Modificando el arreglo para un cátodo de cobre y ánodo de aluminio, con dimensiones de 13cm de largo y 19cm de ancho, colocados en paralelo a una distancia de 40cm con una corriente de 2 amperios funcionó para redistribuir la concentración de plomo en el reactor con un tiempo de operación de la celda de 48 horas
- El proceso que utiliza un cátodo de cobre y ánodo de aluminio, con dimensiones de 10cm de largo y 6cm de ancho, colocados en paralelo a una distancia de 6cm con una corriente de 2 amperios y 20 voltios funcionó para reducir el tiempo necesario para separar una mezcla de biodiésel y glicerina
- Variando el arreglo del proceso para un cátodo de cobre y ánodo de aluminio, con dimensiones de 10cm de largo y 6cm de ancho, colocados en paralelo a una distancia de 6cm con una corriente de 2 amperios y 30 voltios funcionó para reducir el tiempo necesario para separar una mezcla de biodiésel y glicerina.
- Al utilizar electrodos de Cobre y Aluminio y operar por 1.5 horas, con una corriente de 2 amperios, se registra una reducción de concentración de metales de un $97.3 \pm 10.9\%$ para el Cinc y un $93.9 \pm 8.8\%$ para Manganeso.
- La celda electroquímica que utiliza electrodos de Hierro y Cobre y opera por 1.5 horas, con una corriente de 2 amperios, registró una reducción de concentración de metales de $90.12 \pm 11.88\%$ para Manganeso y un $97.30 \pm 4.25\%$ para Cinc.

- La recuperación de aluminio en agua utiliza un proceso más sencillo que el de la remoción de hierro y el electrodo de aluminio presenta una mayor remoción de metales con un $97.3 \pm 10.9\%$ para el Cinc y un $93.9 \pm 8.8\%$ para Manganeseo.
- La celda electroquímica que utiliza electrodos de Cobre y Aluminio y opera por 2.5 horas, con una corriente de 3 amperios, registró una reducción de concentración de metales de $71.0 \pm 4.18\%$ para Manganeseo y un porcentaje de $95.9 \pm 14.8\%$ para Cinc.
- La operación de tratamiento de aguas por medio de un sistema electroquímico de electrocoagulación es factible técnicamente, además que remueve eficientemente la concentración de metales presentes en los efluentes.
- El tratamiento de aguas por medio de un sistema electroquímico reduce el impacto ambiental en comparación del proceso de tratamiento de aguas regular, además que posee una menor cantidad de aspectos ambientales significativos.
- Por los resultados obtenidos, la celda electroquímica sería el primer paso del tratamiento de aguas residuales de una planta que maneja reactivos con presencia de manganeso y cinc, teniendo como fin reducir la cantidad de estos.
- Se realizó una metodología para medición de tiempo utilizando el método de la coalescencia electrostática comparada con la metodología de decantación por gravedad, en donde se determinó que a los 10 minutos de la separación aún había presencia de glicerina en la muestra, con un porcentaje de 1.70% para el electrodo de aluminio-aluminio y un 1.53% para el electrodo cobre-cobre, mientras que para la metodología de decantación por gravedad se observó un 5.10%, esto determina que la metodología por coalescencia electrostática provoca una separación más rápida.
- Utilizando las pruebas de calidad para determinar densidad fue posible determinar que con la metodología de coalescencia electrostática es necesario solamente un lavado, ya que para los valores de densidad utilizando el electrodo de aluminio-aluminio se obtuvo 0.872 ± 0.503 g/mL, para el electrodo de cobre-cobre se obtuvo 0.878 ± 0.507 g/mL, ambas ya cumplen con el rango establecido por ASTM, mientras que para la muestra aplicando decantación natural se obtuvo 0.964 ± 0.556 g/mL, la cual no cumple.
- Utilizando las pruebas de calidad para determinar pH fue posible determinar que con la metodología de coalescencia electrostática es necesario solamente un lavado, ya que para los valores de densidad utilizando el electrodo de aluminio-aluminio se obtuvo 7.010 ± 0.014 , para el electrodo de cobre-cobre se obtuvo 7.035 ± 0.021 , ambas ya cumplen.

con el rango establecido por ASTM, mientras que para la muestra aplicando decantación natural se obtuvo 8.080 ± 0.028 la cual no cumple.

- Las ventajas de la aplicación de la metodología de coalescencia electrostática cumple con una separación más rápida de la emulsión biodiésel- glicerina, por lo que se puede observar un incremento en la producción de 30.00% utilizando electrodo aluminio-aluminio y 33.33% utilizando electrodo cobre-cobre.
- La comparación entre el electrodo de aluminio-aluminio y cobre-cobre indicó que la separación por cobre-cobre es más rápida por una diferencia de 0.2% comparando el porcentaje de glicerina presente en la muestra a los 10 minutos, esto se puede dar a la capacidad de ionización mayor por parte del cobre.

IX. RECOMENDACIÓN

- Verificar el análisis de los materiales utilizados en los electrodos y asegurarse de utilizar materiales de composición conocida para tener un mejor control de las variables en los procesos, disminuyendo las condiciones desconocidas.
- Repetir pruebas con distintas combinaciones y configuraciones para los electrodos utilizados para el proceso, evaluar el uso de electrodos cilíndricos o de otra geometría para determinar el efecto del área superficial del electrodo en los procesos.
- Realizar pruebas variando únicamente el volumen de las muestras tratadas para determinar si existe algún factor de escalamiento entre la potencia requerida para el proceso y la cantidad de material a tratar.
- Ejecutar pruebas con una fuente de poder con mayor capacidad de voltaje para completar el análisis del efecto de la cantidad de corriente aplicada al sistema mediante los electrodos.
- Celdas medio hídricas
 - Analizar cambio de concentración en la solución de agua para otras sustancias consideradas como contaminantes, por ejemplo, análisis del cambio de DQO y DBO en la solución después del tratamiento.
 - Examinar el efecto de la aplicación de una mayor diferencia de potencial en el proceso de tratamiento de la solución para un tiempo determinado.
 - Considerar el efecto la temperatura, en el proceso de tratamiento de agua residual.
 - Observar el efecto de utilizar más de dos electrodos en el proceso de tratamiento de agua residual.
 - Investigar la posibilidad de contaminación por óxidos de hierro resultado del efecto de la corriente eléctrica aplicada al electrodo de hierro.
 - Indagar el efecto de realizar el tratamiento en diferentes volúmenes para una diferencia de potencial y un tiempo determinado con el fin de encontrar un posible factor de escalamiento que relacione las condiciones del proceso y el volumen de agua a tratar.

- Celdas biodiésel
 - Comparar el efecto de la temperatura en la reducción de tiempo de separación de la solución de glicerina biodiesel.
 - Razonar el efecto de la aplicación de una mayor diferencia de potencial en el proceso de separación de la solución glicerina biodiésel para un tiempo determinado.
 - Estudiar el efecto de realizar el tratamiento en diferentes volúmenes para una diferencia de potencial determinada con el fin de determinar un factor de escalamiento que relacione la diferencia de potencial aplicado, el volumen de solución tratado y la reducción en el tiempo de separación.
 - Efectuar una investigación más profunda de los fenómenos dentro de la solución de biodiésel y glicerina para determinar el mecanismo por el cual, al procesar la mezcla con la celda electroquímica, varía el tiempo necesario para que se dé una separación de las sustancias en solución.

- Celdas medios edáficos
 - Analizar el efecto de realizar el tratamiento en diferentes volúmenes para una diferencia de potencial determinada con el fin de determinar un factor de escalamiento que relacione la diferencia de potencial aplicado, el volumen a tratar y la disminución de contaminantes.
 - Comparar el efecto de cambiar la configuración de los electrodos, utilizar electrodos de configuración cilíndrica.
 - Investigar la influencia de la aplicación de una mayor diferencia de potencial en el proceso de tratamiento de desechos.
 - Razonar los efectos del uso de una cantidad diferente de EDTA para analizar la influencia de la electroósmosis en los procesos electroquímicos en la celda.
 - Considerar los efectos del uso de una cantidad diferente de agua para analizar la influencia de la electroósmosis en los procesos electroquímicos en la celda.

- Realizar la experimentación empleando esta metodología a escala planta piloto, para determinar si las condiciones a escala laboratorio de pueden extrapolar y se tiene el mismo funcionamiento.

- Efectuar un análisis exhaustivo de que no haya desgaste de las celdas al tener contacto con el biodiésel para lograr determinar la vida útil de cada electrodo.
- Ejecutar un análisis exhaustivo de los costos del sistema de metodología electroquímica, de esta forma se puede evaluar una mayor viabilidad en relación al método de decantación ya que se requiere una inversión inicial mayor en la metodología electroquímica.
- Formalizar medición de tiempo de separación de agua y biodiésel en el proceso de lavado, utilizando la celda electroquímica para lograr una mayor reducción en el tiempo de purificación de biodiésel, ya que la mezcla biodiésel – agua también funciona como una emulsión.

X. BIBLIOGRAFÍA

1. Greg Austic & Scott Shore, 2006, *Characterization of the effect of high voltage current on the enhancement of biodiésel/glycerin separation*.
2. Cañizares, J. García-Gómez, J. Lobato y M. A. Rodrigo, *Tratamiento de aguas residuales, El tratamiento electroquímico en la depuración de efluentes industriales líquidos*, Dpto. de Ingeniería Química. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Castilla-La Mancha. págs 188-206.
3. Alvaro Arango Ruiz & Luis Fernando Garcés Giraldo, *Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea* Revista Universidad EAFIT Vol. 43 No. 147, 2007 pp, 58-57
4. Felipe de Jesús Torres del Carmen, 2008, *Diseño, construcción y pruebas de un prototipo para la producción de biodiésel a partir de aceites provenientes de recursos renovables*, CENIDET, Cuernava, Morelos, México.
5. Egdymer Elena Cordero Medina & Jesús Alfredo Manrique Acosta, 2009, *Evaluación del efecto de la electrocoagulación en la disminución de la carga contaminante en aguas residuales*, República Bolivariana de Venezuela, Universidad Rafael Urdaneta, Escuela de Ingeniería Química
6. Nelly Bibiana Morales Posada & Gema Eunice Acosta Niño, *Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas*, Ciencia e ingeniería Neogranadina, Vol. 20-1, pp. 33-44, Bogotá ISSN 0124-8170
7. Víctor Miguel Martínez Arreguín, Roberto Aurelio Nuñez, Yunny Meas Vong, Francisco Javier Avelar González, Francisco Javier Rodríguez Valadez, *Lavado de suelo contaminado con plomo y recuperación electroquímica del Pb*, Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, Parque tecnológico Sanfandila, México
8. David A. DE LA ROSA-PÉREZ, Ma. Maura Margarita TEUTLI-LEÓN y Marta E. RAMÍREZ-ISLAS, *Electroremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo*, 2007, Rev. Int. Contam. Ambient. 23(3) 129-138.
9. Pablo Santiago Hernández Lehmann, 2011, *Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación*, Universidad Politécnica de Madrid.

10. CIT-INTI, Horacio J. Alvarez, Germán Escobar, Mauro Fernández, Escuela Superior Técnica Gral. D. Manuel N. Savio. Hector J.Fasoli. *Método electroquímico para el tratamiento de efluentes de la industria textil*, Instituto nacional de tecnología industrial y Centro de investigación y desarrollo textil.
11. Carlos Ariél Cardona Alzate & Carlos Eduardo Orrego Alzate, 2009, *Avances investigativos en la producción de biocombustibles*, Universidad nacional de Colombia, Sede Manizales, Gobernación de Caldas, PNUD, Colombia.
12. García Hernández Laura, Reyes Cruz Víctor E, Veloz Rodríguez María Aurora, González Martínez. Ignacio, *Estudio preliminar de la electroremediación de suelos contaminados de la zona minera de Zimapán en una celda cilíndrica*, 26-28 de mayo del 2008 UAEH-AACTYM. Pachuca Hidalgo, Encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales X Seminario de Investigación del Programa de Doctorado en Ciencias de los Materiales
13. Dra. Tania Lorena Volke Sepúlveda & M en C. Juan Antonio Velasco Trejo, 2003, Bidegradación de hidrocarburos del petróleo en suelos intemperizados mediante composteo, Dirección de Investigación en residuos y proyectos regionales México.
14. D.R. Crow, Chapman and Hall, *Principles and Application of electrochemistry*, tercera Edición, Londres 1998
15. Duncan A. MacInnes, *The principles of electrochemieitry*, Dover Publications, New York, tercera Edición 1961
16. *Principios de electroquímica*, 8/11/2009, pagina consultada 25 Febrero de 2013 <http://es.scribd.com/doc/18421225/PRINCIPIOS-DE-ELECTROQUIMICA>.
17. Adriana Aristizábal Castillón, María Catalina Bermúdez Agudelo, 2007, Medellín, *Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de rehusó*, Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Química.
18. Mauricio Andres Hani Rodriguez, 2009, Concepción, *Utilización de un sistema híbrido basado en filtración con membranas y electrooxidación avanzada para depurar efluentes complejos*, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Depto. Ingeniería Química Civil.

XI. ANEXOS

Tabla 32: Peso del picnómetro con biodiésel después del proceso de lavado, aplicando metodología de coalescencia electrostática, utilizando electrodos de aluminio-aluminio.

No. De lavado	Corriente (± 0.05 A)	Voltaje (± 0.05 V)	Muestra 1 biodiésel + picnómetro (± 0.005 g)	Muestra 2 biodiésel + picnómetro (± 0.005 g)
1	2.00	30.00	54.007	54.218
2			53.785	53.657
Sin lavar			59.654	59.986

Tabla 33: Peso del picnómetro con biodiésel después del proceso de lavado, aplicando metodología de coalescencia electrostática, utilizando electrodos de cobre-cobre.

No. De lavado	Corriente (± 0.05 A)	Voltaje (± 0.05 V)	Muestra 1 biodiésel + picnómetro (± 0.005 g)	Muestra 2 biodiésel + picnómetro (± 0.005 g)
1	2.00	30.00	54.504	54.897
2			53.870	53.934
Sin lavar			59.765	59.765

Tabla 34: Peso del picnómetro con biodiésel después del proceso de lavado, aplicando metodología de decantación por gravedad.

No. De lavado	Muestra 1 biodiésel + picnómetro (± 0.005 g)	Muestra 2 biodiésel + picnómetro (± 0.005 g)
1	57.032	56.765
2	54.235	54.123
Sin lavar	60.935	61.023

Tabla 35: pH de las muestras de biodiésel después del proceso de lavado, aplicando coalescencia electrostática utilizando electrodos de aluminio.

No. De Lavadas	Muestra 1 Biodiésel (±0.05)	Muestra 2 Biodiésel (±0.05)
1	7.00	7.10
2	6.50	6..60
Sin Lavar	8.90	10.10

Tabla 36: pH de las muestras de biodiésel después del proceso de lavado, aplicando decantación por gravedad.

No. De Lavadas	Muestra 1 biodiésel (±0.05)	Muestra 2 biodiésel (±0.05)
1	7.00	7.10
2	6.50	6..60
Sin Lavar	8.90	10.10

Tabla 37: Propiedades generales del biodiésel según ASTM

Poder calorífico	37.27 MJ/L
Punto de inflamación	130 °C
Densidad (15°C)	0.86 – 0.90 g/cm ³
Viscosidad cinemática a 40°C	1.9 – 6.0 cSt
Mono glicéridos	0.8 % (m/m) máx
Diglicéridos	0.2 % (m/m) máx
Triglicéridos	0.2 % (m/m) máx
Glicerina Libre	0.020 % (m/m) máx
Glicerol Total	0.240 % (m/m) máx
pH	6 – 7

Tabla 38: Propiedades generales de la glicerina.

Fórmula	C ₃ H ₈ O ₃
Densidad	1.26 g/cm ³
Punto de ebullición	290 °C
Punto de fusión	17.8°C
Masa molar	92.094 g/mol
Solubilidad	En agua
Viscosidad	1490 cP

Tabla 39: Lectura de nivel de glicerina presente en los tubos de ensayo utilizados para depositar las muestras con el método de coalescencia electrostática y decantación por gravedad.

Tiempo (±0.05min)	Nivel de glicerina Aluminio- Aluminio (±0.05 cm)	Nivel de glicerina con electrodo Cobre-Cobre (±0.05 cm)	Nivel de glicerina Decantación por gravedad (±0.05 cm)
0.50	1.20	1.30	2.30
1.00	1.10	1.00	1.60
2.00	0.80	1.00	1.60
3.00	0.70	0.70	1.60
4.00	0.60	0.65	0.90
5.00	0.40	0.60	0.90
6.00	0.30	0.40	0.60
7.00	0.30	0.30	0.40
8.00	0.20	0.20	0.30
9.00	0.10	0.10	0.30
10.00	0.10	0.09	0.30

CÁLCULOS DE MUESTRA

1. Cálculos de muestra

a. Alicuota de solución agua residual para medición de cinc. Para la medición de Cinc en el equipo HachDataloggingColorimeter DR/890, se utilizó el único método existente del equipo que medía un rango de 0-3 ppm Zn. La solución inicial de agua residual contenía una concentración mayor a 3 ppm por lo que se procedió a realizar una dilución y alícuota dentro de un balón de 100 mL, agregando 1 mL de muestra de agua residual. La lectura que el equipo brindó se multiplicó por el factor de dilución para obtener la concentración real. Ejemplo: Corrida 1, electrodos de cobre y aluminio, muestra 2.

$$[Zn] = [Zn^*] * \frac{(100 - 1)ml}{1 ml solución} \text{ (Ecuación \# 2)}$$

$$[Zn] = 0.3 \pm 0.1 \frac{mg Zn}{L} * (99) = 29.7 \pm 0.1 \frac{mg Zn}{L}$$

b. Porcentaje de reducción de concentración de manganeso y cinc. El porcentaje de reducción de la concentración entre las soluciones iniciales y después del tratamiento se obtuvo realizando la diferencia de concentración inicial y final, dividiéndolas entre la concentración inicial y así poder sacar la reducción en base al punto inicial. Ejemplo: Corrida 1, electrodos de cobre y aluminio, muestra 1, Manganeso.

$$\% \text{ Reducción} = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} * 100 \quad (\text{Ecuación \# 3})$$

$$\% \text{ Reducción Mn} = \frac{20.0 \pm 0.1 - 1.9 \pm 0.1 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{20.0 \pm 0.1 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} * 100 = 90.5 \pm 0.839\%$$

c. Costos de operación. Para obtener los costos de operación se tomó en cuenta la compra de la fuente de poder de corriente directa, los electrodos y el costo de energía eléctrica. Los electrodos tienen que intercambiarse durante cada corrida por ser el electrodo de sacrificio. Se calculó además el posible costo mensual y anual con corridas de 2.5 horas.

$$\text{Costos de operación} = \text{costo de electricidad} + \text{costo de electrodos} \quad (\text{Ecuación \# 4})$$

$$\text{Costos de operación} = Q0.3375 + \frac{Q746}{\text{cm}^2} * (10 \text{ cm} * 6 \text{ cm}) = Q1.8295$$

$$\text{Costos de operación} = \frac{Q1.8295}{2.5 \text{ L agua}} = \frac{Q0.7318}{\text{L agua}}$$

d. Modelo propuesto para diseño de reactor, a nivel industrial (Mn^{+2}). El modelo realizado como ejemplo está diseñado únicamente para concentraciones iniciales de 10 mg/L de Manganeso, puesto que el tiempo de residencia varía según la concentración inicial. Para otras concentraciones debe modificarse siguiendo el mismo cálculo.

Tomando la suposición que el modelo de la reacción es elemental, es decir que la cantidad de electrones para obtener el Manganeso metálico es 2 y el orden de la reacción es 2, se procede a buscar las ecuaciones de diseño para dimensionar un reactor a nivel industrial. Ya que es una solución acuosa, el volumen no varía por lo que $\epsilon = 0$.

Se utilizará un Reactor continuo de tanque agitado (CSTR) para buscar la salida continua de contaminantes en el reactor y poder obtener la solución tratada.

$$k\tau = \frac{X_a}{C_{a0}(1 - X_a)^2}$$

Para un promedio de las 3 corridas, tomando una concentración inicial de 10 mg/L de Mn.

Buscando obtener una concentración final de 0.1 mg/L de Mn es posible calcular la conversión deseada.

$$X_a = 1 - \frac{C_{af}}{C_{ao}} = 1 - \left(\frac{0.1 \frac{mg}{L}}{10 \frac{mg}{L}} \right) = 0.99$$

La constante cinética se obtendría por medio de experimentación, conforme a una de las recomendaciones de la curva de concentración en relación al tiempo.

$$k\tau = \frac{X_a}{C_{ao}(1 - X_a)^2} = \frac{0.99}{10 \frac{mg}{L} (1 - 0.99)^2} = 990 \frac{mg}{L}$$

El tiempo de residencia podría calcularse de la siguiente forma:

$$\tau = \frac{990 \frac{mg}{L}}{k \left(\frac{mg}{L * s} \right)}$$

Siendo el espacio tiempo, una relación entre el volumen del reactor y el flujo volumétrico.

$$\frac{990 \frac{mg}{L}}{k \left(\frac{mg}{L * s} \right)} = \frac{V}{\dot{m}}$$

Puede encontrarse el volumen del reactor necesario para llevar a cabo la reacción con una conversión del 99%.

$$V = \frac{990 \frac{mg}{L} * \dot{m}}{k \left(\frac{mg}{L * s} \right)}$$

e. Modelo propuesto para diseño de reactor, a nivel industrial (Mn). El modelo realizado como ejemplo está diseñado únicamente para concentraciones iniciales de 30 mg/L de cinc, puesto que el tiempo de residencia varía según la concentración inicial. Para otras concentraciones debe modificarse siguiendo el mismo cálculo.

Tomando la suposición que el modelo de la reacción es elemental, es decir la molecularidad de la reacción es 2 y el orden del mismo es 2, se procede a buscar las ecuaciones de diseño para dimensionar un reactor a nivel industrial. Ya que es una solución líquida, el volumen no varía por lo que $\varepsilon = 0$.

Se utilizará un CSTR para buscar la salida continua de contaminantes en el reactor y poder obtener la solución tratada.

$$k\tau = \frac{X_a}{C_{a0}(1 - X_a)^2}$$

Para un promedio de las 3 corridas, tomando una concentración inicial de 30 mg/L de Zn.

Buscando obtener una concentración final de 0.8 mg/L de Zn es posible calcular la conversión deseada.

$$X_a = 1 - \frac{C_{af}}{C_{a0}} = 1 - \left(\frac{0.8 \frac{mg}{L}}{30 \frac{mg}{L}} \right) = 0.9733$$

La constante cinética se obtendría por medio de experimentación, conforme a una de las recomendaciones de la curva de concentración en relación al tiempo.

$$k\tau = \frac{X_a}{C_{a0}(1 - X_a)^2} = \frac{0.9733}{30 \frac{mg}{L} (1 - 0.9733)^2} = 45.6248 \frac{mg}{L}$$

El tiempo de residencia podría calcularse de la siguiente forma:

$$\tau = \frac{45.6248 \frac{mg}{L}}{k_1 \left(\frac{mg}{L * s} \right)}$$

Siendo el espacio tiempo, una relación entre el volumen del reactor y el flujo volumétrico.

$$\frac{45.62 \frac{mg}{L}}{k_1 \left(\frac{mg}{L * s} \right)} = \frac{V}{\dot{m} / \rho}$$

Puede encontrarse el volumen del reactor necesario para llevar a cabo la reacción con una conversión del 99%.

$$V = \frac{45.62 \frac{mg}{L} * \frac{\dot{m}}{\rho}}{k_1 \left(\frac{mg}{L * s} \right)}$$

f. Módulo biodiésel

- Promedio de las mediciones, para obtener el tiempo total de separación.

Ecuación 17: Media aritmética o promedio (Skoog, 2005)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

$$\bar{x} = \frac{7.02 \pm 0.05 + 7.00 \pm 0.0}{2} = 7.01 \pm 0.05$$

Dónde:

x_i es cada una de las mediciones

N = cantidad total de mediciones tomadas

- Determinación de volumen de agua para lavado.

Relación de biodiésel con agua para lavado: 10:1

$$\text{Cant. de agua} = \text{Cant. Biodiesel} \cdot \text{relación biodiesel: agua}$$

$$\text{Cant. de agua} = 200 \pm 0.05 \text{ mL} \cdot \frac{1}{10} = 20 \pm 0.05 \text{ mL}$$

La misma cantidad se realizó para el lavado del biodiésel para las demás pruebas con decantadores electroquímicos y en método de decantación.

- Determinación de densidad de biodiésel

Ecuación 18: Determinación de volumen partiendo de densidad para el picnómetro con agua. (López, 2012)

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$m_{\text{agua}} = m_{\text{picnómetro+agua}} - m_{\text{picnómetro}}$$

$$m_{\text{agua}} = 57.828 \pm 0.005 \text{ g} - 32.258 \pm 0.005 \text{ g} = 25.570 \pm 0.007 \text{ g}$$

$$V = \frac{25.570 \pm 0.007 \text{ g}}{1.000 \text{ g/cm}^3} = 25.570 \pm 0.007 \text{ cm}^3$$

Valor de la muestra 1 obtenida en la separación a 20.00 ± 0.005 V. Con un volumen constante de $25.270 \pm 0.007 \text{ cm}^3$.

$$\rho_L = \frac{w_p}{V}$$

Ecuación 19: Determinación de densidad de biodiésel. (López, 2012)

$$\rho_L = \frac{21.749 \pm 0.005 \text{ g}}{24.570 \pm 0.007 \text{ cm}^3} = 0.859 \pm 2.700 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$$

De igual forma se realizan los cálculos para determinar la densidad de todas las muestras de biodiésel para las corridas realizadas.

- Determinación del volumen de glicerina en las muestras tomadas después del tratamiento con metodología de coalescencia electrostática y decantación por gravedad.

Se utilizan los datos correspondientes a la medición de nivel de glicerina tomada después de 1.00 ± 0.05 min utilizando la metodología de coalescencia electrostática utilizando electrodo de aluminio-aluminio.

- Determinación en el aumento de la capacidad de producción utilizando la metodología de coalescencia electrostática en comparación con la capacidad producida con la metodología de decantación por gravedad.

Se procede a encontrar el porcentaje de volumen de glicerina presente en la muestra de 5 mL tomada en cada tiempo.

$$\frac{\text{Volumen glicerina en muestra}}{\text{Volumen total de muestra}} \times 100$$

$$\frac{0.085 \pm 0.050 \text{ mL}}{5.000 \pm 0.050 \text{ mL}} \times 100 = 1.700\%$$

Partiendo del porcentaje presente de glicerina en la muestra, se toma en cuenta para determinar la eficiencia del método, siempre tomando en cuenta el volumen de glicerina presente en relación al tiempo de separación.

$$\frac{\text{Volumen glicerina con coalescencia electrostática}}{\text{Volumen de glicerina con decantación por gravedad}} \times 100$$

$$\frac{0.085 \pm 0.050 \text{ mL}}{0.255 \pm 0.050 \text{ mL}} \times 100 = 33.333\%$$

ANÁLISIS DE ERROR

a. Desviación Estándar

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - X_i)^2}{N - 1}} \text{ (Ecuación \# 5)}$$

b. Incertidumbre por suma

$$s_y = \sqrt{sa^2 + sb^2 + sc^2} \text{ (Ecuación \# 6)}$$

$$s_y = \sqrt{0.1^2 + 0.1^2} = \pm 0.14$$

c. Incertidumbre por multiplicación y división

$$S_y = y * \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2} \text{ (Ecuación \# 7)}$$

$$S_y = 90.5 * \sqrt{\left(\frac{0.1414}{18.1}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{20}\right)^2} = \pm 0.839$$

Tabla 40: Análisis estadístico para pruebas de concentración inicial de Manganeso en primera corrida.

<i>Muestra Manganeso Corrida 1</i>	
Media	20.53333333
Error típico	0.392994204
Mediana	20.3
Desviación estándar	0.680685929
Varianza de la muestra	0.463333333
Coficiente de asimetría	1.361301396
Rango	1.3
Mínimo	20
Máximo	21.3
Suma	61.6
Cuenta	3
Mayor (1)	21.3
Menor(1)	20
Nivel de confianza (95.0%)	1.690917585

Tabla 41: Análisis estadístico para pruebas de concentración inicial de Cinc en primera corrida.

<i>Muestra Cinc Corrida 1</i>	
Media	33.99
Error típico	2.933104158
Mediana	32.67
Desviación estándar	5.080285425
Varianza de la muestra	25.8093
Coeficiente de asimetría	1.09029058
Rango	9.9
Mínimo	29.7
Máximo	39.6
Suma	101.97
Cuenta	3
Mayor (1)	39.6
Menor(1)	29.7
Nivel de confianza (95.0%)	12.62012861

Tabla 42: Análisis estadístico para pruebas de concentración final de Manganeso en primera corrida.

<i>Muestra Mn final Corrida 1</i>	
Media	1.233333333
Error típico	0.338296386
Mediana	1
Desviación estándar	0.585946528
Varianza de la muestra	0.343333333
Coeficiente de asimetría	1.507808484
Rango	1.1
Mínimo	0.8
Máximo	1.9
Suma	3.7
Cuenta	3
Mayor (1)	1.9
Menor(1)	0.8
Nivel de confianza (95.0%)	1.455571867

Tabla 43: Análisis estadístico para pruebas de concentración final de Cinc en primera corrida.

<i>Muestra Zn final corrida 1</i>	
Media	0.9
Error típico	0.057735027
Mediana	0.9
Desviación estándar	0.1
Varianza de la muestra	0.01
Coefficiente de asimetría	0
Rango	0.2
Mínimo	0.8
Máximo	1
Suma	2.7
Cuenta	3
Mayor (1)	1
Menor(1)	0.8
Nivel de confianza (95.0%)	0.248413771

Tabla 44: Análisis estadístico para pruebas de concentración inicial de Manganeso en segunda corrida.

<i>Manganeso Inicial</i>	
Media	8.1
Error típico	0.1
Mediana	8.2
Moda	8.2
Desviación estándar	0.173205081
Varianza de la muestra	0.03
	-
Coefficiente de asimetría	1.732050808
Rango	0.3
Mínimo	7.9
Máximo	8.2
Suma	24.3
Cuenta	3
Mayor (1)	8.2
Menor(1)	7.9
Nivel de confianza (95.0%)	0.430265273

Tabla 45: Análisis estadístico para pruebas de concentración inicial de Cinc en segunda corrida.

<i>Cinc Inicial</i>	
Media	32.01
Error típico	4.584506517
Mediana	32.67
Desviación estándar	7.940598214
Varianza de la muestra	63.0531
	-
Coficiente de asimetría	0.371443282
Rango	15.84
Mínimo	23.76
Máximo	39.6
Suma	96.03
Cuenta	3
Mayor (1)	39.6
Menor(1)	23.76
Nivel de confianza (95.0%)	19.72553948

Tabla 46: Análisis estadístico para pruebas de concentración final de Manganeso en segunda corrida.

<i>Manganeso Final</i>	
Media	0.8
Error típico	0.2
Mediana	0.8
Desviación estándar	0.2
Varianza de la muestra	0.04
Coficiente de asimetría	-7.9E-15
Rango	0.4
Mínimo	0.6
Máximo	1
Suma	2.4
Cuenta	3
Mayor (1)	1
Menor(1)	0.6
Nivel de confianza (95.0%)	0.5

Tabla 47: Análisis estadístico para pruebas de concentración final de Cinc en segunda corrida.

<i>Cinc Final</i>	
Media	2.193333333
Error típico	0.047022453
Mediana	2.23
Desviación estándar	0.081445278
Varianza de la muestra	0.006633333
Coefficiente de asimetría	-1.61529056
Rango	0.15
Mínimo	2.1
Máximo	2.25
Suma	6.58
Cuenta	3
Mayor (1)	2.25
Menor(1)	2.1
Nivel de confianza (95.0%)	0.202321287

Tabla 48: Análisis estadístico para pruebas de concentración inicial de Manganeso en tercera corrida.

<i>Manganeso Inicial</i>	
Media	2.633333333
Error típico	0.120185043
Mediana	2.7
Desviación estándar	0.2081666
Varianza de la muestra	0.043333333
Coefficiente de asimetría	-
Rango	0.4
Mínimo	2.4
Máximo	2.8
Suma	7.9
Cuenta	3
Mayor (1)	2.8
Menor(1)	2.4
Nivel de confianza (95.0%)	0.517114501

Tabla 49: Análisis estadístico para pruebas de concentración inicial de Cinc en tercera corrida.

<i>Cinc inicial</i>	
Media	36.3
Error típico	6.698268433
Mediana	31.68
Desviación estándar	11.60174125
Varianza de la muestra	134.6004
Coefficiente de asimetría	1.507808484
Rango	21.78
Mínimo	27.72
Máximo	49.5
Suma	108.9
Cuenta	3
Mayor (1)	49.5
Menor(1)	27.72
Nivel de confianza (95.0%)	28.82032296

Tabla 50: Análisis estadístico para pruebas de concentración final de Manganeso en tercera corrida.

<i>Manganeso final</i>	
Media	0.766666667
Error típico	0.08819171
Mediana	0.8
Desviación estándar	0.152752523
Varianza de la muestra	0.023333333
Coefficiente de asimetría	-0.93521953
Rango	0.3
Mínimo	0.6
Máximo	0.9
Suma	2.3
Cuenta	3
Mayor (1)	0.9
Menor(1)	0.6
Nivel de confianza (95.0%)	0.379458303

Tabla 51: Análisis estadístico para pruebas de concentración final de Cinc en tercera corrida

<i>Cinc final</i>	
Media	1.39
Error típico	0.040414519
Mediana	1.42
Desviación estándar	0.07
Varianza de la muestra	0.0049
	-
Coefficiente de asimetría	1.574344023
Rango	0.13
Mínimo	1.31
Máximo	1.44
Suma	4.17
Cuenta	3
Mayor (1)	1.44
Menor(1)	1.31
Nivel de confianza (95.0%)	0.17388964

Modulo Biodiésel

- Propagación de error en suma y resta.

Ecuación 20: Propagación de error de suma y resta. (Skoog, 2005)

$$s = \sqrt{(S_a)^2 + (S_b)^2}$$

$$s = \sqrt{(0.05)^2 + (0.05)^2} = 0.07$$

Se utiliza la propagación de error en la diferencia entre el peso de la muestra con el picnómetro y el peso del picnómetro, de esta forma poder calcular la densidad de las muestras. Se aplica del mismo modo para las demás mediciones.

- Cálculo de análisis de error para operaciones de multiplicación y división.

Se emplean las propagaciones para la determinación de densidad para cada una de las muestras, encontrando la diferencia entre el peso de la muestra y el volumen del picnómetro utilizado.

Ecuación 21: Propagación de error en multiplicaciones. (Skoog, 2005)

$$S_y = y * \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2}$$

$$S_y = 247.360\% * \sqrt{\left(\frac{0.005}{54.007}\right)^2 + \left(\frac{0.007}{21.749}\right)^2} = 2.992 \times 10^{-4}$$

Datos calculados

Tabla 52: Peso y densidad de la muestra de biodiésel aplicando el método de coalescencia electrostática utilizando electrodos de aluminio- aluminio.

No. De lavados	Peso de muestra 1 de biodiésel (±0.007 g)	Peso de muestra 1 de biodiésel (±0.007 g)	Densidad de la muestra 1 de biodiésel (±2.992 × 10 ⁻⁴)	Densidad de la muestra 2 de biodiésel (±2.992 × 10 ⁻⁴)
1	21.749	21.960	0.885	0.859
2	21.527	21.399	0.876	0.837
sin lavar	27.396	27.728	1.115	1.084

Tabla 53: Peso y densidad de la muestra de biodiésel aplicando el método de coalescencia electrostática utilizando electrodos de cobre-cobre.

No. De lavados	Peso de muestra 1 de biodiésel (±0.007 g)	Peso de muestra 1 de biodiésel (±0.007 g)	Densidad de la muestra 1 de biodiésel (±2.992 × 10 ⁻⁴)	Densidad de la muestra 2 de biodiésel (±2.992 × 10 ⁻⁴)
1	22.246	22.639	0.870	0.885
2	21.612	21.676	0.845	0.848
sin lavar	27.507	27.507	1.076	1.076

Tabla 54: Peso y densidad de la muestra de biodiésel aplicando el método de coalescencia electrostática utilizando electrodos de cobre-cobre.

No. De lavados	Peso de muestra 1 de biodiésel ($\pm 0.007 \text{ g}$)	Peso de muestra 1 de biodiésel ($\pm 0.007 \text{ g}$)	Densidad de la muestra 1 de biodiésel ($\pm 2.992 \times 10^{-4}$)	Densidad de la muestra 2 de biodiésel ($\pm 2.992 \times 10^{-4}$)
1	24.774	24.507	0.969	0.958
2	21.977	21.865	0.859	0.855

Fichas técnicas del equipo utilizado

Tabla 55: Ficha técnica de agitador magnético utilizado en la experimentación.

Nombre	Agitador magnético CIMAREC
Marca	THERMO1020
Fabricante	THERMOLYNE FABRICACIÓN E.U.A.
Modelo	S-130815
Medidas el plato	10 cm X 10 cm
Material Utilizado	Cuerpo metálico, plato con superficie de cerámica.
Voltaje	120 V
Frecuencia	50/60 Hz
Diseñado para adaptar la parte trasera a una varilla de 13 mm \varnothing como soporte.	

Imagen 14: Agitador magnético utilizado en la metodología de aplicación de coalescencia electrostática en comparación a la aplicación de la decantación por gravedad.



Tabla 56: Ficha técnica de tijeras utilizadas para los electrodos de metal.

Grosor de metal a cortar	10" (254 mm)
Color	Negro
Material	Acero

Imagen 15: Tijeras utilizadas para cortar las placas de metal utilizados en la metodología de coalescencia electrostática.



Imagen 16: Fuente de energía utilizada para realizar la metodología de decantación electrostática.



Tabla 57: Datos de placa para fuente de corriente directa utilizada.

Equipo	DC PowerSupply
Marca	Tech™
Modelo	HY3002C
Voltaje de entrada	110/220 ±10% AC
Voltaje de salida	0 – 30 V
Exactitud	2.5 % f.s.
Dimensión	291 x 158 x 136 mm
Peso	3 – 6 kg

Tabla 58: Datos de placa del medidor de pH utilizado para realizar pruebas correspondientes para biodiésel.

Marca	Fisher Scientific™Accumet™
Modelo	AB15
Rango	-1.99 a +19.00 pH
Datos de electrode	Electrode model 13-637-671
Material de pH	Ag/AgCl
Resolución	0.1/0.01 pH
Calibración de buffer	En 15 puntos.
Exactitud	±0.01 pH

Imagen 17: Electrodo de medición de pH AB15 (Fisher Scientific™, 2012)



Imagen 18: Especificaciones de Biodiésel según ASTM. (ASTM, 2012)



**SPECIFICATION FOR
BIODIESEL (B100) – ASTM D6751-09**

Nov. 2008

Biodiesel is defined as the mono alkyl esters of long chain fatty acids derived from vegetable oils or animal fats, for use in compression-ignition (diesel) engines. This specification is for pure (100%) biodiesel prior to use or blending with diesel fuel. #

Property	ASTM Method	Limits	Units
Calcium & Magnesium, combined	EN 14538	5 maximum	ppm (ug/g)
Flash Point (closed cup)	D 93	93 minimum	degrees C
Alcohol Control (One of the following must be met)			
1. Methanol Content	EN14110	0.2 maximum	% volume
2. Flash Point	D93	130 minimum	Degrees C
Water & Sediment	D 2709	0.05 maximum	% vol.
Kinematic Viscosity, 40 C	D 445	1.9 - 6.0	mm ² /sec.
Sulfated Ash	D 874	0.02 maximum	% mass
Sulfur			
S 15 Grade	D 5453	0.0015 max. (15)	% mass (ppm)
S 500 Grade	D 5453	0.05 max. (500)	% mass (ppm)
Copper Strip Corrosion	D 130	No. 3 maximum	
Cetane	D 613	47 minimum	
Cloud Point	D 2500	report	degrees C
Carbon Residue 100% sample	D 4530*	0.05 maximum	% mass
Acid Number	D 664	0.50 maximum	mg KOH/g
Free Glycerin	D 6584	0.020 maximum	% mass
Total Glycerin	D 6584	0.240 maximum	% mass
Phosphorus Content	D 4951	0.001 maximum	% mass
Distillation, T90 AET	D 1160	360 maximum	degrees C
Sodium/Potassium, combined	EN 14538	5 maximum	ppm
Oxidation Stability	EN 14112	3 minimum	hours
Cold Soak Filtration	Annex to D6751	360 maximum	seconds
For use in temperatures below -12 C	Annex to D6751	200 maximum	seconds

BOLD = 8G-9000 Critical Specification Testing Once Production Process Under Control

* The carbon residue shall be run on the 100% sample.

A considerable amount of experience exists in the US with a 20% blend of biodiesel with 80% diesel fuel (B20). Although biodiesel (B100) can be used, blends of over 20% biodiesel with diesel fuel should be evaluated on a case-by-case basis until further experience is available.

Figura 1: Celda electroquímica para el tratamiento de aguas residuales con ánodo de aluminio y cátodo de cobre antes del tratamiento electroquímico

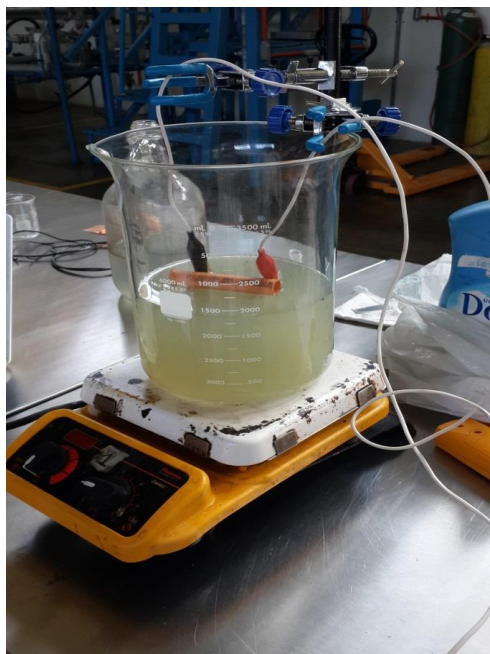


Figura 2: Celda electroquímica y fuente de poder marca DC Power Supply para el tratamiento de aguas residuales con ánodo de aluminio y cátodo de cobre antes del tratamiento electroquímico



Figura 3: Celda electroquímica y fuente de poder marca DC Power Supply para el tratamiento de aguas residuales con ánodo de aluminio y cátodo de cobre después del tratamiento electroquímico.

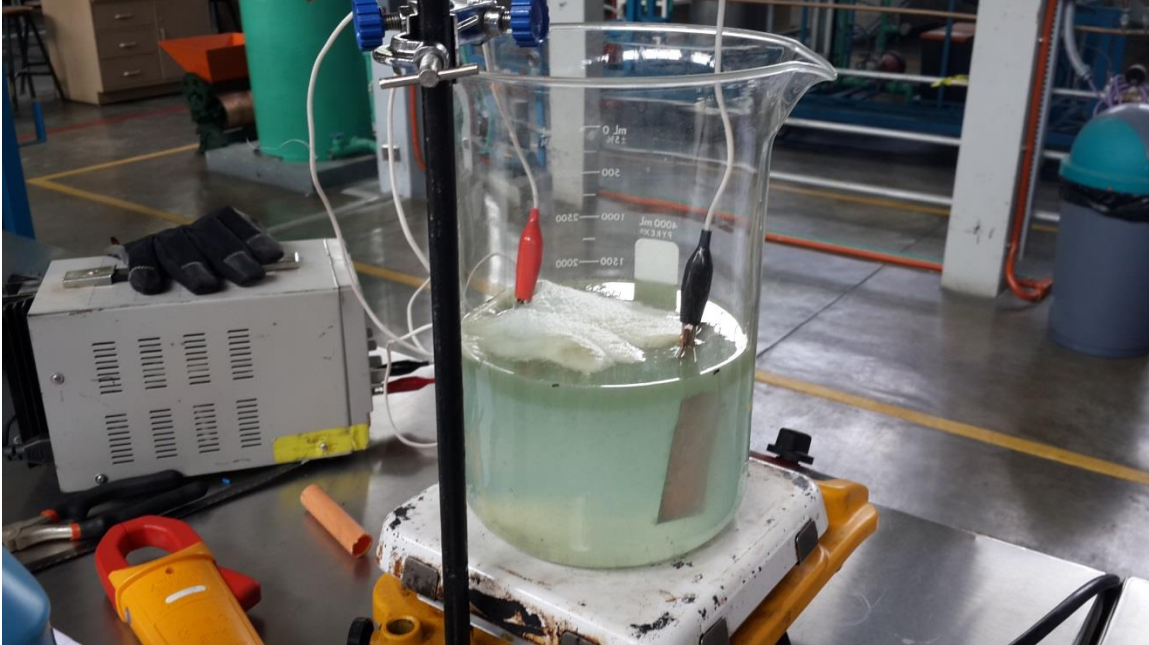


Figura 4: Reactor de la celda electroquímica para el tratamiento de aguas residuales con ánodo de aluminio y cátodo de cobre después del tratamiento electroquímico.



Figura 5: Proceso de homogeneización de la mezcla (glicerina biodiésel) en el reactor de la celda electroquímica para el tratamiento de reducción de tiempo necesario para la separación de glicerina y biodiesel.



Figura 6: Proceso de operación de la celda electroquímica para el tratamiento de reducción de tiempo necesario para la separación de glicerina y biodiesel.



Figura 7: Formación final del área interfacial y definición del límite entre las dos fases luego del tratamiento electroquímico para la separación de glicerina y biodiésel usando ánodo de aluminio y cátodo de cobre con una corriente de 2 amperios a 20 voltios.



Figura 8: Separación final del área interfacial y definición del límite entre las dos fases luego del tratamiento electroquímico para la separación de glicerina y biodiésel usando ánodo de aluminio y cátodo de cobre con una corriente de 3 amperios a 30 voltios.



Figura 9: celda electroquímica y fuente de poder marca DC Power Supply para el tratamiento de medios edáficos con ánodo de aluminio y cátodo de cobre.

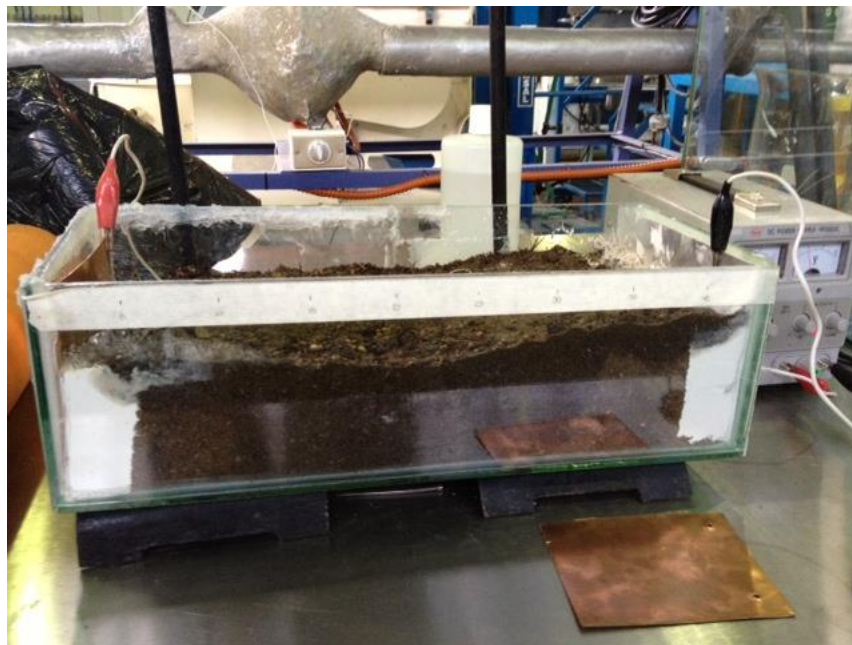


Figura 10: celda electroquímica y fuente de poder marca DC Power Supply para el tratamiento de medios edáficos con ánodo de aluminio y cátodo de cobre.



Figura 11: Toma de muestras para la celda electroquímica y fuente de poder marca DC Power Supply para el tratamiento de medios edáficos con ánodo de aluminio y cátodo de cobre.



Figura 12: Muestra de Terratec utilizado para mejorar la conductividad del suelo en el tratamiento electroquímico de medio edáficos.



XII. GLOSARIO

1. Agente quelante: Es una sustancia que forma complejos con iones de metales pesados.
2. Agrícola: Son todas aquellas actividades o circunstancias que tengan que ver con la actividad de cultivar y de cosechar materias primas que puedan ser luego utilizadas por el ser humano como alimento o con otros fines.
3. Ánodo: Electrodo que se oxida, en el cual el material pierde electrones de valencia, aumentando su número de oxidación.
4. Anticongelante: No permite la congelación del agua, se utiliza para refrigerar los motores.
5. Atomización: Acción y efecto de atomizar, agregar agua en forma de riego o en pequeñas dosis con un riego que cubra toda el área a trabajar.
6. Auto ignición: Es inflamable y puede empezar un incendio por sí mismo.
7. Biodegradable: Dicho de un compuesto químico, que puede ser degradado por acción biológica.
8. Biodiésel: Combustible líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales mediante procesos de esterificación y transesterificación.
9. Catálisis: Proceso de cambio de velocidad de las reacciones químicas mediante acción de una sustancia que permanece inalterada al final del proceso.
10. Cátodo: Electrodo que se reduce, en el cual el material gana electrones y reduce su número de valencia.
11. Cetanos: Compuestos provenientes de la acetona.
12. Coalescencia: Es la posibilidad de dos o más materiales de unirse en un único cuerpo.

13. Colza: Variedad de nabo de cuyas semillas se obtiene un aceite que se emplea como lubricante o en alimentación.
14. Combustibles fósiles: Combustibles provenientes del petróleo, como lo es la gasolina, diésel o bunker.
15. Corrosión: Desgaste progresivo de una superficie por rozamiento o por una reacción química.
16. Cromatógrafo: Aparato especializado en la obtención de los compuestos que forman una solución, las cuales se expresa en un cromatograma.
17. Ecosistema: Sistema biológico que se compone de un conjunto de seres vivos, el medio natural en que se desarrollan y las relaciones que establecen entre sí y con los factores abióticos que constituyen su medio.
18. EDTA: Ácido etilendiaminotetraacético, es una sustancia que se utiliza como agente quelante que puede formar complejos con sustancias metálicas.
19. Electrodo: Extremo de un circuito eléctrico en contacto con un medio, al que lleva o del que recibe corriente eléctrica.
20. Electrodo: Es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito.
21. Electrolítico: Es una sustancia que contiene iones libres, los que se comportan como un medio conductor eléctrico.
22. Electroquímica: Es una rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química.
23. Estático: Que permanece en un mismo estado y no experimenta cambios.
24. Fuente de poder: Sistema que otorga electricidad a un sistema para alimentar un circuito eléctrico.

25. Gasóleo: Líquido que se obtiene por destilación fraccionada de petróleo y se usa como combustible.
26. Glicerina: Es un alcohol con tres grupos hidroxilo, se presenta como un líquido a temperatura ambiente, es higroscópico e inodoro.
27. Heptametilnonano: Compuestos orgánicos y está formado por un conjunto de varios átomos de carbono, unidos mediante enlaces covalentes carbono – carbono.
28. Hexadieno: Alquenos formado por cadena de 6 carbonos, compuestos formados por unión de doble enlace.
29. Hidrocarburos: Compuesto químico orgánico formado por carbono e hidrógeno.
30. Higroscópico: Se aplica al cuerpo o compuesto químico que absorbe la humedad del aire.
31. Humectante: Provee humedad a la superficie para absorber el líquido.
32. Ignición: Proceso en el que sustancia arde y se quema, gracias a un sistema de chispa en los motores de explosión.
33. Inflamables: Arde y se incendia con facilidad.
34. Invernadero: Lugar cubierto en el que se crea artificialmente adecuado para el cultivo de plantas fuera de su ámbito natural.
35. Lubricante: Sustancia grasa o aceitosa que se aplica a las piezas de un mecanismo para lubricarlo y hacer que el rozamiento sea menor o más suave.
36. Metanol: Alcohol metílico, incoloro y muy tóxico, el cual se obtiene por oxidación del metano en presencia de aire y de un catalizador.
37. Metóxido: Son sales orgánicas más simples tiene una base conjugada del metanol.
38. Microemulsión: Mezcla termodinámicamente estable, isotrópica, mezcla líquida de aceite, agua y surfactante.
39. Miscible: Propiedad de mezclar, especialmente referido a líquidos solubles.

40. Oleaginosas: Con base oleoso o aceite.
41. Pirolisis: Descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios.
42. Plastificantes: Sustancia que se añade a los plásticos para mejorar sus propiedades, elevado punto de ebullición o sólido de bajo punto de fusión que se añade a un polímero para aumentar su flexibilidad.
43. Punto de inflamabilidad: Es el punto de la sustancia combustible es la temperatura más baja a la presión atmosférica normal, en la que puede formarse una mezcla inflamable en contacto con un comburente.
44. Terratec: Compuesto de grafito utilizado para mejorar la conductividad eléctrica en la tierra, conformado por 70% grafito industrial y silicatos como aglutinante, con 5% de arcilla higroscópica en volumen, confiere al suelo una resistividad de $15 \Omega/m$ en condiciones normales.
45. Transesterificación: Proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un alcohol, reacciones que son frecuentemente catalizadas mediante la adición de un ácido a una base.
46. Turbidez: Falta de transparencia de un líquido debido a la presencia de partículas en suspensión.
47. Variac: Auto transformador variable con el cual podemos obtener una tensión de salida de corriente alterna entre 0 V y la tensión de alimentación normalmente va de 230 V.