UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Trabajo Experimental previo a la obtención del título de:

INGENIERA AMBIENTAL

TEMA:

"TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES PROCEDENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PROCESOS ELECTROQUÍMICOS PARA LA DISMINUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE COLIFORMES FECALES Y TOTALES"

AUTOR:

María Isabel García Cárdenas

DIRECTOR:

Pablo Wilson Arévalo Moscoso Ph.D

Cuenca, Abril 2016

CLÁUSULA DE RESPONSABILIDAD

María Isabel García Cárdenas, autora de la investigación **"TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES PROCEDENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PROCESOS ELECTROQUÍMICOS PARA LA DISMINUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE COLIFORMES FECALES Y TOTALES"**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

A través de la presente declaración cedo los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Cuenca, Abril 2016.

(f) _____

María Isabel García Cárdenas

010699162-3

CERTIFICACIÓN

Certifico que la presente investigación titulada: **"TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES PROCEDENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PROCESOS ELECTROQUÍMICOS PARA LA DISMINUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE COLIFORMES FECALES Y TOTALES"** fue desarrollado por: María Isabel García Cárdenas, con cédula de identidad 010699162-3 bajo mi supervisión.

Cuenca, Abril 2016.

(f) _____

Pablo Wilson Arévalo Moscoso Ph.D

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Mi profundo sentido e imperecedero agradecimiento al personal docente que labora de esta prestigiosa Universidad quienes a través de sus valiosos conocimientos impartidos durante los años de estudio han permitido que se cumpla mi meta profesional; de manera especial al Ph.D Pablo Arévalo Director de Tesis que ha sabido guiarme en su elaboración y a la vez constituirse en un verdadero baluarte y ejemplo de abnegación, dedicación y empeño para que el presente trabajo académico pueda servir de fuente de consulta e investigación.

DEDICATORIA

Desde lo más profundo de mi ser, dedico mi esfuerzo, sacrificio y estudio plasmado en la presente tesis a mis padres que con responsabilidad, afecto y cariño siempre me han brindado su apoyo en mi formación humana y profesional.

RESUMEN

Hoy en día la gestión, disposición y el manejo de los residuos sólidos, han alcanzado en muchos países un alto rango de importancia por el potencial de reúso benéfico que éstos presentan, siendo la aplicación práctica más empleada en los suelos. La necesidad de minimizar residuos, así como su disposición adecuada y segura, constituyen aspectos de gran importancia que han llevado a la búsqueda de alternativas que permitan generar residuos estables y no peligrosos para su correcto reaprovechamiento (O. N. García, 2006). En la ciudad de Cuenca, Ecuador, su utilización se ha limitado únicamente en rellenos sanitarios, por lo que es necesario que éstos sean previamente tratados aplicando algún sistema de tratamiento para la desinfección de los residuos y disminuyendo la concentración de Coliformes Totales y Fecales (*E. Coli*) presentes en los lodos . El trabajo tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de los procesos electroquímicos para la desinfección del lodo residual en cuanto a la remoción de patógenos de acuerdo a la norma NOM-004-SEMARNAT-2002. Para ello se implementó un sistema electroquímico (celda electrolítica) para disminuir la concentración de Coliformes Totales y Fecales (*E. Coli*) presentes en los lodos provenientes de la PTAR Ucubamba, Cuenca, empleando electrodos de grafito y hierro sobremontados en cubas de vidrio. En éste proyecto se utilizaron tres celdas electrolíticas que mantienen las mismas condiciones de humedad, pH y conductividad eléctrica, cuya diferencia radica en el espaciamiento entre electrodos fue de 5, 5.5 y 6 cm y su tiempo de exposición variaba entre 10-90 min. Los resultados de estos tratamientos señalan una remoción del 100% tanto para los Coliformes Totales y Fecales (*E. Coli*) a un tiempo promedio de 60 min y con electrodos de grafito, los cuales resultaron ser más eficientes frente a electrodos de hierro. La distancia no resultó ser un factor influyente en el proceso de remoción de patógenos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 2
1.2. JUSTIFICACIÓN 3
1.3. DELIMITACIÓN 4
1.4. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICO 4
1.4.1. Objetivo general 5
1.4.2. Objetivos específicos 5
1.5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 5
1.5.1. Análisis de estudios realizados sobre el tema 5
1.5.2. Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) 8
1.5.3. Lodos residuales 9
1.5.3.1. Normativas 9
1.5.3.1.1. Normativas para límites máximos permisibles de contaminantes 9
1.5.3.1.2. Normativas aplicadas para la toma de muestras y el conteo de coliformes totales y fecales (*E. coli*) 13
1.5.3.2. Tipos de lodo 14
1.5.3.2.1. Lodos primarios 15
1.5.3.2.2. Lodos secundarios 15
1.5.3.2.3. Lodos terciarios 15
1.5.3.2.4. Lodos crudos o frescos 16
1.5.3.2.5. Lodos digeridos o tratados 16
1.5.3.2.6. Lodos húmedos y secos 16
1.5.3.3. Caracterización de los lodos 17
1.5.3.3.1. Características físicas 17
1.5.3.3.2. Características químicas 18
1.5.3.3.3. Características biológicas 19
1.5.3.4. Contaminantes principales de los lodos residuales 19
1.5.3.4.1. Metales 19
1.5.3.4.2. Contaminantes orgánicos 20
1.5.3.4.3. Patógenos 20
1.6. TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 24
1.6.1. Tipos de tratamiento 24
1.6.1.1. Espesamiento 24
1.6.1.2. Estabilización 25
1.6.1.2.1. Digestión anaerobia 25
1.6.1.2.2. Digestión aerobia 25
1.6.1.2.3. Compostaje 26
1.6.1.2.4. Estabilización química 26
1.6.1.3. Deshidratación 26
1.6.1.4. Desinfección 27
1.6.1.4.1. Factores que influyen en el proceso de desinfección 27
1.6.1.4.2. Proceso de desinfección a través de cloro 29
1.6.1.5. Acondicionamiento 30
1.6.1.6. Tratamiento térmico 30
1.6.2. Tratamientos electroquímicos 30
1.6.2.1. Electromigración 32
1.6.2.2. Electroósmosis 32
1.6.2.3. Electroforesis 33
1.6.2.4. Tratamiento electroquímico basado en electrólisis 34
1.6.2.4.1. Electrólisis del cloruro de sodio 34
1.6.2.4.2. Electrocloración 35
1.6.2.4.3. Electrocoagulación 36
1.6.2.5. Primera ley de Faraday 38
1.6.2.6. Segunda ley de Faraday 38
1.6.2.7. Efecto de la densidad de corriente en la electrocloración 39
1.6.2.8. Efecto del espaciamiento entre electrodos en la electrocloración 39
1.6.2.9. Efecto del pH en la electrocloración 40
1.6.2.10. Efecto de la conductividad en la electrocloración 40
1.6.2.11. Activación electroquímica de soluciones acuosas 40

1.6.2.12. Componentes del proceso electroquímico 42
1.6.2.12.1. Celdas (cubas) electroquímicas 42
1.6.2.12.2. Electrodos 43
1.6.2.12.3. Electrolito 45
1.6.2.12.4. FUENTE DE ENERGÍA: 46
1.6.2.13. Parámetros físico-químicos que influyen en el proceso electroquímico 46
1.6.2.13.1. pH 47
1.6.2.13.2. Conductividad eléctrica 47
1.6.2.13.3. Humedad 48
2. MATERIALES Y MÉTODOS 49
2.1. PROCESOS REALIZADOS SOBRE LA MUESTRA INICIAL 49
2.1.1. Recolección 49
2.1.2. Almacenamiento y mantenimiento 49
2.1.3. Determinación de parámetros físico-químicos 49
2.2. ACONDICIONAMIENTO DE LA MUESTRA PREVIO AL PROCESO ELECTROQUÍMICO 51
2.3. CONSTRUCCIÓN DE CELDAS ELECTROLÍTICAS PARA LOS PROCESOS ELECTROQUÍMICOS 55
2.4. DISEÑO EXPERIMENTAL 58
2.4.1. Eficiencia del electrodo de hierro y grafito para la remoción de coliformes totales y fecales (E. coli) 60
2.4.2. Influencia del factor distancia 67
2.4.3. Influencia del factor tiempo 70
2.4.4. Influencia del tipo de electrodo 73
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 76
3.1. RESULTADOS 76
3.2. DISCUSIONES 90
CONCLUSIONES 93
RECOMENDACIONES 94
BIBLIOGRAFÍA 95
ANEXOS 102
ANEXO I 102
ANEXO II 104
ANEXO III 106
ANEXO IV 109
ANEXO V 113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Esquema básico del proceso de electroforesis 34
Ilustración 2 Tratamiento electroquímico basado en electrólisis 34
Ilustración 3 Esquema del Proceso de Electrocoagulación 37
Ilustración 4 Alineación de los iones de la solución en los electrodos 41
Ilustración 5 Movimiento de iones en la celda electrolítica 43
Ilustración 6 Movimiento de iones en celda galvánica 43
Ilustración 7 Tipos, geometría y disposición de electrodos 44
Ilustración 8 Solución Electrolítica en Cuba de Vidrio 45
Ilustración 9 Batería o fuente de alimentación a la cuba 46
Ilustración 10 Disposición de los Electrodos de Grafito sobre la Balsa 55
Ilustración 11 Disposición de los Electrodos de Hierro sobre la Balsa 56
Ilustración 12.- Celdas Electrolíticas con Electrodos de Grafito 58
Ilustración 13 Celda Electrolítica con Electrodos de Hierro (Placas Rectangulares) 58
Ilustración 14 Variables de Entrada y de Salida del Diseño Experimental 59
Ilustración 15 Proceso de filtración al vacío 104
Ilustración 16 Conductimetro utilizado en el proceso 104
Ilustración 17 Pesado de la muestra 105
Ilustración 18 Medición del pH a través del pH-metro SevenMulti^MT 106
Ilustración 19 Colocación del plato para la tara en el analizador de humedad 107
Ilustración 20 Determinación de la humedad 108
Ilustración 21 Agua Peptonada Tamponada 110
Ilustración 22 Esterilización de materiales 110
Ilustración 23 Elaboración de las diluciones 111
Ilustración 24 Contabilización de coliformes totales y fecales *(E. coli)* 112
Ilustración 25 Control del peso de cada una de las muestras (2.5 gr) 113
Ilustración 26 Reactivos utilizados para la solución 114
Ilustración 27 Proceso de Titulación 115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.- Tipo, Clase y Aprovechamiento de los biosólidos 11
Tabla 1-2 Valores máximos permisibles de Coliformes fecales Salmonella spp, Huevos de Helmintos y Virus entéricos en biosólidos de acuerdo a la US EPA y la NOM-004-SEMARNAT-2002 12
Tabla 1-3 Criterios microbiológicos para la categorización de biosólidos 13
Tabla 1-4.- Parámetros de los lodos generados en diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales..... 16
Tabla 1-5 Concentración de sólidos de acuerdo al tipo de lodo..... 18
Tabla 1-6 Principales grupos de organismos patógenos y parásitos contenidos en los lodos residuales..... 21
Tabla 1-7 Tratamientos y métodos empleados en los lodos..... 24
Tabla 1-8 Temperatura y tiempo de exposición para la eliminación de patógenos 28
Tabla 2-1 Parámetros Iniciales del Lodo Residual..... 50
Tabla 2-2 Condiciones óptimas del lodo..... 55
Tabla 2-3 Composición química de los hierros comerciales..... 57
Tabla 2-4 Componente y unidades del grafito Escamoso, Veta y Amorfo..... 57
Tabla 2-5 Unidades de las Variables del Diseño Experimental 59
Tabla 2-6 Variables de Entrada y Salida del Diseño..... 60
Tabla 2-7 Tratamientos y Repeticiones para Coliformes Totales 61
Tabla 2-8 Tratamientos y Repeticiones para Coliformes Fecales (E. coli)..... 61
Tabla 2-9 Conjunto de Datos (Coliformes Totales) utilizados para la Prueba de Tukey..... 62
Tabla 2-10 Conjunto de Datos (C. Fecales: E. coli) utilizados para la Prueba de Tukey 62
Tabla 2-11 Variables de Entrada y de Salida para el Análisis de la Eficiencia de los Electrodos (Hierro y Grafito)..... 63
Tabla 2-12 Determinación de Coliformes Totales con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g..... 64
Tabla 2-13 Determinación de Coliformes Fecales (E. coli) con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g..... 64
Tabla 2-14 Determinación de Coliformes Totales con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5cm y Muestra inicial: 3000 UFC/g..... 65
Tabla 2-15 Determinación de Coliformes Fecales (E. coli) con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5,5cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g..... 65
Tabla 2-16 Determinación de Coliformes Totales con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 6cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g..... 66
Tabla 2-17 Determinación de Coliformes Fecales (E. coli) con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 6 cm y Muestra inicial: 5000 UFC/g..... 66
Tabla 2-18 Tratamientos y repeticiones para Coliformes Totales 68
Tabla 2-19 Tratamientos y repeticiones para Coliformes Fecales (E. coli) 68
Tabla 2-20 Conjunto de Datos (Coliformes Totales y Fecales (E. coli)) utilizados..... 69
Tabla 2-21 Variables de entrada y salida del Diseño..... 70
Tabla 2-22 Conjunto de Datos (Coliformes Totales y Fecales (E. coli)) utilizados para el Análisis de la Correlación de Pearson y la Regresión Lineal 73
Tabla 2-23 Variables de entrada y salida del Diseño..... 73
Tabla 2-24 Tratamientos y Repeticiones para Coliformes Totales 74
Tabla 2-25 Tratamientos y Repeticiones para Coliformes Fecales (E. coli)..... 74
Tabla 3-1 Correlación de Pearson para Coliformes Totales 85

Tabla 3-2 Regresión lineal para Coliformes totales 86
Tabla 3-3 Análisis de Varianza para Coliformes totales 86
Tabla 3-4 Correlación de Pearson para Coliformes fecales (E. coli) 87
Tabla 3-5 Regresión lineal para Coliformes fecales (E. coli) 88
Tabla 3-6 Análisis de Varianza para Coliformes fecales (E. coli) 88
Tabla 3-7 Contenido de cloro disponible en porcentaje en volumen según la temperatura y tiempo 89

ÌNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1 Remoción de Coliformes Totales vs Tiempo con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g..... 80
Gráfico 2 Remoción de Coliformes Fecales (E. coli) vs Tiempo con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g 80
Gráfico 3 Remoción de Coliformes Totales vs Tiempo con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5,5 cm y Muestra inicial: 3000 UFC/g..... 81
Gráfico 4 Remoción de Coliformes Fecales (E. coli) vs Tiempo con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5,5 cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g 81
Gráfico 5 Remoción de Coliformes Totales vs Tiempo con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g..... 82
Gráfico 6 Remoción de Coliformes Fecales (E. coli) vs Tiempo con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 6 cm y Muestra inicial: 5000 UFC/g 82
Gráfico 7 Relación entre el Porcentaje de Remoción de C.T. con el Factor Tiempo 85
Gráfico 8 Relación entre el Porcentaje de Remoción de E.C. con el Factor Tiempo 87
Gráfico 9 Resumen del Comportamiento de Concentración de Hipoclorito de sodio vs Tiempo y Temperatura 89

1. INTRODUCCIÓN

La actividad humana ya sea doméstica o industrial, produce aguas servidas o residuales. El tratamiento de estas aguas evita daños principalmente en la salud del hombre y del medio ambiente. Para ello existen diversas metodologías que se aplican de acuerdo a sus características físico-químicas, procedencia, composición, etc.

Del tratamiento de las aguas residuales se obtienen dos productos: uno de ellos es el agua purificada que cumple las especificaciones necesarias para ser devuelta a un cauce natural sin riesgo alguno; y el segundo, una sustancia semilíquida conocida como lodo (Avilés Sacoto, 2011).

La producción de lodos en muchos países está aumentando drásticamente como consecuencia del crecimiento de los sistemas de tratamiento y alcantarillado. Junto al incremento de la producción de lodo, regulaciones más estrictas en términos de una mejor calidad de biosólidos están gradualmente siendo reforzados con la finalidad de minimizar los impactos sanitarios y ambientales.

Uno de los objetivos principales de los tratamientos de lodos consiste en la remoción de microorganismos patógenos y parásitos que atentan contra la salud pública y por otro lado, la generación de lodos cuyas características físicas, químicas y biológicas permitan su aprovechamiento como abono orgánico (agricultura), relleno de terrenos agotados, compostaje, etc.

En el Ecuador, la disposición final de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) constituye una de las principales preocupaciones ya que es un problema reciente y poco estudiado en el país. Además, el volumen total de lodos generados en el tratamiento de las aguas, así como su impacto ambiental sobre los rellenos sanitarios, se desconocen. En las lagunas de estabilización

de Ucubamba de la Ciudad de Cuenca se conoce que aproximadamente 18.250 toneladas de lodos se extraen anualmente en una primera fase (acumulación de lodos durante 14 años), para posteriormente pasar a una segunda fase de extracción definitiva con un promedio anual de 2000 toneladas (Bermeo Barreto & Idrovo Heredia, 2014).

En el presente trabajo experimental se aplicaron procesos electroquímicos sobre muestras de lodos deshidratados tomados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba de la ciudad de Cuenca, para determinar la efectividad de éstos procesos sobre la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. Coli*).

1.1. Planteamiento del problema

En el Ecuador apenas el 8% de las aguas negras o residuales están sometidas a algún nivel de tratamiento. La ciudad de Cuenca cuenta con la mejor capacidad de tratamiento del país y cubre el 95% de las aguas residuales en la PTAR Ucubamba (Cabrera, Garcés, & Paredes, 2012). Sin embargo, los lodos residuales generados y posteriormente deshidratados (minimización/reducción de los lodos), son enviados directamente al relleno sanitario de Pichacay (alrededor de 50 m^3/día), reduciendo la vida útil del mismo (ETAPA).

Otro de los problemas son los grandes volúmenes de lodos residuales generados en las PTAR que constituyen uno de los costos más importantes en el proceso de disposición final (transporte y generación de lixiviados). Además, ya que cada vez las áreas disponibles para la construcción de sitios para la disposición final son menores, es necesario centrarse en la gestión adecuada de los residuos sólidos para reducirlos, reutilizarlos y reciclarlos.

La valorización es una alternativa para la gestión de este tipo de residuos, cuya práctica más generalizada es la de producir abonos con fines agrícolas (cultivos). Sin

embargo muchos de estos residuos no pueden ser aplicados directamente debido a la concentración masiva de metales, bacterias, virus, parásitos, entre otros. Existen diferentes tratamientos de lodos, como por ejemplo el proceso de desinfección, que tiene la finalidad de eliminar una gran cantidad de microorganismos patógenos presentes en ellos. En la actualidad, éste tipo de tratamiento no es un proceso generalizado, pero países como Alemania o Suiza contemplan ya normas de desinfección con fines agrícolas.

1.2. Justificación

El tratamiento de aguas residuales permite la remoción de grandes cantidades de microorganismos patógenos, sin embargo, aún quedan concentraciones de éstos en los lodos residuales, los cuales deben someterse a un nivel de tratamiento antes de ser dispuestos al ambiente.

El problema del manejo de los niveles de tratamiento aplicados hoy en día en las PTAR está asociado al desperdicio del potencial de aprovechamiento que podrían tener los lodos, ya que solo se considera como un desecho que incrementa la cantidad de residuos a disponer en los rellenos sanitarios. Es por esta razón que se justifica aplicar diferentes tratamientos adecuados que permitan la utilización racional de éstos residuos.

Una de las ventajas de aplicar procesos electroquímicos frente a los convencionales está relacionada primordialmente con la eficiencia energética, ya que este tipo de tratamiento es ideal para la destrucción anódica de contaminantes orgánicos frente a la incineración térmica, haciendo muy atractivo el uso de esta tecnología por las bajas temperaturas que requiere.

Las desventajas se centran en las pérdidas energéticas por la distribución no homogénea de la corriente, la caída de tensión y las reacciones secundarias; inconvenientes que pueden minimizarse a través de la optimización del diseño y de la estructura del electrodo de la celda.

Hoy en día los procesos electroquímicos no solamente son comparables desde el punto de vista económico frente a otros, sino que también son más eficientes, compactos y automatizados. Éstos utilizan electricidad para producir reacciones químicas que permitan la destrucción de los contaminantes presentes en el lodo.

Otra de las razones por las que se estudia el comportamiento de éstos tratamientos sobre la remoción de microorganismos patógenos, es que para el caso de la PTAR Ucubamba, los lodos residuales son únicamente deshidratados sin la aplicación de ningún otro tipo de tratamiento. Para ello, los resultados que generan los procesos electroquímicos aplicados sobre las muestras adquiridas del silo de lodos deshidratados, serán analizados a través de indicadores como los Coliformes Totales y Fecales (*E. Coli*), los mismos que nos permitirán determinar el rendimiento del proceso aplicado.

1.3. Delimitación

La investigación se desarrolló en la ciudad de Cuenca, en los laboratorios Ciencias de la Vida pertenecientes a la Universidad Politécnica Salesiana, donde se realizaron los análisis correspondientes de las muestras de los lodos residuales adquiridos en del silo de la planta de deshidratación de lodos de la PTAR Ucubamba.

1.4. Objetivos general y específico

1.4.1. Objetivo general

Tratar los lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) a través de procesos electroquímicos para la disminución de la concentración de Coliformes Totales y Fecales.

1.4.2. Objetivos específicos

- Establecer las condiciones óptimas del lodo, mediante el análisis de las variables: humedad, pH, concentración de sales, conductividad para garantizar la eficiencia del proceso electroquímico.
- Determinar la eficiencia del electrodo de hierro y grafito para la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E.Coli*).
- Estudiar la influencia del tiempo de exposición, tipo de electrodo y espaciamiento entre los electrodos para el desarrollo del proceso electroquímico.

1.5. Fundamentación teórica

En esta sección, se analizó diferentes estudios sobre los procesos de tratamiento de lodos provenientes de aguas residuales, así como su definición, características, tipos, principales contaminantes y normativas que presentan éstos.

1.5.1. Análisis de estudios realizados sobre el tema

En la actualidad, el manejo integral de los lodos provenientes de PTAR ha cobrado gran importancia debido al potencial de reúso benéfico que éstos presentan y su alto contenido en materia orgánica que favorecen las propiedades físicas intrínsecas del suelo (Avedoy, 2006).

La reutilización de lodos es posible siempre y cuando estos, sean sometidos a un tratamiento previo. La aplicación de la electroquímica ha sido abundante en el tratamiento de aguas para la eliminación de metales pesados (Jiménez Molina & Rangel Santiago, 2011), agentes patógenos (M. R. Galvis, Hernández, & Tolosa, 2015) y la materia orgánica (Barrera-Díaz et al., 2015). Estudios realizados han demostrado que aplicando procesos de desinfección de suelo se obtienen excelentes resultados. Por citar:

En el estudio publicado en el 2006 por Vera, Sánchez, et al, de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002, se determina la efectividad que tiene la técnica de lombricompostaje, en lodos residuales crudos producidos en PTAR municipales. El resultado de la actividad de la lombriz se valoró con 4 tratamientos. Siendo el más eficaz en la remoción total de Coliformes Totales y Fecales, el tratamiento tres (lodo residual-lombrices-compostaje) y el cuatro (lodo residual-materia vegetal fresca-lombrices) (Vera-Reza, Sánchez-Salinas, Ortiz-Hernandez, Peña-Camacho, & Ortega-Silva, 2006).

Barrios, Jiménez, Gonzáles, en el año 2000 destruyen coliformes fecales de lodos residuales mediante el uso de los ácidos: sulfúrico, perclórico, peracético y acético, para de esta manera producir biosólidos. El ácido que logro la mayor remoción de estos patógenos fue el ácido peracético, obteniendo un valor de coliformes fecales por debajo del límite de detección (< 3 NMP/g ST) generando biosólidos pertenecientes a la clase B de acuerdo con la Norma US EPA y la NOM-004-ECOL-2000 (Barrios et al., 2000).

En el caso de Colta, Espericeta, y Ponce, estudian el comportamiento de un secador solar en función de la eliminación de Coliformes Fecales presentes en lodos residuales.

El conteo de este tipo de patógenos se realizó por la técnica tubos de fermentación múltiple expuesta en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Al aplicar este tipo de tratamiento de secado se obtuvo una remoción del 42% de Coliformes Fecales enlodo seco (Araujo, Calderón, Jácome, Peñafiel, & Salto, 2015).

La investigación desarrollada por Armenta, Camperos, Vigueros, et al, señala que los tratamientos de lodos que combinan la biodegradación y altas temperaturas (aerobio-termófilo), como es el caso del composteo, son los más eficientes en la remoción de patógenos.

El lodo residual que fue sometido a este tratamiento, se obtuvo de una PTAR después de ser sometido a un proceso de lodos activados. Una vez aplicado el proceso aerobio-termófilo, la reducción de microorganismos se analizó por medio de la concentración de Coliformes Fecales obteniéndose una remoción del 100% de estos patógenos (Armenta, Camperos, Vigueros, Mijaylova, & Nacheva, 2007).

En el estudio de Molina & Cisneros se usan lodos de purga, los cuales son sometidos a un pre-tratamiento térmico y digestión anaerobia mesofílica, logrando una remoción del 100% de Coliformes Fecales, bajo una temperatura de 60°C produciendo biosólidos clase A de acuerdo con la Normativa Mexicana NOM-004 SEMARNAT-2002 (Molina, Trinidad, & Cisneros, s. f.).

En el estudio "Digestión anaerobia en una y dos etapas de lodos residuales secundarios pre-tratados químicamente", con el sistema de etapa única se obtienen lodos digeridos con un número de Coliformes Fecales por debajo de 1000 NMP/g, obteniéndose así una remoción del 90%. Estos resultados frente a la aplicación de TPAB son mucho menores ya que con ésta se logra una remoción del 99.99% de Coliformes Totales (CARMONA, 2002).

Hasta este momento la información disponible en post-tratamiento de lodos respecto a la remoción de organismos patógenos, es escaso. Analizando estudios previos aplicados en aguas como es el estudio publicado por GHERNAOUT en el que aplica la electrocoagulación como tratamiento de desinfección de dos aguas sintéticas conteniendo cepas de *E.coli* y utilizando electrodos de acero corriente, acero inoxidable y aluminio, con separación entre placas de 5cm. Se obtiene la remoción del 100% *de E.coli,* aplicando electrodos de aluminio, una corriente de 1 A, y un pH de 9 (Ghernaout, Badis, Kellil, & Ghernaout, 2008).

Los tratamientos electroquímicos generan en la celda electrolítica cloro, por lo que es otra de las ventajas de éstos, ya que es otra de las causas de la remoción total de patógenos. El estudio publicado por Rojas en el 2010, en el que el sistema de desinfección química por cloración a las 4 horas de tratamiento redujo en un 71% los Coliformes Totales y en un 90% los Coliformes Fecales (*E. coli)* (N. Rojas et al., 2010). Según los estudios analizados, se determina la validez que tiene la aplicación de tratamientos electroquímicos, ya que presenta ventajas como la generación de cloro, que a su vez, constituye un desinfectante que ayuda a la remoción de patógenos. Ésta es la razón por la que la presente investigación analiza la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli)* aplicando éste tipo de procesos.

1.5.2. Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son estructuras artificiales en las que se efectúa un proceso natural controlado enfocado en la reducción del contenido de materia orgánica y sustancias de origen fisicoquímico y biológico, con el fin de disminuir la contaminación de las aguas y poder disponerlas en un cuerpo receptor natural o reutilizarlas en otras actividades, exceptuando el consumo humano.

En las PTAR se generan subproductos que incluyen principalmente: basuras, arena, espuma y lodos, siendo éstos un concentrado de los compuestos más dañinos que constituyen las aguas residuales. El lodo que obtiene de las PTAR tanto en operaciones como en los diferentes procesos de tratamiento, se presenta como: un residuo sólido, semisólido o líquido, cuya composición variara según las características del agua residual afluente y del proceso de tratamiento utilizado en la planta que lo genera (J. Galvis & Rivera, 2013).

1.5.3. Lodos residuales

Este residuo es considerado Según la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, como aquel sólido cuya humedad varia, así sea extraído de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras o de PTAR que no se han encontrado sujetas a técnicas de estabilización (Jiménez & Méndez, 2005).

Es uno de los subproductos de las PTAR de mayor interés debido al volumen obtenido y que aumenta a medida que la población incrementa. Constituye una fuente potencial de materia orgánica (energía) proveniente ya sea de las lagunas o de las plantas depuradoras.

1.5.3.1. Normativas

1.5.3.1.1. Normativas para límites máximos permisibles de contaminantes

Generalmente los lodos residuales se descargan a los sistemas de alcantarillado, se depositan en rellenos sanitarios o se envían a tiraderos, suelos o cuerpos de agua, causando impacto negativo sanitario y ambiental.

Es por este motivo, que han surgido normas como el apartado 503 de la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos (US EPA) y la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes para el uso, aprovechamiento y depósito de lodos y biosólidos (Jiménez & Méndez, 2005).

1.5.3.1.1.1. Agencia de protección del medio ambiente, EPA

Según la Agencia de Protección del Medio Ambiente, EPA (1994), máxima autoridad ambiental de los Estados Unidos y el ente con mayores trabajos en este tema en América Latina, los biosólidos se clasifican en:

- **Lodos categoría A:**

Lodo sin restricciones sanitarias para la aplicación directa en suelos. En este punto, la EPA es más específica al denominarlos "Biosólidos de Calidad Excepcional: (EQ)". Se definen como aquellos que son poco contaminantes y que presentan una reducción de patógenos de clase A, disminuyendo el nivel de componentes degradables que atraen organismos capaces de transportar y transmitir agentes infecciosos como los roedores, moscas y mosquitos (J. Galvis & Rivera, 2013).

- **Lodos categoría B:**

Lodo apto para aplicación al suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según el tipo y localización de los suelos o cultivos. La EPA los denomina como "Biosólidos

con Concentración de Contaminantes: (PC)", y los define como aquellos biosólidos que también logran los mismos límites de concentración de contaminantes que los EQ, pero sólo logran una reducción de patógenos clase B sujetos a la administración en el sitio mismo. Más que como una alternativa de tratamiento, se los utilizan para reducir vectores (Rámila & Rojas, 2008).

1.5.3.1.1.2. Norma oficial mexicana

La Norma Oficial Mexicana establece tres niveles de biosólidos: la clase A, B y C. El aprovechamiento de los biosólidos se establece en función del tipo y clase como se especifica en la **Tabla 1-1**, y cuyo contenido de humedad es de hasta el 85% (C. B. Jiménez, Muñoz, & Barrios Pérez, 1997).

Tabla 1-1.- Tipo, Clase y Aprovechamiento de los biosólidos

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. Los establecidos para clase B y C.
Excelente o Bueno	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. Los establecidos para la clase C.
Excelente o Bueno	C	Usos forestales. Mejoramientos de suelo. Usos Agrícolas.

Fuente: (O. N. García, 2006)

La Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT contempla microorganismos indicadores similares a los establecidos por la EPA, sin embargo incluye una tercera categoría (clase C) adicional.

- **Lodos categoría A:**

Corresponde a aquellos biosólidos que pueden ser utilizados sin ningún tipo de restricción, por ejemplo en la agricultura, incluyendo todos los usos urbanos con contacto público directo.

- **Lodos categoría B:**

Este tipo de lodos presentan ciertas restricciones para aplicaciones como: los de contacto indirecto, revegetación, cultivos de alimentos que se procesan antes de ser consumidos y de cobertura en rellenos sanitarios.

- **Lodos categoría C:**

Puede aplicarse en usos forestales o como mejoradores de suelos.

La **Tabla 1-2** que se presenta a continuación, muestra los límites máximos permisibles de contaminantes microbiológicos en lodos y biosólidos en plantas de tratamiento de aguas residuales establecidos por la US EPA y la Norma Oficial Mexicana NOM-004- SEMARNAT-2002.

Tabla 1-2 Valores máximos permisibles de Coliformes fecales Salmonella spp, Huevos de Helmintos y Virus entéricos en biosólidos de acuerdo a la US EPA y la NOM-004-SEMARNAT-2002

Parámetros microbiológicos	US EPA		PROY-NOM-004-ECOL-2001		
	Biosólidos Clase A	Biosólidos Clase B	Biosólidos Clase A	Biosólidos Clase B	Biosólidos Clase C
Coliformes fecales					

	Menor de 1000 NMP/ g ST	Menor de $2x10^6$ NMP/ g ST	Menor de 1000 NMP/ g ST	Menor de 1000 NMP/ g ST	Menor de $2x10^6$ NMP/ g ST
Salmonella spp.	Menor de 3 NMP/ 4g ST	No aplica	Menor de 3 NMP/ g ST	Menor de 3 NMP/ g ST	Menor de 300 NMP/ g ST
Huevos de helmintos	Menor de 1 HH/ 4g de ST	No aplica	Menor de 1 (a) HH/ ST	Menor de 10 HH/g ST	Menor de 35 HH/g ST
Virus entéricos	Menor de 1 V/ 4g ST	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

Fuente: (Jiménez & Méndez, 2003)

La Tabla 1-3 resume la clasificación de los biosólidos en términos de la calidad microbiológica, donde se observa que en la mayoría de los casos, los biosólidos se clasifican en clases A y B, con excepción de la norma mexicana, que como ya se mencionó introduce una tercera categoría (clase C), y la norma chilena, en la que sólo existe la clase A.

Tabla 1-3 Criterios microbiológicos para la categorización de biosólidos

Criterio	Unidad	EE. UU. (1)	México (2)	Brasil (3)	Chile (4)	Argentina (5)	Colombia (6)
Coliformes fecales	NMP/g	Clase A: $<1x10^3$ Clase B: $<2x10^6$	Clase A: $<1x10^3$ Clase B: $< 1x10^3$ Clase C: $< 2x10^6$	Clase A: $<1x10^3$ Clase B: $< 1x10^6$	Clase A: $< 1x\ 10^3$	Clase A: $<1x10^{3*}$ Clase B: $<2x10^{6*}$	Clase A: $<1x10^3$ Clase B: $< 2x10^6$
Salmonella sp	NMP/g	Clase A: < 3/4	Clase A: < 3 Clase B: <3 Clase C: < 300	Ausencia en 10 g	Clase A: < 3/4	Clase A: < 3/4	Clase A: ausente Clase B: $< 1x10^3$
Huevos de helmintos	HH/g	Clase A: < 1/4	Clase A: < 1 Clase B: <10 Clase C: < 35	Clase A: < 1/4 Clase B: < 10	Clase A: < 1/4	–	Clase A: < 1/4
Virus	UFP/g	Clase A: < 1/4	–	Clase A: <1/4	–	–	–

Fuente: (Torres, Madera-Parra, Silva-Leal, & others, 2013)

1.5.3.1.2. Normativas aplicadas para la toma de muestras y el conteo de coliformes totales y fecales (*E. coli*)

1.5.3.1.2.1. Norma Oficial Mexicana NOM-110-SSA1-1994

Esta norma proporciona las guías generales para la preparación de diluciones para el examen microbiológico de alimentos, con la finalidad de obtener una distribución lo más uniforme posible de estos microorganismos para su posterior análisis.

La preparación de diluciones decimales adicionales, reducen el número de microorganismos por unidad de volumen, para permitir, después de la incubación, la cuenta de colonias en placas (Mexicana, 1994b).

1.5.3.1.2.2. Norma Oficial Mexicana NOM-092-SSA1-1994

Esta Norma Oficial Mexicana establece el método para estimar la cantidad de microorganismos viables presentes en un alimento, agua potable y agua purificada, por la cuenta de colonias en un medio sólido, incubado aeróbicamente. Esta técnica consiste en contar las colonias, que se desarrollan en el medio de elección después de un cierto tiempo y temperatura de incubación, presuponiendo que cada colonia proviene de un microorganismo de la muestra bajo estudio (Mexicana, 1994).

1.5.3.2. Tipos de lodo

Los lodos provenientes de los PTAR constituyen una mezcla entre las aguas residuales y sólidos sedimentados. Por su origen se clasifican en: primarios, secundarios y terciarios. Por su estado de tratamiento pueden denominarse: crudos o frescos, digeridos o tratados, húmedos o secos (Narvaez & others, 2015). A continuación se detalla las características más importantes de cada uno de éstos.

Por su origen:

1.5.3.2.1. Lodos primarios

Estos lodos se obtienen de procesos de tratamiento primario de las aguas residuales. También se considera como lodo primario a aquellos lodos que se encuentran en el fondo del tanque primario de sedimentación.

Las características de estos residuos varían según las características que presente el área de recogida de las aguas, por lo general este contiene materia orgánica, vegetales, frutas, papel, etc., y una humedad que varía en un rango del 93% y 97% (J. Galvis & Rivera, 2013).

1.5.3.2.2. Lodos secundarios

Este tipo de lodos se producen en procesos de tratamiento biológicos que convierten residuos o substratos solubles en biomasa. También incluye la materia particulada que permanece en el agua después de la sedimentación primaria y que se incorpora en la biomasa. La cantidad producida depende de varios factores como: eficiencia del tratamiento primario, relación de SST (Sólidos Suspendidos Totales) a DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), cantidad de sustrato soluble, remoción de nutrientes y criterios de diseño del tratamiento (Limón, 2013).

1.5.3.2.3. Lodos terciarios

Los lodos terciarios son producidos por procesos de tratamiento avanzado del agua residual, tales como la precipitación química y la filtración. Los químicos usados en los procesos de tratamiento avanzados del agua residual son: aluminio, fierro, sales, cal o polímeros orgánicos, los mismo que incrementan la masa y usualmente el volumen del lodo. Generalmente, si se utiliza cal o polímeros, las características del espesamiento y deshidratación del lodo serán mejores, por el contrario, si se usa fierro

o sales de aluminio, la capacidad de la deshidratación y espesamiento del lodo comúnmente será reducido (Ortiz, 2013).

Por su estado de tratamiento:

1.5.3.2.4. Lodos crudos o frescos

Este tipo de lodos son aquellos obtenidos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales y que no están sujetos a ningún tipo de tratamiento ni a un proceso de estabilización. Cuando son sometidos a procesos de digestión, éstos generan la acidificación y produce olor (Moscoso & Vintimilla, 2010)

1.5.3.2.5. Lodos digeridos o tratados

Los lodos digeridos son aquellos que resultan de aplicar procesos de digestión aerobia. Habitualmente este tipo de residuos contiene un porcentaje de materia orgánica que oscila entre el 45-60%, también poseen un color negro y un olor a tierra (Moscoso & Vintimilla, 2010).

1.5.3.2.6. Lodos húmedos y secos

Los lodos húmedos o secos contienen la mayor parte de los contaminantes de las aguas residuales, principalmente metales pesados. Por ende su utilización es contralada para evitar la contaminación en las zonas destinadas para su aplicación («Ensayo de Suelos | Construpedia, enciclopedia construcción».)

La **Tabla 1-4** muestran los diferentes parámetros de lodos primarios, secundarios y digeridos, generados en el tratamiento de aguas residuales domésticas, cuyas características varían en función del proceso que los origina (O. N. García, 2006).

Tabla 1-4.- Parámetros de los lodos generados en diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales

PARÁMETROS	LODOS PRIMARIOS (Sin adición de Químicos)	LODOS SECUNDARIOS (licor mezcla de lodos activados)	LODOS DIGERIDOS (Mezcla)
pH	5,5-6,5	6.5-7.5	6.8-7.6
Contenido de Agua (%)	92-96	97.5-98	94-97
SSV (%SS)	70-80	80-90	55-65
Grasas (%SS)	dic-14	03-may	04-dic
Proteínas (%SS)	abr-14	20-30	oct-20
Carbohidratos (%SS)	08-oct	06-ago	05-ago
Nitrógeno (%SS)	02-may	01-jun	03-jul
Fósforo (%SS)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Bacterias patógenas (NPM/100ml)	10^3-10^5	100-1000	10-100
Metales pesados (%SS) (Zn, Cu, Pb)	0.2-2	0.2-2	0.2-2
SSV: Solidos Suspendidos Volátiles, NMP: Número Más Probable, SS: Sólidos Suspendidos			

Fuente: (O. N. García, 2006)

1.5.3.3. Caracterización de los lodos

Las características de los lodos residuales varían según la frecuencia de bombeo, origen de los lodos (domésticos o industriales) y al contenido de nutrientes en los alimentos. Es por eso que se utiliza otros parámetros físicos, químicos y microbiológicos para caracterizar los lodos, los cuales son importantes para el tratamiento de biosólidos y su disposición final. A su vez la caracterización de los lodos es fundamental para cuantificar las concentraciones de nutrientes para su aplicación en los suelos y los compuestos dañinos que deben ser eliminados.

De acuerdo a su naturaleza, los lodos presentan diferentes características que determinan la capacidad que éstos tienen para ser reutilizados. En este punto, se detallan las características físicas, químicas y biológicas que presentan éstos.

1.5.3.3.1. Características físicas

Los principales factores que caracterizan físicamente a los lodos residuales son: olor, color, apariencia, humedad, sólidos (totales, fijos, volátiles, suspendidos y sedimentables), rapidez de sedimentación, densidad, compresibilidad, temperatura, entre otros. El contenido de humedad presente en los lodos constituye una de las características físicas de mayor importancia. Mientras más alto sea este valor, mayor

es la dificultad para el manejo y almacenamiento de los lodos, por ende mayor serán los recursos utilizados para su tratamiento y más adelante, su disposición final. Usualmente la humedad se define como la concentración de sólidos presentes en el lodo, y depende del tipo de lodo como se indica en la **Tabla 1-5**.

Tabla 1-5 Concentración de sólidos de acuerdo al tipo de lodo

TIPO DE LODO	Concentración de sólidos % de sólidos (peso seco)	
	Intervalo	Concentración típica
Primario	4.0 – 10.0	5.0
Primario + purga de lodo activado.	3.0 – 8.0	4.0
Primario + purga de filtro percolador.	4.0 – 10.0	5.0
Primario avanzado (con cloruro férrico	0.5 – 3.0	2.0
Primario avanzado (con cal en baja concentración).	2.0 – 8.0	4.0
Primario avanzado (con cal en alta concentración)	4.0 – 16.0	10.0
Lodo activado convencional (después del sedimentador primario).	0.5 – 1.5	0.8
Filtro percolador (después del sedimentador primario).	1.0 – 3.0	1.5
Disco biológico (Después de sedimentación primaria).	1.0 – 3.0	1.5

Fuente: (Valencia, 2008)

1.5.3.3.2. Características químicas

Para el adecuado manejo de los lodos se debe evaluar la composición química, que incluye la concentración de metales pesados, así como el contenido de patógenos y parásitos que éstos poseen (Amador, Veliz, & Bataller, 2014).

Las características químicas de los lodos dependen de la calidad de las aguas domésticas y del tipo de industrias conectadas a la red de alcantarillado. También depende de aquellas aguas residuales provenientes de las actividades de una comunidad así como del tipo de tratamiento, acondicionamiento y tratamientos que éstas reciben.

Químicamente, las características principales de los lodos son: parámetros orgánicos e inorgánicos, metales pesados, nutrientes, materia orgánica (DBO:

Demanda Biológica de Oxígeno, DQO: Demanda Química de Oxigeno, COT: Carbono Orgánico Total), tóxicos orgánicos, hidratación, conductividad eléctrica, pH, entre otros.

1.5.3.3.3. Características biológicas

En el aspecto biológico, si bien un lodo sometido a diferentes tipos de tratamiento presenta una disminución en la concentración de microorganismos patógenos, no significa que deje de constituirse en un riesgo para la salud pública.

Los distintos tipos de microorganismos patógenos, caracterizan a los lodos residuales. Pese a que existe un número elevado de microorganismos, se consideran aquellos patógenos más representativos ya sea por la resistencia que éstos presentan, cantidad, afectación, etc. Entre los patógenos más importantes están: *Salmonella spp*, Coliformes Totales y Fecales (*E. coli)* huevos de Helmintos, entre otros.

1.5.3.4. Contaminantes principales de los lodos residuales

Los lodos provenientes de las PTAR, a causa de los procesos de depuración, tienden a almacenar una serie de metales y compuestos orgánicos. La calidad del lodo depende principalmente de tres grupos de contaminantes principales

1.5.3.4.1. Metales

Los metales se utilizan frecuentemente en pigmentos, enzimas, vitaminas, y en otros procesos metabólicos ya que constituyen una parte esencial para diferentes organismos vivos. Los metales pesados a medida que incrementan su concentración se tornan más tóxicos. Entre los metales más comunes presentes en los lodos se encuentran: Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Zinc (Zn), Níquel (Ni), Cobre (Cu), etc.

Las preocupaciones sanitarias como medioambientales que generan estos metales, radica principalmente en su acumulación en tejidos humanos así como la biomagnificación en la cadena alimenticia. En las aguas residuales domésticas la concentración de estos metales es baja, caso opuesto a lo que ocurre en las aguas residuales industriales, donde los metales están siempre presentes y las concentraciones son alarmantes.

1.5.3.4.2. Contaminantes orgánicos

Generalmente aquellos compuestos con poca solubilidad en agua y alta capacidad de adsorción se acumulan en los lodos. Compuestos como los colorantes, disolventes industriales, plastificantes y muchas otras moléculas orgánicas poseen estas características. Todos ellos producen efectos potenciales sobre el medio ambiente, principalmente en la salud humana. A diferencia de los dos contaminantes mencionados anteriormente, éste varía su potencial de biodegradación.

1.5.3.4.3. Patógenos

Los lodos al igual que las aguas residuales poseen bacterias, virus, parásitos, entre otros microorganismos, algunos beneficiosos mientras que otros no. Una vez que las aguas y lodos residuales, se someten a un proceso de tratamiento, el efluente final estará práctica o completamente libre de patógenos.

Son 5 los grupos de organismos patógenos más comúnmente encontrados en los lodos. Estos son: helmintos, protozoarios, hongos, virus y ***bacterias***. Estos organismos pueden provenir de fuentes humanas, lo que se refleja en el estado de la salud de la población mundial, sobre todo en áreas rurales que no cuentan con sistemas de alcantarillado, agua potable y centros de salud. También pueden provenir de fuentes animales, cuyos excrementos son eliminados a través de la red de saneamiento de base

acuosa (por ejemplo, heces de perros y gatos), o bien a través de vectores en las alcantarillas, como los roedores.

Estudios epidemiológicos han demostrado que las bacterias, virus, huevos de helmintos y los quistes de los protozoarios presentan riesgos para la salud humana y animal (Andreoli, 2007). Entre las características más importantes de éstos patógenos están:

- Alta incidencia de parásitos en la población a nivel mundial.
- Largo tiempo de supervivencia de los huevos de los patógenos en el medio ambiente. Por ejemplo, los huevos de áscaris pueden sobrevivir hasta 7 años.
- Un huevo o quiste puede ser suficiente para infectar a un individuo.

Algunos de los organismos patógenos y parásitos que se encuentran presentes en los lodos residuales se mencionan en la **Tabla 1-6**.

Tabla 1-6 Principales grupos de organismos patógenos y parásitos contenidos en los lodos residuales

GRUPO	AGENTES	EFECTOS EN LA SALUD
Bacterias	*Salmonella Typhi*	Fiebre tifoidea, paratifoidea
	Salmonella paratyphi A y B	Disentería bacilar
	Shigella sp.	Cólera
	Vibrio cholerae	Gastroenteritis agudas diarreas
	Escherichia coli	Diarreicas
	Salmonella sp.	
Virus	*Virus Hepatitis A y E*	Hepatitis
	Virus de la Polio	Poliomelitis
	Virus de Norwark	Gastroenteritis aguda y crónica
	Rotavirus	Meningitis
	Enterovirus	Enteritis
	Adenovirus	Infecciones respiratorias
Protozooa	*Entamoeba histolytica*	Disentería amebiana

	Giardia lamblia intestinales	Gastroenteritis
Helmintos	*Taenia saginata*	Cisticercosis
	Ascaris lumbricoides	Ascariasis
	Tricheuris trichiuria	Tricocefalosis o tricuriasis
	Toxocara spp	Toxoplasmosis

Fuente: (Cordero, 2010)

De la **Tabla 1-6**, se detalla los tres patógenos más importantes presentes en los lodos residuales. Estos son: *Salmonella*, Coliformes Totales y Fecales (*Escherichia Coli: E.coli*). Posteriormente en este documento se detalla el estudio realizado sobre éstos dos últimos tipo en lodos residuales provenientes de la PTAR de Ucubamba, de la Ciudad de Cuenca.

1.5.3.4.3.1. *Salmonella*

La bacteria *Salmonella* pertenece a la familia Enterobacteriaceae conformada por: bacilos gramnegativos, anaerobios facultativos y por flagelos perítricos que rodean al microorganismo y no desarrollan cláusula ni espora. Producen sulfuro de hidrógeno, ya que son bacterias móviles (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL MARINO, 2009).

1.5.3.4.3.2. *Escherichia coli*

Escherichia coli (E. coli) también pertenece a la familia Enterobacteriaceae. Generalmente se localiza en el tracto intestinal de los animales, incluido el humano y por ende, en aguas residuales, y que se lo puede encontrar en cualquier tipo de ambiente. (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL MARINO, 2009). Es el organismo más estudiado por el ser humano.

Dentro del grupo de Coliformes Fecales, la bacteria *E. coli*, se encuentra en concentraciones elevadas tanto en las heces humanas como heces de los animales, son

pocas las veces en que la presencia de ésta, viene acompañada de la ausencia de contaminación fecal, aunque estudios revelan que pueden desarrollarse en suelos tropicales. Se considera que la *Escherichia Coli,* es el índice de contaminación fecal más eficaz, por ende es el microorganismo más usado para monitoreos de agua evaluando su calidad y determinando su aptitud para consumo humano (Matute Cordero, Sarmiento Crespo, & Valdez Arcentales, 2010).

1.5.3.4.3.3. Coliformes totales y fecales

La denominación genérica de los coliformes se atribuye a un grupo de especies bacterianas que poseen ciertas características bioquímicas en común e importancia relevante como indicadores de la contaminación presente en agua y en alimentos. Está formado por los siguientes tres géneros: *Escherichia, Klebsiella y Enterobacter.*

No todos los coliformes son de origen fecal, motivo por el cual se hizo necesario desarrollar diferentes pruebas para diferenciarlos y emplearlos como indicadores de contaminación. Se distinguen por tanto a los ***coliformes totales***, que no son más que la totalidad del grupo, y a los ***coliformes fecales***, aquellos que tienen su origen intestinal. Muchas de las veces, los organismos patógenos como bacterias, virus y parásitos presentes en las aguas residuales, resultan difíciles de aislar e identificar. Por ello se emplea el organismo coliforme como organismo indicador, ya que su presencia es más numerosa y fácil de identificar (R. Rojas, 2002).

Durante algunas décadas bacterias como los Coliformes Totales, han sido usadas como un indicador eficaz para el agua potable ya que permiten establecer si el tratamiento es efectivo y a su vez la integridad del sistema de distribución. También son utilizados como un test para la detección de la contaminación fecal y presencia potencial de protozoos patógenos, quistes, y algunos virus (Márquez, 2010).

Otro avance de los coliformes bajo ciertas sustancias, es que pueden proliferar en los biofilms de los sistemas de distribución de agua, oscureciendo o nublando su uso como indicador de contaminación externa. En varias ocasiones los coliformes son de origen no fecal (Márquez, 2010). Para definir la eficiencia de remoción de microorganismos por parte de los diversos tipos de procesos de tratamiento de las aguas residuales, se acostumbra a emplear un organismo indicador y normalmente se hace referencia a los coliformes totales, coliformes termotolerantes o a *E. coli* (R. Rojas, 2002).

1.6. Tratamiento de lodos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

Los objetivos del tratamiento de lodos están dirigidos a lograr su estabilización para garantizar una degradación controlada de las sustancias orgánicas que contiene, y eliminar el olor, disminuir el volumen e inactivar organismos patogénicos para su posible utilización posterior o disposición final (Amador et al., 2014). La **Tabla 1-7** presenta los tratamientos más comunes aplicados en lodos residuales.

Tabla 1-7 Tratamientos y métodos empleados en los lodos

Tratamiento	**Métodos empleados**
Operaciones previas	Bombeo, trituración, desarenado, homogenización
Espesamiento	Gravedad, flotación, centrifugación, filtros de bandas
Estabilización	Cal, tratamiento térmico, digestión anaerobia y aerobia
Deshidratación	Filtraciones, centrifugación, secado
Desinfección	Pasteurización, química, almacenamiento de larga duración
Acondicionamiento	Químico, térmico
Secado térmico	En Hornos, incineración, evaporadores múltiples
Compostaje	Biológico aerobio

Fuente: (Amador et al., 2014)

1.6.1. Tipos de tratamiento

1.6.1.1. Espesamiento

Generalmente constituye la primera fase del tratamiento de lodos en la que se pretende una reducción del volumen entre 30%-80%, sin un gran consumo de energía. Tiene lugar en el tanque de almacenamiento, lo que resultan beneficioso para los siguientes tratamientos: estabilización y desinfección. Necesita de menos espacio para llevar a cabo estas operaciones (Amador et al., 2014).

1.6.1.2. Estabilización

Para elegir una de las técnicas de estabilización de un lodo en particular se debe considerar factores como: la cantidad y calidad de lodos a tratar, las condiciones particulares del sitio y, la situación financiera en cada caso (O. N. García, 2006). La estabilización tiene como objetivo la reducción de materia orgánica en el lodo para que a su vez sea mínima la capacidad de fermentación. Los procesos, a los que abarca la técnica de estabilización son el compostaje, la adición de cal que es conocida como estabilización alcalina y por último la digestión anaerobia y aerobia.

1.6.1.2.1. Digestión anaerobia

En la digestión anaerobia se requiere que los lodos sean calentados, por lo que su costo de construcción es elevado. El agua en el lodo, al contener una elevada concentración de amoniaco, genera la necesidad de llevar un buen control de operación para evitar un proceso de desestabilización.

1.6.1.2.2. Digestión aerobia

La digestión aerobia es comúnmente utilizada en plantas cuyas capacidades son inferiores a los 220 l/s. Una de las desventajas de aplicar este tipo de estabilización es el costo de operación, ya que a diferencia de la digestión anaerobia, se necesita un suministro de aire para la estabilización de los lodos.

1.6.1.2.3. Compostaje

Al momento de utilizar mejoradores o acondicionadores de suelos, el compostaje es una de las mejores opciones (Torres et al., 2005). En este proceso se necesita intensificar la mano de obra y puede generar olores. Adicionalmente existe la probabilidad de que la masa de los biosólidos incremente y que se genere la transmisión de patógenos por el polvo presente en el aire.

El compostaje consiste en la descomposición aerobia de la materia orgánica contenida en los sólidos, realizada en fase sólida y tras la fermentación. Presenta las siguientes ventajas: puede ser llevada a cabo en reactores abiertos, la automatización es casi total y se evitan olores (M. A. García, 2003). En esencia todos los procesos de compostaje se basan en los mismos principios y generan el mismo tipo de productos (dióxido de carbono, agua, minerales y materia orgánica estabilizada) (Torres et al., 2005).

1.6.1.2.4. Estabilización química

Se obtiene la estabilización gracias a la adicion de cal, ya que esta tiene un costo bajo y es muy fácil de manipular. Adicionar productos químicos al lodo logra estabilizarlo produciendo así la no supervivencia de los microorganismos (Aragón Cruz, 2009).

1.6.1.3. Deshidratación

La deshidratación junto con el secado, son operaciones unitarias físicas (mecánicas) usadas para reducir el contenido de humedad de los lodos, y de esta manera ser manipulados fácil y económicamente como un semisólido, y no en el estado líquido. Estas operaciones llegan a reducir el contenido de humedad en un 50 o 70% y menos del 10% de secado (M. A. García, 2003).

Los métodos más comunes utilizados para la deshidratación de los lodos de las PTAR convencionales se clasifican de la siguiente forma (López Cabanes, 1989):

- Sistemas de secado natural: lagunas de secado, lechos de secado (Cacua & Saravia, 2008).
- Sistemas de deshidratación mecánica: centrifugación, filtros al vacío, filtro prensa de banda, filtro prensa de placas (Cabezas, 2011).

1.6.1.4. Desinfección

La desinfección es la última etapa de tratamiento empleada para eliminar los organismos patógenos, mediante la cual, se pueden eliminar microorganismos patógenos presentes en los lodos que pueden suponer un riesgo sanitario. Estos tratamientos utilizan como mecanismos de remoción la radiación solar, la elevación del pH y el aumento de la temperatura. La intensidad y los tiempos de exposición de la masa de los biosólidos en estos sistemas son determinantes para una eficiente desinfección. Los métodos de higienización deben ser económicos, seguros y de fácil aplicación práctica (Torres et al., 2013).

1.6.1.4.1. Factores que influyen en el proceso de desinfección

1.6.1.4.1.1. Microorganismos presentes

Desinfectar microorganismo en mayor o menor proporción depende de la resistencia de sus membranas celulares a la penetración del desinfectante y de la afinidad química del desinfectante frente a las sustancias vitales del organismo.

1.6.1.4.1.2. Desinfectante utilizado

Los desinfectantes presentan distintos modos de actuación frente a los microorganismos con distinta eficacia. La concentración del producto influye en el tiempo de contacto necesario para lograr un tratamiento eficiente.

1.6.1.4.1.3. Tiempo de contacto

El tiempo de contacto entre el desinfectante y el lodo (microorganismos) debe ser adecuado para lograr la remoción de los Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*). La intensidad y los tiempos de exposición de la masa de los biosólidos en los tipos de tratamientos mostrados anteriormente, son determinantes para una eficiente desinfección.

La **Tabla 1-8** muestra la temperatura y tiempo de exposición para la eliminación de algunos microorganismos patógenos.

Tabla 1-8 Temperatura y tiempo de exposición para la eliminación de patógenos

Organismo	Observaciones
Salmonella typhosa	Sin crecimiento por encima de 46ºC, eliminación en 30 minutos a 55-60ºC y en 20 minutos a 60ºC
Slmonella sp.	Eliminación en 1 hora a 55ºC y en 15-20 minutos a 60ºC
Shigella sp.	Eliminación en 1 hora a 55ºC
Escherichia coli	**Eliminación en 1 hora a 55ºC y en 15-20 minutos a 60ºC**
Entamoeba histolytica	Eliminación en pocos minutos a 45ºC y en pocos segundos a 55ºC
Taenia saginata	Eliminación en pocos minutos a 55ºC
Trichinella spiralis	Eliminación rápida a 55ºC e instantánea a 60ºC
Brucellla abortus o Br. Suis.	Eliminación en 1 hora a 55ºC y 3 minutos a 62-63ºC
Mycrococcus pyogenes var. Aureus	Eliminación en 10 minutos a 50ºC
Streptococcus pyogenes	Eliminación en 10 minutos a 54ºC
Mycrobacterium tuberculosis var. Homini	Eliminación en 15-20 minutos a 66ºC
Corynebacterium diphtheria	Eliminación en 45 minutos a 55ºC
Necator americanus	Eliminación en 50 minutos a 45ºC

Ascaris limbricoides	Eliminación en menos de 1 hora a temperaturas mayores a 50ºC

Fuente: (Torres et al., 2013)

1.6.1.4.1.4. Partículas en suspensión

Factor que si se encuentra presente en el lodo residual afecta a la eficiencia del proceso, ya que podría proteger a los patógenos frente al proceso de desinfección.

1.6.1.4.2. Proceso de desinfección a través de cloro

Como se mencionó anteriormente, el cloro presenta la capacidad de traspasar la pared celular de los microorganismos y atacar su sistema enzimático, provocando la muerte de éstos. Los agentes desinfectantes son el ácido hipocloroso (HOCl) y el ión hipoclorito (OCl-).

El ácido hipocloroso, se disocia en iones hidrógeno e iones hipoclorito en la siguiente reacción reversible:

$$HOCl \leftrightarrow H^+ + OCl^-$$

El cloro disminuye el pH del agua gracias a los iones hidrógeno que se producen en las reacciones con el agua. A continuación se estudia la importancia que tiene el pH del agua en el proceso de desinfección.

- Si el pH es inferior a 2, se encuentra en forma molecular.
- Si el pH es 5, el cloro molecular desaparece encontrándose como ácido hipocloroso.
- Si el pH es menor o igual a 10 se encuentra el ion hipoclorito (Rodríguez Pérez, 2013)

La desinfección es más eficiente con niveles de pH bajos ya que favorece la formación de ácido hipocloroso, un agente alrededor de ***80 veces más eficaz*** que el ión hipoclorito.

1.6.1.5. Acondicionamiento

Para continuar con el proceso de secado de los lodos provenientes de los digestores, es necesario acondicionarlos para que el proceso de deshidratación sea eficiente (López Cabanes, 1989), a través por ejemplo del uso de sustancias químicas o tratamiento por calor (M. A. García, 2003).

El objetivo de este tratamiento es facilitar la aglomeración de sólidos. Es necesario tener en cuenta las condiciones limitantes como: cantidad, estructura, disposición, regulaciones, disponibilidad y personal (Amador et al., 2014).

1.6.1.6. Tratamiento térmico

En este tipo de tratamientos los lodos a analizar se colocan en un depósito en el que se calentaron en temperaturas hasta de 260ºC acompañadas de una presión de hasta 2760 kN/m^2 y a un tiempo mínimo de exposición. Tanto el proceso de acondicionamiento como el de estabilización abarcan al tratamiento térmico. Según varios autores consideran al tratamiento térmico más como una técnica de acondicionamiento, ya que a temperaturas y presiones elevadas el agua contenida en los lodos se libera, permitiendo el proceso de deshidratación, liberando así sólidos orgánicos solubles acompañados de nitrógeno amoniacal (Domínguez Tamayo, 2014).

1.6.2. Tratamientos electroquímicos

Se define como proceso químico aquel donde las aguas residuales provenientes de las PTAR sufren tratamientos por reacciones químicas. La remoción completa de los contaminantes presentes en aguas residuales, que incluye los lodos, se acompañan de tratamientos físicos y biológicos (M. Gutiérrez & Volke, 2004).

Un sistema electroquímico está formado básicamente por un ánodo donde tiene lugar la oxidación, un cátodo donde tiene lugar la reducción, y una fuente de potencia encargada de suministrar la electricidad (Guillemes Peira, 2014).

La remoción de los contaminantes presentes en las aguas/lodos residuales, utiliza una corriente eléctrica para mineralizar los compuestos orgánicos, movilizando y eliminando contaminantes tales como metales, bacterias, virus, etc., de los suelos o sedimentos (L. García, Vargas, & Reyes, s. f.). La aplicación de un campo eléctrico entre los electrodos permite la extracción y migración de contaminantes por mecanismos de transporte electrocinéticos. Más adelante se observará la estructura utilizada para el proceso de remoción de las bacterias (Coliforme Totales y Fecales).

Este campo eléctrico produce el transporte de iones y fluidos de los poros y las partículas cargadas eléctricamente, promoviendo la extracción de los contaminantes. Son varias las reacciones entre el suelo y los contaminantes que pueden ocurrir, por ejemplo: reacciones en los electrodos, la adsorción/desorción, electroforesis, entre otras (Rutigliano et al., 2008).

Los electrodos utilizados en este proyecto fueron colocados en cubas de vidrio, y para mejorar las condiciones de conducción del campo eléctrico entre estos es necesario humectar los electrodos con algún tipo de electrolito, como es el caso de Cloruro de Sodio el cual fue añadido en nuestro proyecto (DE LA ROSA-PÉREZ, TEUTLI-LEÓN, Margarita, & RAMÍREZ-ISLAS, 2007). Los procesos de

electromigración, electroósmosis, y electroforesis, hacen posible la conducción de contaminantes hacia los electrodos mediante el campo eléctrico (DE LA ROSA-PÉREZ et al., 2007), detallándose a continuación:

1.6.2.1. Electromigración

La electromigración es la tecnología más empleada para la electrorremediación de suelos. Su aplicación está vinculada con la remoción de contaminantes solubles iónicos como: metales pesados, radionucleidos y cianuros (DE LA ROSA-PÉREZ et al., 2007). El proceso consiste en el movimiento de los iones (carga contaminante) contenidos en el lodo residual, por acción del campo eléctrico generado entre el ánodo y cátodo. Los aniones (iones de carga negativa) se moverán hacia el ánodo (electrodo de carga positiva), mientras que los cationes (iones de carga positiva) se moverán hacia el cátodo (electrodo de carga negativa) (Díaz, 2010).

La principal limitación de este tipo de tecnología es la humedad del suelo, ya que el agua se emplea como soporte para permitir la movilidad de las especies iónicas (Díaz, 2010). En suelos contaminados, para que un metal sea transportado debe mezclarse en una solución y poseer una carga eléctrica que no debe cambiar mientras migra hacia uno de los electrodos (DE LA ROSA-PÉREZ, TEUTLI-LEÓN, Margarita, & RAMÍREZ-ISLAS, 2007).

Entre los contaminantes que pueden tratarse mediante procesos electroquímicos están: metales pesados como: Pb, Hg, Ni, Cu, Zn, Cr, especies radioactivas (137Cs. 90Sr, 60Co, Ur), aniones tóxicos (NO3-, SO4-), mezclas de contaminantes orgánicos/iónicos, hidrocarburos halogenados, hidrocarburos poliaromáticos, cianuros, entre otros (Van Cauwenberghe, 1997).

1.6.2.2. Electroósmosis

La electroósmosis es el fenómeno en cual se genera el movimiento de las moléculas de agua por la aplicación de un campo eléctrico en un medio poroso. Cada poro del material se considera como un capilar que se encuentra en contacto con los iones de una solución de agua, las superficies porosas de los materiales del terreno y los utilizados en la construcción de la edificación que normalmente suelen estar cargados con carga negativa.

Sin embargo, en la proximidad de los muros se encuentran iones positivos o cationes producto de la formación de una doble capa que se compone de una capa fija asociada a los cationes absorbidos por la superficie y de una capa móvil o difusa.

Si se introducen electrodos y se aplica una diferencia de potencial, la capa móvil se trasladará hacia el cátodo llevando consigo las moléculas de agua (López-Vizcaíno López, 2013), y este movimiento de transporte del agua, es lo que se denomina electroósmosis (Del Castillo, 1997).

1.6.2.3. Electroforesis

Este mecanismo se observa cuando hay partículas o coloides con carga eléctrica de forma que los contaminantes ligados a este material particulado puedan ser transportados por el campo eléctrico (DE LA ROSA-PÉREZ et al., 2007)

La ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. muestra un esquema básico el proceso de electroforesis, donde se observa los tres elementos principales: la fuente de alimentación, los electrodos y el suelo (en este caso será el lodo residuales de la PTAR UCUBAMBA).

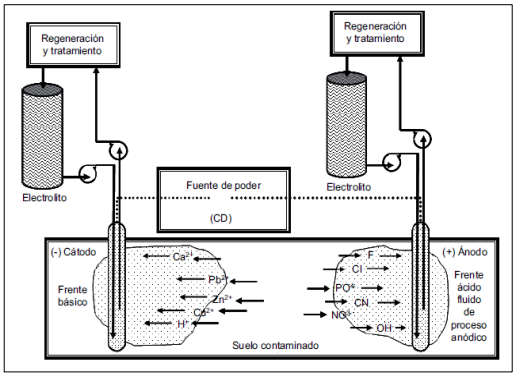


Ilustración 1 Esquema básico del proceso de electroforesis

Fuente: (DE LA ROSA-PÉREZ et al., 2007)

1.6.2.4. Tratamiento electroquímico basado en electrólisis

La electrolisis es un proceso novedoso ya que permite incorporar la explotación agropecuaria de aquellos suelos afectados por salinidad y/o alcalinidad (Marín, 2009). En este método se aplica corriente eléctrica para crear un campo eléctrico entre los dos electrodos. Las sustancias altamente solubles se orientan similarmente a las moléculas del agua y tienden a emigrar hacia uno de los dos electrodos de acuerdo a la carga (polaridad y movilidad de los contaminantes) (Flores, 2010). Debido a que los sistemas electroquímicos implican una etapa de electrólisis, estos se pueden agrupar en función del tipo de eliminación que se produce (S. Gutiérrez, 2008). La **Ilustración 2** muestra dos tipos de electrólisis: directa e indirecta.

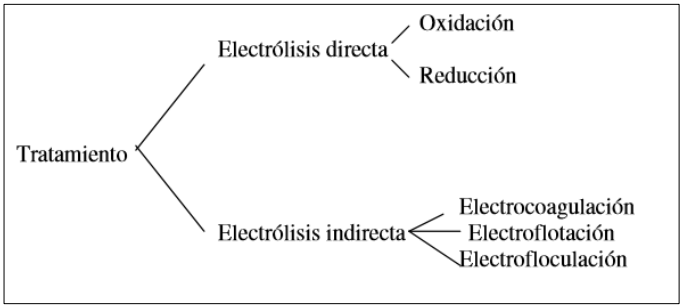


Ilustración 2 Tratamiento electroquímico basado en electrólisis

Fuente: (Vázquez, 2015)

1.6.2.4.1. Electrólisis del cloruro de sodio

El proceso de electrólisis del NaCl se realiza dentro de una celda electrolítica. El electrolito usado (Cloruro de sodio) está constituido por una fundición de cloruro de sodio, el cual contiene iones tanto de sodio como de cloro (Milla González, 2014).

Un cable conductor permite que los electrodos estén sujetos a una fuente de corriente continua; lo que permite que el electrodo conectado al polo negativo quede cargado negativamente, y de igual manera ocurre con el positivo, ya que se queda cargado positivamente, siempre y cuando esté conectado al polo positivo (Whitten, Gailey, Davis, Ortega, & Muradás, 1992).

El electrodo que se quedó cargado negativamente atrae hacia su superficie los iones de tipo positivos, y a su vez cada ion sodio recibe un electrón, reduciéndose para formar un átomo de sodio. Los átomos de sodio en el electrodo se mezclan para formar sodio metálico que debido a que es el más denso, sale a la superficie del electrólito.

El electrodo que se encuentra cargado positivamente trae hacia su superficie los iones de tipo negativos. Los iones cloruro dan un electrón al electrodo y se transforman en átomos de cloro, que se combinan para dar lugar a un Cl_2 (g), que sube a la superficie en forma de burbujas.

En la superficie de cada electrodo tiene lugar una transferencia de electrones; es decir: del cátodo va hacia el electrólito y del electrólito va hacia el ánodo.

1.6.2.4.2. Electrocloración

Actualmente el cloro continúa siendo el método más frecuente de desinfección en todo el mundo por su largo historial de fiabilidad. El cloro trabaja formando hipoclorito (HClO) cuando se disuelve en agua. El HClO es un oxidante de acción rápida con un amplio efecto biosida. La generación electrolítica de hipoclorito tiene numerosas ventajas en comparación con otros métodos de desinfección ya que solo requiere sal

(poder ser casera, como fue el caso de este proyecto), agua y electricidad. La electrocloración se basa en una solución de salmuera con una serie de electrodos que contienen una célula electrolítica.

A medida que la salmuera pasa por la célula, la corriente continua en los electrodos genera una solución de soda caustica, cloro e hidrógeno (Ordoñez & others, 1992).

1.6.2.4.3. Electrocoagulación

El empleo de la electricidad, fue aplicado por primera vez en tratamientos de aguas residuales en el año 1889, una vez conocida esta aplicación se realizaron más estudios en esta temática, descubriendo así la electrólisis, este proceso fue descubierto en el año de 1904, el cual se empleó en la purificación de metales. En el año de 1909, se descubre lo que es la electrocoagulación usando electrodos de aluminio y hierro (Suárez Hidalgo, 2014).

En lo que respecta el medio ambiente, la electrocoagulación es uno de los procesos más utilizados para tratar aguas y lodos residuales mediante la aplicación de electrodos que proporcionan iones a estos (Suárez Hidalgo, 2014).

Si se utiliza electrodos de hierro o de aluminio, éstos se disuelven en el ánodo formando hidróxidos (formado por un metal y varios aniones hidroxilos) de estos metales, los cuales constituyen excelentes agentes coagulantes. Cabe recalcar que en los procesos de coagulación convencional, éstos agentes se añaden, se disuelven y se mezclan, mientras que en éste proyecto, la utilización de la electrocoagulación permite que los agentes coagulantes se produzcan insitu en el proceso.

La coagulación ocurre cuando estos cationes o sus hidróxidos se combinan con partículas coloidales que tienen carga negativa. El desplazamiento de éstas partículas

hacia el ánodo facilita el proceso de neutralización gracias a un movimiento electroforético (Pérez, 2000).

Por ende, los contaminantes presentes en las aguas (lodos) residuales son removidos gracias a las reacciones químicas que se generan en este proceso y a la adhesión física o química generada por el consumo de los electrodos. Más adelante se detalla que la remoción de éstos patógenos puede dar sea través de: flotación, sedimentación o filtración.

La producción de iones metálicos en los electrodos (caso del hierro) ocurre paralelamente a la hidrólisis del agua, donde se puede observar pequeñas burbujas de oxígeno en el ánodo y de hidrógenos en el cátodo, que se adhieren a los flóculos ya formados, permitiendo que éstos floten hacia la superficie (flotación natural en la electrocoagulación). Algunos de los contaminantes presentes en las aguas residuales también serán eliminados en el cátodo. La **Ilustración 3** presenta un esquema general del proceso de electrocoagulación.

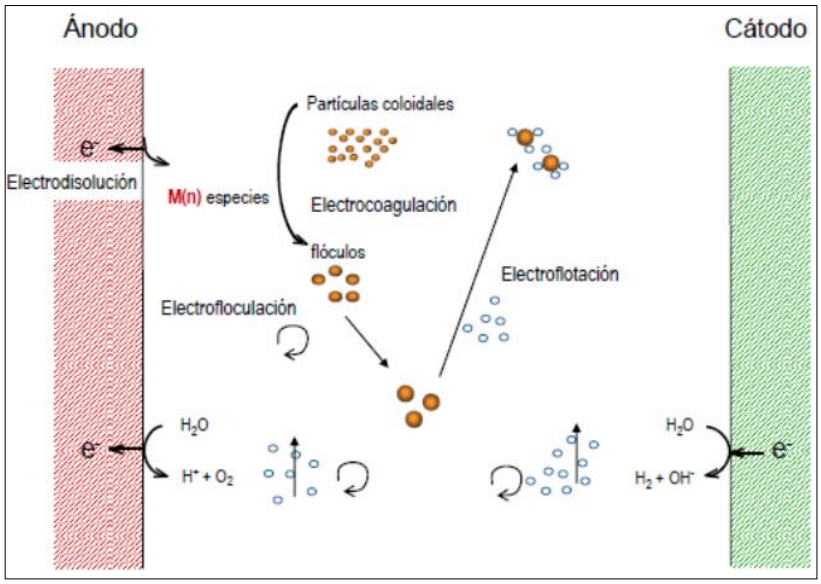


Ilustración 3 Esquema del Proceso de Electrocoagulación

Fuente: (Suárez Hidalgo, 2014)

Es importante señalar que: ya que se trata de un proceso electroquímico, la electrocoagulación se rige en la primer y segunda Ley de Faraday, útiles en la cuantificación de la energía y masa aportadas en éste proceso. En esta sección se detalla brevemente estas leyes para poder entender el efecto que tiene la densidad de la corriente aplicada en el proceso de electrocoagulación, así como el efecto del espaciamiento entre los electrodos, el pH, la conductividad y la temperatura.

1.6.2.5. Primera ley de Faraday

"La masa de un elemento liberada o depositada en un electrodo durante el proceso de la electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que pasa a través de la solución". Este concepto se lo explica a través de la ecuación

$$m \propto I \cdot t \tag{1.1}$$

$$m = Z \cdot I \cdot t \tag{1.2}$$

Donde:

- m, es la masa depositada o liberada del electrodo en [g].
- I, es la intensidad de la corriente en [Cs^{-1}].
- t, es el tiempo en [s].
- Z, es la constante de equivalencia electroquímica en [gC^{-1}], que se define como la cantidad de sustancia liberada o depositada cuando un culombio de carga eléctrica pasa a través de la solución electrolítica. Éste parámetro se explicará más detalladamente a través de la Segunda Ley de Faraday.

1.6.2.6. Segunda ley de Faraday

"Las masas de los diferentes elementos depositados o liberados es proporcional al peso equivalente cuando una misma cantidad de electricidad pasa por un electrolito".

El peso equivalente corresponde al peso molecular de una substancia dividido para el número de electrones que se requieren ya sea para oxidar o reducir cada unidad de substancia (Suárez Hidalgo, 2014). La constante de equivalencia electroquímica, Z, definida anteriormente representa el peso equivalente de la especie usada en la Primera Ley de Faraday.

1.6.2.7. Efecto de la densidad de corriente en la electrocloración

La densidad de corriente en el proceso de electrocoagulación constituye la única variable de operación que se puede manipular directamente, ya que como se verá más adelante, ésta se obtiene a partir de una fuente de alimentación disponible en los laboratorios de la universidad. Esta variable determina la generación de las burbujas y de la dosis coagulante, permitiendo una mezcla mayor dentro del reactor y una mejor transferencia de masa. Inyectar una mayor densidad de corriente no necesariamente significa que el reactor opera efectivamente. La corriente óptima para aplicar al proceso electroquímico debe equilibrar con otras variables como: los costes de operación, la disponibilidad de fuentes de alimentación, entre otras.

1.6.2.8. Efecto del espaciamiento entre electrodos en la electrocloración

Mientras mayor sea la distancia que separe a los electrodos, mayor será la resistencia al paso de corriente, ya que la resistencia eléctrica es proporcional al espaciamiento entre electrodos.

Estudios realizados señalan que una buena remoción de patógenos se logra en un rango entre 5 mm a 3 cm. Sin embargo, la distancia óptima dependerá de los elementos que se quiera remover, así como de sus concentraciones en los lodos residuales. Más adelante se detalla que para éste proyecto, se utilizará distancias de 5 y 6 cm.

1.6.2.9. Efecto del pH en la electrocloración

El pH constituye un elemento clave para la electrocloración, ya que éste no solo afecta directamente a la conductividad, sino también a la facilidad que pueda presentar el electrodo para disolverse y determinar el potencial Z de las partículas coloidales.

1.6.2.10. Efecto de la conductividad en la electrocloración

Mientras menor sea la conductividad del lodo residual, la corriente inyectada por la fuente de alimentación será menor, por lo que se necesitará aplicar una mayor tensión de entrada (voltaje), aumentando paralelamente el costo del tratamiento. Estudios han demostrado que la aplicación de NaCl, aumenta la eficiencia en la desinfección de aguas residuales, ya que ésta incrementa la conductividad y, los iones Cl^- contribuyen a la desinfección del agua.

1.6.2.11. Activación electroquímica de soluciones acuosas

Dentro del proceso de activación electroquímica, la solución de agua (contenida en el lodo residual) y el NaCl se separan en dos flujos. La corriente eléctrica proveniente de la fuente de alimentación de CC entre los dos polos actúa a través de la solución acuosa. Del tratamiento aplicado en la cámara del ánodo se obtiene la fracción anódica, la cual actúa como un oxidante efectivo en mínimas concentraciones, operando en la desinfección microbiológica (Vinogradov, Cuevas, & Vinogradov, 2011).

Por otro lado, la fracción catódica posee propiedades reductoras, ya que varían la velocidad de una reacción química sin modificar el producto que se obtiene al final, actuando como un catalizador.

La concentración de los compuestos de la fracción anódica (oxígeno y cloro) dependen de la concentración de NaCl y de la intensidad de la corriente eléctrica inyectada por la fuente (Vinogradov et al., 2011).

El campo eléctrico obtenido por la fuente de alimentación entre electrodos es mucho mayor que la energía resultante de los enlaces del Hidrogeno del Agua, esto con referencia a nivel molecular, lo que produce que exista la atracción de sus elementos hacia el polo opuesto.

El NaCl, que como se definió anteriormente actúa como un electrolito también rompe sus enlaces y se disocia en iones Na^+ y Cl^-. Los iones Na^+ y H^+ se concentran en el polo negativo, mientras que los iones O^- y Cl^-, en el polo positivo (Vinogradov et al., 2011). Esto se observa en la **Ilustración 4**.

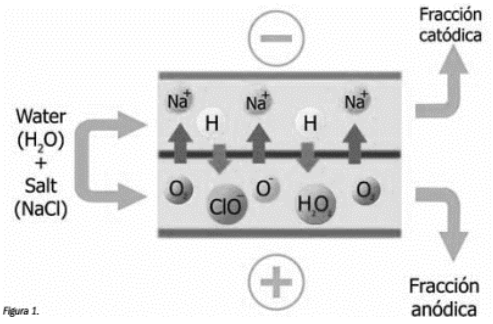


Ilustración 4 Alineación de los iones de la solución en los electrodos

Fuente: (Vinogradov et al., 2011)

En la ilustración anterior, la fracción catódica contiene compuestos de hidrógeno y sodio, mientras que la fracción anódica contiene oxígeno y el cloro. Esta solución degrada las proteínas de las células y es capaz de eliminar bacterias como la *E. coli* que es el principal motivo de este proyecto. La fracción anódica elimina estos microorganismos mediante el ataque de las moléculas de oxígeno y cloro sobre la superficie de éstos. Los iones libres desnaturalizan las proteínas atacando a sus membranas celulares. En segundo lugar ya que la concentración de iones en la solución

es mayor en comparación con la del citoplasma de estos microorganismos, se provoca una ruptura en su membrana exterior lo que conduce a su muerte celular (Vinogradov et al., 2011).

1.6.2.12. Componentes del proceso electroquímico

1.6.2.12.1. Celdas (cubas) electroquímicas

Existen dos tipos de celdas electroquímicas: las celdas galvánicas o voltaicas, en la que ocurren reacciones espontáneas, y las celdas electrolíticas, donde se generan reacciones no espontáneas. Ambos tipos de celdas contienen electrodos donde la oxidación y la reducción ocurren. La oxidación ocurre en el electrodo llamado ánodo y la reducción en el electrodo llamado cátodo (Cerón & Soto–Bubert, 2004).

En una celda electrolítica, el electrodo cargado negativamente se denomina cátodo, y el cargado positivamente se denomina ánodo (Isajoc, 2011). Cada electrodo atrae a los iones de carga opuesta. Los iones positivos (o cationes) son atraídos al cátodo, donde se reducen, creando lo que se conoce como corriente catódica, mientras que los iones negativos (o aniones) se desplazan hacia el ánodo, donde se oxidan, creando lo que se conoce como corriente anódica.

La energía necesaria para movilizar los iones e incrementar su concentración en los electrodos, proviene de una fuente eléctrica que mantiene la diferencia de potencial entre los electrodos (constante) (Gil, 2006). La **Ilustración 5** muestra el comportamiento de los iones cuando se aplicación una tensión entre los electrodo.

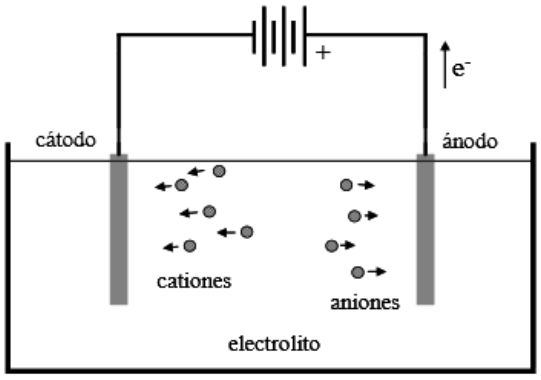


Ilustración 5 Movimiento de iones en la celda electrolítica

Fuente: (Gil, 2006)

Por otra parte, el ánodo de una celda galvánica está cargado negativamente, dado que la oxidación espontánea del ánodo es la fuente de electrones o carga negativa. El cátodo de la celda galvánica es el terminal positivo. Estas dos medias celdas conectadas a través de un puente de sal como se indica en la **Ilustración 6**, forma un gel de una solución acuosa salina concentrada, que permite el flujo de iones y que completa el circuito eléctrico (Gil, 2006).

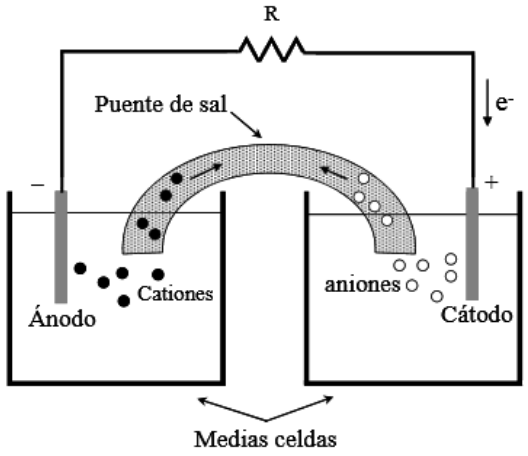


Ilustración 6 Movimiento de iones en celda galvánica

Fuente: (Gil, 2006)

1.6.2.12.2. Electrodos

El electrodo es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito donde ocurren reacciones de óxido-reducción (Cerón &

Soto–Bubert, 2004). Las características como el tipo de material electródico, la geometría y su disposición en el suelo es de suma importancia en el proceso de remediación electrocinética (López-Vizcaíno López, 2013), (Ruiz & Giraldo, 2012). Los materiales utilizados son metales nobles como platino, plata y oro, ya que son materiales inertes e impiden la generación de iones que alteren los resultados (Chen, Chen, & Yue, 2000). Sin embargo, debido a sus altos costos comerciales, estos son reemplazados por materiales como acero, titanio y grafito (Virkutyte y col. 2002).

La geometría de los electrodos puede ser cilíndrica o en forma de plancha y su disposición en el lodo a tratar puede ser en hileras de electrodos enfrentados y sistemas de ánodos rodeando a un cátodo o viceversa (López-Vizcaíno López, 2013). Dependiendo del material del electrodo se obtienen las reacciones de oxidación y reducción respectivas. Los materiales empleados en la electrocoagulación son usualmente Al o Fe por la formación de hidróxidos metálicos que forman los núcleos de las partículas coloidales (Chen, 2004). La **Ilustración 7** muestra una imagen resumida de lo mencionado anteriormente.

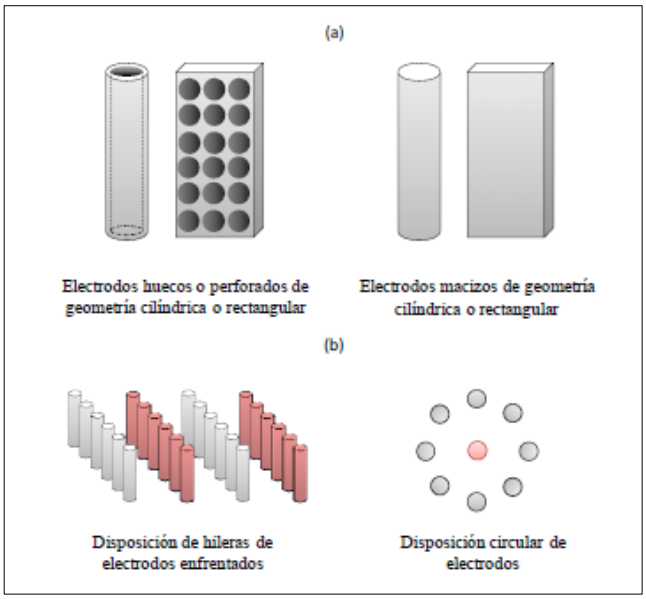


Ilustración 7 Tipos, geometría y disposición de electrodos

Fuente: (López-Vizcaíno López, 2013)

En el presente proyecto, se utilizó electrodos tanto de hierro (tipo metálico) como de grafito (no metálico). El primero de ellos presenta la forma de una plancha cuyas dimensiones se detallan más adelante, mientras que el segundo de ellos, se dispuso en forma de hileras de electrodos enfrentados**.** Se optó por estos electrodos debido a su disponibilidad, bajo costo y excelentes conductores de energía dentro de los procesos electroquímicos.

1.6.2.12.3. Electrolito

Anteriormente ya se mencionó la utilización de un electrolito el cuya aplicación índice en la optimización de las condiciones de conducción del campo eléctrico generado por los electrodos al aplicar una tensión de entrada en ellos (DE LA ROSA-PÉREZ et al., 2007). Se define como una sustancia capaz de descomponerse por acción de la corriente eléctrica, y que conduce corriente eléctrica. El electrolito siempre va dentro de la celda electrolítica. La **Ilustración 8** muestra una solución electrolítica embebida en una cuba (celda) de vidrio.

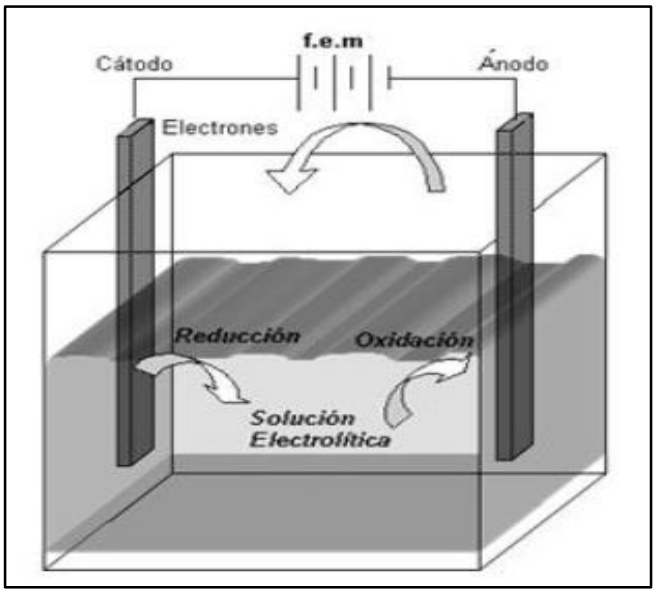


Ilustración 8 Solución Electrolítica en Cuba de Vidrio

Fuente: (Maldonado Rogel & Molina Ayala, 2011)

1.6.2.12.4. FUENTE DE ENERGÍA:

En los procesos electrolíticos se utilizan generadores/fuentes de corriente continua, baterías o pilas conectadas en serie. En este caso, se utilizará una fuente de tensión continua, es decir, la corriente entregada a la carga es constante.

La **Ilustración 9** muestra un esquema general del proceso electroquímico que se utilizará en este proyecto.

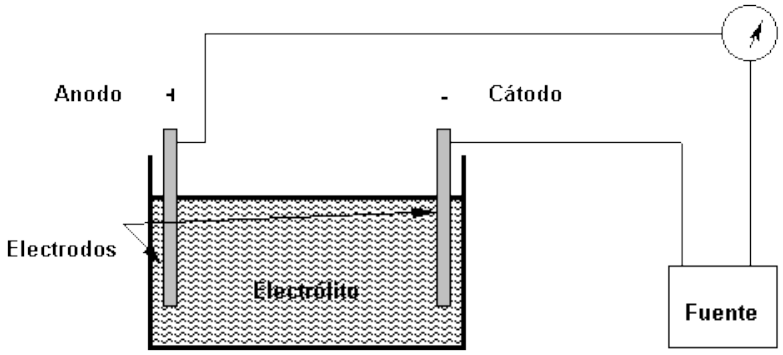


Ilustración 9 Batería o fuente de alimentación a la cuba

Fuente: (Monografias.com, s. f.)

Se la conoce también como fuente de poder, un dispositivo que se encarga de transformar la corriente alterna en corriente continua. La fuente de poder puede suministrar distintas cantidades de corriente dependiendo de la configuración interna del dispositivo. Consta de un rectificador, fusibles y otros componentes que le permiten recibir la electricidad, regular, filtrarla y adaptarlas a las necesidades del aparato electrónico al que va estar conectado (Maldonado Rogel & Molina Ayala, 2011).

1.6.2.13. Parámetros físico-químicos que influyen en el proceso electroquímico

La velocidad de descontaminación mediante procesos electrocinéticos depende fundamentalmente de la naturaleza, concentración y uniformidad en la distribución de

los contaminantes en el suelo, así como de la velocidad de trasporte de un contaminante hacia los electrodos y de los posibles efectos sinérgicos debido a la combinación de tratamientos para la eliminación de un contaminante especifico (López-Vizcaíno López, 2013).

Además existen otros parámetros físico-químicos como:

1.6.2.13.1. pH

El pH dentro de los tratamientos electroquímicos, promueve reacciones de los metales con otras sustancias que se encuentran en el suelo de forma natural, regulando de esta manera la movilidad de los contaminantes (DE LA ROSA-PÉREZ et al., 2007). El pH determina el grado de adsorción de iones en las partículas del suelo, afectando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo. La solubilidad de muchos contaminantes inorgánicos cambia en función del pH y normalmente su movilidad disminuye con altos valores del mismos (Reyes & Vazquez, 2009). El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante los procesos electroquímicos, y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del lodo a tratar. El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, mientras que en aguas residuales alcalinas, el pH puede decrecer (Aguilar, 2015), (DE LA ROSA-PÉREZ et al., 2007), (Mosquera, 2014).

1.6.2.13.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad de un medio para permitir el paso de la corriente eléctrica, y a su vez difiere por cada tipo de lodo (DE LA ROSA-PÉREZ et al., 2007). Valores altos de conductividad disminuyen la resistencia eléctrica del sistema favoreciendo el fenómeno de electrólisis en los electrodos (López-Vizcaíno López, 2013).

Cuando la conductividad del lodo a tratar no es elevada, es frecuente la adición de un electrolito como soporte para aumentar su valor (conductividad eléctrica), consiguiéndose así una disminución en el potencial de la celda y por tanto, un ahorro energético considerable. Una de las sales más empleadas para este fin es el ***cloruro sódico o llamado también Cloruro Sodio (ClNa)***, ya que se ha determinado que los iones cloruro pueden contrarrestar los efectos negativos de aniones como el HCO3 y el SO4 (Chen, 2004). Este compuesto es el que se agregará en la cuba de vidrio en adición al lodo, para aumentar la conductividad eléctrica de éste y provocar la mayor remoción posible de los coliformes totales y fecales.

1.6.2.13.3. Humedad

La humedad es un factor indispensable dentro del proceso electrocinético, ya que este promueve el movimiento de la carga contaminante hacia uno de los electrodos (DE LA ROSA-PÉREZ et al., 2007). El contenido bajo de humedad podría generar sequedad del suelo debido al incremento de la temperatura o a la generación de reacciones químicas exotérmicas (Shapiro y Probstein 1993).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Procesos realizados sobre la muestra inicial

2.1.1. Recolección

En primer lugar, se recolectó 25 kilos de lodo residual almacenado en el silo de la planta de deshidratación de lodos de la PTAR UCUBAMBA en un contenedor de polietileno con una capacidad de 5 galones. La muestra fue colocada en el recipiente de forma manual con la ayuda de una pala, y una vez pesada, fue tapada y sellada.

2.1.2. Almacenamiento y mantenimiento

Posteriormente la muestra fue trasladada a los laboratorios Ciencias de la Vida de la Universidad Politécnica Salesiana, almacenándola a una temperatura de 4° C según la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT- 2002, para evitar posibles cambios en la concentración de los patógenos.

2.1.3. Determinación de parámetros físico-químicos

Para determinar las condiciones iniciales del lodo residual, se tomó una muestra de 20 gr para determinar sus parámetros físico-químicos y microbiológicos, tales como:

conductividad eléctrica, pH, humedad y el número de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)*. El procedimiento aplicado para la determinación de estos parámetros se muestra a continuación.

- **Conductividad Eléctrica:** para la determinación de este parámetro se utilizó el "**Protocolo de Métodos de Análisis para Suelos y Lodos**" (Zagal & Sadzawka, 2007) (Ver **ANEXO I**). El equipo utilizado para su medición fue: el **pH-METRO** de marca de $SevenMulti^{MT}$.
- **pH:** para la determinación de este parámetro se utilizó el mismo protocolo empleado para el caso de la conductividad eléctrica al igual que **el pH-METRO** mencionado anteriormente (Ver **ANEXO II**).
- **Humedad:** éste parámetro se determinó a través de un equipo **Analizador de Humedad** de la marca Mettler Toledo, análisis elaborado en base a los criterios de uso del equipo (Ver **ANEXO III**).

Los parámetros obtenidos sobre la muestra inicial se detallan en la **Tabla 2-1.**

Tabla 2-1 Parámetros Iniciales del Lodo Residual

Parámetros	Inicial	Unidades
Ph	6	-
Humedad relativa Parámetros Iniciales del Lodo Residual	68	(%)
Conductividad eléctrica (mS/cm)	10	(mS/cm)
Peso por cuba (gr)	566.62	(gr)
Temperatura	25	(°C)

Fuente: Autora

Cabe recalcar, que el número de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) de las muestras iniciales previo a la aplicación del tratamiento electroquímico, varían unas respecto a otras. En algunos casos los Coliformes Totales tomaban valores de 3000 y

4000 (UFC/g), mientras que los Coliformes Fecales variaban entre 4000 y 5000 (UFC/g), debido a que las muestras se tomaron de diferentes lodos.

2.2. Acondicionamiento de la muestra previo al proceso electroquímico

Previo al acondicionamiento de la muestra se procedió a

El estudio de tratamientos electroquímicos aplicados en aguas residuales son abundantes, sin embargo son escasos los existentes en lodos residuales, razón por la cual se procedió a realizar un análisis y revisión de bibliografías en libros, artículos científicos, documentos de sitios web, entre otros.

A continuación se mencionan ciertos estudios relacionados con la temática, los cuales fueron la base fundamental para establecer los parámetros óptimos para el acondicionamiento de la muestra:

Para el caso del ***parámetro humedad:***

Se encontró que lodos residuales con una humedad media del 70% pueden ser utilizados directamente en la agricultura siempre y cuando cumpla con los demás parámetros que exigen diferentes normativas (mexicana, colombiana, EPA) como: la concentración de metales pesados, organismos patógenos, materia orgánica, entre otros.

De igual manera el aprovechamiento de biosólidos en la agricultura tiene que cumplir con una humedad de hasta el 85% de acuerdo a la Norma Mexicana, para posteriormente categorizarlo.

Según Trejos & Agudelo, en su estudio aplican compostaje utilizando lodos residuales provenientes una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, en el que evaluaron condiciones físicas, químicas y microbiológicas, destacándose la humedad

ya que trabajando con este parámetro a un 70% se logró una remoción del 100% de Coliformes Fecales, resultando el compostaje como una de las alternativas para la remoción de patógenos en este tipo de residuos (Trejos Vélez & Agudelo Cardona, 2012).

Jiménez, Barrios y Maya en el año de 1999 evaluaron cal viva e hidratada en lodos de tratamiento primario avanzado provenientes de una PTAR, previamente deshidratados con una humedad que variaba entre un rango del 71%– 86%, con pH superior a 12 unidades, removiendo entre el 98 a 99% de Coliformes Fecales generando biosólidos de Tipo B (B. Jiménez, Barrios, & Maya, 1999).

El lodo obtenido de una PTAR, fue usado en el estudio publicado por Armenta, al cual se le aplicó un proceso aerobio-termofílico, para ser utilizado en compostaje. El lodo fue mezclado con pasto, viruta de madera y cáscara de coco, en el cual se mantuvo parámetros de: temperatura, materia orgánica entre otros y se le aplicó una humedad que variaba entre el 70-80% al final de la etapa termofílica, logrando así una remoción del 99.8% de Coliformes Fecales (Armenta, Camperos, Vigueros, Mijaylova, & Nacheva, 2007).

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación, dado que se aplicó la solución NaCl al 12% para aumentar la conductividad eléctrica de los lodos (como se detalla más adelante), trajo consigo un aumento de la humedad en un valor alrededor del 2%, hecho que no repercute al lodo deshidratado proveniente de la PTAR Ucubamba, cuyo valor inicial es del 68% de humedad.

Para el caso del ***parámetro pH***:

Se ha manifestado que: para no afectar negativamente al sistema biológico al crecimiento de las plantas y a la propia estructura del suelo, el pH del lodo a usar en

suelos con fines agrícolas debe ser cercano a la neutralidad ($pH = 7.0$) y que la conductividad eléctrica no debe ser demasiado elevada (Juárez, Sánchez-Andreu, & Mataix, 1987).

Además se menciona que someter a lodos residuales procedentes de depuradoras a diferentes tratamientos como el compostaje, garantiza un producto con pH entre 6,5 y 8,0; y cuyas ventajas son: favorecer al crecimiento de las plantas, reducir la movilidad de metales pesados (EPA, 1999) y el uso benéfico como acondicionador de suelos (KUTER et al., 1995).

En el estudio "Digestión anaerobia de lodos residuales usando un reactor de manto de lodos no convencional (Tipo UASB)", publicado por Cabeza en el año 2008, se obtiene que el digestor mostró estabilidad con valores promedio de pH de 6.95 En relación con la norma para biosólidos NOM-004-SE MARNAT-2002, los parámetros de Coliformes Fecales (1.45 E4 NMP/gST) y Salmonella (57 NMP/gST)) cumplen con los biosólidos clase C (Cabeza, 2008).

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación, la aplicación de procesos electroquímicos provocó que el pH de lodo tratado aumente de 6 a 7.5 unidades. En éste proceso se garantizó un valor pH cercano al neutro, con la finalidad de que sea apto para reutilizarlo en aplicaciones agrícolas.

Para el caso del ***parámetro conductividad eléctrica:***

Según el estudio de Paredes, Lascano, y Tapia, en el año 2009, se afirma que la conductividad es proporcional a la densidad de corriente ya que con el aumento de la conductividad eléctrica, incrementa la densidad de corriente, factor que se considera como el que más influye en la remoción de contaminantes presentes en el agua residual. La adición de algunos electrolitos como el cloruro de sodio, produce un

aumento en la conductividad del agua residual (Paredes Sánchez, Lascano Morante, & Tapia Sánchez, 2009).

En el estudio publicado en el 2002, por Vera, Ortiz, et al, aplican el lombricompostaje a lodos residuales que tienen una conductividad de 1,32 ms/cm, logrando una remoción del 100% de Coliformes fecales y una conductividad de 4,25 ms/cm con el tratamiento tercero el cual poseía una mezcla lodo residual más compostaje y lombrices y el cuarto tratamiento aplicaba lodo residual con materia vegetal fresca y lombrices. (Vera-Reza et al., 2006).

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación, se procedió a aumentar la conductividad eléctrica de las muestras sin alejarse del valor inicial del lodo residual obtenido de la PTAR Ucubamba. Para ello se recurrió a la aplicación de una solución de Cloruro de Sodio (NaCl) al 12%. Bajo este proceso, se logró un aumento de 10 (ms/cm) a 12.8 (ms/cm), cuya diferencia, al igual que el caso de la humedad, se mantiene cercana a los valores iniciales. Es importante señalar que la conductividad se encuentra en función de las sales disueltas, razón por la cual se trata de que la disolución de sales en los lodos no genere problemas en los procesos de depuración. Además la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad.

Una vez analizados estos estudios, se procedió a acondicionar la muestra con Cloruro de Sodio (NaCl) como un electrolito que permita aumentar (mejorar) la conductividad eléctrica del lodo residual. Este tipo de solución se realizó al 12%; es decir, 12 gr de sal (casera) diluidos en 100 ml de agua destilada. Una vez

homogenizado el lodo con la solución de NaCl, se procedió a trabajar con las siguientes condiciones:

Tabla 2-2 Condiciones óptimas del lodo

Parámetros	Valores	Unidad
Ph	7,5	-
Humedad relativa	70,53	(%)
Conductividad eléctrica	12,8	(mS/cm)

Fuente: Autora

2.3. Construcción de celdas electrolíticas para los procesos electroquímicos

En primer lugar, se procedió a la construcción de las cubas de vidrio para depositar tanto el lodo residual homogenizado con la solución de NaCl y los electrodos (ánodo y cátodo) de hierro o grafito, según sea el caso. Para el presente proyecto se construyó 3 cubas de vidrio cuadradas de 12 cm tanto para la longitud de su base, altura y profundidad, cada una de ellas con una capacidad disponible de hasta 1728 cm^3. En éstas se colocaron soportes de balsa de 11.5 cm de largo, 3 cm de ancho y 3.5 mm de espesor (**Ver Ilustración 10 e Ilustración 11**), para estabilizar a los electrodos que estarán separados a distancias de 5, 5.5 y 6cm. Se escogió específicamente balsa, ya que este tipo de material no presenta conductividad térmica ni eléctrica.

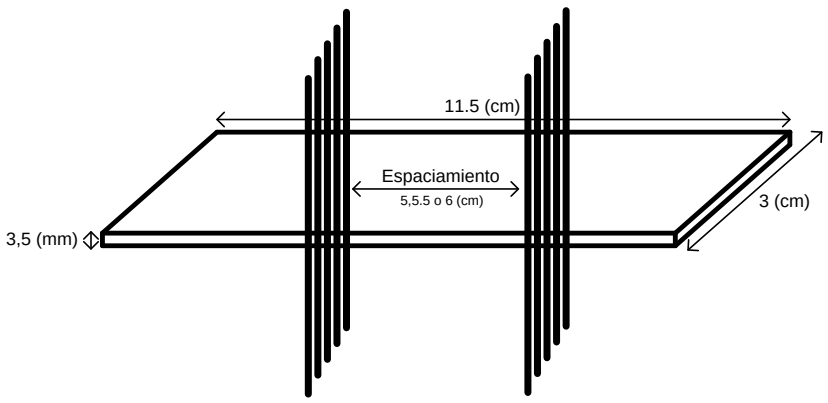


Ilustración 10 Disposición de los Electrodos de Grafito sobre la Balsa

Fuente: Autora

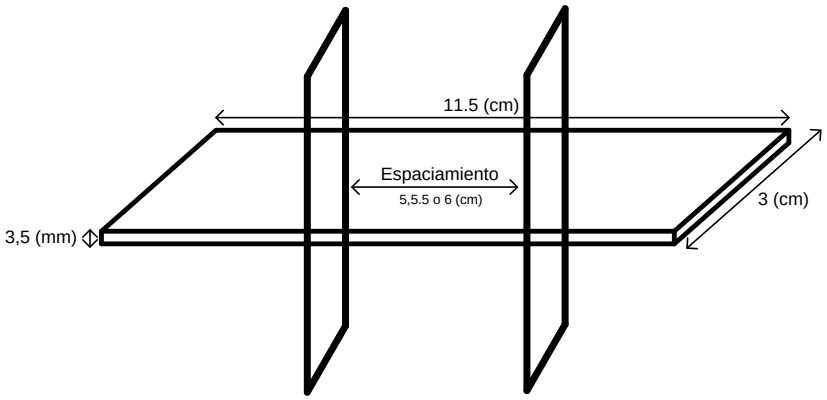


Ilustración 11 Disposición de los Electrodos de Hierro sobre la Balsa

Fuente: Autora

En segundo lugar, se escogió al grafito y al hierro como electrodos. El grafito comercial adquirido cuenta con las siguientes características: es una mina cilíndrica cuyas dimensiones son: 7cm de alto y 2 mm de diámetro. Se procedió a la unión de 5 minas de grafito colocadas en serie como se muestra en la **Ilustración 10,** facilitando su introducción en la muestra homogenizada y para distribuir la corriente entregada por la fuente de alimentación en C.C. sobre cada uno de estos.

De igual manera se utilizó electrodos de hierro en forma de piezas rectangulares, cuyas dimensiones son: 9 cm de largo, 7.5 cm de ancho y 4mm de espesor, tal y como se observa en la **Ilustración 11.** Estos electrodos se colocaron verticalmente dentro de la cuba de vidrio, colocando las dos placas rectangulares sobre la balsa a distancias de igual manera de 5, 5.5 y 6 cm.

Haciendo uso de las hojas técnicas de los electrodos utilizados, se puede determinar las características físicas como químicas del hierro y grafito. La lámina de hierro adquirida comercialmente presenta la composición química enmarcada con rojo la misma que se muestra en la **Tabla 2-3.**

Tabla 2-3 Composición química de los hierros comerciales

Composición química de los hierros comerciales				
Elemento	Hierro Gris (%)	Hierro Blanco (%)	Hierro Maleable (Blanco Fundido) (%)	Hierro Dúctil (%)
Carbono	2.5 - 4.0	1.8 - 3.6	2.00 - 2.60	3.0 - 4.0
Silicio	1.0 - 3.0	0.6 - 1.9	1.10 - 1.60	1.8 - 2.8
Manganeso	0.25 - 1.0	0.25 - 0.80	0.20 - 1.00	0.10 - 1.0
Azufre	0.02 - 0.25	0.06 - 0.20	0.04 - 0.18	0.03 máx
Fósforo	0.06 - 1.0	0.06 - 0.18	0.18 máx	0.10 máx

Fuente: (Alva, 2014)

Por otro lado, las minas de grafito adquiridas comercialmente presentan las siguientes carácteristicas químicas que se muestran enmarcadas en rojo en la **Tabla 2-4**.

Tabla 2-4 Componente y unidades del grafito Escamoso, Veta y Amorfo

Componente	Unidad	Escamoso	Veta	Amorfo
Carbono	%	90.0	96.7	81.0
Azufre	%	0.1	0.7	0.10
Densidad	g/cm^3	2.29	2.26	2.31
Contenido de grafito	%	99.9	100.0	28.00
Densidad de cenizas	g/cm^3	2.91	2.89	2.68
Resistencia	ohm-cm	0.031	0.029	0.021

Fuente: (Merino del Amo, 2010)

En tercer lugar, para el desarrollo del proyecto se dispuso de una **fuente de alimentación** que cuenta con un display digital para la lectura de la corriente y voltaje que entrega, y cuyo tamaño es de 291*158*136 mm. Dicha fuente de alimentación tiene un peso de aproximadamente 4 kilos. La tensión de entrada es de 110/220 Vrms (alterna), y otorga tensiones de salida continua en un rango entre 0-30 V.

La **Ilustración 12** muestra los prototipos construidos para someter a las diferentes muestras de lodos a los procesos electroquímicos. En esta ilustración se detalla en rojo a las celdas electrolíticas compuestas por el par de electrodos de grafito, una muestra de 567 gr de lodos residual mezclada con una solución de NaCl al 12% (12 gr de sal diluidos en 100ml de agua destilada) y su respectiva tensión de entrada proporcionada por la fuente de alimentación. Cabe recalcar que el proceso electroquímico se somete

a una tensión continua que oscila entre los 12-15 V y una corriente entre los 1,8 y los 3 A. La **Ilustración 13**, posee los mismos componentes mencionados anteriormente con la única diferencia de que sus electrodos están compuestos por hierro.

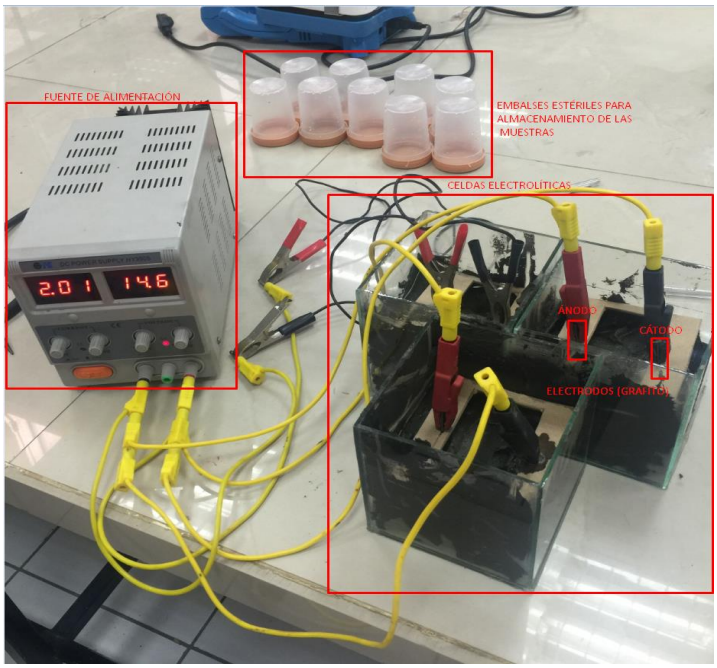


Ilustración 12.- Celdas Electrolíticas con Electrodos de Grafito

Fuente: Autora

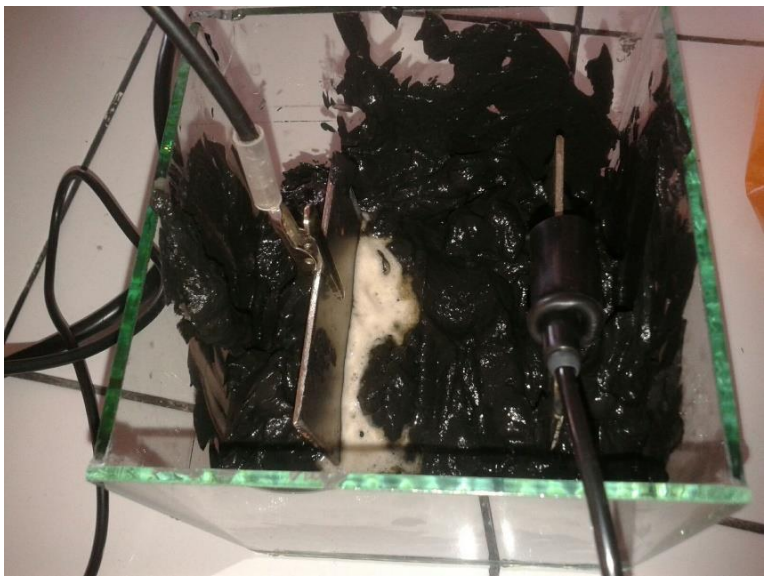


Ilustración 13 Celda Electrolítica con Electrodos de Hierro (Placas Rectangulares)

Fuente: Autora

2.4. Diseño experimental

Para alcanzar con los objetivos planteados en este proyecto de investigación, que como ya se mencionó anteriormente consiste en aplicar tratamientos electroquímicos para la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*), primero se estableció las variables de entrada (variables independientes) y de salida (variables dependientes) del proceso, las mismas que se encuentran resumidas en la **Ilustración 14.**

Una variable se define como el resultado de una fuerza o es una fuerza que causa un cambio en otra variable. Una variable independiente es aquella que tiene la capacidad de influir, incidir o afectar a otras variables del proceso y no depende de otros factores para estar presente en esa realidad en estudio. Por el contrario, una variable dependiente es aquella que se está investigando.

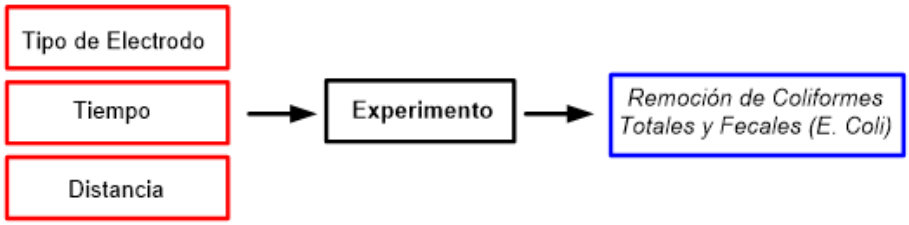


Ilustración 14 Variables de Entrada y de Salida del Diseño Experimental

Fuente: Autora

La variable estudiada: tipo de electrodo, tiempo y distancia enmarcadas con rojo constituyen las variables de entrada del diseño experimental, mientras que la variable enmarcada con azul constituye la variable de salida. Para los procesos aplicados como se mostrará más adelante, las unidades pertenecientes a cada una de ellos son:

Tabla 2-5 Unidades de las Variables del Diseño Experimental

	Variables	Unidad
Entrada	Tipo de Electrodo	-
	Tiempo	(min)
	Distancia	(cm)
Salida	Remoción de C.T. y C.F. (*E. coli*)	(%)

Fuente: Autora

Durante un experimento, al conjunto de variables de entrada se las conoce como "factores", los mismos que se utilizan para determinar su efecto sobre la variable de respuesta (variable de salida). Los factores solo pueden tener un número limitado de posibles valores, conocidos como "niveles". Por lo tanto, los factores dentro de este proyecto de investigación serán: *Tipo de Electrodo, Distancia* y *Tiempo.* Se utilizó dos tipos de electrodos para el proceso electroquímico: hierro y grafito, cuyas características se mostraron anteriormente. Las pruebas experimentales se realizaron en tiempos que varían entre los 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 120 min y distancias de 5, 5.5 y 6 cm.

2.4.1. Eficiencia del electrodo de hierro y grafito para la remoción de coliformes totales y fecales (*E. coli)*

En este proceso de investigación para determinar la eficiencia del electrodo de Hierro y Grafito para la remoción de coliformes totales y fecales (*E. coli),* se consideró la aplicación de dos análisis: El primero de ellos fue determinar si los tratamientos aplicados con ambos tipos de electrodos diferían uno del otro en los procesos electroquímicos. En el caso de que ésta condición se cumpliera, se analizaría qué *Tipo de Electrodo* proporciona un mejor resultado en la remoción de los microorganismos patógenos estudiados a través de la aplicación de la Prueba de Tukey. Las variables de entrada y salida con sus respectivos niveles se muestran en la ***Tabla 2-6.***

Tabla 2-6 Variables de Entrada y Salida del Diseño

	Factores	**Niveles**	
Entrada	Tiempo (min)	90	
	Distancia (cm)	5	
	Tipo de Electrodo	Hierro	Grafito
Salida	Remoción de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)*		

Fuente: Autora

Para determinar estadísticamente si el *Tipo de Electrodo Grafito* permite una mayor remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*), se utilizó la prueba de Tukey. Ésta es una de las pruebas existentes para poder encontrar diferencias estadísticas significativas entre medias de tratamientos bajo condiciones controladas o cuando éstas son homogéneas (uniformes). La conductividad eléctrica, el pH y el nivel de humedad son variables controladas. Todas las repeticiones que se plantearon en esta investigación se realizaron bajo las mismas condiciones.

En este caso, el Tratamiento 1 corresponde a la aplicación de Electrodos de Hierro, mientras que al Tratamiento 2 están asociados los Electrodos de Grafito. Cada uno de los tratamientos fueron sometidos al proceso electroquímico por un *tiempo de 90min* y una *distancia de 5cm*, cuyos resultados se muestran en las columnas I, II, III y IV, que no son más que la representación del número de Coliformes Totales (Ver ***Tabla 2-7***) y Fecales (*E. coli*) (Ver ***Tabla 2-8*)**.

Tabla 2-7 Tratamientos y Repeticiones para Coliformes Totales

TRATAMIENTOS	REPETICIONES			
	I	II	III	IV
1	1000	0	1000	1000
2	0	0	0	0

Fuente: Autora

Tabla 2-8 Tratamientos y Repeticiones para Coliformes Fecales (E. coli)

TRATAMIENTOS	REPETICIONES			
	I	II	III	IV
1	2000	2000	1000	1000
2	0	0	0	0

Fuente: Autora

*NOTA: Los resultados tanto para Coliformes Totales y Fecales (*E.Coli*) están en (UFC/g)

Para la aplicación de la Prueba de Tukey se empleó la Herramienta Minitab en su versión 16.0, programa diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas. En ésta, se utiliza el Porcentaje de Remoción de Coliformes Totales y

Fecales (*E. coli*) con respecto a la muestra inicial (**Mo**) que fue de (4000 UFC/g). El resumen de los datos ingresados en Minitab se muestra en la ***Tabla 2-9*** y ***Tabla 2-10.***

Tabla 2-9 Conjunto de Datos (Coliformes Totales) utilizados para la Prueba de Tukey

	Tratamiento	Coliformes Totales (UFC/g)	% Remoción
HIERRO	1	1000	75
	1	0	100
	1	1000	75
	1	1000	75
GRAFITO	2	0	100
	2	0	100
	2	0	100
	2	0	100
	Mo	4000	(UFC/g)
	Tiempo	90	(min)
	Distancia	5	(cm)

Fuente: Autora

Tabla 2-10 Conjunto de Datos (C. Fecales: E. coli) utilizados para la Prueba de Tukey

	Tratamiento	Coliformes Fecales (*E. coli*) (UFC/g)	% Remoción
HIERRO	1	2000	50
	1	2000	50
	1	1000	75
	1	1000	75
GRAFITO	2	0	100
	2	0	100
	2	0	100
	2	0	100
	Mo	4000	(UFC/g)
	Tiempo	90	(min)
	Distancia	5	(cm)

Fuente: Autora

La hipótesis planteada para el conjunto de datos mostrados anteriormente es la siguiente: ¿Los tratamientos con Electrodos de Grafito difieren de los tratamientos con Electrodos de Hierro?

Entonces:

- **La Hipótesis Nula (Ho)** es: Los tratamiento con Electrodos de Grafito no difieren de los tratamientos con Electrodos de Hierro.
- **La Hipótesis Alternativa (H_1)** es: Los tratamiento con Electrodos de Grafito difieren de los tratamientos con Electrodos de Hierro.

El segundo modelo aplicado para el cumplimiento de objetivo, es analizar qué *Tipo de Electrodo* es más eficiente en la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) en el menor tiempo posible a través de un análisis gráfico del comportamiento que presentan los Electrodos de Hierro y Grafito a lo largo del tiempo. Para ello se realizaron corridas en intervalos de tiempo de 10 min (10-90 min), a distancias de 5, 5.5 y 6 cm aplicado para los Electrodos de Hierro y Grafito. Las variables de entrada y salida para este diseño gráfico se muestran a continuación:

Tabla 2-11 Variables de Entrada y de Salida para el Análisis de la Eficiencia de los Electrodos (Hierro y Grafito)

	Factores	**Niveles**		
Entrada	Tiempo (min)	10		
		20		
		30		
		40		
		50		
		60		
		70		
		80		
		90		
	Distancia (cm)	5	5.5	6
	Tipo de Electrodo	Hierro	Grafito	
Salida	Remoción de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)*			

Fuente. Autora

Los datos que se utilizaron para determinar qué tipo de electrodo es más eficiente fueron tomados en base al porcentaje de Remoción de Coliformes totales y fecales (*E. coli*) (E.C.) obtenidos después de que las muestras fueron sometidas a procesos electroquímicos a distancias que variaban entre valores de 5, 5.5 y 6 cm cada 10 min

hasta alcanzar los 90 min (tiempo aproximado en el que la Remoción varía entre el 50 y 100%) y utilizando tanto Electrodos de Hierro como de Grafito.

Tabla 2-12 Determinación de Coliformes Totales con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g

Muestra	Tiempo (min)	Distancia (cm)	GRAFITO		HIERRO	
			Coliformes Totales (UFC/ml)	% Remoción C.T.	Coliformes Totales (UFC/g)	% Remoción C.T.
1	10	5	4000	0,00	4000	0,00
2	20	5	4000	0,00	4000	0,00
3	30	5	3000	25,00	4000	0,00
4	40	5	2000	50,00	3000	25,00
5	50	5	1000	75,00	3000	25,00
6	60	5	0	100,00	2000	50,00
7	70	5	0	100,00	2000	50,00
8	80	5	0	100,00	2000	50,00
9	90	5	0	100,00	1000	75,00
Muestra inicial: 4000 (UFC/g)						

Fuente: Autora

Tabla 2-13 Determinación de Coliformes Fecales (E. coli) con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g

Muestra	Tiempo (min)	Distancia (cm)	GRAFITO		HIERRO	
			Coliformes Totales (UFC/ml)	% Remoción C.T.	Coliformes Totales (UFC/g)	% Remoción C.T.
1	10	5	4000	0,00	4000	0,00
2	20	5	3000	25,00	4000	0,00
3	30	5	2000	50,00	4000	0,00
4	40	5	2000	50,00	3000	25,00
5	50	5	1000	75,00	3000	25,00
6	60	5	0	100,00	2000	50,00
7	70	5	0	100,00	2000	50,00
8	80	5	0	100,00	2000	50,00
9	90	5	0	100,00	1000	75,00
Muestra inicial: 4000 (UFC/g)						

Fuente: Autora

Tabla 2-14 Determinación de Coliformes Totales con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5cm y Muestra inicial: 3000 UFC/g

Muestra	Tiempo (min)	Distancia (cm)	GRAFITO		HIERRO	
			Coliformes Totales (UFC/g)	% Remoción C.T.	Coliformes Totales (UFC/g)	% Remoción C.T.
1	10	5,5	3000	0,00	3000	0,00
2	20	5,5	3000	0,00	3000	0,00
3	30	5,5	2000	33,33	2000	33,33
4	40	5,5	2000	33,33	2000	33,33
5	50	5,5	1000	66,67	2000	33,33
6	60	5,5	0	100,00	2000	33,33
7	70	5,5	0	100,00	2000	33,33
8	80	5,5	0	100,00	1000	66,67
9	90	5,5	0	100,00	1000	66,67
Muestra inicial: 3000 (UFC/g)						

Fuente: Autora

Tabla 2-15 Determinación de Coliformes Fecales (E. coli) con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5,5cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g

Muestra	Tiempo (min)	Distancia (cm)	GRAFITO		HIERRO	
			E. coli (UFC/g)	% Remoción E.C.	*E. coli* (UFC/g)	% Remoción E.C.
1	10	5,5	4000	0,00	4000	0,00
2	20	5,5	4000	0,00	4000	0,00
3	30	5,5	3000	25,00	4000	0,00
4	40	5,5	3000	25,00	4000	0,00
5	50	5,5	2000	50,00	3000	25,00
6	60	5,5	0	100,00	3000	25,00
7	70	5,5	0	100,00	3000	25,00
8	80	5,5	0	100,00	2000	50,00
9	90	5,5	0	100,00	2000	50,00
Muestra inicial: 4000 (UFC/g)						

Fuente: Autora

Tabla 2-16 Determinación de Coliformes Totales con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 6cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g

Muestra	Tiempo (min)	Distancia (cm)	GRAFITO		HIERRO	
			Coliformes Totales (UFC/g)	% Remoción C.T.	Coliformes Totales (UFC/g)	% Remoción C.T.
1	10	6	4000	0,00	4000	0,00
2	20	6	3000	25,00	3000	25,00
3	30	6	3000	25,00	3000	25,00
4	40	6	1000	75,00	3000	25,00
5	50	6	1000	75,00	2000	50,00
6	60	6	0	100,00	2000	50,00
7	70	6	0	100,00	1000	75,00
8	80	6	0	100,00	1000	75,00
9	90	6	0	100,00	1000	75,00
Muestra inicial: 4000 (UFC/g)						

Fuente: Autora

Tabla 2-17 Determinación de Coliformes Fecales (E. coli) con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 6 cm y Muestra inicial: 5000 UFC/g

Muestra	Tiempo (min)	Distancia (cm)	GRAFITO		HIERRO	
			E. coli (UFC/g)	% Remoción E.C.	*E. coli* (UFC/g)	% Remoción E.C.
1	10	6	5000	0,00	5000	0,00
2	20	6	4000	20,00	5000	0,00
3	30	6	2000	60,00	4000	20,00
4	40	6	2000	60,00	4000	20,00
5	50	6	1000	80,00	3000	40,00
6	60	6	0	100,00	3000	40,00
7	70	6	0	100,00	2000	60,00
8	80	6	0	100,00	2000	60,00
9	90	6	0	100,00	1000	80,00
Muestra inicial: 5000 (UFC/g)						

Fuente. Autora

La hipótesis planteada para el conjunto de datos mostrados anteriormente es la siguiente:

¿El electrodo de Grafito es más eficiente en la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) frente a los Electrodos de Hierro?

Entonces:

- **La Hipótesis Nula (Ho)** es: El electrodo de Grafito no es más eficiente en la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) frente a los Electrodos de Hierro.
- **La Hipótesis Alternativa (H_1)** es: El electrodo de Grafito es más eficiente en la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) frente a los Electrodos de Hierro.

2.4.2. Influencia del factor distancia

Para analizar el factor distancia se procedió a aplicar un Diseño Completamente al Azar (DCA), el cual no es más que un arreglo estadístico que permite realizar investigaciones bajo condiciones controladas o cuando éstas son homogéneas (uniformes). En este caso: la conductividad eléctrica, el pH y el nivel de humedad son variables controladas. Por lo tanto, todas las repeticiones que se plantearon en esta investigación se realizaron bajo las mismas condiciones.

Para la aplicación de este diseño, el tratamiento 1 corresponde a la aplicación de una distancia de 5 cm, el tratamiento 2 está asociado a una distancia de 5,5 cm, mientras que el tratamiento 3 corresponde a una distancia de 6 cm.

También es necesario recalcar que las muestras fueron tomadas a un ti*empo de 90 minutos* y con *electrodos de grafito*, ya que como se menciona en la sección de Resultados, es éste el mejor y el más eficiente.

Bajo estas condiciones, el número de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) muestreados se muestran en la *Tabla 2-18* y ***Tabla 2-19*.**

Tabla 2-18 Tratamientos y repeticiones para Coliformes Totales

TRATAMIENTOS	REPETICIONES			
	I	II	III	IV
1	1000	0	1000	1000
2	1000	1000	1000	0
3	1000	0	1000	0

Fuente: Autora

Tabla 2-19 Tratamientos y repeticiones para Coliformes Fecales (E. coli)

TRATAMIENTOS	REPETICIONES			
	I	II	III	IV
1	0	1000	1000	0
2	2000	1000	2000	1000
3	1000	1000	0	1000

Fuente: Autora

Los resultados que se observan en cada uno de los tratamientos sometidos a diferentes distancias constituyen una variable aleatoria que cumple con el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \in_{ij}$$

Con las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula: $Ho = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$
- Hipótesis Alternativa $H_1 \neq \mu_i \neq \mu_k \qquad i \neq k$

En donde:

- $Y_{ij:}$ es la observación de la j-esima u.e. del i-esmo tratamiento
- $\mu_{i:}$ es la media del i-esmo tratamiento
- $\epsilon_{ij:}$ es el error experimental de la unidad ij

Los datos ingresados en la Herramienta de Minitab y que fueron utilizados para el Análisis del Diseño Completamente al Azar (DCA) se muestra en la ***Tabla 2-20*.**

Tabla 2-20 Conjunto de Datos (Coliformes Totales y Fecales (E. coli)) utilizados

Tratamiento	C. Totales	% Remoción CT	C. Fecales	% de Remoción E.C
1	1000	75	0	100
1	0	100	1000	75
1	1000	75	1000	75
1	1000	75	0	100
2	1000	75	2000	50
2	1000	75	1000	75
2	1000	75	2000	50
2	0	100	1000	75
3	1000	75	1000	75
3	0	100	1000	75
3	1000	75	0	100
3	0	100	1000	75
Mo	4000	(UFC/g)		
Tipo de Electrodo:		Grafito		

Fuente: Autora

La hipótesis planteada dentro de este análisis es la siguiente:

¿Existe la influencia de la distancia en el proceso electroquímico para la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) presentes en los lodos residuales previamente deshidratados?

Entonces:

- **La Hipótesis Nula (Ho)** es: No existe la influencia de la distancia en el proceso electroquímico para la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) presentes en los lodos residuales previamente deshidratados.

- **La Hipótesis Alternativa (H_1)** es: Existe la influencia de la distancia en el proceso electroquímico para la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) presentes en los lodos residuales previamente deshidratados.

2.4.3. Influencia del factor tiempo

Para analizar la influencia del factor tiempo se consideró un solo Tipo de Electrodo: Grafito debido a que alcanza mayores porcentajes de remoción para Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)* y es el más eficiente en los procesos electroquímicos.

De igual manera se consideró una distancia fija de 5 cm, ya que como se observa en la sección de Resultados, el factor distancia no influye en el proceso de remoción de microrganismos patógenos. Las variables consideradas para este diseño se muestran en la ***Tabla 2-21.***

Tabla 2-21 Variables de entrada y salida del Diseño

	Factores	**Niveles**
Entrada	Distancia (cm)	5
	Tipo de Electrodo	Grafito
Salida	Remoción de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)*	

Fuente: Autora

Para éste análisis se hizo uso de la Herramienta SPSS 24, que constituye una potente aplicación de análisis estadísticos de datos, caracterizada por una intuitiva interfaz gráfica que resulta de fácil uso. Para aplicar el Modelo de Regresión Lineal sobre las variables Tiempo (Variable Independiente) y Porcentaje de Remoción de Coliformes Totales o Fecales (*E. coli*) (Variable Dependiente), es importante conocer si las variables se encuentran o no correlacionadas ente ellas.

Para ello, se aplica la Correlación de Pearson, prueba estadística que permite analizar la relación entre dos variables medidas en un nivel por intervalos o de razón; en otras palabras, determinar qué tan fuerte es la relación entre estas dos variables. El coeficiente de correlación es un número entre (-1 y +1) cuyo signo coincide con la pendiente de la recta de regresión y cuya magnitud está relacionada

con el grado de dependencia lineal entre las dos variables. Se dice que la Correlación de Pearson es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. Esto implica que puede haber variables que están fuertemente relacionadas, pero no de forma lineal. En este caso, no se puede proceder a aplicar la Correlación de Pearson.

La Correlación de Pearson no evalúa la causalidad, es por eso que no se considera a la variable dependiente e independiente. Para interpretar los resultados que se obtengan de la Herramienta SPSS 24 se menciona que:

Si

- -1.00 = Correlación negativa perfecta.
- -0.95 = Correlación negativa muy fuerte.
- -0.75 = Correlación negativa considerable.
- -0.50 = Correlación negativa media.
- -0.10 = Correlación negativa débil.
- -0.00 = No existe correlación alguna.
- +0.10 = Correlación positiva débil.
- +0.50 = Correlación positiva media.
- +0.75 = Correlación positiva considerable.
- +0.95 = Correlación positiva muy fuerte.
- +1.00 = Correlación positiva perfecta.

El valor del coeficiente de correlación se altera de forma importante antes la presencia de un valor extremo, es por este motivo que se debe considerar cautelosamente los valores extremos.

Por otro lado se aplica la regresión lineal, técnica que permite cuantificar la relación existente entre variables cuantitativas. Aquí se considera a la variable dependiente la cual denominaremos "Y" y a la variable independiente como "X". La regresión lineal se determina en base al diagrama de dispersión, en el cual se dice que:

"Dos variables están relacionadas cuando se puede detectar algún patrón de variación conjunta".

El grafico de dispersión es una representación gráfica de la relación entre las variables que se construyen representado los pares de valores de las variables medidas en el plano cartesiano. La ecuación de regresión lineal está dada por:

$$Y = Bo + BX$$

Donde:

- Y = valor de la variable dependiente que se desea predecir.
- Bo = ordenada en el origen.
- B = pendiente o inclinación.
- X = valor que se fija a la variable independiente.

Definido estos conceptos, primero se aplica el Criterio de Correlación de Pearson, ya que para poder hacer una regresión lineal primero se necesita conocer si la variable Tiempo tiene o no correlación con la el Porcentaje de Remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*).

Además es necesario aplicar la relación numérica de la Correlación de Pearson para determinar si el Coeficiente de Correlación de Pearson es positiva y cercana a +1. Los datos utilizados para el Análisis de Correlación y Regresión Lineal se muestran en la ***Tabla 2-22*.**

Tabla 2-22 Conjunto de Datos (Coliformes Totales y Fecales (E. coli)) utilizados para el Análisis de la Correlación de Pearson y la Regresión Lineal

Tiempo (min)	Porcentaje Remoción CT (%)	Porcentaje Remoción EC (%)
10	0	0
20	0	25
30	25	50
40	50	50
50	75	75
60	100	100

Fuente: Autora

2.4.4. Influencia del tipo de electrodo

Para el factor Tipo de Electrodo, nuevamente se aplica un Diseño Completamente al Azar, cumpliendo de igual manera con el modelo del diseño. Las variables definidas para este diseño se muestra en la ***Tabla 2-23.***

Tabla 2-23 Variables de entrada y salida del Diseño

	Factores	Niveles	
Entrada	Tiempo (min)	90	
	Distancia (cm)	5	
	Tipo de Electrodo	Hierro	Grafito
Salida	Remoción de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)*		

Fuente: Autora

En las siguientes tablas se muestran los tratamientos a los que fueron sometidas las muestras, en las que el tratamiento 1 representa a los Electrodos de Hierro, mientras que al tratamiento 2 están asociados los Electrodos de Grafito.

Para este diseño se tomaron los resultados obtenidos después de aplicar procesos electroquímicos a un tiempo y distancia especifica de 90 min y 5cm respectivamente. Se realizaron 4 repeticiones (I, II, III y IV), para Coliformes Totales y Fecales *(E. coli),* las cuales se muestran a continuación:

Tabla 2-24 Tratamientos y Repeticiones para Coliformes Totales

TRATAMIENTOS	REPETICIONES			
	I	II	III	IV
1	1000	0	1000	1000
2	0	0	0	0

Fuente: Autora

Tabla 2-25 Tratamientos y Repeticiones para Coliformes Fecales (E. coli)

TRATAMIENTOS	REPETICIONES			
	I	II	III	IV
1	2000	2000	1000	1000
2	0	0	0	0

Fuente: Autora

La hipótesis planteada dentro de este análisis es la siguiente:

¿Existe la influencia del Tipo de Electrodo en el proceso electroquímico para la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) presentes en los lodos residuales previamente deshidratados?

Entonces:

- **La Hipótesis Nula (Ho)** es: No existe la influencia del Tipo de Electrodo en el proceso electroquímico para la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) presentes en los lodos residuales previamente deshidratados.
- **La Hipótesis Alternativa (H_1)** es: Existe la influencia del Tipo de Electrodo en el proceso electroquímico para la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) presentes en los lodos residuales previamente deshidratados.

Por último se determinó el porcentaje de Hipoclorito de Sodio presente en el lodo tratado después de su correspondiente aplicación del proceso electroquímico. Existen

varias metodologías para cuantificar la concentración de hipoclorito en una muestra que ha sido ya aplicada a un proceso electroquímico.

Uno de los métodos más utilizados es la yodometría, que se define como un análisis volumétrico donde el agente valorante es un agente oxidante o reductor y la reacción de estudio presenta transferencia de electrones. El cloro activo puede determinarse agregando yoduro de potasio (KI) y ácido. La cantidad de yodo liberada equivale a la cantidad de cloro activo. Para acidificar la muestra se utilizó ácido acético glacial.

El indicador utilizado en este tipo de titulación fue el almidón, compuesta por amilasa y amilopectina, donde el primero de ellos da en solución un color azul con yodo y el segundo un color violeta. Los resultados obtenidos se mostrarán en la sección Resultados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

En primer lugar se determinó si el factor Tipo de Electrodo es estadísticamente significativo en el proceso de remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*).

El diseño aplicado en éste análisis cumplió con los supuestos de normalidad (los residuos quedaron alineados en una línea recta), independencia (no existió un patrón de dispersión) y de igualdad de varianzas (no existió un patrón de dispersión).

La influencia del **factor Tipo de Electrodo** después de aplicar un Diseño Completamente al Azar (DCA) se muestran a continuación:

ANOVA unidireccional: Porcentaje de Remoción Coliformes Totales vs. Tratamiento

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Tratamiento	1	703,1	703,1	9,00	**0,024**
Error	6	468,7	78,1		
Total	7	1171,9			

S = 8,839 R-cuad. = 60,00% R-cuad. (Ajustado) = 53,33%

Nivel	N	Media	Desv.Est.
1	4	81,25	12,50
2	4	100,00	0,00

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. Agrupada

```
(--------*--------)
                 (--------*--------)
-+---------+---------+---------+--------
72        84        96       108
```

Desv.Est. agrupada = 8,84

El valor de p obtenido en el ANOVA es de ($p = 0{,}024 < 0.05$), por lo que existe significancia estadística, es decir, existe influencia del Tipo de Electrodo en la remoción de Coliformes Totales.

El mismo caso ocurrió para la remoción de los Coliformes Fecales (*E. coli*), donde nuevamente el valor de ($p = 0{,}002 < 0.05$). Estos resultados se muestran a continuación:

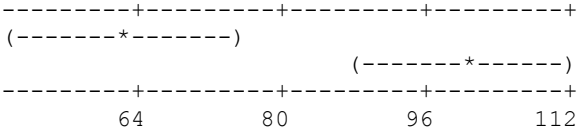
ANOVA unidireccional: Porcentaje de remoción Coliformes Fecales (E.C.) vs. Tratamiento

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Tratamiento	1	2813	2813	27,00	**0,002**
Error	6	625	104		
Total	7	3438			

S = 10,21 R-cuad. = 81,82% R-cuad. (Ajustado) = 78,79%

Nivel	N	Media	Desv.Est.
1	4	62,50	14,43
2	4	100,00	0,00

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. Agrupada



Desv.Est. agrupada = 10,21

De esta manera, se rechaza la Hipótesis Nula y se acepta la Hipótesis Alternativa, la cual manifiesta que: **Existe la influencia del Tipo de Electrodo en el proceso electroquímico para la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) presentes en los lodos residuales previamente deshidratados**.

El modelo de Tukey cumplió con los supuestos de normalidad (los residuos quedaron alineados en una línea recta), independencia (no existió un patrón de dispersión) y de igualdad de varianzas (no existió un patrón de dispersión).

Los resultados obtenidos tras la aplicación de la prueba de Tukey para determinar si los Tratamientos con Electrodos de Grafito difieren de los tratamientos con Electrodos de Hierro se muestran a continuación:

ANOVA unidireccional: Porcentaje Remoción Coliformes Totales vs. Tratamiento (Aplicación de Procesos Electroquímicos con Fe y Grafito)

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Tratamiento	1	703,1	703,1	9,00	**0,024**
Error	6	468,7	78,1		
Total	7	1171,9			

Agrupar información utilizando el método de Tukey

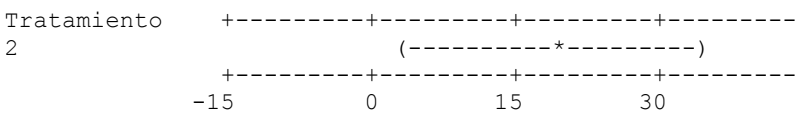
Tratamiento	**N**	**Media**	**Agrupación**
2	**4**	**100,000**	**A**
1	**4**	**81,250**	**B**

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Nivel de confianza individual = **95,00%**

Tratamiento = 1 restado de:

Tratamiento	Inferior	Centro	Superior
2	3,457	18,750	34,043



Los tratamientos son significativamente diferentes por el valor de ($p = 0.024 < 0.05$) y que el Tratamiento 2, asociado a la utilización de Electrodos de Grafito es el mejor ya que a un nivel de confianza del 95% se determina que el tratamiento con electrodos de grafito (2) presenta una media de 100 mientras que con electrodos de hierro la media es del 81. 250, agrupándolo en una categoría inferior B.

Por otro lado, los resultados obtenidos para el caso de los Coliformes Fecales (*E. coli*) se muestran a continuación:

ANOVA unidireccional: Porcentaje Remoción E.C. vs. Tratamiento

```
Fuente       GL    SC    CM      F      P
Tratamiento   1  2813  2813  27,00  0,002
Error         6   625   104
Total         7  3438

S = 10,21   R-cuad. = 81,82%   R-cuad. (Ajustado) = 78,79%


Agrupar información utilizando el método de Tukey
Tratamiento  N   Media  Agrupación
2            4  100,00  A
1            4   62,50    B

Nivel de confianza individual = 95,00%

Tratamiento = 1 restado de:
Tratamiento  Inferior  Centro  Superior
2               19,84   37,50     55,16

Tratamiento  ---------+---------+---------+---------+
2                             (--------*--------)
             ---------+---------+---------+---------+
                      0        20        40        60
```

Los tratamientos son significativamente diferentes por el valor de ($p = 0.002 < 0.05$) y que el Tratamiento 2, asociado a la utilización de Electrodos de Grafito nuevamente es el mejor.

Bajo estos resultados, se rechaza la Hipótesis Nula y se acepta la Hipótesis Alternativa la cual manifiesta que: **Los tratamiento con Electrodos de Grafito difieren de los tratamientos con Electrodos de Hierro.**

Los resultados obtenidos para la determinación del electrodo más eficiente dentro del proceso electroquímico se muestran en las siguientes Gráficas:

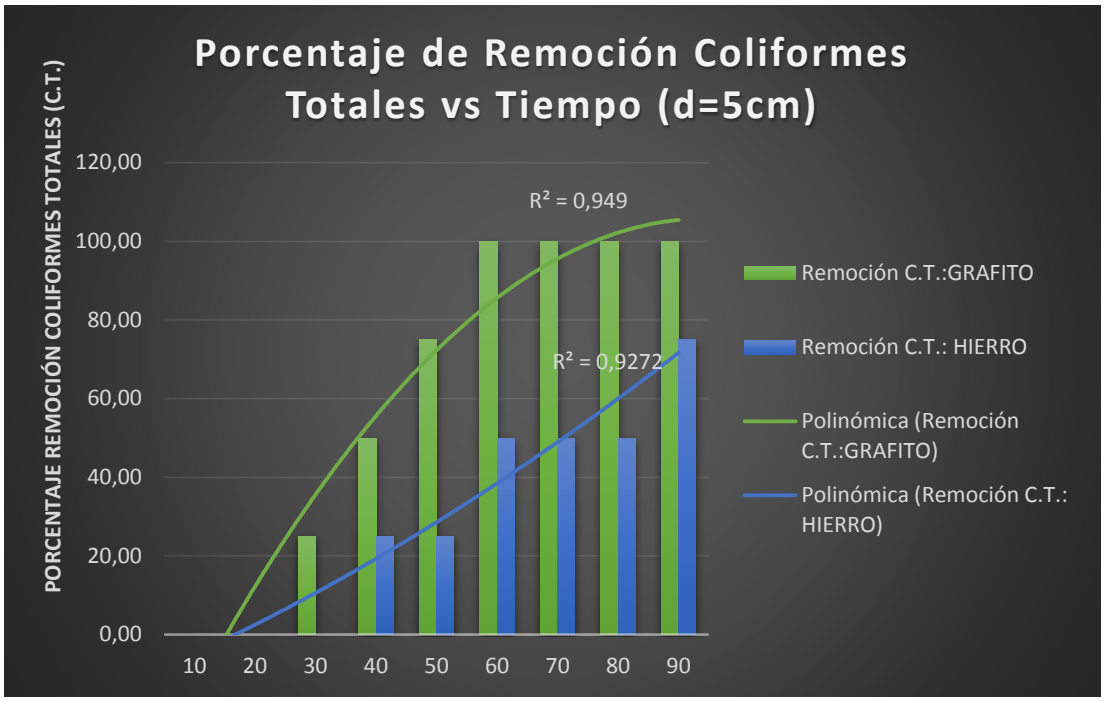


Gráfico 1 Remoción de Coliformes Totales vs Tiempo con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g

Fuente: Autora

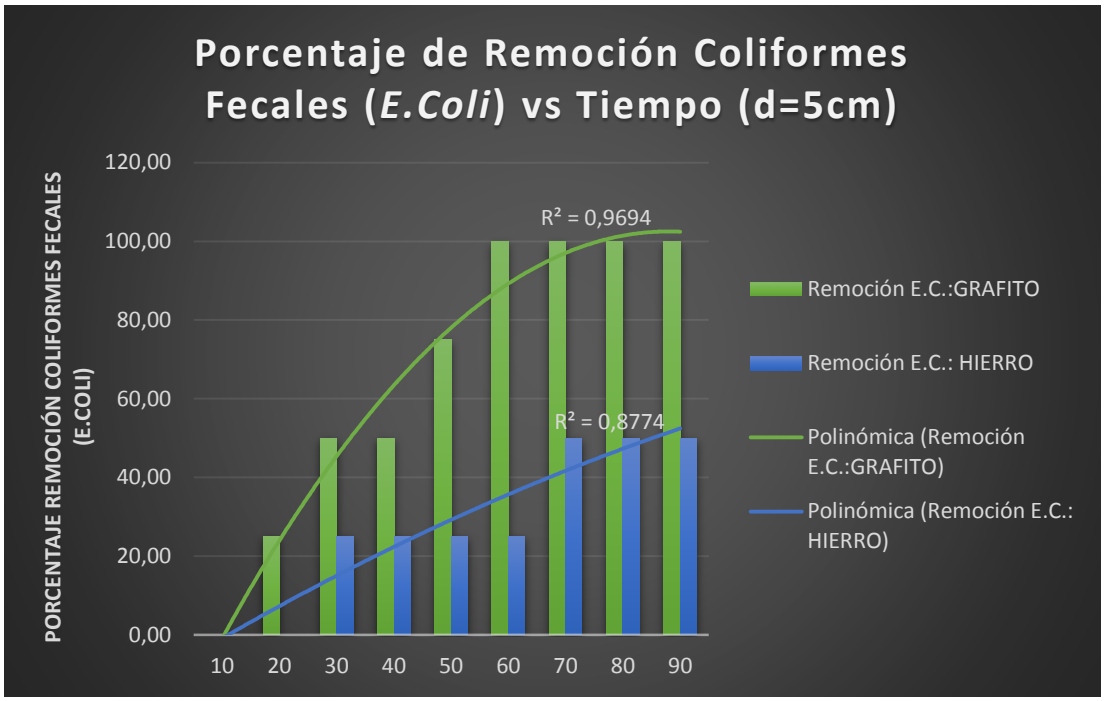


Gráfico 2 Remoción de Coliformes Fecales (*E. coli*) vs Tiempo con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g

Fuente: Autora

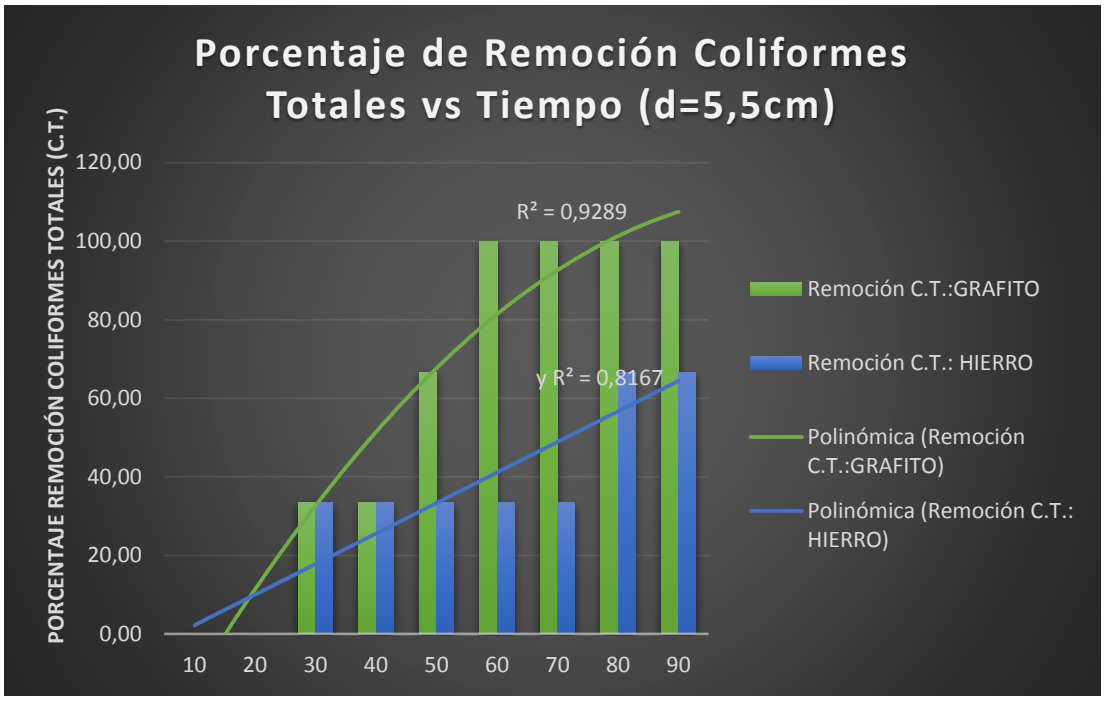


Gráfico 3 Remoción de Coliformes Totales vs Tiempo con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5,5 cm y Muestra inicial: 3000 UFC/g

Fuente: Autora

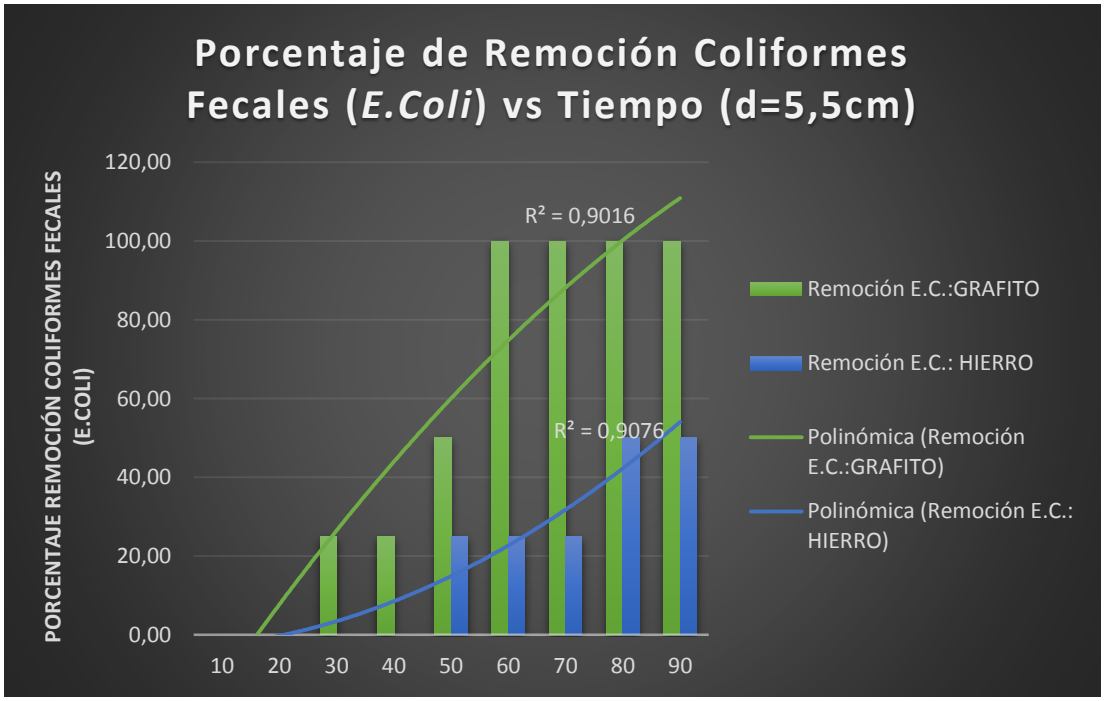


Gráfico 4 Remoción de Coliformes Fecales (*E. coli*) vs Tiempo con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5,5 cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g

Fuente: Autora

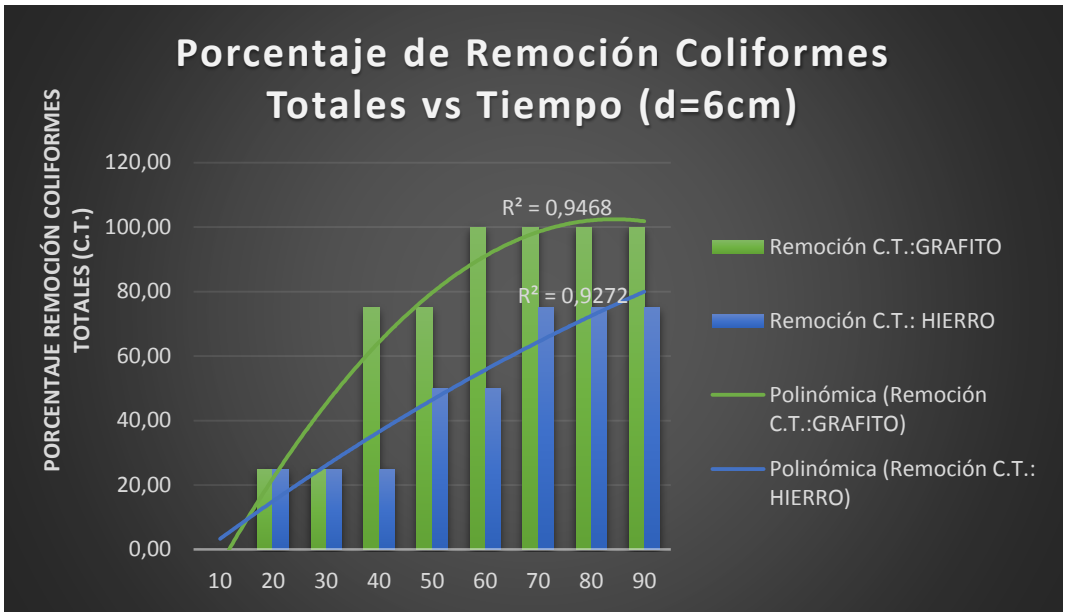


Gráfico 5 Remoción de Coliformes Totales vs Tiempo con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 5cm y Muestra inicial: 4000 UFC/g

Fuente: Autora

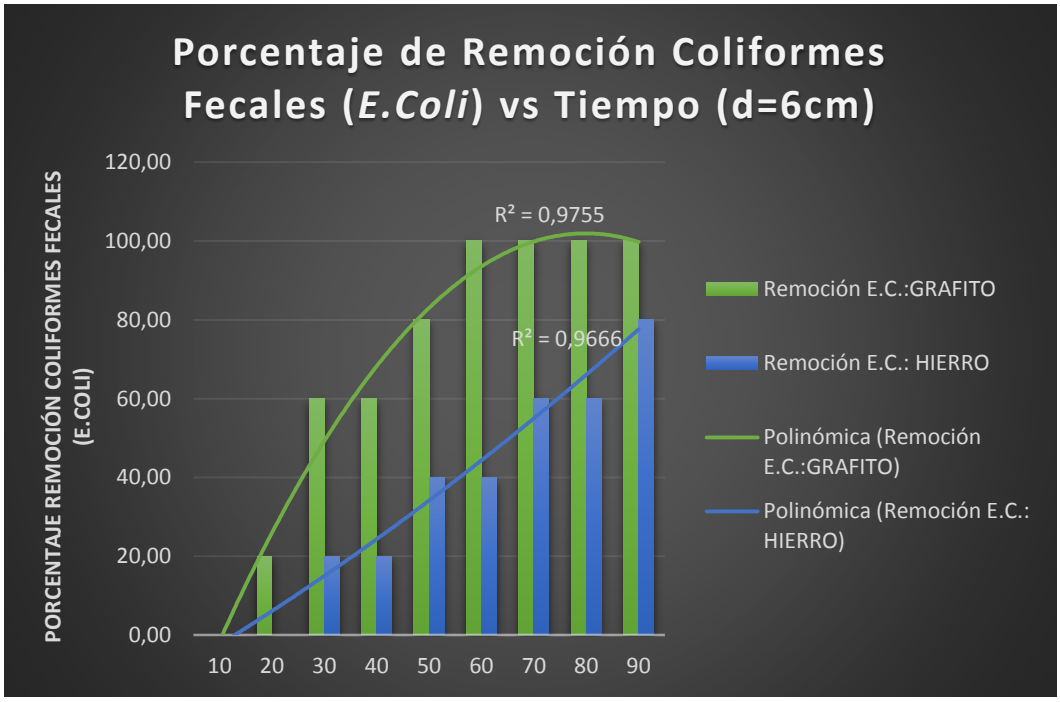


Gráfico 6 Remoción de Coliformes Fecales *(E. coli)* vs Tiempo con electrodos de hierro y grafito a una distancia: 6 cm y Muestra inicial: 5000 UFC/g

Fuente: Autora

Los gráficos del 1 al 6 muestran que el electrodo de grafito alcanza una remoción del 100% tanto para Coliformes Totales como Fecales *(E. coli)* en un tiempo de 60 min, mientras que con el electrodo de hierro alcanza una remoción del 75% en

Coliformes Totales a un tiempo promedio de 80 min, y de un 80% para la remoción de Coliformes Fecales (*E. coli)* a un tiempo de 90 minutos.

En cada una de las gráficas el valor de R^2 es superior al 90%, por lo tanto se trata de un ajuste muy aproximado, y los datos se encuentran relacionados de una manera casi perfecta.

Por lo tanto se rechaza la Hipótesis Nula y se acepta la Hipótesis Alternativa que manifiesta que: **El electrodo de Grafito es más eficiente en la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) frente a los Electrodos de Hierro.**

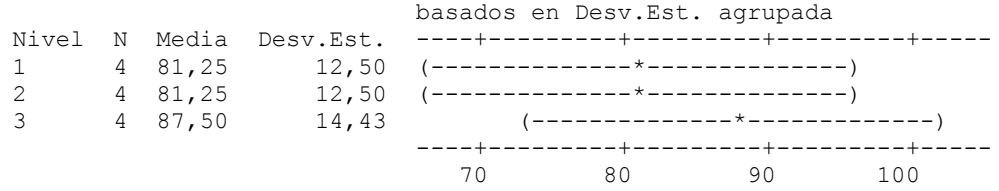
El diseño aplicado en el DCA para determinar la influencia o no del factor distancia, cumplió con los supuestos de normalidad, independencia, e igualdad de varianzas. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Modelo lineal general: Porcentaje Eliminación Coliformes Totales vs. Tratamiento

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Tratamiento	2	104	52	0,30	**0,748**
Error	9	1563	174		
Total	11	1667			

Nivel	N	Media	Desv.Est.
1	4	81,25	12,50
2	4	81,25	12,50
3	4	87,50	14,43

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada



Desv.Est. agrupada = 13,18

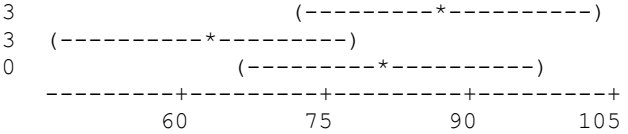
Se observa que para la remoción de los Coliformes Totales, la distancia no influye ($p = 0.748 > 0.05$). El mismo caso ocurrió para la remoción de los Coliformes Fecales (*E. coli*), donde nuevamente el valor de ($p = 0.073 > 0.05$) supera el nivel de significancia de 0.05, resultados que se muestran a continuación:

ANOVA unidireccional: Porcentaje de Remoción Coliformes Fecales (*E. coli*) vs. Tratamiento

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Tratamiento	2	1354	677	3,55	**0,073**
Error	9	1719	191		
Total	11	3073			

Nivel	N	Media	Desv.Est.
1	4	87,50	14,43
2	4	62,50	14,43
3	4	81,25	12,50

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. Agrupada



Desv.Est. agrupada = 13,82

De esta manera se acepta la Hipótesis Nula, en la que se manifiesta que: **No existe la influencia de la distancia en el proceso electroquímico para la remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) presentes en los lodos residuales previamente deshidratados.**

Por último el diseño aplicado en el análisis de la influencia del factor tiempo cumplió con los supuestos de normalidad, independencia e igualdad de varianzas.

La aplicación del Coeficiente de Correlación de Pearson mostro que las variables tiempo y Porcentaje de remoción C.T y E.C, están correlacionadas directamente.

Para ello se obtuvo el **Gráfico 7,** en la que la recta proporcionada por el ajuste lineal es ascendente, razón por la cual se deduce que la correlación es positiva.

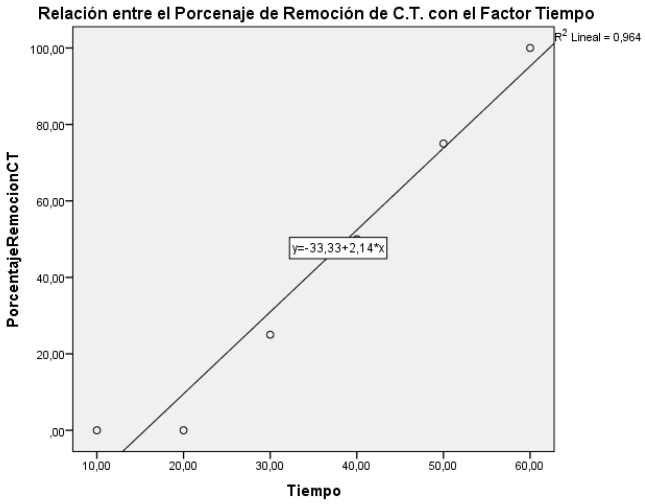


Gráfico 7 Relación entre el Porcentaje de Remoción de C.T. con el Factor Tiempo

Fuente: Autora

El Análisis de la relación numérica de la Correlación de Pearson es positivo y cercano a +1, existiendo una correlación positiva (0,98) muy fuerte entre las variables X (Factor/Variable tiempo) y Y (Porcentaje de Remoción de Coliformes Totales/Fecales (*E. coli*)), como se muestra a continuación:

Tabla 3-1 Correlación de Pearson para Coliformes Totales

Correlaciones			
		Tiempo	Porcentaje Remoción CT
Tiempo	Correlación de Pearson	1	,982**
	Sig. (bilateral)		,000
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	1750,000	3750,000
	Covarianza	350,000	750,000
	N	6	6
**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).			

Fuente: Autora

Una vez que se cumple el Criterio de la Correlación de Pearson, el resultado del Modelo de Regresión Lineal, es el siguiente:

Tabla 3-2 Regresión lineal para Coliformes totales

Modelo R		R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Cambio en R cuadrado
1	0,982 [a]	0,964	0,955	8,62582	0,964
a. predictores: (constante) tiempo					

Fuente: Autora

En el resumen del modelo, nos interesa analizar el valor de R^2. Si a este valor lo multiplicamos por 100, se obtiene que: el Factor Tiempo influye en un 96.4% en el Porcentaje de Remoción de Coliformes Totales.

Tabla 3-3 Análisis de Varianza para Coliformes totales

ANOVA:						
Modelo		Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	8035,714	1	8035,714	108,000	,000 [b]
	Residuo	297,619	4	74,405		
	Total	8333,333	5			
a. Variable dependiente: Porcentaje Remoción CT						
b. Predictores: (Constante), Tiempo						

Fuente: Autora

De los resultados obtenidos en el ANOVA, se concluye que: Dado que el valor de $Sig.(p) = 0.000 < 0.05$, entonces se rechaza la Hipótesis Nula y se acepta la Hipótesis Alternativa la cual manifiesta que: **El Factor Tiempo influye en la Remoción de Coliformes Totales y Fecales (*E. coli*) dentro del proceso electroquímico, es decir que: el Tiempo, es un factor estadísticamente significativo.**

De los resultados obtenidos en Coeficientes, se puede deducir que la ecuación del Modelo de Regresión Lineal estaría dada por la siguiente expresión:

$$Y = -33.333 + 2.143X$$

Donde:

- Y = Porcentaje de Remoción de Coliformes Totales

- X= Tiempo

El mismo procedimiento se llevó a cabo para determinar la influencia del Factor Tiempo sobre la Remoción de Coliformes Fecales (*E. coli*), tal y como se muestra a continuación:

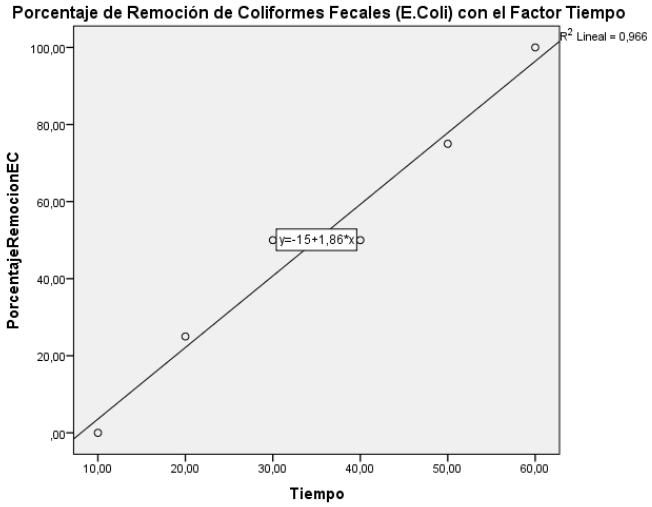


Gráfico 8 Relación entre el Porcentaje de Remoción de E.C. con el Factor Tiempo

Fuente: Autora

El Análisis de la relación numérica de la Correlación de Pearson para coliformes fecales *(E. coli)* es positivo y cercano a +1, existiendo una correlación positiva (0,983) muy fuerte entre las variables X (Factor/Variable tiempo) y Y (Porcentaje de Remoción de Coliformes Totales/Fecales (*E. coli*)), como se muestra a continuación:

Tabla 3-4 Correlación de Pearson para Coliformes fecales (E. coli)

Correlaciones			
		Tiempo	Porcentaje Remoción EC
Tiempo	Correlación de Pearson	1	,983**
	Sig. (bilateral)		,000
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	1750,000	3250,000
	Covarianza	350,000	650,000
	N	6	6
**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).			

Fuente: Autora

Cumpliendo el criterio de correlación entre el tiempo y el porcentaje de remoción de coliformes fecales *(E. coli),* se obtienen los resultados del Modelo de Regresión Lineal como se muestra a continuación:

Tabla 3-5 Regresión lineal para Coliformes fecales (E. coli)

Modelo R		R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Cambio en R cuadrado
1	0,983 a	0,966	0,957	7,31925	0,966
a. predictores: (constante) tiempo					

Fuente: Autora

En el resumen del modelo, el valor de R cuadrado indica que: el Factor Tiempo influye en un 96.6% en el Porcentaje de Remoción de Coliformes Fecales (*E. coli*).

Tabla 3-6 Análisis de Varianza para Coliformes fecales (E. coli)

ANOVA:						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	6035,714	1	6035,714	112,667	,000[b]
	Residuo	214,286	4	53,571		
	Total	6250,000	5			
a. Variable dependiente: Porcentaje Remoción EC						
b. Predictores: (Constante), Tiempo						

Fuente: Autora

De los resultados obtenidos en el ANOVA, se concluye que: Dado que el valor de Sig.(p) = 0.000 < 0.05, entonces se rechaza la Hipótesis Nula y se acepta la Hipótesis Alternativa la cual manifiesta que: **El Factor Tiempo influye en la Remoción de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)* dentro del proceso electroquímico, es decir que: el Tiempo, es un factor estadísticamente significativo.**

De los resultados obtenidos en Coeficientes, se puede deducir que la ecuación del Modelo de Regresión Lineal estaría dada por la siguiente expresión:

$$Y = -15 + 1.857X$$

Por último, para determinar el porcentaje de hipoclorito de sodio en cada una de las muestras se utilizó el procedimiento mostrado en el **ANEXO V**. Después de aplicar el proceso mencionado en el **ANEXO IV**, se obtuvo los resultados que se muestran en la **Tabla 3-7**. En ésta se muestra el tiempo total de aplicación del proceso electroquímico, los volúmenes de tiosulfato de sodio 0.011 N gastados en la titulación y el porcentaje en volumen del cloro disponible. El **Gráfico 9** resume el comportamiento de Concentración de Cloro en el tiempo.

Tabla 3-7 Contenido de cloro disponible en porcentaje en volumen según la temperatura y tiempo

Tiempo	% Volumen de cloro	Temperatura (°C)
10 min	0,93	28
20 min	1,64	35
30 min	1,82	39
40 min	2,46	45
50 min	3,18	51
60 min	4,27	57
70 min	5,50	59
80 min	7,05	61
90 min	8,00	65

Fuente: Autora

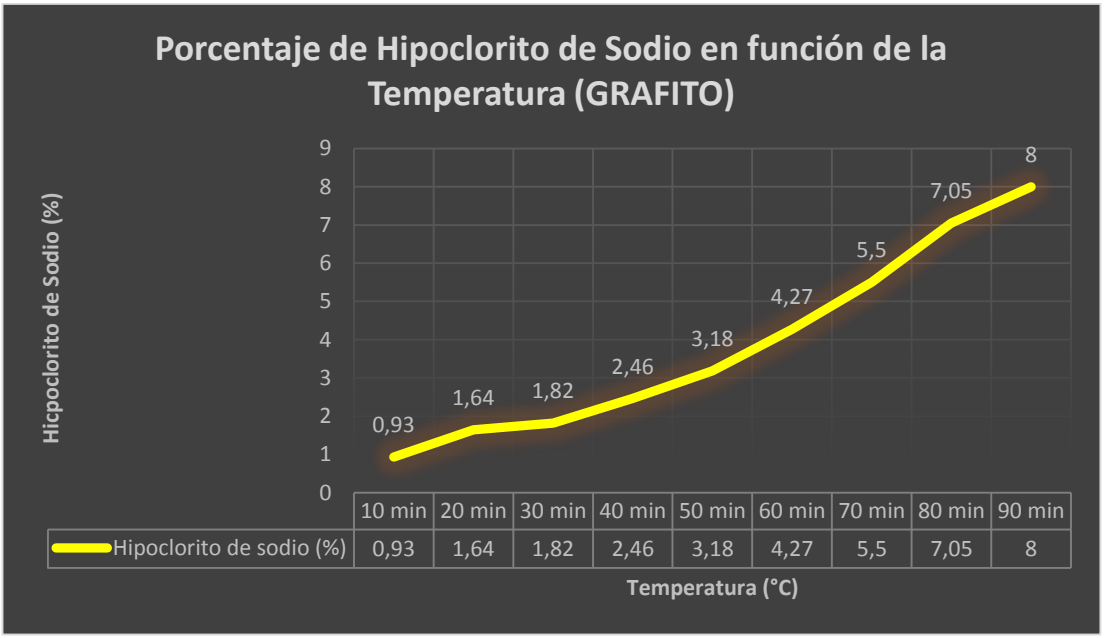


Gráfico 9 Resumen del Comportamiento de Concentración de Hipoclorito de sodio vs Tiempo y Temperatura

Fuente: Autora

3.2. Discusiones

Si comparamos los resultados obtenidos en "**Estabilización de lodos residuales municipales por medio de la técnica de lombricompostaje**" (Vera, Reza et al., 2006)., con el tratamiento propuesto en este proyecto, se observa que ambos tratamientos muestran una remoción total de los Coliformes Fecales, por lo que se concluye que tanto el lombricompostaje como el proceso de desinfección estudiado, presentan un rendimiento elevado en la eliminación de microorganismos patógenos.

Barrios, Jiménez, Gonzales, et al, demuestran que con la aplicación de ácido peracético en lodos residuales provenientes de la "PTAR San Pedro Atocpan" se logra reducir la densidad de Coliformes Fecales por debajo del límite de detección (< 3 NMP/g ST) alcanzando una remoción del 96% (Barrios et al., 2000). Sin embargo no logró conseguir la remoción total de los patógenos como es el caso del tratamiento de desinfección planteado en este documento. Otra de las desventajas de utilizar el tratamiento por vía ácida es que reduce considerablemente el pH, mientras que usando el proceso de desinfección planteado en esta investigación el pH se mantiene constante.

En los resultados obtenidos en el estudio "**Eliminación de bacterias patógenas en lodos residuales durante el secado solar**", se obtiene una remoción del 42% de Coliformes Fecales de lodo seco, por lo que nuevamente el tratamiento propuesto en este documento, trae mayores ventajas con respecto a la remoción total (100%) de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)*. Uno de los inconvenientes que presenta el tratamiento por secado solar es que durante periodos de cielos nublados y sobre todo por las noches, las temperaturas de incubación disminuyen entre los 25^{o}C-40^{o}C, lo que favorece al crecimiento óptimo de los Coliformes Fecales. A temperaturas menores de 20^{o}C se hallan en estado de latencia y a temperaturas mayores a 50^{o}C, mueren (Araujo

et al., 2015). Sin embargo, éste no fue un problema dentro del estudio planteado, ya que el tratamiento propuesto produce hipoclorito de sodio, favoreciendo la eliminación de estos patógenos.

Si comparamos los resultados obtenidos en el "**Tratamiento de lodos residuales municipales con un proceso aerobio-termofílico**", al final de la etapa termofílica se tuvo la reducción de 99.8% de Coliformes Fecales, y en la etapa de curado se tuvo una reducción del 100% a un tiempo de exposición superior a los 5 días (Armenta et al., 2007). Mientras que con la aplicación de un proceso de desinfección, como el que se plantea en este documento se obtiene una remoción del 100% bajo un tiempo de 60min.

Molina aplica en lodos residuales proveniente de una PTAR, dos tipos de tratamientos: tratamiento térmico y digestión anaerobia mesofílica, logrando la remoción del 100% de Coliformes, bajo una temperatura de 70°C y un tiempo de exposición entre 1 h y 1.5 (Molina et al., s. f.).. Mientras que con el proceso de desinfección realizado en este proyecto obtiene la misma remoción (100%) de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)* a un tiempo de exposición menor (60 min) resultando ser más eficiente.

En el estudio "**Digestión anaerobia en una y dos etapas de lodos residuales secundarios pre-tratados químicamente**", frente al tratamiento propuesto en este proyecto, se observa el sistema de etapa única logra alcanzar un 90% de remoción de Coliformes Fecales y la Temperatura en la Fase Anaerobia del Reactor alcanza una remoción del 99.99% de estos (CARMONA, 2002). Al igual que los casos anteriores, la digestión anaerobia en una y dos etapas emplean tiempos que superan los 11 días, razón por la cual nuevamente la aplicación de procesos electroquímicos (desinfección)

resulta más eficiente, logrando una remoción del 100% de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)*, con un tiempo de exposición tan solo de 60 minutos.

En resumen, los procesos electroquímicos aplicados a lodos residuales presentan una serie de ventajas ya que se alcanza una remoción de Coliformes Totales y Fecales del 100% a un tiempo de 60 minutos, frente a otros procesos convencionales cuyos tiempos de exposición que superan las 24 horas de aplicación. Además es necesario considerar que el factor que hace posible la eliminación de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)* es la generación de hipoclorito de sodio en el lodo residual. El NaCl es un oxidante fuerte y económico, debido a estas características es utilizado a nivel mundial como un desinfectante.

CONCLUSIONES

Aplicando el proceso de desinfección utilizado en este documento se logra una remoción del 100% de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)* con un nivel de humedad del 70,53%, pH de 7,5 y conductividad eléctrica de 12,8 mS/cm.

Se demostró estadísticamente que el tipo de electrodo es una de las variables de mayor importancia ya que influye significativamente dentro el proceso de remoción. Además se concluyó que el electrodo de grafito es el más eficiente y da mejores resultados en la remoción de patógenos.

Otro factor altamente significativo es el tiempo, ya que a un tiempo de exposición de 60 minutos se logra una remoción total para Coliformes Totales como Fecales *(E. coli).*

El factor distancia en procesos de desinfección de lodos no afecta en el porcentaje de remoción de este tipo de patógenos.

Los procesos electroquímicos (desinfección) en lodos provenientes de PTAR, logran la remoción tanto de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)*, resultando ser más eficiente frente a otro tipo de tratamientos analizados. Además los lodos obtenidos cumplen con el límite establecido por la US EPA y propuesto por la NOM-004-SEMARNAT-2002 en lo referente a patógenos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda en futuros proyectos de investigación a través procesos electroquímicos:

- Determinar la incidencia que presenta la remoción de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)* ante diferentes niveles de corriente y voltaje.
- Estudiar la remoción de Coliformes Totales y Fecales *(E. coli)* a diferentes porcentajes de humedad, ya que para este proyecto se trabajó con una humedad del 70,53%.
- Analizar el desgaste de los electrodos producido durante la aplicación del tratamiento electroquímico.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, E. (2015). EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN A ESCALA LABORATORIO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA. Recuperado 10 de febrero de 2016, a partir de http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/4303/3/Aguilar_ae.pdf

Alva, F. (2014). *Hierro Fundido*. Recuperado a partir de http://es.slideshare.net/rc8/clase-11-hierro-fundido

Amador, A., Veliz, E., & Bataller, M. (2014). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones.

Andreoli, C. V. (Ed.). (2007). *Sludge treatment and disposal*. London: IWA Publ.

Aragón Cruz, C. A. (2009). Optimización del proceso de lodos activos para reducir la generación de fangos residuales.

Araujo, A., Calderón, R., Jácome, J., Peñafiel, L., & Salto, J. (2015). SALMONELOSIS.

Armenta, S. L., Camperos, E. R., Vigueros, L. C., Mijaylova, P., & Nacheva, G. M. C. (2007). TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES MUNICIPALES CON UN PROCESO AEROBIO-TERMOFÍLICO. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*.

Avedoy, V. J. G. (2006). *Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos*. Instituto Nacional de Ecología.

Avilés Sacoto, E. C. (2011). Determinación de la efectividad del proceso de lombricultura como tratamiento para la estabilización de lodos residuales provenientes de una planta de tratamiento de aguas.

Barrera-Díaz, C., Martínez-Miranda, V., Lugo-Lugo, V., Bernal-Martínez, L., Linares-Hernández, I., & Pavón-Romero, S. (2015, febrero 10). OXIDACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA PERSISTENTE EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES MEDIANTE TRATAMIENTOS ELECTROQUÍMICOS.

Barrios, J. A., Jiménez, B., González, O., Salgado, G., Sanabria, L., Iturbe, R., & others. (2000). Destrucción de coliformes fecales y huevos de helmintos en lodos

fisicoquímicos por vía ácida. En *Instituto de Ingeniería de la UNAM. XII Congreso Nacional, Femisca, Morelia, México* (pp. 683–692).

Bermeo Barreto, A. M., & Idrovo Heredia, E. P. (2014). Aprovechamiento de lodos deshidratados generados en plantas de tratamiento de agua potable y residual como agregado para materiales de construcción.

Cabeza, F. (2008). *Digestión anaerobia de lodos residuales usando un reactor de manto de lodos no convencional (Tipo UASB)*.

Cabezas, Y. (2011). DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS PROVENIENTES DE EPMAPA – SANTO DOMINGO.

Cabrera, H., Garcés, M., & Paredes, P. (2012). *Proyecto de Desarrollo de Capacidades para el Uso Seguro de Aguas Servidas en Agricultura*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Ministerio de Salud Pública.

Cacua, C., & Saravia, D. (2008). DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE LODOS PARA LA PLANTA BOSCONIA DEL A.M.B S.A E.S P.

CARMONA, I. S. E. V. (2002). DIGESTIÓN ANAEROBIA EN UNA Y DOS ETAPAS DE LODOS RESIDUALES SECUNDARIOS PRETRATADOS QUÍMICAMENTE.

Cerón, M. L., & Soto–Bubert, A. (2004). *Elementos de Electroquímica*.

Chen, X., Chen, G., & Yue, P. L. (2000). Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and purification technology*, *19*(1), 65–76.

Cordero, N. (2010). *MEJORAMIENTO DE SUELO CON BIOSÓLIDOS PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UNAM*.

DE LA ROSA-PÉREZ, D. A., TEUTLI-LEÓN, M., Margarita, M., & RAMÍREZ-ISLAS, M. E. (2007). Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo. *Revista internacional de contaminación ambiental*, *23*(3), 129–138.

Del Castillo, L. F. (1997). *El fenómeno mágico de la ósmosis*. Fondo de Cultura Económica.

Domínguez Tamayo, I. (2014). Selección y dimensionamiento de la nueva linea de tratamiento de lodos de las Edars de Chiclana de la Frontera.

Ensayo de Suelos | Construpedia, enciclopedia construcción. (s. f.).

ETAPA EP - Servicios de Telefonía, Televisión, Internet, Agua Potable, Alcantarillado de Cuenca -Ecuador. (s. f.).

Galvis, J., & Rivera, X. (2013). CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE LOS LODOS PRESENTES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESID UALES INDUSTRIALES (PTARI)DE LA EMPRESA JUGOS HIT DE LA CIUDAD DE PEREIRA.

Galvis, M. R., Hernández, H. J., & Tolosa, E. W. (2015). Sistema de remoción de coloides para aguas crudas mediante electrocoagulación y floculación. *Innovando en la U*, *2*(2).

García, L., Vargas, M., & Reyes, V. (s. f.). Estudio Electrocinético en una celda de Electroremediación.

García, M. A. (2003). METODO ALTERNATIVO PARA TRATAR LODOS DE PLANTAS DE AGUA RESIDUAL EN MEXICO.

García, O. N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos conciencia*, *1*, 51–58.

Ghernaout, D., Badis, A., Kellil, A., & Ghernaout, B. (2008). Application of electrocoagulation in Escherichia coli culture and two surface waters. *Desalination*, *219*(1), 118–125.

Gil, J. (2006). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UNA CELDA ELECTROLÍTICA DEL TIPO HALL-HÉROULT.

Guillemes Peira, Á. (2014). Aplicación de la oxidación avanzada en la desinfección de aguas residuales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, *35*(3), 60-72.

Gutiérrez, M., & Volke, T. (2004). EFECTO DE PRETRATAMIENTOS FISICOQUÍMICOS EN LA BIODEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS DEL PETRÓLEO EN UN SUELO INTEMPERIZADO, POR COMPOSTEO.

Gutiérrez, S. (2008). APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS EN LA REMEDIACIÓN AMBIENTAL.

Isajoc. (2011, junio 12). Celda Electroquimica: celda electrolítica.

Jiménez, B., Barrios, J. A., & Maya, C. (1999). Class B Biosolids Production from Wastewater Sludge with High Pathogenic Content Generated in an Advanced Primary Treatment. Disposal and Utilisation of Sewage Sluge: Treatment Methods and Application Modalities. *Water Resources, Hydraulics and Maritime Engineering NTUA. Athens, Greece*, 13–15.

Jimenez, B. E., & Mendez, J. M. (2005). *Estabilización alcalina de lodos residuales en sistemas cerrados con recirculación de amoniaco opcional*. Google Patents.

Jimenez, B., & Mendez, J. (s. f.). Estabilización alcalina de lodos residuales en sistemas cerrados con recirculación de amoniaco opcional.

Jiménez, C. B., Muñoz, C. A. M., & Barrios Pérez, J. A. (1997). Fundamento Técnico para la Elaboración de la Norma Oficial Mexicana en Materia de Estabilización, Manejo y Aprovechamiento de Lodos Provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Municipales e Industriales. *Elaborado para la Comisión Nacional del Agua (CNA) por el Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto*, *8313*, 107.

Jiménez Molina, E., & Rangel Santiago, E. (2011). *Remoción de metales pesados en una muestra modelo mediante un proceso electroquímico*.

Juárez, M., Sánchez-Andreu, J., & Mataix, J. (1987). Interés agrícola de lodos de depuradoras de aguas residuales. *Anal. Edafol. Agrobiol*, *46*(1-2), 211–228.

KUTER, G., BLACKWOOD, K., LF DÍAZ, J., DONOVAN, D., DURFEE, E., EPSTEIN, J., … others. (1995). WILBER III; WILLIAMS, T. *Biosolids Composting*.

Limón, J. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas ¿Problema o Recurso?

López Cabanes, J. M. (1989). Digestión anaerobia de lodos de depuradora, etapas controlantes y cinética del proceso.

López-Vizcaíno López, R. (2013). Remediación electrocinética de suelos de baja permeabilidad contaminados con compuestos orgánicos hidrofobos.

Macías, J. G. L., & Guadalajara, J. (2013). Los Lodos de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales,?` Problema o Recurso?

Maldonado Rogel, A. N., & Molina Ayala, R. M. (2011). Estudio para la reducción de colorantes de las aguas residuales de la industria textil a través de procesos electroquímicos.

Márquez, S. (2010). Distribución espacial de la presencia de coliformes totales en el embalse de la ESPOL.

Matute Cordero, M. X., Sarmiento Crespo, J. C., & Valdez Arcentales, S. V. (2010). Control Físico-Químico y Microbiológico del agua según INEN 1108: 2006 de la junta de agua potable regional Cojitambo.

Merino del Amo, N. (2010). Fabricación y caracterización de materiales compuestos de matriz metálica reforzados con nanofibras de carbono.

Mexicana, N. O. (1994a). NOM-092-SSA1-1994. Bienes y Servicios. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa. *Diario Oficial de la Federación*, *12*, 6.

Mexicana, N. O. (1994b). NOM-110-SSA1-1994. Bienes y Servicios. Preparación y dilución de muestras de alimentos para su análisis microbiológico. *Diario Oficial de la Federación. DV*, *11*, 16.

Milla González, M. (2014). Procesos electrolíticos industriales. Electrolisis de la sal NaCl en disolución acuosa y como sal fundida.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL MARINO. (2009). Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España.

Molina, M., Trinidad, P., & Cisneros, M. (s. f.). PRETRATAMIENTO TÉRMICO Y DIGESTIÓN ANAEROBIA MESOFÍLICA DE LODOS RESIDUALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOSÓLIDOS DE CLASE A.

Monografias.com, P. G. (s. f.). Electroquímica.

Moscoso, P. A., & Vintimilla, P. L. (2010). Digestión de lodos residuales de las lagunas de oxidación de Ucubamba, Cuenca. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, *11*(1).

Narvaez, W., & others. (2015). EFECTO DE LA APLICACIÓN DE LODOS TEXTILES INDUSTRIALES CRUDOS EN LA CALIDAD, PRODUCCION Y COMPOSICION

QUIMICADEL FRUTO DE TOMATE (Solanum lycopersicum) Y LECHUGA (Lactuca sativa).

Ordoñez, G. A., & others. (1992). Desinfección electrolítica de agua. En *Memoria* (pp. 241–8). Organización Panamericana de la Salud. Programa Medio Ambiente y Salud en el Istmo Centroamericano (MASICA). Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo.

Ortiz, A. (20013). IMPACTO DE LODOS RESIDU ALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA UAAAN EN CALABACITA TIPO ZUCCHINI (Cucúrbita pepo L.).

Paredes Sánchez, R. A., Lascano Morante, G. R., & Tapia Sánchez, A. del R. (2009). Diseño, construcción y puesta en marcha de un equipo piloto didáctico de electrocoagulación y floculación para el tratamiento de efluentes de industrias heladeras.

Pérez, H. M. G. (2000). Electroforesis en geles de poliacrilamida: fundamentos, actualidad e importancia. *Universo Diagnóstico*, *1*(2), 31–4.

Rámila, J., & Rojas, S. (2008). ALTERNATIVAS DE USO Y DISPOSICIÓN DE BIOSÓLIDOS Y SU IMPACTO EN LAS TARIFAS DE AGUA.

Reyes, J., & Vazquez, M. V. (2009). Electrochemical Remediation at Laboratory Scale of the Coal Dump in Paz de Rio (Colombia).

Rodríguez Pérez, R. L. (2013). *Influencia de los fármacos presentes en el agua residual sobre la resistencia de la bacteria Escherichia coli y su eliminación por oxidación avanzada*. Caminos.

Rojas, N., Sánchez, A., Matiz, A., Salcedo, J., Carrascal, A., & Pedroza, A. M. (2010). Evaluación de tres métodos para la inactivación de coliformes y Escherichia coli presentes en agua residual doméstica, empleada para riego.

Rojas, R. (2002). Eliminación de Mircroorganismos por diversos Procesos de Tratamiento.

Ruiz, A. A., & Giraldo, L. F. G. (2012). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, *43*(147), 56-67.

Suárez Hidalgo, S. D. (2014). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de las descargas de un centro comercial de la ciudad de Quito mediante procesos de electrocoagulación y adsorción en carbón activado*. Quito: EPN, 2014.

Torres, P., Escobar, J., Pérez, A., Imery, R., Nates, P., Sánchez, G., … Bermúdez, A. (2005). IINFLUENCIA DEL MATERIAL DE ENMIENDA EN EL COMPOSTAJE DE LODOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES-PTAR.

Torres, P., Madera-Parra, C. A., Silva-Leal, J. A., & others. (2013). Mejoramiento de la calidad microbiológica de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista EIA*.

Trejos Vélez, M., & Agudelo Cardona, N. (2012). Propuesta para el aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa «Comestibles La Rosa» como alternativa para la generación de biosólidos.

Valencia, N. (2008). *SECADO SOLAR DE LODOS*.

Vázquez, M. (2015). Electroquímica: Métodos electroquímicos de tratamiento de contaminantes.

Vera-Reza, A. M., Sánchez-Salinas, E., Ortiz-Hernandez, M. L., Peña-Camacho, J. L., & Ortega-Silva, M. M. (2006). Estabilización de lodos residuales municipales por medio de la técnica de lombricompostaje. En *Memorias del V Congreso Internacional y el XI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. México* (pp. 7–9).

Vinogradov, V., Cuevas, A., & Vinogradov, D. (2011). Activación electroquímica de soluciones acuosas (ECAS). *Ingeniería química*, (498), 68–76.

Whitten, K. W., Gailey, K. D., Davis, R. E., Ortega, M. T. A., & Muradás, R. M. G. (1992). *Química general*. McGraw-Hill Madrid.

Zagal, E., & Sadzawka, A. (2007). PROTOCOLO DE MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA SUELOS Y LODOS.

ANEXOS

ANEXO I

DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

1. MATERIALES Y EQUIPOS

- 2 Pipetas
- Agitador magneto
- 2 Vasos de precipitación de 500 ml

- Papel filtro (8 μm)
- Conductivímetro

2. REACTIVOS

- Solución de cloruro de potasio, KCl, 0,1 mol/L con conductividad eléctrica de 12,9 dS/m y una temperatura de 25°C.
- Solución de cloruro de potasio, KCl, 0,02 mol/L con conductividad eléctrica de 2,77 dS/m y una temperatura de 25°C.
- Solución de cloruro de potasio, KCl, 0,01 mol/L con conductividad eléctrica de 1,41 dS/m y una temperatura de 25°C.

3. PROCEDIMIENTO

1. Con la ayuda de una balanza de proceder a pesar 20 gramos de la muestra que se requiere analizar , una vez que se haya secado en una estufa regulada con temperatura de 105ºC±5°C hasta alcanzar una masa constante.
2. En un vaso de precipitación de 500 ml se agrega la muestra más 100 ml de agua destilada, y a esta mezcla se le agrega el agitador magnetido para remover homogéneamente durante 30 minutos, ajustando la temperatura a 20º.
3. Al pasar el periodo de tiempo ya mencionado (30 min) se coloca la muestra en un embudo, el cual contiene un papel filtro para realizar la filtración al vació el cual contiene el papel filtro. Este proceso se indica en la **Ilustración 15.**

Ilustración 15 Proceso de filtración al vacío

Fuente: Autora

Finalmente se recoge el filtrado de la muestra que se encuentra en el vaso de precipitación, e introducimos el conductimetro determinando así el valor de la conductividad eléctrica. El conductimetro que se aplicó en la determinación de la conductividad se muestra en la **Ilustración 16.**

Ilustración 16 Conductimetro utilizado en el proceso

Fuente: Autora

ANEXO II

MARCHA ANALÍTICA PARA DETERMINAR EL PH MEDIANTE LA DETERMINACIÓN POTENCIOMÉTRICA (LODOS Y SUELOS)

1. MATERIALES Y EQUIPOS

- 1 Varilla de vidrio
- 4 Envases de vidrio.
- 3 Vasos de precipitación de 500 ml.
- pH-metro

- 2 pipetas de 10 ml
- Termómetro
- Espátula
- Balanza.
- Agitador magnético.

2. PROCEDIMIENTO

- En primer lugar se pesan dos muestras de lodos, las mismas que se obtuvieron de la PTAR Ucubamba. La diferencia entre estas dos muestras es que para la primera se tomaron 20 gramos directamente del lodo deshidratado de la planta depuradora ya mencionada, mientras que la segunda luego de ser adquirida, fue sometida a un proceso de secado, de la cual se extrajeron de igual manera 20 gramos.

Ilustración 17 Pesado de la muestra

Fuente: Autora

- Se mide en un vaso de precipitación 50 ml de agua destilada y se les añade a las dos muestras previamente pesadas, las mismas que se encuentran bajo a una temperatura que oscila en un rango de 20ºC-25ºC.
- Una vez que mezcladas con agua destilada, son removidas con un agitador magnético durante un tiempo de cinco minutos.
- Como último paso se deja reposar la muestra por dos horas y se mide el pH de la muestra.

Ilustración 18 Medición del pH a través del pH-metro SevenMulti^MT

Fuente: Autora

ANEXO III

MARCHA ANALÍTICA PARA DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

1. MATERIALES Y EQUIPOS

- Varilla de vidrio
- Espátula
- 3 Vasos de precipitación de 100 ml.
- Luna
- Analizador de humedad

2. PROCEDIMIENTO

- Como primer paso, hay que tarar el analizador, en el que abre la cámara se coloca un plato nuevo y limpio, se cierra la cámara y está listo para analizar la muestra de interés.

Ilustración 19 Colocación del plato para la tara en el analizador de humedad

Fuente: Autora

Se abre la cámara del analizador y se coloca la muestra previamente pesada, la cual debe estar en un rango entre 3.5-5.8 gramos, expandiéndolos con la ayuda de una espátula por todo el plato.

Una vez colocada la muestra en la parte interna, se cierra la cámara y automáticamente, después de un determinado tiempo, el analizador se para, mostrando como resultado el porcentaje de humedad.

Ilustración 20 Determinación de la humedad

Fuente: Autora

ANEXO IV

DETERMINACIÓN Y RECUENTO DE COLIFORMES TOTALES Y FECALES (E.COLI) MEDIANTE METODO TRADICIONAL DE CULTIVO: AOAC OFFICIAL METHOD 991.14

1. MATERIALES Y EQUIPOS

- Envases estériles
- Tubos de ensayo, pipetas, micropipetas y probetas estériles
- Balanza
- Cámara de flujo laminar.
- Mechero
- Espátula
- Varilla de vidrio
- Aplicador Petrifilm.
- Estufa de incubación

2. REACTIVOS, SOLUCIONES, Y MEDIOS DE CULTIVO

- Agua Peptonada Tamponada (APT)
- Placas Petrifilm para el recuento de *E. coli* y coliformes.

3. MÉTODO

Se procedió a realizar el Agua de peptona, diluyendo 15 gr de peptona en 1 litro de agua destilada, la cual se contenía en un Erlenmeyer de 1000 ml.

Para que la dilución se realice en un menor tiempo, se procedió a colocar un agitador magneto.

Ilustración 21 Agua Peptonada Tamponada

Fuente: Autora

Una vez obtenido este medio de cultivo, se procedió a esterilizar tubos de ensayo, pipetas, en la autoclave.

Ilustración 22 Esterilización de materiales

Fuente: Autora

Al tener el material estéril se procedió a trabajar en la cámara de flujo laminar, en donde se realizaron diluciones con el medio de cultivo y las 8 muestras de lodo que habían sido sometidas a procesos electroquímicos, a diferentes tiempos, tipos de electrodos y distancia entre los mismos, tomando en cuenta que se tomó una muestra inicial para evaluar la conductividad eléctrica, pH, y humedad.

Se pesaron 10 gr del lodo de cada una de las muestras incluyendo la inicial, y fueron diluidos en 90 ml de APT por separado, obteniendo una dilución de 10^{-1}, de esta nueva dilución se tomó 1 ml y se agregó en 9ml de APT, obteniendo una dilución de 10^{-2}, y así se realizaron 2 diluciones más; 10^{-3}, trabajando con la última dilución con el fin de obtener placas con recuentos contables, ya que las muestras tenían una alta carga bacteriana.

Ilustración 23 Elaboración de las diluciones

Fuente: Autora

Se toma 1ml de la dilución 10^{-3} con una micropipeta y se coloca directamente en la placa petrifilm (film interior) y bajamos con mucho cuidado el film superior, evitando que se formen bombas de aire. Después colocamos el aplicador con la cara lisa hacia abajo, en el centro de la placa y se lo presiona de manera que el inoculo se distribuya de una manera homogénea por toda la placa y lo retiramos.

Al trabajar con material estéril, todo el proceso fue desarrollado dentro de la cámara de flujo laminar para luego proceder a la incubación.

4. INCUBACIÓN

Según el método usado, se incuban las placas en posición horizontal, cara arriba en pilas de hasta no más de 20 placas, a una estufa incubadora con temperatura de 35 ºC ± 1ºC, en el caso de *E.coli* a un tiempo de 48 horas y coliformes 24 horas.

5. CÁLCULOS

Para obtener el recuento de *E.coli* confirmados se enumeraron las colonias azules a rojo-azuladas asociadas a gas atrapado, independientemente del tamaño o intensidad de color. Las colonias azules sin gas no se contaron como *E.coli*. Las colonias rojas y asociadas con gas son las correspondientes a coliformes, por lo tanto no fueron consideradas dentro del recuento final de *E.coli*. En las placas Petrifilm no existieron más de 150 colonias por lo que no fue necesario realizar ningún tipo de estimación. Para obtener los resultados en la unidad UFC/g se procedió a multiplicar cada uno de los coliformes encontrados por el factor de dilución (1:1000).

Ilustración 24 Contabilización de coliformes totales y fecales *(E. coli)*

Fuente: Autora

ANEXO V

CUANTIFICAZIÓN DE HIPOCLORITO DE SODIO

1. MATERIALES Y REACTIVOS

- Cristales de yoduro de potasio
- Solución indicadora de almidón al 0,5%
- Tiosulfato de sodio 0,1 N
- Ácido acético glacial
- Papel filtro
- Embudos

2. PROCEDIMIENTO

Se pesó 2.5gr de cada una de las muestras y se procedió a colocar en el papel filtro y después en un embudo.

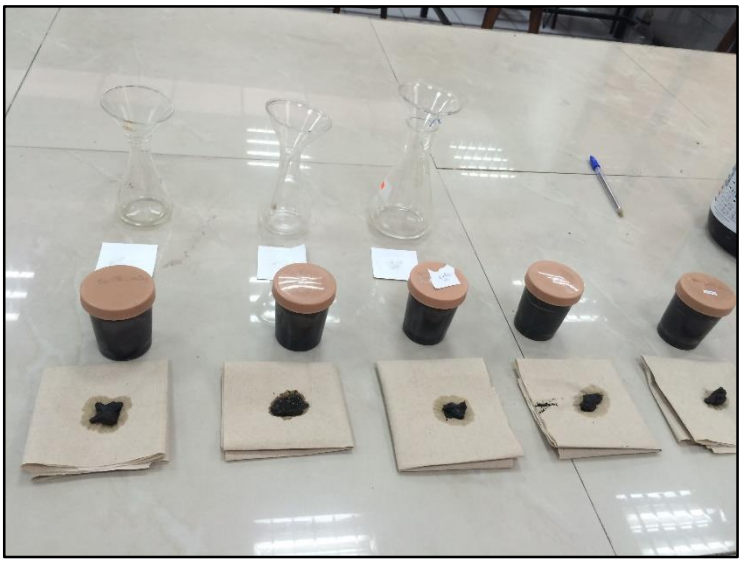


Ilustración 25 Control del peso de cada una de las muestras (2.5 gr)

Fuente: Autora

Se procede a hacer varios lavados de la muestra con agua destilada hirviente con el objetivo de filtrar, y obtener un volumen de 25 cm^3.

Una vez obtenido el volumen ya mencionado, se transfirió a un balón volumétrico de 1 litro y se llevó a volumen con agua destilada.

Se tomó con la pipeta 25 cm^3 de esta solución y se colocó en un vaso de precipitación de 100 ml y se adicionó aproximadamente 1 g de cristales de yoduro de potasio. Posteriormente se acidificó con 4 cm^3 de ácido acético glacial.

Ilustración 26 Reactivos utilizados para la solución

Fuente: Autora

Posteriormente, se tituló con tiosulfato de sodio 0,1 N, hasta cuando el color amarillo del yodo desapareció. Se adicionó alrededor de 1 cm3 de la solución indicadora de almidón y se continuó la titulación hasta que el color desaparezca.

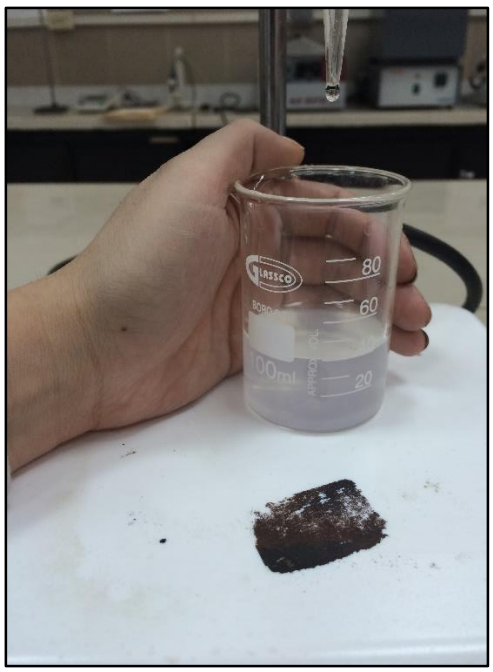
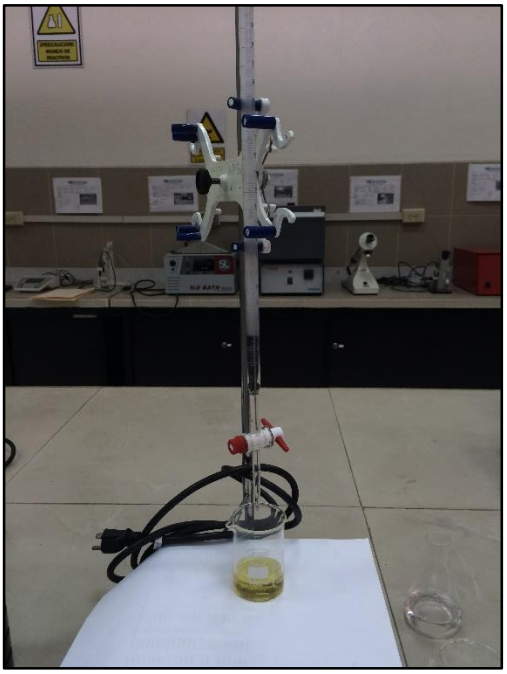



Ilustración 27 Proceso de Titulación

Fuente: Autora

3. CÁLCULOS

El contenido de cloro disponible en porcentaje en volumen se calculó de la siguiente manera:

$$C = \frac{\mathbf{VxNx141,8}}{\mathbf{V_m}}$$

Siendo:

- **C:** Cloro disponible en porcentaje en volumen.
- **V:** Volumen de tiosulfato de sodio, en cm3.
- **N:** Normalidad del tiosulfato de sodio (0.011 N).
- $\mathbf{V_m}$: Volumen de la muestra, en cm^3.
- **Factor de conversión:** 141.8

Cabe recalcar que el volumen de Tiosulfato de sodio (cm^3) para las titulaciones de las diferentes muestras sometido a diferentes tiempos, se muestran en la siguiente tabla:

Volumen de Tiosulfato de Sodio utilizado para tiempo de 10-90 minutos

Tiempo	Volumen de tiosulfato
10 min	1,9
20 min	2,9
30 min	3,2
50 min	5,6
70 min	9,7
90 min	14,1

Fuente: Autora