



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE
COLOR, TURBIDEZ Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN EN AGUAS DE LAVADO DE BASALTO
EN LA INDUSTRIA DE CONSTRUCCIÓN**

Ana del Milagro Escobar Guerra

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, septiembre de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE
COLOR, TURBIDEZ Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN EN AGUAS DE LAVADO DE BASALTO
EN LA INDUSTRIA DE CONSTRUCCIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANA DEL MILAGRO ESCOBAR GUERRA
ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADORA	Inga. Cinthya Patricia Ortiz Quiroa
EXAMINADORA	Inga. Dina Lissette Estrada Moreira
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE COLOR, TURBIDEZ Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN EN AGUAS DE LAVADO DE BASALTO EN LA INDUSTRIA DE CONSTRUCCIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 6 de febrero de 2020.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ana del Milagro Escobar Guerra', enclosed within a circular scribble.

Ana del Milagro Escobar Guerra

Guatemala 13 de abril de 2023

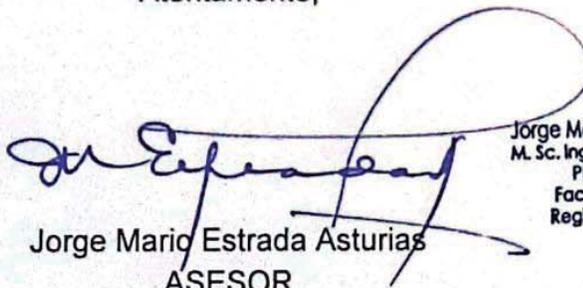
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Williams Guillermo Álvarez Mejía:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final en la modalidad TESIS, con seminario de investigación, del trabajo de graduación titulado: "EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE COLOR, TURBIDEZ Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN EN AGUAS DE LAVADO DE BASALTO EN LA INDUSTRIA DE CONSTRUCCIÓN.", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Ana del Milagro Escobar Guerra, quien se identifica con el registro académico 200925282 y con el CUI 2216865920101.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Jorge Mario Estrada Asturias
ASESOR

Ingeniero Químico
Colegiado activo no. 685

Jorge Mario ESTRADA ASTURIAS
M. Sc. Ingeniero Químico Col. 685
PROFESOR TITULAR
Facultad de Ingeniería
Registro USAC 20080059



Guatemala, 09 de agosto de 2023.
Ref. EIQ.TG-IF.017.2023.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **096-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Ana Del Milagro Escobar Guerra**.
Identificado con número de carné: **2216865920101**.
Identificado con registro académico: **200925282**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **TESIS (Informe Final, Seminario de Investigación)**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE COLOR, TURBIDEZ Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN EN AGUAS DE LAVADO DE BASALTO EN LA INDUSTRIA DE CONSTRUCCIÓN

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Jorge Mario Estrada Asturias, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Jorge Emilio Godínez Lemus
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
INGENIERO QUÍMICO
Colegado 874

C.c.: archivo





LNG.DIRECTOR.198.EIQ.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE COLOR, TURBIDEZ Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN EN AGUAS DE LAVADO DE BASALTO EN LA INDUSTRIA DE CONSTRUCCIÓN**, presentado por: **Ana del Milagro Escobar Guerra** , procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Williams G. Alvarez Mejia: Mg.I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre de 2023.



LNG.DECANATO.OI.673.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE COLOR, TURBIDEZ Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN EN AGUAS DE LAVADO DE BASALTO EN LA INDUSTRIA DE CONSTRUCCIÓN**, presentado por: **Ana del Milagro Escobar Guerra**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.

Guatemala, octubre de 2023

JFGR/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por la vida que me ha dado, por bendecir mis planes, iluminar mi camino y guiar mis pasos. Por permitirme crecer y conocer más de la vida, por permitirme alcanzar esta meta. Gracias Dios por bendecirme con tu inmenso amor.

Virgen María

Por ser la intercesora de mis peticiones, por acompañarme en todo momento, porque jamás ha dejado de escucharme. Gracias Adorada Virgen, por todas las bendiciones que derramas cada día en mi vida y alma.

Mi abuela

Marta Cabrera, por ser un ejemplo de vida, por cuidar de mí, por todos sus consejos, por escucharme en todo momento, por ser mi amiga y por todo su amor incondicional.

Mi madre

Ana Lidia Guerra, por ser mi ángel en la tierra, por cuidar de mí siempre, por estar siempre conmigo, por tus consejos, por tu apoyo incondicional, por ser mi inspiración. Gracias, madre por tu esfuerzo, dedicación y amor.

Mi padre

Marco Tulio Escobar, por guiarme, gracias por tu apoyo, por tu sabiduría y por tus consejos. Gracias, papá por amarme siempre.

Mi hermano

Luis Pablo Escobar, por ser mi amigo todos estos años, por compartir estos momentos de la vida, por sus consejos, por su apoyo incondicional. Gracias Pablo por tu amor.

Mis tíos y tías

Dora Violeta Guerra, Giovanni González, Claudia Rabbé de González, les agradezco por sus consejos, por el apoyo que me han brindado, por compartir conmigo y ser parte de mi vida.

Mis primos y primas

Por su cariño y apoyo incondicional. A mi prima Marta María Guerra, por ser mi mejor amiga, por estar conmigo, por sus consejos, por escucharme, y por su apoyo incondicional. Cuenten conmigo siempre.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudio, por permitirme adquirir nuevos conocimientos y aportar a mi vida muchos aprendizajes. Gracias gloriosa tricentenaria, soy san carlista de corazón.
Facultad de Ingeniería	Por todas las enseñanzas y conocimientos que me permitió adquirir para poder desempeñarme como una buena profesional en mi vida.
Mi asesor	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias, por brindarme su tiempo, asesoramiento y apoyo durante todo el proceso de este trabajo de graduación. Gracias por compartir sus conocimientos.
Laboratorio	Por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto de graduación en sus instalaciones.
Mis amigos	Por todos los momentos compartidos buenos y malos que vivimos juntos en nuestra carrera. Gracias a todos aquellos que formaron parte y que hicieron de mis años de estudiante los mejores años de mi vida, por permitirme conocerlos, compartir y aprender con ustedes. A mis catedráticos a quienes puedo llamar también mis amigos.

Y en especial a Estuardo Herrera Jerez por brindarme su cariño y amistad en esta nueva etapa de mi vida. Gracias por su amistad a todos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. MARCO CONCEPTUAL	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	6
1.3. Determinación del problema	7
1.3.1. Definición	7
1.3.2. Delimitación	8
1.4. Hipótesis	8
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Electrocoagulación	9
2.2. Equipo	10
2.2.1. Coagulación	11
2.2.2. Floculación	11
2.2.3. El ánodo y el cátodo	12
2.2.4. Factores que afectan la electrocoagulación	14
2.2.5. Factores que afectan la electrocoagulación	15
2.2.6. Desventajas de la electrocoagulación	17
2.2.6.1. Propiedades del agua	17

2.3.	Contaminación del agua	18
2.3.1.	¿Cuáles son los mayores contaminantes del agua?	18
2.3.2.	Contaminación de agua por materiales de construcción	20
2.4.	Basalto	21
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	23
3.1.	Localización	23
3.1.1.	Variables	23
3.2.	Delimitación del campo de estudio	24
3.3.	Recursos humanos disponibles	24
3.4.	Recursos materiales	25
3.5.	Técnica cuantitativa	26
3.5.1.	Creación de reactor de electrocoagulación	26
3.6.	Recolección y ordenamiento de la Información	27
3.7.	tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	28
3.8.	Análisis estadístico	34
3.8.1.	Análisis de varianza ANOVA	34
3.8.2.	Análisis de tendencia central y desviación estándar	36
3.9.	Análisis de Tukey	36
3.9.1.	Diseño experimental	38
4.	RESULTADOS	39
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	53

CONCLUSIONES	57
RECOMENDACIONES	59
REFERENCIAS	61
APÉNDICES	65
ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Sistema de electrocoagulación	10
Figura 2.	Celda electrolítica	13
Figura 3.	Calidad del agua	21
Figura 4.	Basalto	22
Figura 5.	Muestra 1 turbidez en función del tiempo	39
Figura 6.	Muestra 2 turbidez en función del tiempo	40
Figura 7.	Muestra 3 turbidez en función del tiempo	41
Figura 8.	Muestra 4 turbidez en función del tiempo	42
Figura 9.	Muestra 5 turbidez en función del tiempo	43
Figura 10.	Muestra 6 turbidez en función del tiempo	44
Figura 11.	Muestra 1 color en función del tiempo	45
Figura 12.	Muestra 2 color en función del tiempo	46
Figura 13.	Muestra 3 color en función del tiempo	47
Figura 14.	Muestra 4 color en función del tiempo	48
Figura 15.	Muestra 5 color en función del tiempo	49
Figura 16.	Muestra 6 color en función del tiempo	50

TABLAS

Tabla 1.	Variables de operación	23
Tabla 2.	Recursos materiales a utilizar	25
Tabla 3.	Recursos materiales a utilizar	25
Tabla 4.	Datos experimentales	27

Tabla 5.	Datos experimentales	27
Tabla 6.	Datos experimentales 1	28
Tabla 7.	Datos experimentales 2	29
Tabla 8.	Datos experimentales 3.....	30
Tabla 9.	Datos experimentales 4.....	31
Tabla 10.	Datos experimentales 5.....	32
Tabla 11.	Datos experimentales 6.....	33
Tabla 12.	Datos de análisis de varianza	35
Tabla 13.	Datos tendencia central media y desviación estándar.....	36
Tabla 14.	Datos método Tukey	37
Tabla 15.	Datos método Tukey	37
Tabla 16.	Porcentaje de remoción de sólidos por electrocoagulación.....	50

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
h	Altura
ArEC	Área del reactor de electrocoagulación
AE	Área efectiva del ánodo
Q	Caudal
X²	Chi-cuadrado
r	Coefficiente de correlación de una muestra
ρ	Coefficiente de correlación para una población
R²	Coefficiente de determinación
sd o SD	Desviación estándar
σ	Desviación estándar
s	Desviación estándar de una muestra
d	Diferencia entre datos apareados
EC	Electrocoagulación
SEM	Error estándar de la media
σ\bar{x}	Error estándar de la media
SEP	Error estándar de la proporción
σ\hat{p}	Error estándar de la proporción
f	Frecuencia (es decir, con qué frecuencia sucede algo)
f/n	Frecuencia relativa
d.f	Grados de libertad
v	Grados de libertad
PAC	Hidroxiclورو de aluminio
H 1 o H a	Hipótesis alternativa

Ho	Hipótesis nula
b o b 0	Intersección con y
IC	Intervalo de confianza
Pk	k-ésimo percentil
P(AC) o P(no A)	La probabilidad de que A no suceda
P(B A)	La probabilidad de que ocurra el evento B, dado que ocurre el evento A
E	Margen de error
μ	Media
\bar{x}	Media de una muestra
M	Mediana
α	Nivel de significación (error tipo I)
m	Pendiente de una recta
b 1	Pendiente de una recta (usada en regresión)
pHf	pH final
pHi	pH inicial
PAM	Poliacrilamida
%DQO	Porcentaje de remoción de demanda química de oxígeno
%O&G	Porcentaje de remoción de grasas y aceites
%SST	Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales
%Turbidez	Porcentaje de remoción de turbidez
1-β	Potencia estadística
Q1	Primer cuartil
q	Probabilidad de fallo en una distribución binomial o geométrica
β	Probabilidad de un error tipo II
P(A)	Probabilidad del evento A

\hat{p}	Proporción muestral
HT	Prueba de hipótesis
t	Puntuación t
z	Puntuación z
IQR	Rango intercuartílico
n	Tamaño de la muestra o número de intentos en un experimento binomial
N	Tamaño de la población
Tf	Temperatura final
Ti	Temperatura inicial
Q3	Tercer cuartil
t	Tiempo de electrocoagulación o tiempo de residencia
x	Un valor de datos
X	Una variable
p	Valor p, o probabilidad de éxito en un experimento binomial, o proporción poblacional
VrEC	Volumen del reactor

GLOSARIO

Absorbancia	Medida de la atenuación de una radiación al atravesar una sustancia, que se expresa como el logaritmo de la relación entre la intensidad saliente y la entrante.
Agua residual	Aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo.
Anión	Ion con carga eléctrica negativa, un anión tiene más electrones que protones y es atraído por una carga positiva.
Ánodo	Electrodo donde ocurre la oxidación es decir los electrones fluye de electrolito a electrodo.
Catión	Ion con carga eléctrica positiva, un catión tiene menos electrones que protones y es atraído por una carga negativa.
Cátodo	Electrodo donde ocurre la reducción, los electrones fluyen desde el electrodo al electrolito.
Celda electrolítica	Dispositivo utilizado para la descomposición de sustancias ionizadas mediante corriente eléctrica, consiste en al menos dos electrodos conductores

normalmente metales en contacto con conductores iónicos o también llamados electrolitos.

Coagulación	Desestabilización de las partículas para conseguir que las fuerzas de atracción tipo vander Walls que existen entre dos partículas predominen sobre las de repulsión electrostática, logrando que estas se unan y formen sólidos de mayor tamaño.
Coagulante	Sustancias químicas empleadas en la coagulación.
Conductividad	Medida de la capacidad de una solución acuosa para transmitir una corriente eléctrica, esta depende de la presencia de iones.
Corriente eléctrica	Es la velocidad de cambio de la carga respecto al tiempo su medida se da en Amperios.
Efluente	Resultado final del agua residual tras haber pasado por un proceso de tratamiento.
Electrocoagulación	Proceso que separa simultáneamente metales pesados, compuestos orgánicos emulsionados y otros contaminantes del agua aplicando una tensión de corriente directa a electrodos inmersos en el reactor.
Electrocoagulador	Reactor en donde se desarrolla el proceso de electrocoagulación.

RESUMEN

Se diseñará el sistema para la evaluación de un sistema de electrocoagulación para la remoción de color, turbidez y sólidos en suspensión en aguas de lavado de basalto en la industria de construcción por medio del diseño y construcción de un reactor a pequeña escala de electrocoagulación. Para alcanzar los objetivos se llevará a cabo un estudio experimental de observación y toma de datos estableciendo las distintas variables dependientes e independientes las cuales permitirán evaluar la posibilidad del experimento determinando para ello tres características físicas y organolépticas del agua que son color, turbidez y sólidos en suspensión para evaluar la remoción del material de construcción basalto en agua.

Posteriormente evaluado el sistema de electrocoagulación se puede caracterizar la calidad del agua a diferentes voltajes, y tiempos para determinar los porcentajes de eficiencia de remoción de basalto en el agua a las condiciones iniciales del tratamiento, para concluir acerca de los parámetros óptimos de operación de un sistema de electrocoagulación.

OBJETIVOS

General

Evaluar un sistema de electrocoagulación para la remoción de color, turbidez y sólidos en suspensión en aguas de lavado de basalto en la industria de construcción.

Específicos

1. Caracterizar la calidad del agua antes del tratamiento de electrocoagulación.
2. Determinar las condiciones de voltaje y amperaje para optimizar el proceso de electrocoagulación.
3. Caracterizar la calidad del agua después del tratamiento de coagulación a diferentes voltajes, tiempos y números de placas.
4. Determinar los porcentajes de eficiencia de remoción de color, turbidez y sólidos en suspensión para concluir sobre los parámetros óptimos de operación del sistema de electrocoagulación.

INTRODUCCIÓN

La electrocoagulación es un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados. La técnica consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, dentro de los más comúnmente utilizados están el hierro y el aluminio. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes, bien sea suspendidas o emulsificadas. Es así que los contaminantes presentes en el medio acuoso forman agregados, produciendo partículas sólidas que son menos coloidales y menos emulsificadas (o solubles) que en estado de equilibrio. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y se pueden remover fácilmente por algún método de separación de tipo secundario (Mollah, Schennach, Parga, y Cocke, 2001).

En la actualidad la contaminación producida por distintos procesos de construcción tiene como sumidero los cuerpos hídricos que con el proceder del tiempo han disminuido su capacidad de resiliencia creándose de esta manera bastantes impactos ambientales acerca de los componentes bióticos, abióticos y sociales.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

Para empezar a presentar los antecedentes de la electrocoagulación es que estudia los procesos químicos producidos por la corriente eléctrica.

Uno de los tratamientos para las aguas residuales generadas en el galvanizado, tiene que ver con el empleo del principio de la electroquímica, según métodos tradicionales como: electrocoagulación, electroflotación y electro sustancias presentes en los efluentes industriales. Estos métodos poseen ventajas económicas y ambientales sobre los métodos tradicionales de remoción con empleo de productos químicos. Entre las ventajas de los métodos electroquímicos, se encuentran los beneficios ambientales, la eficiencia de energía, la seguridad, la facilidad de automatización del proceso y los bajos costos. (Morales y Acosta 2010, p. 36)

La aplicación de la técnica de electrocoagulación está en tener una alternativa para el tratamiento de aguas residuales que la hará útil en algunos casos, pero sin sustituir totalmente los procedimientos químicos y biológicos que se han venido aplicando desde tiempos muy remotos. La

naturaleza misma ha mitigado los impactos ambientales causados por el hombre, restablecido el equilibrio ecológico y biológico necesario para la supervivencia de este. (Morante, 2002, p. 12)

Los iones liberados durante la electrocoagulación forman largas cadenas de poli hidróxidos, los cuales son diferentes a los formados en la coagulación convencional cuando se añaden sales químicas, debido a que tienen diferente estructura hidratada. Esta situación permite retirar, retener y desecar con mayor facilidad los lodos residuales. Los flocs formados de esta forma son menos hidratados, conteniendo menos agua ligada y por lo tanto se compactan más fácilmente. (Martín, Rivera, Piña y Pérez 2008, p. 497)

La electrocoagulación es una técnica utilizada para el tratamiento de diversas aguas residuales. En este proceso son removidos los contaminantes que se encuentran suspendidos, emulsionados o disueltos en el medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados. Sin embargo, en este caso no se hace uso de un coagulante químico, cuya función es llevada a cabo por la corriente eléctrica aplicada al medio contaminado. (Alvaro y Garcés, 2009, p. 52)

Desde esta perspectiva, la electrocoagulación se convierte en un proceso electroquímico que puede tener resultados exitosos en su aplicación optimizando los factores que lo conforman, alcanzando el reto de proteger, conservar y recuperar el recurso hídrico. Así cuando el también denominado lactosuero no es aprovechado económicamente y se convierte en un residuo acuoso y vertido a los canales de aguas residuales, se magnifica el impacto ambiental por el incremento de la DQO. Aplicar nuevas técnicas de reducción de las cargas orgánicas con elevadas. (Prieto, Callejas, Reyes y Marmolejo, 2012, p. 52)

Una de estas tecnologías es la electrocoagulación, que es un proceso electroquímico donde se utiliza la corriente eléctrica para eliminar contaminantes que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados en un medio acuoso. La corriente eléctrica se hace pasar a través de electrodos generalmente de aluminio y fierro, los cuales pueden trabajar como ánodo o cátodo respectivamente, generando coagulantes por la disolución de iones en los electrodos. En el ánodo es donde se generan los iones metálicos, el cual es conocido como electrodo de sacrificio, ya que la placa se disuelve progresivamente. En cambio, en el cátodo hay una liberación de burbujas de hidrógeno gaseoso que permiten la flotación de las partículas coaguladas. (Aguilar, 2016, p. 70)

La electrocoagulación es una tecnología que se ha venido desarrollando en los últimos años y que se presenta como alternativa de tratamiento para las aguas residuales de estas industrias, al ofrecer múltiples ventajas comparativas con las tecnologías tradicionales. Objetivo. Estudiar la remoción del colorante azoico tartrazina de soluciones acuosas usando electrocoagulación con electrodos de hierro y aluminio. Materiales y métodos. Se trataron por electrocoagulación, aguas residuales sintéticas. (Arango, 2009, p. 58)

La experimentación realizada concluye sobre los buenos resultados de la aplicación del sistema de electrocoagulación, en relación con el grado de cumplimiento respecto a las normativas actuales de reutilización. Los resultados garantizan las posibilidades del proceso en la eliminación de: la turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), DQO y fosfatos en fósforo total, así como en la eliminación de microorganismos. (Hernández, 2011, p. 2)

La remoción de metales pesados en aguas residuales por algunos métodos ha preocupado a las autoridades ambientales, debido a los altos costos, además de la generación de residuos secundarios y en algunas ocasiones la poca eficiencia de los procesos empleados. Con el fin de retirar metales pesados en aguas, se han desarrollado estudios en el

campo de la electrocoagulación, postulando dicho proceso como alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales, ya que éste genera pocos residuos secundarios, es rentable económicamente y tiene altos porcentajes de remoción, cercanos o iguales al cien por ciento. El presente trabajo muestra una recopilación bibliográfica de los últimos años que evidencia el uso e importancia de la electrocoagulación con el fin de remover diferentes metales como: hierro, níquel, cobre, zinc, plomo, cadmio, mercurio y cromo hexavalente, presentes en aguas residuales, para mejorar los parámetros en el proceso de remoción de estos contaminantes ambientales que son tan perjudiciales para la salud. (Acosta y Coy, 2013, p. 306)

Este estudio electroquímico muestra que es posible disminuir en un 98 % la coloración de los residuos de tinturado de una curtiembre en menos de 10 minutos de reacción, si se electrogenera el floculante (electrocoagulación) en un sistema monopolar constituido por un cátodo de grafito y un ánodo de hierro, aluminio o cobre sometidos a una corriente constante. (Orozco, 2012, p. 51)

Basándonos en los antecedentes anteriores se evidencia que se puede ejecutar el proyecto, se puede reforzar la aplicación del sistema de electrocoagulación en distintos tratamientos para remover partículas no deseadas.

1.2. Justificación

La mala calidad del agua impacta en la vida de miles de personas que dependen de lo que producen los ríos, los cuales son afectados por la acumulación de basura, y contaminantes que hace que el vital líquido no sea apto ni para la recreación y mucho menos para el riego de cultivos o el consumo humano en Guatemala.

El uso de la electrocoagulación, nos permite la remoción de un contaminante y realizarla en una sola operación, debido a que no necesita de procedimientos anexos para llevar a cabo la extracción del mismo, sino que este se realiza a condiciones in situ, situación que convierte a esta tecnología en una opción económica, para el tratamiento de aguas residuales de industrias o construcción, hablando en términos de sus componentes físicos, materiales y consumo energético necesarios para el montaje y operación del proceso a pequeña escala, donde son significativamente menores en comparación con una escala tipo industrial donde sus costos aumentan proporcionalmente, debido a que dependen del caudal a tratar, la naturaleza del agua residual, los contaminantes a ser removidos y de la región o localidad en la que se realizará el tratamiento, además que el capital y los costos de operación son menores en comparación con un tratamiento de coagulación química.

Las tecnologías electroquímicas han sido utilizadas para rescatar metales, para distintos tratamientos de agua potable o aguas residuales, hasta para la remoción de contaminantes de productos industriales, lavandería, textiles, combustibles, emulsiones, entre otros, por lo cual es de suma importancia buscar métodos para recuperar el agua. El país no cuenta con una ley de aguas que regule su calidad.

Por lo que evaluar un sistema de electrocoagulación para la remoción de color, turbidez y sólidos en suspensión resulta factible como solución para disminuir partículas no deseadas en agua.

1.3. Determinación del problema

Surge de la necesidad de preservar el recurso natural del agua en condiciones óptimas para el uso de las personas y de la importancia de conocer tratamientos de aguas que contengan otros elementos.

1.3.1. Definición

El agua es el componente principal para la materia viva, este líquido incoloro, inodoro e insípido es esencial para la supervivencia y se encuentra presente en infinidad de procesos tanto químicos como fisiológicos; cada una de las propiedades de este líquido vital hace que un individuo no pueda estar excluido de un entorno sin agua.

Una de las principales causas de la contaminación de los diferentes cuerpos de agua es la cantidad de nutrientes y materia orgánica que son vertidos en ellos como resultado de las diferentes actividades antropogénicas. El exceso de nutrientes en el agua, principalmente nitrógeno y fósforo, genera un deterioro del recurso hídrico y en general de los ecosistemas acuáticos debido a la afectación de la calidad fisicoquímica del agua. Dicha contaminación es generada principalmente por las aguas residuales que no reciben un tratamiento adecuado dado que la mayoría de los casos se necesitan sistemas de tratamiento eficientes para el manejo de las aguas residuales que requieren inversiones sustanciales de capital que las comunidades no están en capacidad de pagar.

1.3.2. Delimitación

El problema se delimitó al estudio de aguas residuales provenientes de la industria de construcción que contienen gravas.

1.4. Hipótesis

Es posible evaluar un sistema de electrocoagulación para la remoción de color, turbidez y sólidos en suspensión en aguas de lavado de basalto que sea eficiente.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Electrocoagulación

El fundamento de la operación coagulación – floculación radica en que las partículas que se hallan en suspensión en el agua tienen un carácter eléctrico que las hace recolectoras de iones de carga opuesta, formando agregados más grandes llamados flocs, los cuales por su mayor peso sedimentarán por gravedad. Los iones necesarios para la coagulación en un proceso químico son aportados por compuestos como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, que entran en disociación en solución, provocando el efecto deseado de la coalescencia de las partículas.

Por otra parte, en un proceso electroquímico, los iones son aportados por el metal de los electrodos entre los cuales se aplica una diferencia de potencial, ocasionando un reajuste de cargas lo que provoca la unión y/o aglomeración de partículas para su posterior sedimentación. Las partículas suspendidas en el agua presentan un grado elevado de estabilidad debido a su carga, que generalmente es negativa; lo que se consigue con la Electrocoagulación es, por medio de una corriente eléctrica, generar una buena cantidad de iones de carga contraria (positiva) que producen la neutralización (desestabilización) de esas partículas; la materia desestabilizada se agrega para formar partículas de mayor peso, lo que hace más fácil su eliminación por cualquier método de separación, como por ejemplo la filtración.

2.2. Equipo

El reactor electrolítico, donde se realiza la EC, es un recipiente de termoplástico como el que se muestra en la figura 1. Consta de una fuente de energía para inducir la corriente eléctrica y de los electrodos dispuestos de forma intercalada dentro del reactor, estos van cubiertos por el agua a tratar.

El material de los electrodos varía de acuerdo al tipo de sistema utilizado, estos pueden ser de hierro, de aluminio, cobre, acero o aleaciones de aluminio y magnesio. (Morante, 2002)

Las partículas coloidales se desestabilizan con la adición de iones multivalentes (Fe^{+++} y Al^{+++}). Los electrodos son de sacrificio, según Faraday, debido a que en el proceso electrolítico desprenden en el agua los iones que desestabilizan los coloides.

Figura 1.

Sistema de electrocoagulación



Nota. Reactor usado en la electrocoagulación. Elaboración propia.

Durante el proceso se generan compuestos que desestabilizan las suspensiones y emulsiones provocando su floculación; de igual manera ocurre una disolución anódica donde se liberan elementos que pueden reaccionar con algunos contaminantes en solución precipitándolos. En los electrodos se generan micro burbujas de hidrógeno y oxígeno que chocan y se adhieren a los flóculos (Rajkumar y Palanivelu, 2004).

Arrastrándolos a la superficie del líquido donde se forma una espuma que puede ser removida mecánicamente. También, las burbujas formadas dentro del reactor ayudan a que el aceite y las grasas floten.

2.2.1. Coagulación

“Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado” (Andía, 2000, p. 9).

2.2.2. Floculación

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. (Andía, 2000, p. 33)

2.2.3. El ánodo y el cátodo

Para Sienko y Robert (1966):

El ánodo y el cátodo son los tipos de electrodos que se encuentran en las celdas electroquímicas. Estos son dispositivos capaces de producir energía eléctrica a través de una reacción química. Las celdas electroquímicas más usadas son las pilas.

Existen dos tipos de celdas electroquímicas, las celdas electrolíticas y las células galvánicas o voltaicas. En las celdas electrolíticas, la reacción química que produce la energía no sucede de forma espontánea, sino que la corriente eléctrica se transforma en una reacción química de oxidación-reducción.

La celda galvánica está compuesta por dos semiceldas. Estas están conectadas por dos elementos, un conductor metálico y un puente salino.

El conductor eléctrico, como indica su nombre, conduce la electricidad porque tiene muy poca resistencia al movimiento de la carga eléctrica. Los mejores conductores suelen ser metales.

El puente salino es un tubo que conecta las dos semiceldas, mientras mantiene el contacto eléctrico de las mismas, y sin dejar que los componentes de cada celda se unan. Cada semicelda de la celda galvánica contiene un electrodo y un electrolito.

Cuando se produce la reacción química, una de las semiceldas pierde electrones hacia su electrodo, a través del proceso de oxidación; mientras que la otra gana los electrones para su electrodo, a través del proceso de reducción. Los procesos de oxidación se producen en el ánodo, y los procesos de reducción en el cátodo. (p. 18)

Figura 2.

Celda electrolítica



Nota. Utilización de corriente eléctrica en la celda. Elaboración propia.

2.2.4. Factores que afectan la electrocoagulación

- La densidad de corriente: el suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierro Fe^{+2} liberados por los respectivos electrodos. Cuando se usa una corriente demasiado grande, hay una transformación de energía eléctrica en energía calórica que calienta el agua. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación como pH y temperatura.
- Presencia de NaCl: la sal aumenta la conductividad del agua residual. Se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO_3^- y SO_4^{2-} pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca^{+2} y Mg^{+2} produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos, que aumentaría el potencial entre los electrodos decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl^- del 20 %.
- pH: el efecto del pH en la electrocoagulación se refleja en la eficiencia de la corriente y se relaciona con la disolución del hidróxido del metal, se ha encontrado que el rendimiento del proceso depende de la naturaleza del contaminante y la mejor remoción se ha observado para valores de pH cercanos a 7. No obstante a pH neutral el consumo de energía es alto, debido a que hay variación de la conductividad. Cuando la conductividad es alta, el efecto del pH no es significativo. El pH después de la electrocoagulación podría incrementarse para aguas residuales ácidas, pero decrecer para aguas alcalinas. El incremento de pH a condiciones

ácidas ha sido atribuido a la reacción del hidrógeno en el cátodo dada por $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$.

- Temperatura: los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente incrementa inicialmente hasta llegar a 60 °C punto donde se hace máxima, para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuido al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo.

2.2.5. Ventajas de la electrocoagulación

Existen un gran número de métodos para aguas residuales entre los cuales están los tratamientos biológicos y los fisicoquímicos. La electrocoagulación es un método que tiene gran potencial para eliminar las desventajas de los tratamientos tradicionales. Las principales ventajas de la electrocoagulación son:

- La electrocoagulación en aguas residuales requiere una menor superficie, entre un 50 a 60 % menor que en los sistemas biológicos. El tiempo de residencia para que se lleve a cabo el proceso es mucho menor en la electrocoagulación en comparación con el sistema biológico.
- La electrocoagulación cuenta con unidades compactas, fáciles de operar, con una producción de lodo y consumo energético menor que en los sistemas biológicos y químicos.

- Las celdas de electrocoagulación no requieren de obras civiles importantes para su instalación, en comparación con los sistemas biológicos y químicos que sí lo hacen.
- En las celdas electroquímicas no se utilizan productos químicos, por lo tanto, no se presenta una contaminación secundaria por el uso de otras sustancias químicas como se presenta en la precipitación química (Mollah, Schennach, Parga y Cocke, 2001).

Por todo lo anterior la electrocoagulación presenta unos costos de operación menores que en los sistemas biológicos y químicos.

Otras ventajas que posee la electrocoagulación y son ampliamente presentadas en la literatura de Mollah *et. al.* (2001) son:

- El agua residual después de ser tratada con electrocoagulación queda con menos color, menos olor y libre del contaminante.
- El lodo formado en la electrocoagulación es fácil de despojarlo del agua.
- Los flocúlos formados por electrocoagulación pueden ser filtrados fácilmente.
- Las burbujas producidas durante la electrocoagulación pueden facilitar la remoción del contaminante, ya que, estas llevan el contaminante a la superficie.

2.2.6. Desventajas de la electrocoagulación

Las desventajas de esta técnica más mencionadas en la literatura de Mollah *et. al.* (2001) son:

- Los electrodos necesitan ser reemplazados con regularidad debido a su oxidación.
- El uso de la electricidad es costoso en algunos lugares.
- La formación de una placa de óxido en el cátodo puede disminuir la eficiencia de la electrocoagulación.
- Se requiere una conductividad alta.

2.2.6.1. Propiedades del agua

Entre las propiedades del agua es de destacar que se trata de una sustancia sin olor, sin color y sin sabor. Se encuentra en la naturaleza conformando todo tipo de fuentes fluviales como ríos, lagos y mares, ocupando tres cuartas partes de la Tierra. Las propiedades del agua son imprescindibles para la vida animal y vegetal. Se puede presentar en estado líquido, sólido y gaseoso, por ejemplo, en un río, en un glaciar o en las nubes. El agua está constituida por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno, siendo su fórmula H_2O .

Por consiguientes un dato a destacar de las propiedades del agua es el hecho de poder presentarse en tres estados: para interés de nuestro estudio la usaremos en estado líquido.

El agua en estado líquido se encuentra de forma más predominante en la Tierra. Podemos verlo en ríos, lagos, mares, lluvia, entre otros. El paso de estado sólido a líquido del agua recibe el nombre de fusión. Dependiendo de los materiales que se encuentren en disolución en el agua, ésta se encuentra en estado líquido entre los 0 y los 100 °C (la mayoría de las moléculas siguen unidas) (Equipo Editorial Naturaleza, 2017).

2.3. Contaminación del agua

La contaminación del agua es cualquier cambio químico, físico o biológico en la calidad del agua que tiene un efecto dañino en cualquier cosa viva que consuma esa agua. Cuando los seres humanos beben el agua contaminada tienen a menudo problemas de salud. La contaminación del agua puede también puede hacer a esta inadecuada para el uso deseado.

2.3.1. ¿Cuáles son los mayores contaminantes del agua?

Hay varias clases de agentes contaminantes del agua. Los primeros son agentes causantes de enfermedad.

Éstos son bacterias, virus, protozoos y los gusanos parásitos que se incorporan desde los sistemas de aguas residuales y las aguas residuales sin tratar.

Una segunda categoría de agentes contaminantes del agua son los agentes consumidores de oxígeno; residuos que se pueden descomponer por las bacterias consumidoras de oxígeno. Cuando las poblaciones de bacterias son grandes la descomposición de los residuos tiene lugar y se consume mucho

oxígeno pudiendo agotar el oxígeno disuelto en el agua. Esto puede ser causa de que otros organismos que viven en el agua, tal como pescados, mueran.

Una tercera clase de agentes contaminantes del agua son los agentes contaminantes inorgánicos solubles en agua, tales como ácidos, sales y metales tóxicos. Grandes cantidades de estos compuestos harán el agua inapropiada para beber y pueden causar la muerte de la vida acuática.

Otra clase de agentes contaminadores del agua son los nutrientes; los nitratos y los fosfatos solubles en agua que causan el crecimiento excesivo de las algas y de otras plantas acuáticas, que agotan la fuente de oxígeno del agua. Esto mata a pescados y, cuando esta se encuentra en agua potable, puede matar a niños infantiles.

El agua se puede también contaminar por un número de compuestos orgánicos tales como aceite, plásticos y pesticidas, que son dañinos para los seres humanos y para las plantas y animales acuáticos.

Una categoría muy peligrosa es el sedimento suspendido, porque causa una disminución en la absorción de la luz por el agua y las partículas separan compuestos peligrosos tales como pesticidas a través del agua.

Finalmente, los compuestos radiactivos solubles en el agua pueden causar cáncer, defectos de nacimiento y daño genético siendo por tanto agentes contaminantes muy peligrosos del agua (Lenntech, 2019).

2.3.2. Contaminación de agua por materiales de construcción

Algunos materiales de construcción tienen efectos nocivos para la salud y el medio ambiente. Por ejemplo:

- El hormigón y ciertos tipos de granito pueden ser radiactivos.
- El radón es un gas radiactivo que no tiene olor ni color y puede encontrarse en casi todos los tipos de suelo, incluso en las rocas y el agua, este gas proviene de la descomposición natural del uranio. En general, el radón se mueve hacia arriba, a través del suelo, hasta el aire que se respira y puede llegar a causar cáncer de pulmón.
- El amianto es un material aislante de origen mineral peligroso cuando se dispersa en el aire en forma de fibras diminutas invisibles a simple vista; produce asbestosis ocasionando graves dificultades respiratorias y cáncer de pulmón.
- Muchas pinturas, barnices y materiales sintéticos emanan gases tóxicos (fenoles, formaldehídos, benceno, tricloroetileno y otros). Estas sustancias tienen estructuras moleculares que no se hallan en la naturaleza, por lo que los ecosistemas no están preparados para procesarlos fácilmente. No se conocen sus efectos a largo plazo.

Figura 3.

Calidad del agua



Nota. Mezcla de agua con basalto. Elaboración propia.

2.4. Basalto

Roca ígnea (volcánica) compuesta por plagioclasa, piroxenos (augita) y olivino. Su contenido en sílice (SiO_2) es inferior al 50 %, por lo que se considera una roca básica. En función de la separación del gas del resto de los componentes del magma, la apariencia externa del basalto es variable. Las condiciones de viscosidad y movimiento de las lavas basálticas sobre la superficie originan coladas y coladas fluidas que al enfriarse pueden desarrollar columnas prismáticas de gran perfección. Los basaltos pueden contener vacuolas que cuando se encuentran rellenas de precipitados, generados a expensas de procesos hidrotermales, forman zeolitas. El basalto se ha utilizado tradicionalmente como roca industrial (fabricación de adoquines para pavimento urbano y construcción de carreteras) y como roca ornamental.

Figura 4.

Basalto



Nota. Basalto en estado sólido. Elaboración propia.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Localización

La investigación se desarrollará en las instalaciones del Laboratorio bacteriológico de EMPAGUA en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Zona 12 Capitalina.

3.1.1. Variables

A continuación, se citan y describen las variables y constantes que intervienen en el proceso:

Tabla 1.

Variables de operación

Variable	Símbolo	Unidad	Tipo de variable		
			Independiente	Dependiente	Constantes
Voltaje	V	voltio	X		
Tiempo	s	segundo	X		
Amperaje	A	ampério		X	
No. Placas			X		
Turbiedad		NTU		X	
Color		PtCo		X	

Nota. Variables que intervienen en el proceso. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El presente estudio de investigación tratará de establecer las características y dimensiones de operación para un sistema de electrocoagulación para el tratamiento de agua con residuos de basalto empleándose como tema principal la electrocoagulación como método fisicoquímico.

Como propósito fundamental se necesita crear un reactor a pequeña escala para poder llevar a cabo la metodología, para el tratamiento de agua con basalto. Esto conlleva realizar un estudio y análisis del sistema de electrocoagulación empleando parámetros de DQO, para establecer los parámetros óptimos necesarios para la remoción de color, turbidez y sólidos en suspensión del material de construcción en el agua. Esto se realizará con la finalidad de encontrar un método que no contenga químicos y que sea amable con el medio ambiente evitando de esta manera la contaminación ambiental.

En esta circunstancia el equipo de electrocoagulación del agua será relativamente simple evitando grandes costos en la creación de este, siendo el proceso de electrocoagulación una operación sencilla y que requiere poca inversión en mantenimiento.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Ana del Milagro Escobar Guerra
- Asesor: Jorge Mario Estrada Asturias

3.4. Recursos materiales

Los recursos materiales fueron los dos equipos utilizados para la medición de la turbidez y del color, el sistema de electrocoagulación que se realizó.

Tabla 2.

Recursos materiales a utilizar

Descripción	Unidades	Características
Equipo de computación	1	Computadora de escritorio o laptop
Colorímetro	1	Digital
Turbidímetro	1	Digital marca Hach

Nota. Equipo utilizado en la realización de análisis. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 3.

Recursos materiales a utilizar

Descripción	Unidades	Características
Alambre de electricidad	½ m	De cobre
Baterías	2-6	Cuadradas
Cargador CA universal	1	Multi voltajes
Placas	2	Aluminio
Recipiente	1	Volumen de 10 Litros
Basalto	6 bolsas	360 g

Nota. Materiales utilizados en el sistema de electrocoagulación. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.5. Técnica cuantitativa

La técnica cuantitativa se basó en cuantificar la recopilación y en el análisis de datos obtenidos del estudio de las seis muestras preparadas a distintas condiciones a partir de un enfoque deductivo existente.

3.5.1. Creación de reactor de electrocoagulación

Utilizar un contenedor de PMMA de 20 cm de ancho* 25 cm de alto* 20 cm de largo colocar en estas dos placas de aluminio con una separación entre cada una de 10 cm posteriormente colocar una banda de metal encima de estas y conectar los alambres a cada placa.

Los electrodos de aluminio son requeridos para el proceso de electrocoagulación debido a que estos se disuelven dando origen a iones metálicos, los cuales forman hidróxidos o polihidróxidos, los cuales son excelentes agentes coagulantes, que desestabilizan las sustancias coloidales y también son fáciles de conseguir por su bajo costo y disponibilidad, por tal motivo fue el material seleccionado para llevar a cabo el experimento. (Mollah, Schennach, Parga y Cocke, 2001, p. 32)

Con la finalidad de evaluar el sistema de electrocoagulación y los diferentes parámetros como lo son los valores de voltaje, concentración inicial de la solución y tipo de electrodos buscando encontrar las condiciones óptimas de operación que remuevan el color, la turbidez y los sólidos en suspensión en el agua de basalto se realizarán las distintas pruebas experimentales.

3.6. Recolección y ordenamiento de la Información

Para llevar a cabo la recolección de la información se procedió a realizar la experimentación con las seis muestras en el sistema de electrocoagulación y posteriormente se ordenó la información obtenida en el experimento.

Tabla 4.

Datos experimentales

Muestra	Peso (g)	Voltaje (V)
1	45 g	6 V
2	90 g	6 V
3	180 g	6 V
4	45 g	12 V
5	90 g	12 V
6	180 g	12 V

Nota. Datos iniciales de las muestras. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 5.

Datos experimentales

	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Corrida 6
Repeticón 1	7.70	8.94	29.7	11.6	22.3	27.4
Repeticón 2	7.05	5.58	23.5	9.99	12.2	22.8
Repeticón 3	7.04	4.90	23.1	6.03	11.5	22.5
Repeticón 4	6.77	3.94	21.7	5.02	10.9	17.3
Repeticón 5	6.58	3.61	20.0	4.27	9.53	12.8
Repeticón 6	4.72	3.38	19.2	4.26	8.70	12.0
Repeticón 7	4.53	3.20	18.9	3.32	7.66	10.1
Repeticón 8	4.47	3.12	16.9	3.16	7.22	9.28

Continuación de la tabla 5.

	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Corrida 6
Repetición 9	4.09	3.06	16.1	2.57	6.38	9.13
Repetición 10	3.68	2.65	10.8	2.43	5.51	9.01
Repetición 11	1.69	2.57	9.45	2.41	5.28	7.31
Repetición 12	1.30	2.46	6.35	1.17	4.69	5.70
Suma (Xi)	59.62	47.41	215.7	56.23	111.87	165.33
Media	5.30	4.09	19.03	5.01	9.74	14.51
Suma total (X)	656.16					
ni	12	12	12	12	12	12
N	72			K	6	
SC trat	1965.1503					
SC total	3436.3296					
SC error	1471.1793					

Nota. Datos obtenidos para las distintas corridas del experimento. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Haciendo uso de un programa de computación siendo este Excel se tabularon los resultados del estudio evaluado del sistema de electrocoagulación de las seis muestras preparadas para el respectivo análisis, y luego se procedió a procesar esta información.

Tabla 6.

Datos experimentales 1

Muestra:	No.1
Peso de basalto:	45 g/L

Continuación de la tabla 6.

Muestra:	No.1	
Voltaje aplicado:	6 voltios	
Material:	Aluminio	
Tiempo (segundos)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt-Co)
0	7.70	69
30	7.05	61
60	7.04	38
120	6.77	32
180	6.58	31
240	4.72	30
300	4.53	27
360	4.47	26
420	4.09	24
480	3.68	22
540	1.69	19
600	1.30	9

Nota. Resultados obtenidos para la muestra 1. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 7.

Datos experimentales 2

Muestra:	No.2	
Peso de basalto:	90 g/L	
Voltaje aplicado:	6 voltios	
Material:	Aluminio	
Tiempo (segundos)	Turbiedad (NTU)	Color (U. PT-CO)
0	8.94	209
30	5.58	112
60	4.90	96

Continuación de la tabla 7.

Muestra:	No.2	
Peso de basalto:	90 g/L	
Voltaje aplicado:	6 voltios	
Material:		
Tiempo (segundos)	Turbiedad (NTU)	Color (U. PT-CO)
120	3.94	88
180	3.61	83
240	3.38	76
300	3.2	70
360	3.12	69
420	3.06	56
480	2.65	49
540	2.57	44
600	2.46	28

Nota. Resultados obtenidos para la muestra 2. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 8.

Datos experimentales 3

Muestra:	No.3	
Peso de basalto:	180 g/L	
Voltaje aplicado:	6 voltios	
Material:	Aluminio	
Tiempo (segundos)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt-Co)
0	29.70	237
30	23.5	212
60	23.10	198
120	21.7	186
180	20	179

Continuación de la tabla 8.

Muestra:	No.3	
Peso de basalto:	180 g/L	
Voltaje aplicado:	6 voltios	
Material:	Aluminio	
Tiempo (segundos)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt-Co)
240	19.2	171
300	18.9	169
360	16.9	158
420	16.1	156
480	10.8	120
540	9.45	113
600	6.35	86

Nota. Resultados obtenidos para la muestra 3. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 9.

Datos experimentales 4

Muestra:	No.4	
Peso de basalto:	45 g/L	
Voltaje aplicado:	12 voltios	
Material:	Aluminio	
Tiempo (segundos)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt-Co)
0	11.60	91
30	9.99	85
60	6.03	70
120	5.02	66
180	4.27	59
240	4.26	19
300	3.32	18

Continuación de la tabla 9.

Muestra:	No.4	
Peso de basalto:	45 g/L	
Voltaje aplicado:	12 voltios	
Material:	Aluminio	
	Tiempo (segundos)	Turbiedad (NTU)
	360	3.16
	420	2.57
	480	2.43
	540	2.41
	600	1.17
		Color (U. Pt-Co)
		11
		10
		9
		7
		2

Nota. Resultados obtenidos para la muestra 4. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 10.

Datos experimentales 5

Muestra:	No.5	
Peso de basalto:	90 g/L	
Voltaje aplicado:	12 Voltios	
Material:	Aluminio	
	Tiempo (segundos)	Turbiedad (NTU)
	0	22.30
	30	12.2
	60	11.50
	120	10.9
	180	9.53
	240	8.7
	300	7.66
	360	7.22
	420	6.38
		Color (U. Pt-Co)
		99
		77
		60
		59
		58
		51
		40
		27
		24

Continuación de la tabla 11.

Muestra:	No.5	
Peso de basalto:	90 g/L	
Voltaje aplicado:	12 Voltios	
Material:	Aluminio	
Tiempo (segundos)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt-Co)
480	5.51	20
540	5.28	18
600	4.69	12

Nota. Resultados obtenidos para la muestra 5. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 11.

Datos experimentales 6

Muestra:	No.6	
Peso de basalto:	180 g/L	
Voltaje aplicado:	12 Voltios	
Material:	Aluminio	
Tiempo (segundos)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt-Co)
0	27.40	161
30	22.8	142
60	22.50	140
120	17.3	103
180	12.8	76
240	12	71
300	10.1	59
360	9.28	54
420	9.13	49
480	9.01	40
540	7.31	39

Continuación de la tabla 11.

Muestra:	No.6	
Peso de basalto:	180 g/L	
Voltaje aplicado:	12 Voltios	
Material:	Aluminio	
Tiempo (segundos)	Turbiedad (NTU)	Color (U. Pt-Co)
600	5.70	28

Nota. Resultados obtenidos para la muestra 6. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.8. Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico para poder caracterizar el comportamiento de las seis muestras en nuestro sistema de electrocoagulación para realizar el estudio.

3.8.1. Análisis de varianza ANOVA

El análisis de varianza (ANOVA) prueba la hipótesis de que las medias de las seis muestras son iguales. Con el ANOVA se pudo evaluar la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. La hipótesis nula establece que todas las medias de las muestras (medias de los niveles de los factores) son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente.

Para ejecutar el análisis de varianza ANOVA, se debe tener una variable de respuesta continua siendo en nuestro caso de estudio el tiempo y al menos un factor categórico con doce repeticiones en este caso la turbiedad. Los análisis ANOVA requieren datos de poblaciones que sigan una distribución

aproximadamente normal con varianzas iguales entre los niveles de factores como se presentó en nuestro estudio. Esa fue la razón por la que se decidió usar el análisis de varianza.

Se puede observar en el análisis de varianza presentado en la siguiente tabla que el valor de la razón F calculada, 17.6, aporta una evidencia significativa en contra de la hipótesis nula de que las medias son iguales sobre el punto crítico p, 2.35. Se rechaza la hipótesis nula aceptando que las medias de las muestras no son iguales y aceptamos la hipótesis alterna debido a que las medias de las seis muestras de estudio son distintas.

Tabla 12.

Datos de análisis de varianza

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Columna 1	12	59.62	4.96833333	4.46074242		
Columna 2	12	47.41	3.95083333	3.3416447		
Columna 3	12	215.7	17.975	43.5061364		
Columna 4	12	56.23	4.68583333	9.95566288		
Columna 5	12	111.87	9.3225	22.9578023		
Columna 6	12	165.33	13.7775	49.5215841		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
				17.6321	4.68136E	
Entre grupos	1965.1503	5	393.03006	023	-11	2.35380896
Dentro de los grupos	1471.1793	66	22.2905955			
Total	3436.3296	71				

Nota. Resultados de varianza para las seis muestras. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.8.2. Análisis de tendencia central y desviación estándar

Las medidas obtenidas con el análisis de tendencia central de nuestro estudio son medidas estadísticas que pretenden resumir en un solo valor a un conjunto de valores de las seis muestras. La medida de tendencia central utilizada en nuestro estudio es la media. Los datos obtenidos del análisis realizado se procedieron a ordenar en una tabla estadística por lo que diremos que son datos agrupados. En la tabla 13 se pueden observar las medidas estadísticas de nuestros resultados obtenidos. También se procedió a calcular la desviación estándar que es la medida que nos proporcionó información sobre la dispersión media de la variable de la Turbiedad.

Tabla 13.

Datos tendencia central media y desviación estándar

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Media	5.30	4.09	19.03	5.01	9.74	14.51
Desviación estándar	2.02	1.75	6.32	3.02	4.59	6.74
Límite máximo	7.32	5.84	25.35	8.03	14.33	21.25
Límite mínimo	3.28	2.34	12.72	1.98	5.16	7.77

Nota. Media y desviación estándar para las muestras. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.9. Análisis de Tukey

El método de Tukey se utiliza en ANOVA para crear intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas entre las medias de los niveles de los factores mientras controla la tasa de error por muestra en un nivel especificado. Se utilizó este método porque se realizó el Análisis de Varianza y

nos permitió saber que muestras eran iguales. Concluyendo que las muestras 3 y 6 son similares en su comportamiento.

Tabla 14.

Datos método Tukey

K	6
N-k	66
Cme	22.29059545
ni	12
$q\alpha(k,N-k)$	4.19

Nota. Datos muestrales para método Tukey. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 15.

Datos método Tukey

Diferencia poblacional	Diferencia muestral	Decisión
$\mu_1-\mu_2$	1.215454545	no significativa
$\mu_1-\mu_3$	13.73	significativa
$\mu_1-\mu_4$	0.296363636	no significativa
$\mu_1-\mu_5$	4.441818182	no significativa
$\mu_1-\mu_6$	9.21	significativa
$\mu_2-\mu_3$	14.94545455	significativa
$\mu_2-\mu_4$	0.919090909	no significativa
$\mu_2-\mu_5$	5.657272727	no significativa
$\mu_2-\mu_6$	10.42545455	significativa
$\mu_3-\mu_4$	14.02636364	significativa
$\mu_3-\mu_5$	9.288181818	significativa
$\mu_3-\mu_6$	4.52	no significativa
$\mu_4-\mu_5$	4.738181818	no significativa

Continuación de la tabla 15.

Diferencia poblacional	Diferencia muestral	Decisión
$\mu_4-\mu_6$	9.506363636	significativa
$\mu_5-\mu_6$	4.768181818	no significativa

Nota. Resultados obtenidos para el método Tukey. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.9.1. Diseño experimental

Para el proceso de electrocoagulación, se inició con la construcción del reactor a escala de laboratorio utilizando los siguientes materiales un recipiente de forma prisma rectangular de vidrio con las siguientes medidas 20 cm de longitud, 20 cm de profundidad y 25 cm de altura con capacidad para un volumen de 10 litros; también se hizo uso de una fuente de poder construidas con un cargador, lagartos y $\frac{1}{2}$ m de alambre para electricidad de cobre.

También se realizaron placas de aluminio haciendo uso de láminas de este metal obtenidas de latas de agua gaseosas. Después se realizó la búsqueda de basalto obteniendo 657.21 g de basalto de los cuales únicamente se utilizó 630 g los que se distribuyeron en 6 muestras 2 muestras con la cantidad de 45 g cada una, 2 muestras con la cantidad de 90 g cada una y 2 muestras con la cantidad de 180 g cada una. Estas muestras se pesaron y se identificaron con su respectivo número la numeración asignada fue del 1 al 6. de pequeños transformadores rebobinados con los cuales realizarán experimentos, a manera de pruebas de jarra. Se determinará en qué tiempos se dará las reducciones de turbiedad y color con distintos voltajes. Realizándose 12 repeticiones para cada muestra siendo estas 6 corridas aleatorias cada una.

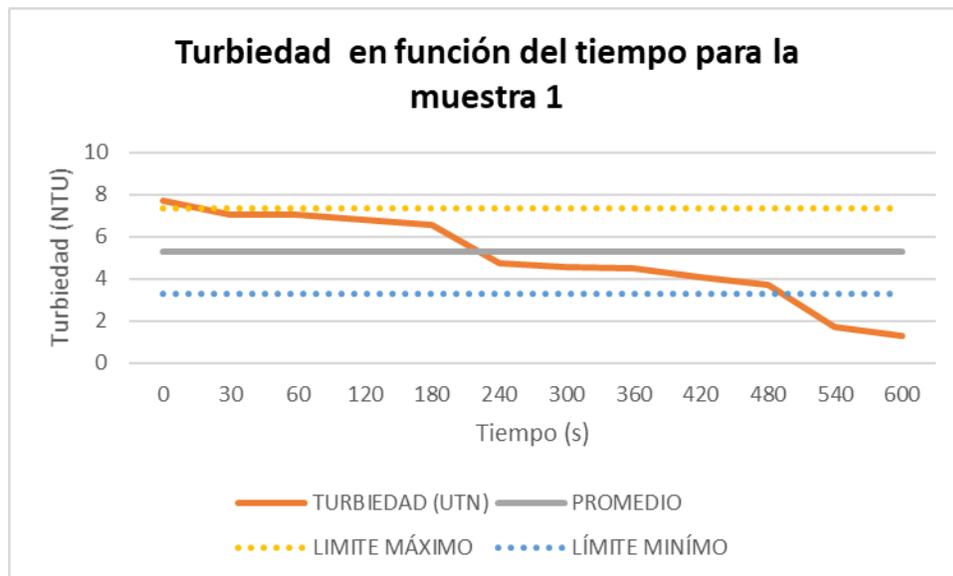
4. RESULTADOS

El estudio realizado en un sistema de electrocoagulación a escala de laboratorio permitió observar la remoción de la turbidez, el color y sólidos en suspensión en aguas de basalto.

Se observa el resultado obtenido mediante gráficas de turbidez del Efluente Líquido Residual a Tratar respecto al tiempo. Cuando el tiempo aumentaba esta variable mencionada anteriormente disminuía en cada muestra que se analizó.

Figura 5.

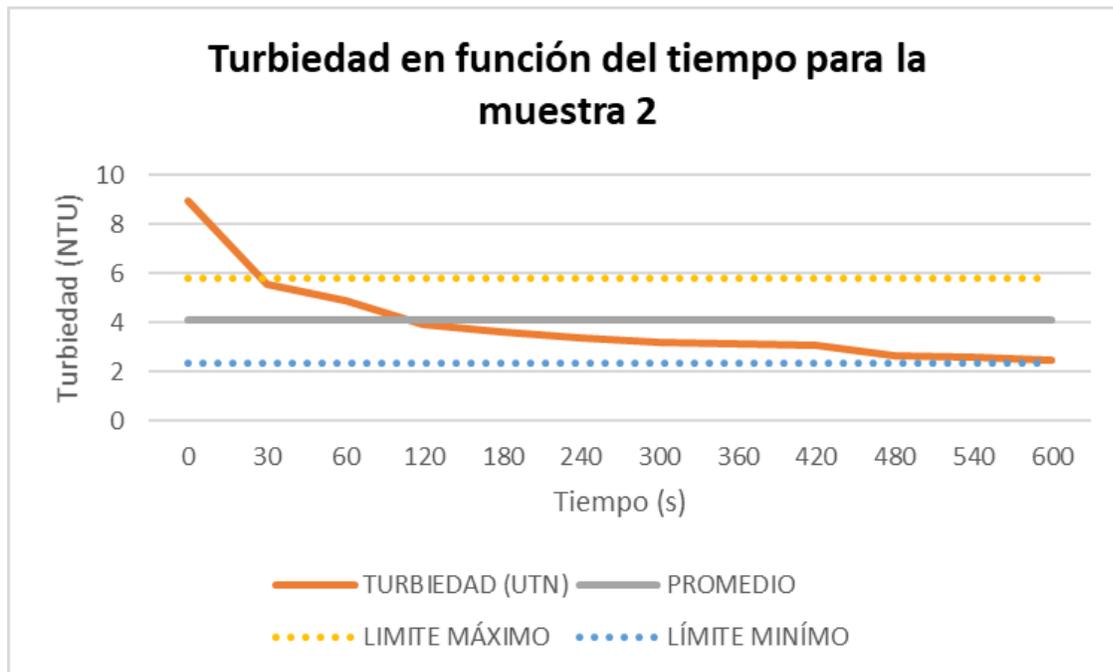
Muestra 1 turbidez en función del tiempo



Nota. Tendencia de turbidez en función del tiempo para muestra 1. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 6.

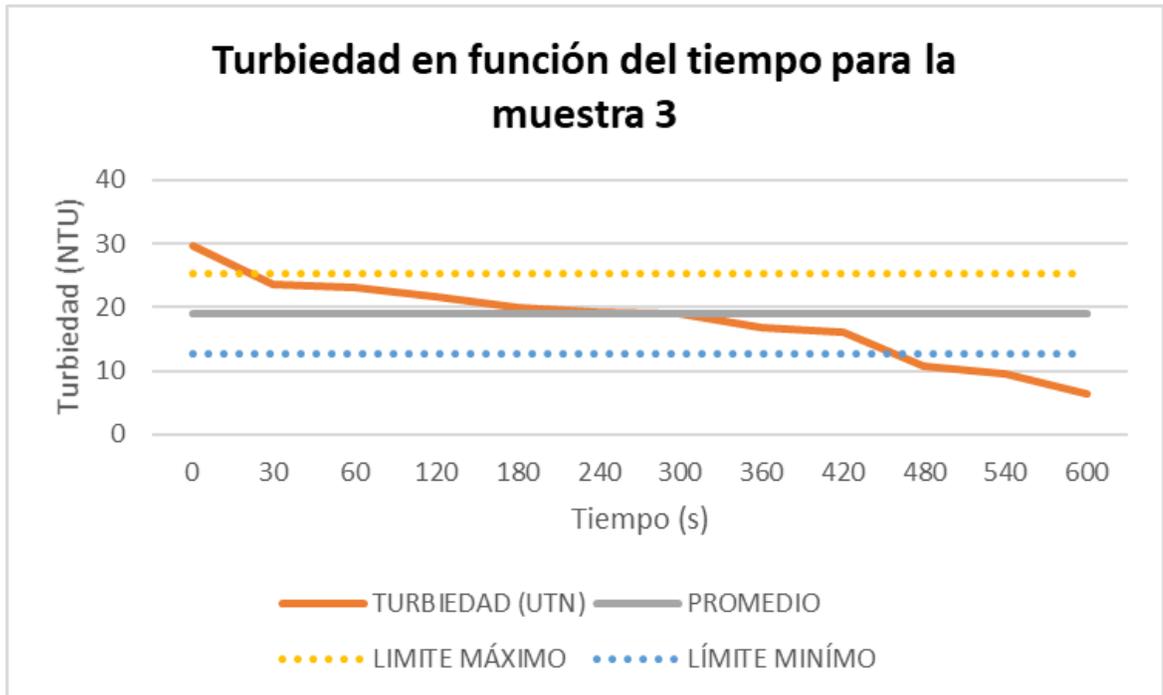
Muestra 2 turbidez en función del tiempo



Nota. Tendencia de turbidez en función del tiempo para muestra 2. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 7.

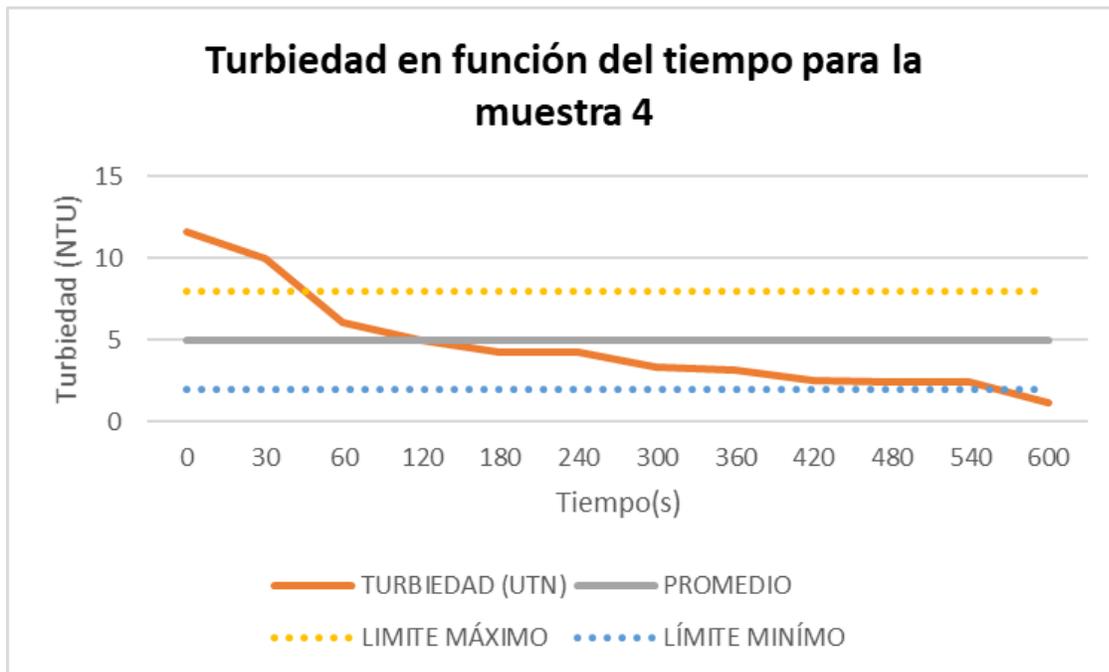
Muestra 3 turbidez en función del tiempo



Nota. Tendencia de turbidez en función del tiempo para muestra 3. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 8.

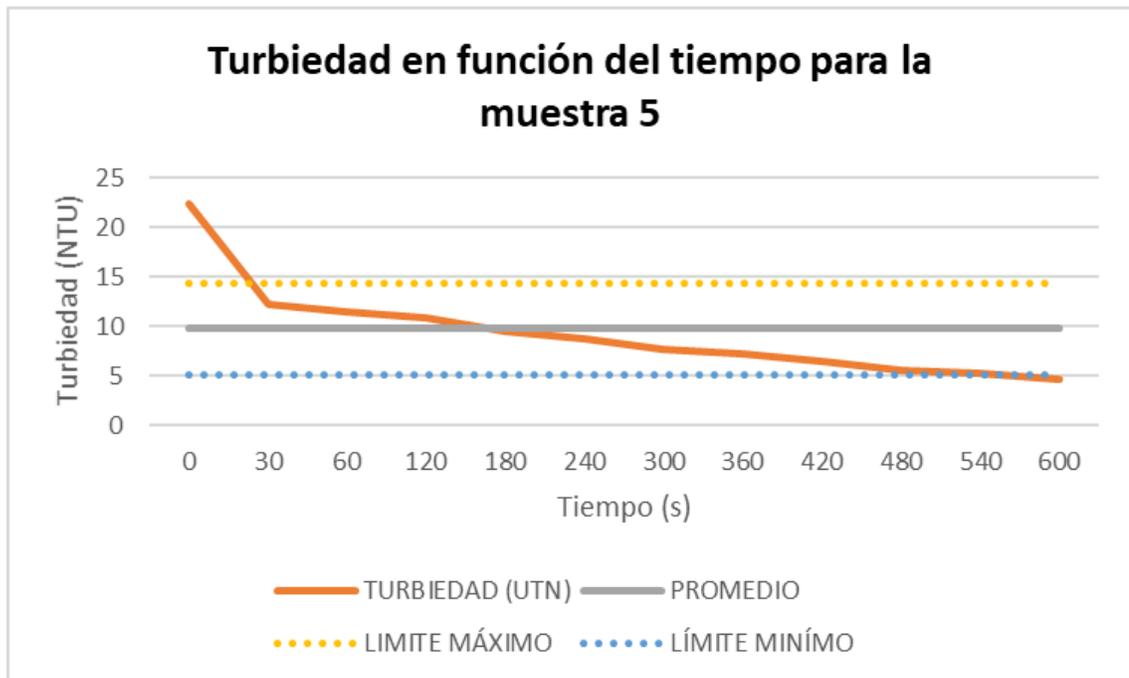
Muestra 4 turbidez en función del tiempo



Nota. Tendencia de turbidez en función del tiempo para muestra 4. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 9.

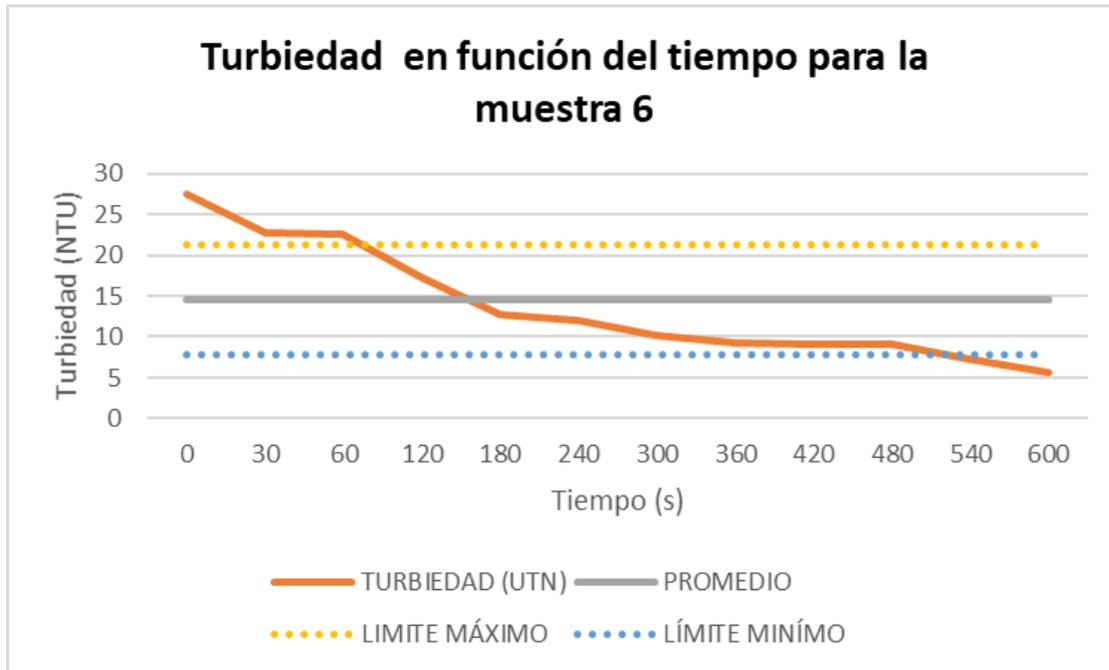
Muestra 5 turbidez en función del tiempo



Nota. Tendencia de turbidez en función del tiempo para muestra 5. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 10.

Muestra 6 turbidez en función del tiempo

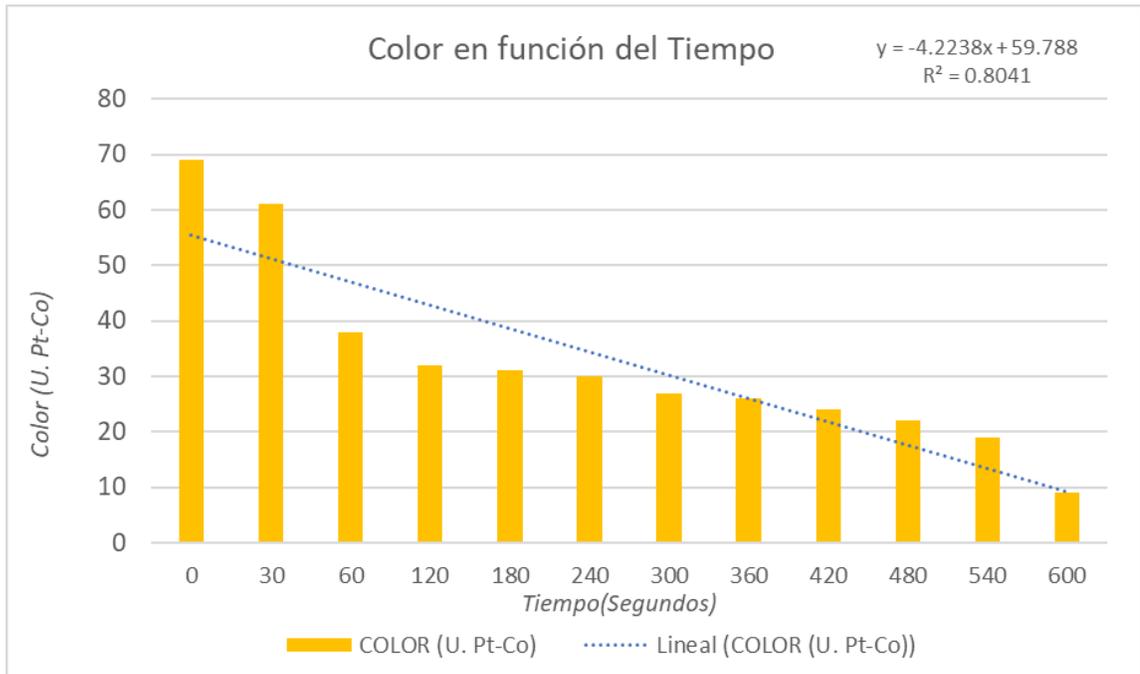


Nota. Tendencia de turbidez en función del tiempo para muestra 6. Elaboración propia, realizado con Excel.

Se observa el resultado de la remoción de color en las distintas muestras obtenido mediante graficas del comportamiento del color del efluente liquido residual a tratar respecto al tiempo. Cuando el tiempo aumentaba estas dos variables mencionadas anteriormente disminuían en cada muestra que se analizó.

Figura 11.

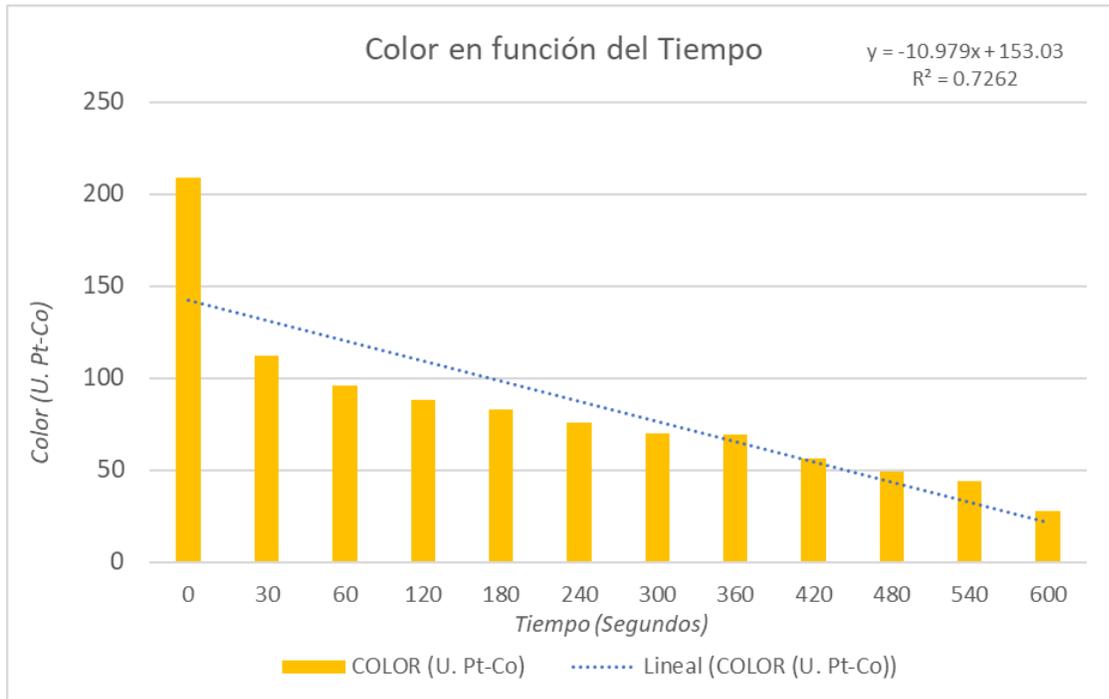
Muestra 1 color en función del tiempo



Nota. Tendencia de color en función de tiempo para muestra 1. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 12.

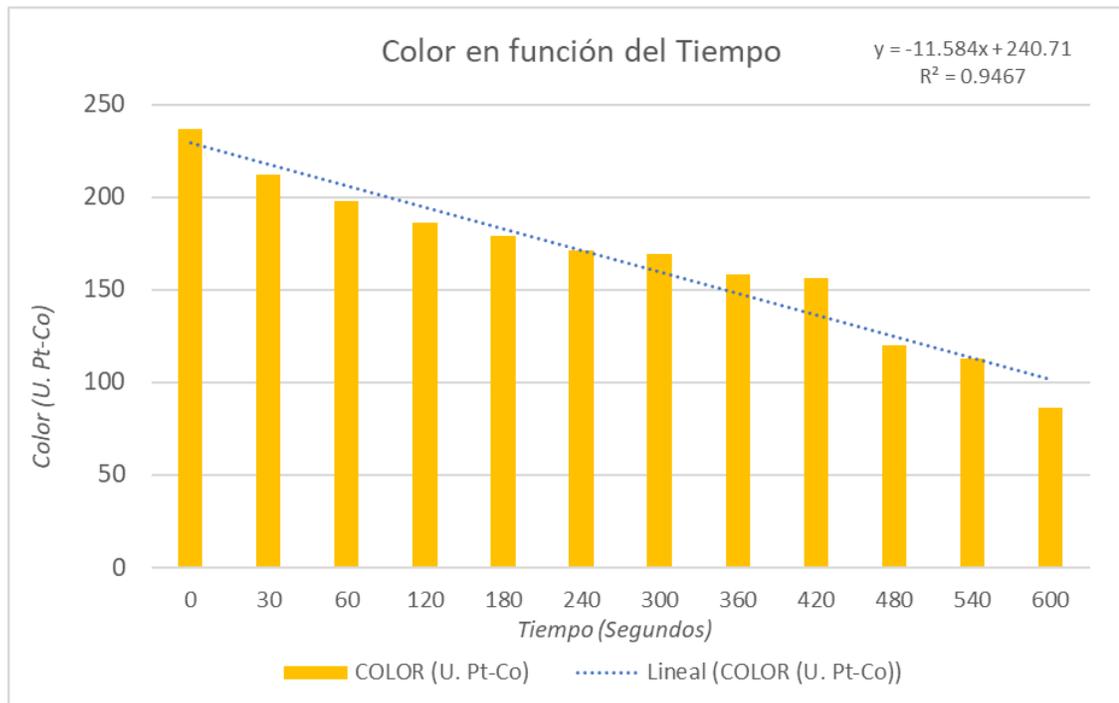
Muestra 2 color en función del tiempo



Nota. Tendencia de color en función de tiempo para muestra 2. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 13.

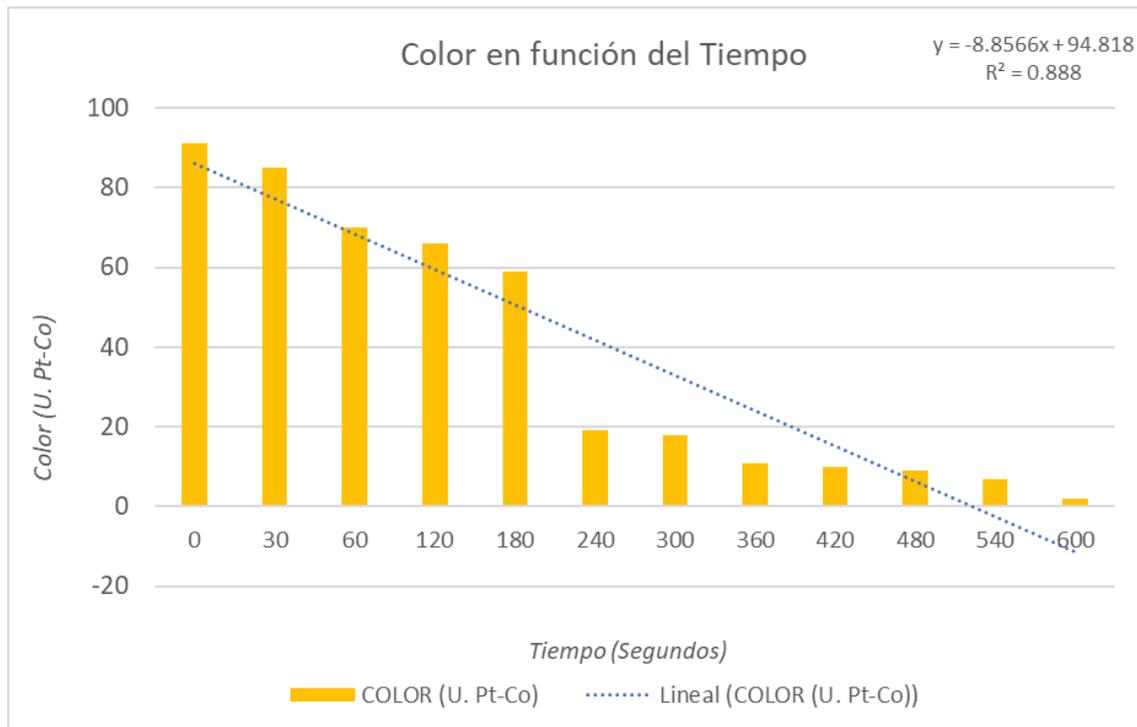
Muestra 3 color en función del tiempo



Nota. Tendencia de color en función de tiempo para muestra 3. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 14.

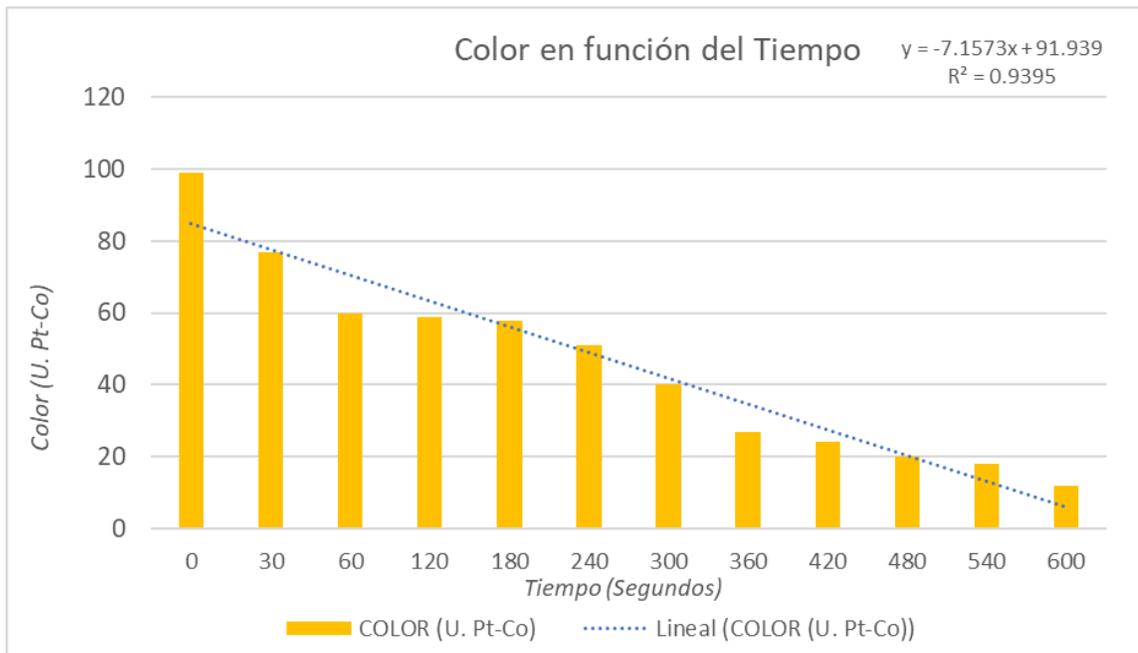
Muestra 4 color en función del tiempo



Nota. Tendencia de color en función de tiempo para muestra 4. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 15.

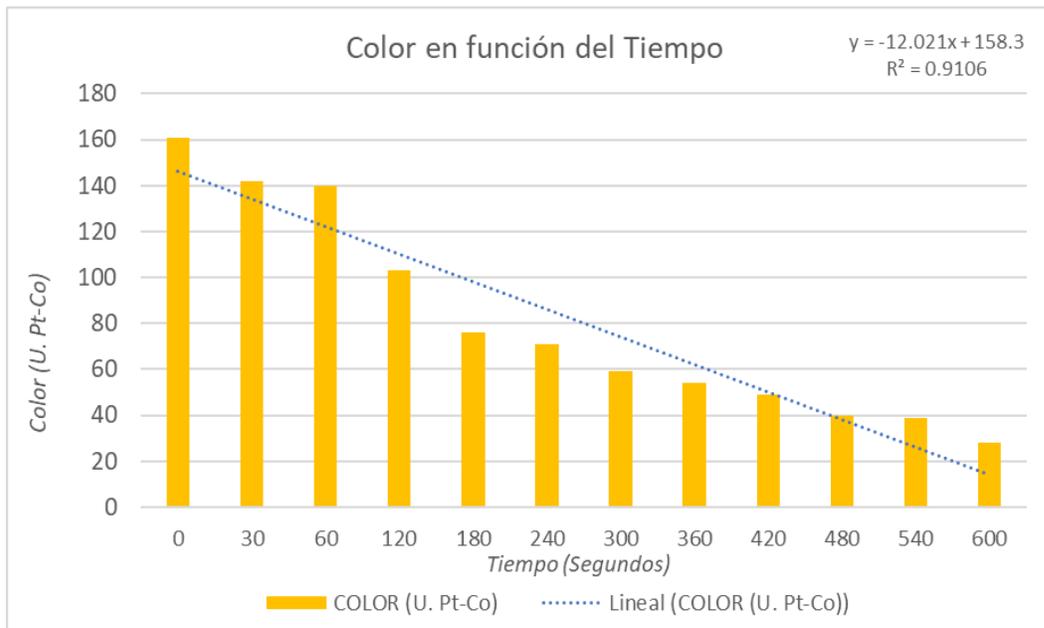
Muestra 5 color en función del tiempo



Nota. Tendencia de color en función de tiempo para muestra 5. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 16.

Muestra 6 color en función del tiempo



Nota. Tendencia de color en función de tiempo para muestra 6. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 16.

Porcentaje de remoción de sólidos por electrocoagulación

Muestra	DQO (g/L)	SST (g/L)
1	60	97.3
2	58	97.2
3	54.4	97.7
4	51	95.5
5	53	96.8
6	52	98.33

Nota. Resultado de remoción de sólidos en las muestras. Elaboración propia, realizado con Excel.

Muestra de cálculo para % DQO y % SST

Los cálculos para para porcentajes de remoción de carga contaminante fueron realizados utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de remoción de carga contaminante} = CCI - CCF / CCI * 100 \text{ (Ec. 1)}$$

Dónde:

CCI = Carga contaminante inicial

CCF= Carga contaminante final

A continuación, se muestran como ejemplo la realización de los cálculos para saber el porcentaje de eficiencia necesario en los parámetros de DQO y SST (sólidos suspendidos totales), para dar cumplimiento a la norma 631 de 2015:

$$\% \text{ remoción de DQO} = (45 - 18) / 45 * 100 = 60 \%$$

$$\% \text{ remoción de SST} = (45 - 1.2) / 45 * 100 = 97 \%$$

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Terminado el estudio de análisis de electrocoagulación en aguas de basalto se procedió a realizar gráficas para observar el comportamiento de las distintas muestras que tenían distintos pesos y distintos voltajes.

En la figura 5 se puede observar la gráfica de la muestra 1 que tenía peso de 45 g se aplicó el voltaje de 6 V y se realizaron 12 repeticiones con distintos tiempos estos expresados en segundos de 0 segundos a 600 segundos de 30 en 30 segundos este mismo proceso se le aplicó a la muestra 2 con peso de 90 g y a la muestra 3 con peso de 180 g se puede observar su comportamiento en las figuras 6 y 7 correspondiente a las muestras anteriormente descritas. El comportamiento fue el mismo mientras transcurría el tiempo la turbidez, el color y los sólidos en suspensión iban disminuyendo. Este se comprobó visualmente al realizar la práctica y se comprobó con las gráficas representadas en las figuras 5, 6 y 7 correspondiente a la turbidez en función del tiempo. También con el voltaje de 6 V se realizó el análisis del comportamiento del color en las muestras y se obtuvo el mismo resultado siendo este la disminución del color conforme transcurría el tiempo este se puede observar en las figuras 11, 12 y 13. Los datos se obtuvieron con turbidímetros y colorímetros.

A partir de la figura 8 se puede observar la gráfica de la muestra 4 que tenía peso de 45 g se aplicó el voltaje de 12V y se realizaron 12 repeticiones con distintos tiempos estos expresados en segundos se repitió el mismo procedimiento de las muestras 1, 2 y 3 aplicando un rango de tiempo de 0 segundos a 600 segundos de 30 en 30 segundos, este mismo proceso se le aplicó a la muestra 5 con peso de 90 g y a la muestra 6 con peso de 180 g se

puede observar su comportamiento en las figuras 9 y 10 correspondiente a las muestras anteriormente descritas. El comportamiento fue el mismo mientras transcurría el tiempo la turbidez, el color y los sólidos en suspensión iban disminuyendo. Este se comprobó también visualmente al realizar la práctica y se comprobó con las gráficas representadas en las figuras 8, 9 y 10 correspondiente a la turbidez en función del tiempo. También con un voltaje 12 V se realizó el análisis del comportamiento del color en las muestras y se obtuvo el mismo resultado siendo este la disminución del color conforme transcurría el tiempo este se puede observar en las figuras 14, 15 y 16. Los datos se obtuvieron con turbidímetros y colorímetros.

Estos resultados se comprobaron con análisis estadísticos dando como resultado el rechazo de la hipótesis nula aceptando la hipótesis alterna. Donde Influye la intensidad de corriente en el tratamiento de aguas con electrocoagulación. También Influye el tiempo en el tratamiento de aguas con electrocoagulación. Es eficiente la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) en el proceso de electrocoagulación en el tratamiento de agua.

En la tabla 16 se refleja el porcentaje de remoción de sólidos en suspensión con el uso de la técnica de electrocoagulación dando como resultado similar los porcentajes de SST (sólidos suspendidos totales) 95 %, 96 %, 97 % y 98 % repitiéndose el porcentaje de 97 % y porcentajes de DQO de 51 %, 52 %, 53 %, 54 %, 58 % y 60 % con estos porcentajes se puede observar que el DQO no se eliminó en su totalidad pero el SST tuvo un mejor resultado al obtener porcentajes altos de remoción en las aguas de basalto.

Obteniendo los resultados esperados con respecto a los antecedentes obtenidos por otros estudios realizados a la eficiencia de la electrocoagulación

dando como resultado que es una técnica favorable para la remoción de turbidez, color y sólidos en suspensión.

CONCLUSIONES

1. El agua es de suma importancia para el uso del ser humano y de esto se deriva la importancia de investigar y realizar estudios de técnicas que favorezcan el tratamiento de este valioso recurso natural como en la industria de construcción.
2. Se concluye que la muestra 3 de basalto con peso de 180 g que se le aplicó 6 voltios y la muestra 6 de basalto con peso de 180 g que se le aplicó 12 voltios tuvieron resultados muy próximos debido a que las dos muestras tenían el mismo peso por lo que no fue significativa la diferencia; esto se comprobó en los resultados estadísticos obtenidos a partir de las gráficas.
3. Las muestras de basalto 1 con peso de 45 g que se le aplicó 6 voltios, la muestra 2 con peso de 90 g que se le aplicó 6 voltios, la muestra 4 de 45 g que se le aplicó 12 voltios y la muestra 5 con peso de 90 g con 12 voltios se comportaron de forma similar pero no obtuvieron resultados estadísticos similares concluyendo que las condiciones del agua de sí influye en el comportamiento de la turbidez el color y los sólidos en suspensión.
4. Al aumentar el tiempo las 3 propiedades del agua turbidez, color y sólidos en suspensión disminuye y al aplicar una corriente eléctrica era más eficiente la remoción de estas en el agua de basalto.

5. Se logra una mayor eficiencia de remoción de turbidez, color y sólidos en suspensión con un voltaje más alto, por lo que el voltaje de 12 V fue más eficiente que el voltaje de 6 V.

6. La electrocoagulación es una técnica eficiente para la remoción de la turbidez, el color y los sólidos en suspensión en aguas de basalto, siendo una técnica alternativa que se puede mejorar y de bajo costo.

RECOMENDACIONES

1. Realizar análisis de electrocoagulación de aguas de basalto usando cantidades menores de 120 g de basalto para obtener mejores resultados.
2. Estudiar análisis posteriores de electrocoagulación utilizando como electrodos otros metales como el cobre.
3. Experimentar con la técnica de electrocoagulación la remoción de otros contaminantes porque se ha comprobado lo eficiente que esta resultó ser.
4. Hacer más investigación de tecnología que utilice la técnica de electrocoagulación para remoción de cualquier contaminante y obtener como resultado agua inocua para uso de las personas.

REFERENCIAS

- Acosta, G. y Coy, C. (2013). La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. *Revista Facultad de Ciencias Básicas* 9(2), 306-317. <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/389/168>
- Aguilar, E. (2016). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 18(35), 69-73.
- Álvaro, A., Garces, L. (2009). Remoción del colorante azoico amaranto de soluciones acuosas mediante electrocoagulación. *Revista de Lasallista de Investigación* 6(2), 1-09. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69514278005.pdf>
- Andía, Y. (2000). *Tratamiento de agua Coagulación y Floculación*. SEDAPAL. http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e359b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
- Arango, A. (2009). Influencia de la conductividad eléctrica en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Producción + Limpia*, 7(1), 59-67.
- Equipo Editorial Naturaleza. (23 de marzo de 2017). *Hidrosfera terrestre Propiedades del agua y sus características, formas de presentación*.

Animales y biología. <https://naturaleza.paradais-sphynx.com/hidrosfera/propiedades-del-agua.htm>

Hernández, P. (2011). *Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación*. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo digital. <https://oa.upm.es/7755/>

Lenntech. (marzo de 2019). *FAQ de la contaminación del agua*. <https://www.lenntech.es/faq-contaminacion-agua.htm>

Martín, A., Rivera, M., Piña, M. y Pérez, C. (2008). Incidencia del gradiente de velocidad en la eficiencia de la electrocoagulación para remover arsénico en un reactor a flujo pistón. *Interciencia*, 33(7), 496-502.

Mollah, M., Schennach, R., Parga, J. y Cocke D. (2001). Electrocoagulation (EC) – science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29-41. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5)

Morales, N. y Acosta, G. (2010). Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 20(1), 33-44.

Morante, G. (2002). Electrocoagulación de aguas residuales. *Revista Colombiana de Física*, 34(2), 484-487.

Orozco, L. (2012). Reducción de la demanda química de oxígeno, coliformes, mohos y levaduras en mucílago de café mediante electrocoagulación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 4(1), 1-07.

[file:///C:/Users/Laboratorio11/Downloads/Administrador,+5+reduccion_de_la_demanda_quimica_de_oxigeno+subir%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Laboratorio11/Downloads/Administrador,+5+reduccion_de_la_demanda_quimica_de_oxigeno+subir%20(1).pdf)

Prieto, F., Callejas, J., Reyes, V. y Marmolejo, Y. (2012). Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lactosuero residual. *Revista AIDIS*, 5(3), 51-77.

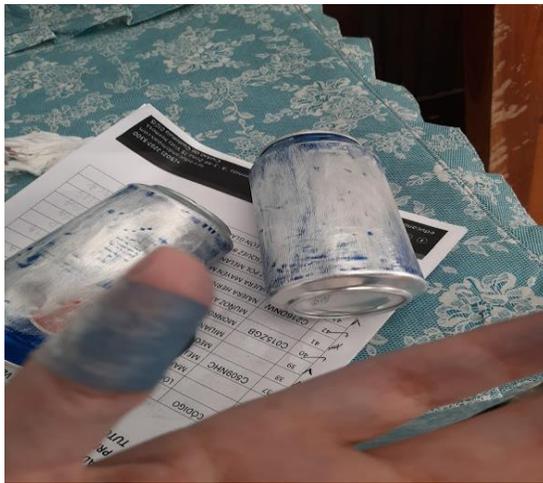
Rajkumar, D. y Palanivelu, K. (2004). Electrochemical treatment of industrial wastewater. *Journal of hazardous materials*, 113(1-3), 123-129.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.05.039>

Sienko, M., y Robert, A. (1966). *Chemistry: principles and properties*. McGraw-Hill.

APÉNDICES

Apéndice 1.

Pasos del procedimiento



Creación de electrodo



Fuente de energía eléctrica

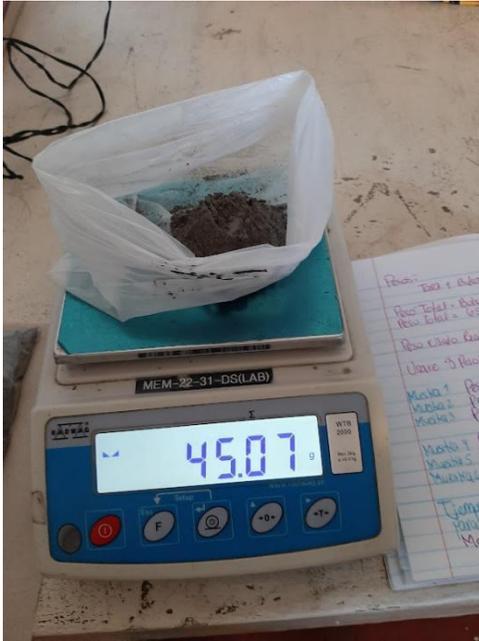


Alambre de cobre



Toma de pesos de basalto

Continuación del apéndice 1.



Preparación de muestras



Preparación de muestras



Peso de lámina para electrodo



Preparación de sistema de electrocoagulación

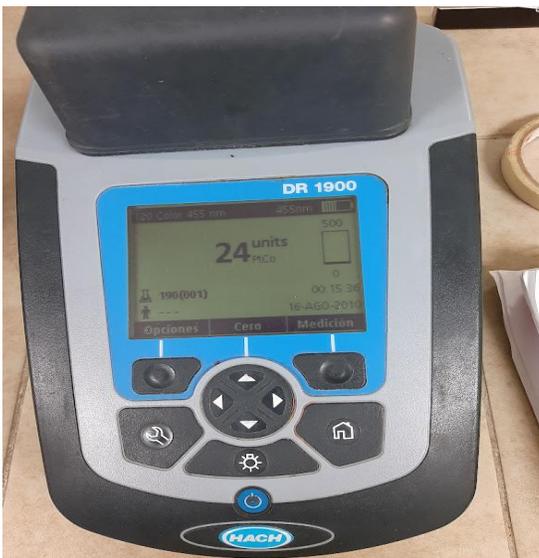
Continuación del apéndice 1.



Inicio de análisis



Toma de muestras



Equipo colorímetro



Equipo turbidímetro

Continuación del apéndice 1.



Remoción de sólido

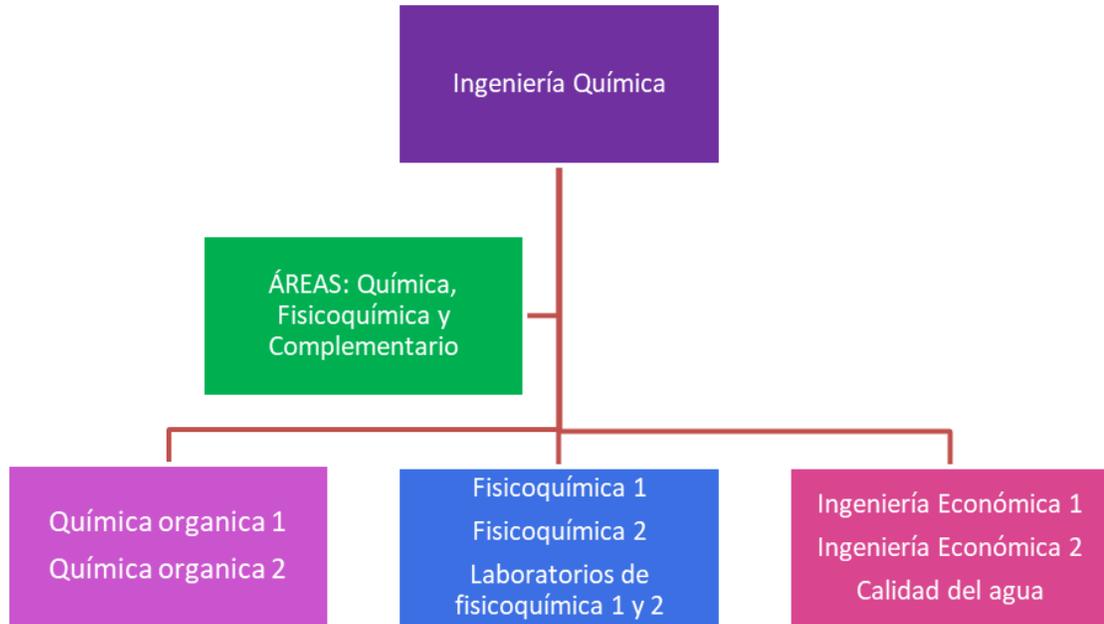


Finalizando la evaluación

Nota. Fotografías del proceso de evaluación del sistema de electrocoagulación de aguas de lavado de basalto. Elaboración propia.

Apéndice 2.

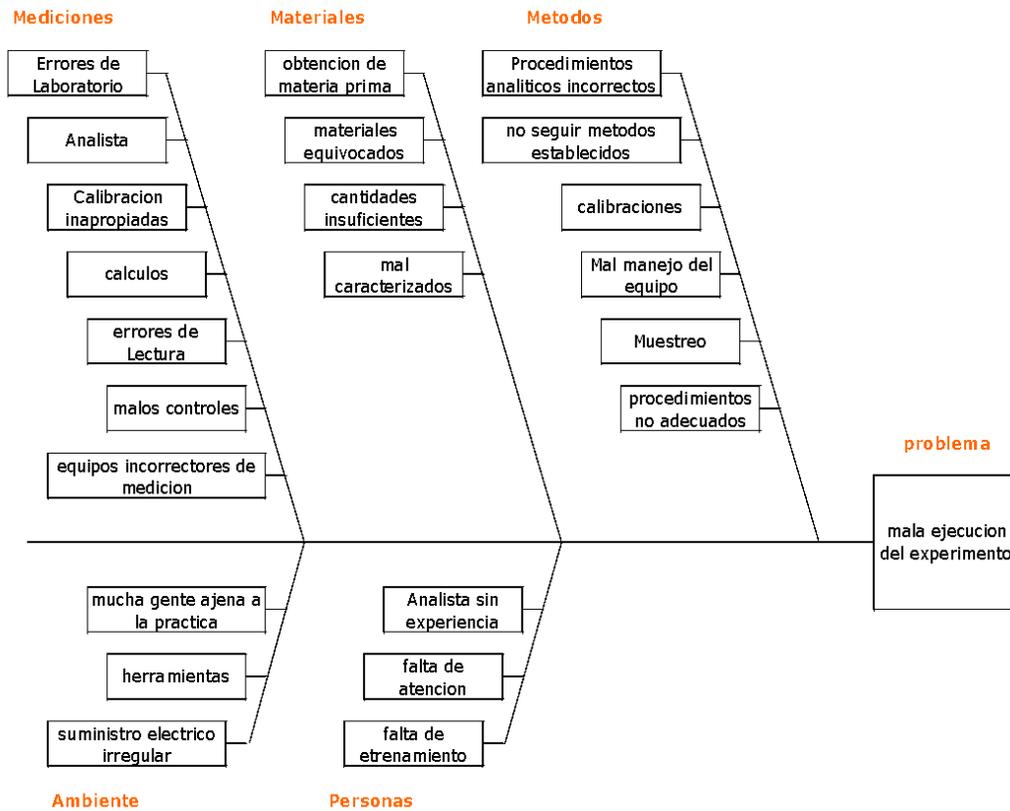
Requisitos académicos



Nota. Cursos necesarios para la realización de la evaluación del sistema de electrocoagulación de aguas de lavado de basalto. Elaboración propia.

Apéndice 3.

Diagrama de Ishikawa



Nota. Diagrama de Ishikawa realizado para la evaluación del sistema de electrocoagulación de aguas de lavado de basalto. Elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1.

Cuantiles de la distribución de Tukey

$\alpha = 0.05$	n													
m	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	6.08	8.33	9.80	10.88	11.73	12.43	13.03	13.54	13.99	14.40	14.76	15.09	15.39	15.67
3	4.50	5.91	6.82	7.50	8.04	8.48	8.85	9.18	9.46	9.72	9.95	10.15	10.35	10.52
4	3.93	5.04	5.76	6.29	6.71	7.05	7.35	7.60	7.83	8.03	8.21	8.37	8.52	8.66
5	3.64	4.60	5.22	5.67	6.03	6.33	6.58	6.80	6.99	7.17	7.32	7.47	7.60	7.72
6	3.46	4.34	4.90	5.30	5.63	5.90	6.12	6.32	6.49	6.65	6.79	6.92	7.03	7.14
7	3.34	4.16	4.68	5.06	5.36	5.61	5.82	6.00	6.16	6.30	6.43	6.55	6.66	6.76
8	3.26	4.04	4.53	4.89	5.17	5.40	5.60	5.77	5.92	6.05	6.18	6.29	6.39	6.48
9	3.20	3.95	4.41	4.76	5.02	5.24	5.43	5.59	5.74	5.87	5.98	6.09	6.19	6.28
10	3.15	3.88	4.33	4.65	4.91	5.12	5.30	5.46	5.60	5.72	5.83	5.93	6.03	6.11
11	3.11	3.82	4.26	4.57	4.82	5.03	5.20	5.35	5.49	5.61	5.71	5.81	5.90	5.98
12	3.08	3.77	4.20	4.51	4.75	4.95	5.12	5.27	5.39	5.51	5.61	5.71	5.80	5.88
13	3.06	3.73	4.15	4.45	4.69	4.88	5.05	5.19	5.32	5.43	5.53	5.63	5.71	5.79
14	3.03	3.70	4.11	4.41	4.64	4.83	4.99	5.13	5.25	5.36	5.46	5.55	5.64	5.71
15	3.01	3.67	4.08	4.37	4.59	4.78	4.94	5.08	5.20	5.31	5.40	5.49	5.57	5.65
16	3.00	3.65	4.05	4.33	4.56	4.74	4.90	5.03	5.15	5.26	5.35	5.44	5.52	5.59
17	2.98	3.63	4.02	4.30	4.52	4.70	4.86	4.99	5.11	5.21	5.31	5.39	5.47	5.54
18	2.97	3.61	4.00	4.28	4.49	4.67	4.82	4.96	5.07	5.17	5.27	5.35	5.43	5.50
19	2.96	3.59	3.98	4.25	4.47	4.65	4.79	4.92	5.04	5.14	5.23	5.31	5.39	5.46
20	2.95	3.58	3.96	4.23	4.45	4.62	4.77	4.90	5.01	5.11	5.20	5.28	5.36	5.43
21	2.94	3.56	3.94	4.21	4.42	4.60	4.74	4.87	4.98	5.08	5.17	5.25	5.33	5.40
22	2.93	3.55	3.93	4.20	4.41	4.58	4.72	4.85	4.96	5.06	5.14	5.23	5.30	5.37
23	2.93	3.54	3.91	4.18	4.39	4.56	4.70	4.83	4.94	5.03	5.12	5.20	5.27	5.34
24	2.92	3.53	3.90	4.17	4.37	4.54	4.68	4.81	4.92	5.01	5.10	5.18	5.25	5.32
25	2.91	3.52	3.89	4.15	4.36	4.53	4.67	4.79	4.90	4.99	5.08	5.16	5.23	5.30
26	2.91	3.51	3.88	4.14	4.35	4.51	4.65	4.77	4.88	4.98	5.06	5.14	5.21	5.28
27	2.90	3.51	3.87	4.13	4.33	4.50	4.64	4.76	4.86	4.96	5.04	5.12	5.19	5.26
28	2.90	3.50	3.86	4.12	4.32	4.49	4.62	4.74	4.85	4.94	5.03	5.11	5.18	5.24
29	2.89	3.49	3.85	4.11	4.31	4.47	4.61	4.73	4.84	4.93	5.01	5.09	5.16	5.23
30	2.89	3.49	3.85	4.10	4.30	4.46	4.60	4.72	4.82	4.92	5.00	5.08	5.15	5.21
31	2.88	3.48	3.84	4.09	4.29	4.45	4.59	4.71	4.81	4.90	4.99	5.06	5.13	5.20
32	2.88	3.48	3.83	4.09	4.28	4.45	4.58	4.70	4.80	4.89	4.98	5.05	5.12	5.18
33	2.88	3.47	3.83	4.08	4.28	4.44	4.57	4.69	4.79	4.88	4.97	5.04	5.11	5.17
34	2.87	3.47	3.82	4.07	4.27	4.43	4.56	4.68	4.78	4.87	4.96	5.03	5.10	5.16
35	2.87	3.46	3.81	4.07	4.26	4.42	4.56	4.67	4.77	4.86	4.95	5.02	5.09	5.15
36	2.87	3.46	3.81	4.06	4.25	4.41	4.55	4.66	4.76	4.85	4.94	5.01	5.08	5.14
37	2.87	3.45	3.80	4.05	4.25	4.41	4.54	4.66	4.76	4.85	4.93	5.00	5.07	5.13
38	2.86	3.45	3.80	4.05	4.24	4.40	4.53	4.65	4.75	4.84	4.92	4.99	5.06	5.12
39	2.86	3.45	3.79	4.04	4.24	4.39	4.53	4.64	4.74	4.83	4.91	4.98	5.05	5.11
40	2.86	3.44	3.79	4.04	4.23	4.39	4.52	4.63	4.73	4.82	4.90	4.98	5.04	5.11
41	2.86	3.44	3.79	4.03	4.23	4.38	4.51	4.63	4.73	4.82	4.90	4.97	5.04	5.10
42	2.85	3.44	3.78	4.03	4.22	4.38	4.51	4.62	4.72	4.81	4.89	4.96	5.03	5.09
43	2.85	3.43	3.78	4.03	4.22	4.37	4.50	4.62	4.72	4.80	4.88	4.96	5.02	5.08
44	2.85	3.43	3.78	4.02	4.21	4.37	4.50	4.61	4.71	4.80	4.88	4.95	5.02	5.08
45	2.85	3.43	3.77	4.02	4.21	4.36	4.49	4.61	4.70	4.79	4.87	4.94	5.01	5.07
46	2.85	3.42	3.77	4.01	4.20	4.36	4.49	4.60	4.70	4.79	4.87	4.94	5.00	5.06
47	2.85	3.42	3.77	4.01	4.20	4.36	4.48	4.60	4.69	4.78	4.86	4.93	5.00	5.06
48	2.84	3.42	3.76	4.01	4.20	4.35	4.48	4.59	4.69	4.78	4.86	4.93	4.99	5.05
49	2.84	3.42	3.76	4.00	4.19	4.35	4.48	4.59	4.69	4.77	4.85	4.92	4.99	5.05
50	2.84	3.42	3.76	4.00	4.19	4.34	4.47	4.58	4.68	4.77	4.85	4.92	4.98	5.04

Nota. Distribución de Tukey. Universidad Nacional de la Plata. (2020). *Cálculo estadístico y biometría.*