

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Electrofiltración de Agua Subterráneas para Remoción de
Metales Pesados a Escala de Laboratorio**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Por:

Bach. Ronald Ricardo Alanocca Quispe

Asesor:

Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, diciembre de 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORIA DEL INFORME DE TESIS

Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: “Electrofiltración de Agua Subterráneas para Remoción de Metales Pesados a Escala de Laboratorio” Constituye la memoria que presenta el Bachiller Ronald Ricardo Alanocca Quispe para aspirar al título Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente constancia en Juliaca, a los 22 días del mes de diciembre del año 2020.



Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera

**Electrofiltración de Agua Subterráneas para Remoción de Metales Pesados
a Escala de Laboratorio**

TESIS

Presentado para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

JURADO CALIFICADOR



**Msc. Rose Adeline Callata Chura
Presidente**



**Ing. Verónica Haydeé Pari Mamani
Secretario**



**Msc. Jael Calla Calla
Vocal**



**Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera
Asesor**

Juliaca, 22 de diciembre de 2020

DEDICATORIA

A Dios que es la fuente de la vida, el conocimiento y la sabiduría.

A mi padre Donato y a mi madre Ángela.

A mis hermanos Edith, Helard, Yanet,
Cristian y Paul.

A mi novia Mónica, familiares y amigos de
toda la vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien me dio fuerzas para continuar en esta etapa de mi vida, por ayudarme a cumplir mis metas.

A mí querida familia por apoyarme en todo momento, les guardo un cariño y respeto muy grande.

Al Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera mi asesor, él fue quien me brindó su apoyo incondicional, orientación para la ejecución de la investigación.

Al Ing. Nelson Yohel Rodríguez Calampa por su orientación y atención a mis consultas sobre el tema de investigación.

A la Universidad Peruana Unión Filial Juliaca por ser mi casa de estudio universitario.

ÍNDICE GENERAL

Índice de tablas.....	ix
Índice de figuras	ix
Índice de anexos	x
Simbolos utilizados.....	xi
Resumen.....	xii
Abstract.....	xiii
CAPÍTULO I EL PROBLEMA.....	14
1.1. Identificación del Problema	14
1.2. Justificación de la investigación	18
1.3. Presuposición filosófica	18
1.4. Objetivos	19
1.4.1. Objetivo general.....	19
1.4.2. Objetivos específicos.....	19
CAPÍTULO II REVISION DE LA LITERATURA.....	20
2.1. Fundamentos del objeto de estudio.	20
2.1.1. Metales Pesados	20
2.1.2. Electrofiltracion	23
2.2. Métodos para la acción del objeto de estudio.....	23
2.2.1. Precipitación Química.....	23
2.2.2. Intercambio Iónico	24
2.2.3. Adsorción	24
2.2.4. Tecnología de Membranas.....	24
2.2.5. Procesos Electroquímicos	25
2.3. Resultados anteriores de investigación	28
2.3.1. Antecedentes Internacionales	28
2.3.2. Antecedentes Nacionales.....	30
2.3.3. Antecedentes Locales	32
2.4. Marco normativo	33
2.4.1. Normas nacionales	33
2.4.2. Norma internacional.....	34
CAPITULO III MATERIALES Y MÉTODOS	36
3.1. Lugar de ejecución	36
3.2. Materiales, Insumos y Equipos.	36
3.2.1. Materiales	36
3.2.2. Insumos.....	37
3.2.3. Equipos	37

3.3.	Metodología	37
3.3.1.	Enfoque de la Investigación	37
3.3.2.	Tipo de Investigación.....	38
3.3.3.	Variables en Estudio.....	38
3.3.4.	Diseño de Investigación	38
3.4.	Esquema experimental de los tratamientos	39
3.5.	Análisis e Interpretación de Datos.....	39
3.5.1.	Análisis de Varianza ANOVA	39
3.6.	Diseño del Electrofiltro	39
3.6.1.	Determinación y Preparación del Número de electrodos de Fe.....	39
3.6.2.	Construcción de la celda de electrofiltracion	40
3.6.3.	Densidad de Corriente en el Electrofiltro	40
3.7.	Esquema de la etapa experimental.....	42
3.7.1.	Etapa Experimental	43
CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		50
4.1.	Caracterizacion inicial de muestra de agua subterránea sin tratamiento	50
4.2.	Caracterizacion final de las muestras de agua subterránea con tratamiento	51
4.3.	Arsénico	51
4.3.1.	Oxidación del arsénico	51
4.3.2.	Remoción del arsénico	52
4.3.3.	Análisis de varianza ANOVA.....	57
4.4.	Cerio.....	57
4.4.1.	Oxidación del cerio	57
4.4.2.	Remoción de cerio	58
4.4.3.	Análisis de varianza ANOVA.....	61
4.5.	Selenio	61
4.5.1.	Oxidación del selenio.....	61
4.5.2.	Remoción del selenio	61
4.6.	Titanio	65
4.6.1.	Oxidación de titanio	65
4.6.2.	Remoción del titanio	66
4.7.	Prueba T – Student para los parámetros físicos.....	69
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		76
5.1.	Conclusiones	76
5.2.	Recomendaciones	77
REFERENCIAS		78
ANEXOS.....		86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tecnologías de membrana más empleada	25
Tabla 2. Parámetros físicos del reglamento de la calidad del agua para consumo humano	33
Tabla 3. Parámetros inorgánicos del reglamento de la calidad del agua para consumo humano	34
Tabla 4. Parámetros físicos estándares internacionales para la calidad de agua para consumo humano establecidos por la OMS.....	35
Tabla 5. Parámetros inorgánicos estándares internacionales para la calidad de agua para consumo humano establecidos por la OMS	35
Tabla 6. Ubicación del punto de obtención de la muestra	36
Tabla 7. Combinaciones para la prueba de electrofiltración	39
Tabla 8. Fórmula para determinar el número de electrodos	40
Tabla 9. Fórmula para determinación del área efectiva de la reacción del electrodo	40
Tabla 10. Fórmula para determinación del área efectiva total de reacción	41
Tabla 11. Fórmula para hallar intensidad de corriente en miliamperios	41
Tabla 12. Fórmula para hallar densidad de corriente en mA/m ²	41
Tabla 13. Parámetros monitoreados.....	48
Tabla 14. Resultados de la caracterización	50
Tabla 15. Concentraciones de As, Ce, Se y Ti post tratamiento	51
Tabla 16. Porcentajes de remoción promedios de arsénico	52
Tabla 17. Análisis de Varianza para %Remoción de As - Suma de Cuadrados Tipo III...	57
Tabla 18. Porcentajes de remoción promedios de cerio	58
Tabla 19. Análisis de Varianza para %Remoción de Ce - Suma de Cuadrados Tipo III...	61
Tabla 20. Porcentajes promedios de remoción de selenio	62
Tabla 21. Análisis de Varianza para %Remoción de Se - Suma de Cuadrados Tipo III...	65
Tabla 22. Porcentajes de remoción promedios de titanio	66
Tabla 23. Análisis de Varianza para %Remoción de Ti - Suma de Cuadrados Tipo III	69
Tabla 24. Estadísticas descriptivas CE.....	69
Tabla 25. Estadísticas descriptivas turbiedad	71
Tabla 26. Estadísticas descriptivas pH	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático de la configuración del electrofiltro aireado.	27
Figura 2. Cámara de electrofiltración	27
Figura 3. Sistema de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro.	28
Figura 4. Etapa experimental.....	42
Figura 5. Radiación solar mes de agosto 2020.	43
Figura 6. Posibles reacciones químicas en el electrofiltro basados	51
Figura 7. Posibles reacciones químicas en el electrofiltro.	46
Figura 8. Porcentaje de remoción de As con respecto a los tratamientos.....	53
Figura 9. Concentraciones de reducción del Arsénico mg/L comparado con respecto a DS N° 031-2010-SA.....	54
Figura 10. Porcentaje de remoción de Ce con respecto a los tratamientos.	59
Figura 11. Concentraciones de reducción del cerio con respecto a los tratamientos.	60
Figura 12. Porcentaje de remoción de Se con respecto a las variables operacionales. ...	62
Figura 13. Concentraciones de reducción del Selenio mg/L comparado con respecto a DS N° 031-2010-SA.....	63
Figura 14. Porcentaje de remoción de Ti con respecto a los tratamientos.....	67
Figura 15. Concentraciones de reducción del Titanio con respecto a los tratamientos. ...	67
Figura 16. Comparación de los resultados de la conductividad eléctrica con el DS N°031- 2010-SA.	70
Figura 17. Comparación de los resultados de la turbiedad con el DS N°031-2010-SA. ...	72
Figura 18. Comparación de los resultados del pH con el DS N°031-2010-SA.....	74

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Prueba Duncan al 95%	86
Anexo 2. Panel fotografico	106
Anexo 3. Diseño de planos	100

SÍMBOLOS UTILIZADOS

As	: Arsénico
As III	: Arsénico trivalente
As V	: Arsénico pentavalente
Ce	: Cerio
Se	: Selenio
Ti	: Titanio
H ₂ O ₂	: Peróxido de hidrogeno
ICC	: Intensidad de corriente continúa
AC	: Corriente alterna
DC	: Corriente continúa
mA/cm ²	: Miliamperios por centímetro cuadrado
mA/m ²	: Miliamperios por metro cuadrado
CE	: Conductividad eléctrica
pH	: Potencial de hidrogeno
UNT	: Unidades nefelométrica de turbiedad
LMP	: Limite máximos permisibles
MINAM	: Ministerio del ambiente
OMS	: Organización mundial de la salud
DCA	: Diseño completamente al azar

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue evaluar la remoción de metales pesados mediante la electrofiltración en aguas subterráneas a escala de laboratorio, la obtención de las muestras de trabajo fue de la Urb. Villa magisterial de la ciudad de Juliaca - Puno. Se aplicó un diseño estadístico factorial 2A2B DCA completamente al azar, las variables operacionales con las que se trabajó fue A: (Intensidad de corriente continua, 25 V, 30 V); B: (Tiempo de tratamiento, 50 min, 60 min). El diseño del electrofiltro es cilíndrico con 28 cm de diámetro, 30 cm de altura, 20 L de capacidad, se emplearan 8 electrodos de acero inoxidable, 4 ánodos, 4 cátodos y dos filtros de sedimentos de 1 micra, la evacuación del agua tratada será por medio de los filtros que estarán conectados a un tubo pvc 1/2" en la base del reactor. Los porcentajes más significantes de remoción fue de 96.1, 76.2, 75.0, 88.9% para el Arsénico, Cerio, Selenio y Titanio que trabajo con las siguientes combinaciones de las variables independientes As (25 V, 60 min), Ce (25 V, 30 V; 60 min), Se (25 V, 60 min), Ti (30 V, 60min). El análisis de varianza ANOVA nos indica que por lo menos uno de los tratamientos para cada metal reporta un porcentaje promedio de remoción significativamente diferente que los otros tratamientos ($P=0.000<0,05$; prueba ANOVA). Se concluye que el sistema de electrofiltración de tipo batch demostró una eficiencia de remoción significativa.

Palabras clave: Electrolisis, electrofiltro, reactor batch, remoción de metales pesados.

ABSTRACT

The objective of the research was to evaluate the removal of heavy metals by electrofiltration in groundwater at a laboratory scale, the work samples were obtained from the Urb. Villa magisterial of the city of Juliaca - Puno. A factorial statistical design 2A2B DCA was applied completely at random, the operational variables with which we worked were A: (Continuous current intensity, 25 V, 30 V); B: (Treatment time, 50 min, 60 min). The design of the electrofilter is cylindrical with 28 cm in diameter, 30 cm in height, 20 L capacity, 8 stainless steel electrodes, 4 anodes, 4 cathodes and two 1 micron sediment filters will be used, the evacuation of the treated water will be Through the filters that will be connected to a 1/2 " PVC tube at the base of the reactor. The most significant removal percentages were 96.1, 76.2, 75.0, 88.9% for Arsenic, Cerium, Selenium and Titanium that worked with the following combinations of the independent variables As (25 V, 60 min), Ce (25 V, 30 V; 60 min), Se (25 V, 60 min), Ti (30 V, 60 min). The ANOVA analysis of variance indicates that at least one of the treatments for each metal reports an average removal percentage significantly different than the other treatments ($P = 0.000 < 0.05$; ANOVA test). It is concluded that the batch type electrofiltration system demonstrated a significant removal efficiency.

Keywords: *Electrolysis, electrofilter, batch reactor, removal of heavy metals.*

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Identificación del Problema

El agua es el elemento vital más importante para los seres humanos, para los animales y el resto de los seres vivos que se encuentran en el planeta. El agua no solo tiene una importancia como recurso de consumo sino también como un recurso económico e industrial ya que su uso o aplicación se da en muchas actividades y el consumo es muy elevado y casi siempre resulta contaminada (Quispe, 2015).

La contaminación de las aguas se efectúa mediante el vertimiento directo de las aguas contaminadas sin ningún tipo de tratamiento, esta contaminación afecta no solo a los seres humanos sino también a la flora y fauna (FAO, 2017). El crecimiento de la población, la ampliación de las áreas urbanas y la industrialización incrementaron los impactos ambientales hacia los recursos hídricos (Escobar *et al.* 2005). La contaminación hídrica está en crecimiento y es considerado como uno de los problemas ambientales principales que se aqueja a nivel mundial alterando la calidad de los cuerpos de agua (FAO, 2017). La calidad de las aguas puede ser alterada a consecuencia de las actividades humanas o de origen natural que producen efectos negativos que alteran la calidad del agua generando riesgos potenciales hacia la salud humana y el bienestar del medio ambiente (Branco, 1984).

Los metales pesados que están liberados en el medio ambiente transitan entre los ciclos abióticos y bióticos ya que son bioacumulables que persisten a lo largo del tiempo incluso cientos de años sin biodegradarse, el acumulamiento de estos metales pesados tóxicos con el pasar del tiempo han provocado la presencia de metales en abundancia en el medio ambiente logrando generar efectos nocivos en la salud humana y sobre los ecosistemas, entre los metales más peligrosos se encuentran el Pb, Hg, As y Cd (Bermejo, 2016).

La contaminación ambiental por metales pesados esta generada por actividades antropogénicas como las industrias, minera informal, curtiembre entre otras actividades económicas o también pueden ser de origen natural que están presente en aguas subterráneas, superficiales que fueron generados a partir de la lixiviación de del agua en el suelo, rocas madres o tuvieron contacto con material rocoso de erupciones volcánicas (Castro, 2015). Según Tovar et al. (2012) Infiere de que en los últimos años esta problemática ha tenido un impacto notorio en su crecimiento debido a que algunos metales pesados presentes en el ambiente tienen su origen y su uso generalizado en las industrias, el vertimiento de los efluentes que contienen iones metálicos que son agentes que amenazan la vida acuática y también la cadena trófica, mencionar que también se tiene información de su acumulación a concentraciones mayores en el ambiente y estas perduran ya que el medio ambiente no tiene esa capacidad de degradarlos.

La toxicidad de los metales pesados se puede describir como toxicidad a largo plazo o transformación a formas más tóxicas, indicar que los metales pesados como el mercurio y el cadmio son muy tóxicos a concentraciones de 0.001 a 0.1 mg/L en el caso del arsénico su toxicidad viene a ser a partir de 0.01 mg/L y a concentraciones más elevadas que esta (Bermejo, 2016). Cada metal tiene un efecto de acción muy diferente, el más conocido entre todos es el plomo que tiene un efecto el cual afecta a varios sistemas, uno de ellos es el sistema nervioso que llega a dañar las neuronas del cerebro,

el plomo también afecta a la médula ósea, también en el riñón es frecuentemente encontrado y la esclerosis múltiple enfermedad incurables de las mil caras (Romero, 2009).

El cadmio también es otro metal que causa efectos en la salud humana específicamente en el riñón, el Arsénico tal como lo señala Escarcena (2018), ‘‘Interfiere en las actividades fisiológicas esenciales como con las cardíacas, vasculares, neurológicas, lesiones hepáticas, renales, repercusiones al aparato respiratorio y lesiones cutáneas que avanzan progresivamente hasta las neoplasias, esto debido a consumir agua con contenido de arsénico durante un tiempo prolongado’’. Los efectos producidos vienen a ser muy diversos estos efectos conllevan a lesiones celulares esto dependerá básicamente del tipo de metal.

A nivel mundial existen reportes de la presencia de metales pesados en ríos, lagos, pozos subterráneos o zonas urbanas, donde se ha detectado la acumulación de metales tóxicos. En 36 países millones de personas consumen aguas con concentraciones elevadas de metales pesados dentro de ellos se encuentra el arsénico, en los años noventa se realizó un estudio encontrando concentraciones de arsénico en aguas subterráneas superiores a los parámetros establecidos por la organización mundial de la salud sobre la calidad del agua para consumo humano en los continentes de Asia, América, Europa, África y América del sur donde los reportes indican que esas aguas no son aptas para el consumo humano ya que puede generar daños hacia la salud de las personas (Quispe, 2015). De acuerdo con Ccencho (2018) menciona que ‘‘estudiar a los metales pesados es de gran importancia debido a su alta toxicidad, los efectos tóxicos de estos metales presentan problemas a largo plazo’’.

En el Perú existen casos de contaminación por metales pesados en pozos subterráneos, el Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI (2016) pone en conocimiento que la calidad de agua de los pozos subterráneos del Distrito de Mórrope –

Lambayeque tiene un alto nivel de contenido de arsénico y plomo los cuales ocasionan daños a hacia la salud de las personas del distrito.

En el departamento de Puno también existen antecedentes de la presencia de metales pesados en pozos subterráneos, el Fondo de Cooperación para el Desarrollo Social - FONCODES (2001), pone en conocimiento que mediante “el proyecto de desarrollo social en la amazonia y en la sierra”, se construyó 2200 pozos para dotar de agua potable e implementar 2200 letrinas para la disposición de excretas, la comunidad de Pelipeline ubicada en el distrito de Achaya, provincia de Azángaro, en el departamento de Puno fue beneficiada de este proyecto, que presente 91 pozos de agua para consumo humano de los cuales se muestrearon 50, con resultado superiores al Límites Máximos Permisibles (LMP) de 44, 84, 40 y 72 % para As, Fe, Pb y Al, respectivamente.

La Autoridad Nacional del Agua - ANA (2015), realizo un monitoreo de la calidad de agua superficial y subterránea del rio Coata – Puno, donde monitoreo cinco pozos en la parte baja del rio Coata, encontrando presencia de Coliformes termo tolerantes, E-Coli, y la DQO, el fósforo total, el manganeso, el aluminio, el bicarbonatos, los cloruros, el sulfatos, el calcio y arsénico superan los estándares de calidad ambiental (ECA) en aguas superficiales y los (LMP) en las aguas subterráneas.

De acuerdo con la investigación de la OMS (2014), titulada “Exposición al arsénico en el agua potable: una gran amenaza inadvertida para la salud en Perú” indican que la presencia de arsénico en la ciudad de Juliaca y Caracoto es de 96%, se tomaron 28 muestras de agua de pozo en donde 27 muestras indican la alta presencia de As y todas estas superan los límites establecidos por la OMS y son un riesgo latente contra la salud humana.

La problemática en la ciudad de Juliaca es el consumo de agua subterránea con presencia de metales pesados esto se debe a que 100 mil ciudadanos y por lo menos 130 urbanizaciones no cuenta con servicio de agua potable (Zea, 2018).

1.2. Justificación de la investigación

Esta investigación permitirá dar solución a la problemática de la ciudad de Juliaca que es la presencia de metales pesados en aguas subterráneas. Utilizando la tecnología de la electrolisis, se diseñó y construyó un electrofiltro que trabajara con electrodo de Fe (acero inoxidable) por donde se inducirá energía eléctrica manipulada acompañados de dos filtros de sedimentos de 1 micra, la construcción de este prototipo requiere tener conocimientos de ingeniería tanto para su etapa de diseño, adaptación, funcionamiento y su mantenimiento. Esta tecnología de tratamiento puede ser replicada o mejorada con los diversos métodos ya existentes para el tratamiento de agua para consumo humano con el fin de generar nuevos proyectos de tratamiento y así cumplir con el reglamento de la calidad del agua para consumo humano.

1.3. Presuposición filosófica

Las actividades humanas están modificando la calidad del medio ambiente de una manera muy acelerada en los últimos 50 años, a medida que el tiempo va avanzando esta problemática se va tornando cada vez más amenazador, un claro ejemplo de ello es el calentamiento global.

La biblia nos da razones importantes para el cuidado del medio ambiente y al mismo tiempo nos induce a ser equilibrados.

Dios creo la tierra para que fuese el hogar del hombre y goce de la creación del señor en todos sus aspectos. Según Génesis (2:15) “Y jehová Dios procedió a tomar al hombre y a establecerlo en el jardín del edén para que lo cultivara y lo cuidara”.

El agua es la fuente de la vida que Dios nos brindó para poder beberla con el principal fin de poder satisfacer nuestras necesidades y vivir sin inconvenientes, indicar

que en (Génesis 1:9) menciona “Y Dios dijo: Júntese las aguas que están debajo del cielo en un lugar, y descúbrase lo seco” (Reyna Valera, 1960).

El cuidado del agua también es el símbolo de salud en (Éxodo 23:25) menciona “Más a Jehová vuestro Dios serviréis, y él bendecirá tu pan y tus aguas; y yo quitaré toda enfermedad de en medio de ti” (Reyna Valera, 1960). En la biblia podemos encontrar muchos versículos que hablan del agua, de su importancia, su significado y sus beneficios para el desarrollo de la vida de las personas.

La problemática sobre la contaminación de aguas y la pérdida de su calidad es un factor que está perdurando en la actualidad, es por ello que la humanidad está impulsando estrategias para restaurar los recursos naturales que Dios creó mediante tecnologías innovadoras amigables con el medio ambiente, ya que Dios nos creó con el propósito de cuidar su creación.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Evaluar la remoción de metales pesados mediante la electrofiltración en aguas subterráneas a escala de laboratorio.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la concentración de metales pesados del agua subterránea.
- Identificar las variables operacionales del prototipo del electrofiltro.
- Determinar el porcentaje de remoción de los metales pesados.

CAPÍTULO II

REVISION DE LA LITERATURA

2.1. Fundamentos del objeto de estudio.

2.1.1. Metales Pesados

Según Quispe (2015) menciona que el arsénico, cromo, cobre, mercurio, plata, plomo, plata y zinc, estos vienen a ser elementos metálicos tóxicos que a pequeñas escalas son perjudiciales para la salud humana.

2.1.1.1. Importancia de los Metales Pesados

El agua es considerada una solución universal en donde se disuelven los metales pesados provenientes de estructura geológicas ricas en variedad de iones disueltos. Para la inserción al ciclo hidrológico los metales pesados provienen en su gran porcentaje de la naturaleza, estos minerales son desplazados por las corrientes de lluvia que los dirigen a lagos, ríos (Ccencho, 2018).

De acuerdo con Ccencho (2018), menciona que “estudiar a los metales pesados es de gran importancia debido a su alta toxicidad, los efectos tóxicos de estos metales presentan problemas a largo plazo”.

2.1.1.2. Agua Subterránea

Las aguas subterráneas son las que están situadas por debajo de la superficie del suelo, están compuestas por acuíferos también se tiene que mencionar a la capa freática que es la saturación del nivel del agua ya sea en un pozo, en ranuras de las capas de las rocas o de los espacios porosos del suelo (Carmona, 2018).

Las aguas duras se generan en presencia de piedras calizas y en donde la capa del suelo superior es gruesa y lo contrario pasa con la formación de aguas blandas estas se generan con ausencia o dispersión de las piedras calizas y con una capa de suelo superior delgada (Carmona, 2018).

Se tiene en conocimiento que cuando hay precipitación pluvial una parte de esta infiltra en el suelo y llega a saturar los poros del suelo y formar una capa impermeable donde esta se almacena, también tenemos que mencionar que por medio de la percolación del suelo se permite la solubilización de los minerales presentes en la corteza terrestre los cuales que a medida del porcentaje de concentración pueden llegar a perjudicar las utilidades del agua (Carmona, 2018).

2.1.1.3. Origen y Distribución de los Metales Pesados

Los metales pesados están presentes en el ambiente en concentraciones, los cuales no causan daños ni perjudican el desarrollo de la vida, los metales pesados no se destruyen ni se degradan solo son disueltos por agentes químicos o físicos, también los metales pesados pueden solubilizarse y así se pueden distribuir o transportarse (Londoño et al., 2016).

2.1.1.4. Efectos de los Metales Pesados en la Salud

Cada metal tiene un efecto de acción muy diferente, el más conocido entre todos es el plomo que tiene un efecto el cual afecta a varios sistemas, uno de ellos es el sistema nervioso que llega a dañar las neuronas del cerebro, el plomo también afecta a la médula ósea, también en el riñón es frecuentemente encontrado y la esclerosis múltiple enfermedad incurables de las mil caras (Romero, 2009).

El cadmio también es otro metal que causa efectos en la salud humana específicamente en el riñón, el Arsénico tal como lo señala Escarcena (2018), "Interfiere en las actividades fisiológicas esenciales como con las cardíacas, vasculares,

neurológicas, lesiones hepáticas, renales, repercusiones al aparato respiratorio y lesiones cutáneas que avanzan progresivamente hasta las neoplasias, esto debido a consumir agua con contenido de arsénico durante un tiempo prolongado”. Los efectos producidos vienen a ser muy diversos estos efectos conllevan a lesiones celulares esto dependerá básicamente del tipo de metal.

2.1.2. Electrofiltración

2.1.2.1. Electroquímica

La electroquímica es una extensión más de la química, la cual estudia la transformación del intercambio la energía química y la eléctrica que mediante la aplicación de esta produce una reacción de óxido – reducción (Díaz del castillo, 2008).

Según Díaz del castillo (2008), define que el proceso de oxidación es la pérdida de los electrones y denomina al proceso de la reducción que es la ganancia de electrones, esta reacción de óxido – reducción se conoce como (REDOX), aquí existe la transferencia de electrones de uno o más de ellos.

2.1.2.2. Electrolisis

La electrolisis es considerada uno de los métodos químicos primordiales de separación, se denomina electrolisis al proceso en el cual se utiliza la energía eléctrica para producir cambios químicos basados en una reacción de oxidación – reducción redox no espontánea, este proceso se realizara en una celda de electrolisis o electrolítica, en donde se añade una densidad de corriente eléctrica (Díaz del castillo, 2008).

El método de la electrolisis tiene ventajas una de ellas consiste en que la temperatura no es necesaria elevarla para que la reacción se de, así evitándose pérdidas innecesarias de energía y reacciones secundarias (Díaz del castillo, 2008).

2.1.2.3. Electrodo

Según Quispe (2015), manifestó que el electrodo es un conductor para la distribución de corriente en una solución en donde produce la ganancia de electrones o la pérdida de electrones de los iones de la solución.

2.1.2.4. Ánodo

De acuerdo con Quispe (2015), se menciona que es el electrodo positivo de un terminal que cumple la función de conductor de corriente en un proceso electroquímico y está conectado a una fuente de corriente directa en el terminal positivo de este equipo.

2.1.2.5. Cátodo

Como se lee en Quispe (2015), se menciona que es un electrodo negativo de un terminal que cumple la función de conductor de corriente en un proceso electroquímico y que está conectado a una fuente de corriente directa en el terminal negativo de este equipo.

2.1.2.6. Filtración

La filtración es el acto de separación de materiales en suspensión, se puede realizar con medios porosos que tengan un flujo descendente o ascendente, se trabaja también con presión o por gravedad, también se cataloga dos tipos de filtración la rápida o la lenta esto dependerá a la velocidad de la filtración (Ordoñez y Pesantez, 2017).

2.2. Métodos para la acción del objeto de estudio.

2.2.1. Precipitación Química

Melgar (2016), hace mención que la eliminación del ion metálico se realizara mediante la añadidura de un reactivo el cual forme un compuesto insoluble con el mismo, los metales pesados precipitan al aumentar su concentración de pH y el proceso tiene lugar solubilizarse el metal y formarse el precipitado.

Por ejemplo el método más utilizado para la eliminación del cromo de efluentes industriales es al añadirle (NaOH) o la cal (CaO) con el principal motivo de conseguir un pH alcalino y que el cromo precipite en forma de hidroxilo. También indicar que este método no es efectivo cuando en el efluente hay presencia de materia orgánica por el simple hecho de que los compuestos de cromo no llegan a precipitar (Melgar, 2016).

2.2.2. Intercambio Iónico

Consiste de un mecanismo de interacción electrostática lo cual se debe principalmente a las fuerzas de atracción de coulomb el cual se realiza cuando un ion de disolución pasa intercambiarse por otro ion que tiene el mismo signo el que está unida a una partícula solida inmóvil (Melgar, 2016).

Este proceso es generalmente usado para la eliminación de un catión o anión que no se desea del agua, hacer también énfasis que para el caso de remoción de los cationes estos intercambiados por un H^+ o un Na^+ (Trelles, 2013).

Melgar (2016), menciona que cuando las concentraciones de metales pesados en el agua estén presentes en menores cantidades el intercambio iónico puede ser una tecnología alternativa efectiva.

2.2.3. Adsorción

Es el proceso de separación de una fase fluida (liquida – solida) en el que son transferidos hacia un sustrato sólido y así quedando física o químicamente enlazados en la superficie del adsorbente. La adsorción se considera un método eficaz para la remoción de iones de metales pesados en concentraciones bajas (Melgar, 2016).

2.2.4. Tecnología de Membranas

La tecnología de membranas son barreras físicas las cuales son semipermeables la cual separa dos fases el cual impide su contacto y restringe el desplazamiento de las moléculas a través de ella este proceso es la que permite la separación de los agentes

contaminantes presentes en el agua y así genera un efluente acuoso ya depurado (Melgar, 2016).

La aplicación de esta tecnología de membranas para el tratamiento de contaminantes tiene una mayor dificultad y a esto añadiéndole su elevado precio para su implementación, también se indica que las membranas no son capaces de resistir ciertos niveles de pH y algunos tipos de agentes químicos, estas membranas son deteriorables con la presencia de microorganismos (Melgar, 2016).

Tabla 1
Tecnologías de membrana más empleada

Tecnología	Sustancias que pasan			Sustancias que retienen	
	Tipo	Fuerza impulsadora	Estado físico	Tipo	Dimensiones
Microfiltración (M.F.)	Agua y sólidos disueltos	0 – 1 atm	Suspendidos	Bacterias, sílice	>500.000 g/mol (0.02 – 10 µm)
Ultrafiltración (U.F.)	Agua y sustancias de bajo peso molecular	0 – 10 atm	Suspendidos Coloidales disueltos	Macromoléculas coloidales	>500 g-7mol (0.001 – 0.02 µm)
Osmosis inversa (O.I.)	Agua	1 – 6 atm	Inorgánicos Coloidales orgánicos	Inorgánicos Coloidales orgánicos	>50 g/mol

Fuente: Melgar (2016).

2.2.5. Procesos Electroquímicos

El funcionamiento de esta tecnología es añadir corriente eléctrica a través del agua, el agua a tratar debe de tener una conductividad buena en el caso hipotético que el agua a tratar tenga una conductividad baja se le añade un electrolito que aumenta la conductividad en el agua, una vez que se le aplique electricidad al agua se procede a generar la electrolisis en el agua generando reacciones de oxidación y reducción tanto en el ánodo y cátodo (Melgar, 2016).

Oxidación en el ánodo se produce por la transferencia de electrones en la superficie del ánodo o por la generación de un agente oxidante in situ. La reducción en el cátodo se utilizó en situaciones no poco frecuentes de reducción de metales catiónicos desde varios y miles de mg/L hasta valores por muy debajo de mg/L. Existe una primera etapa en la cual la deposición de metal sobre la superficie del cátodo que ha de continuarse con la remoción del mismo (Melgar, 2016).

2.2.5.1. Electrofiltración

La electrofiltración es una tecnología convencional básica la cual se aplica al tratamiento de aguas para el consumo humano y aguas residuales con la aplicación de un campo eléctrico que se darán a través de un medio de filtración la cual mejorara la calidad de remoción de los contaminantes presentes en el tratamiento, también se destaca que la inserción de un filtro de membrana en el proceso de la aplicación con el campo eléctrico en el tratamiento demuestra que es muy eficiente obteniendo resultados de mejora en la separación de líquido – sólido (Khosravanipour et al., 2016).

Esta se plantea como una tecnología moderna y nueva la cual tiene expectativas altas en su eficiencia, esta se basa gracias a la aplicación de un campo eléctrico que actúa como una fuerza la cual se adiciona a la fuerza aplicada a un filtro, está demostrado que la electrofiltración es mucho más eficiente que un filtro a presión convencional de suspensiones sólidos – líquidos (Capilla et al., 2013).

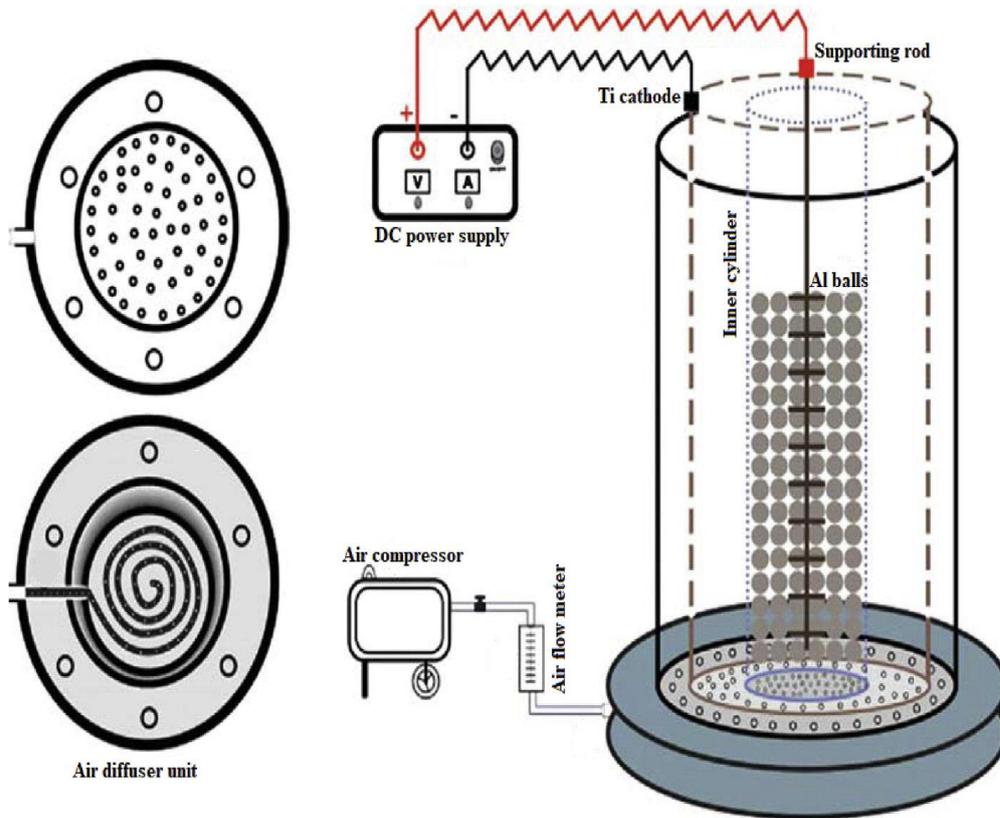


Figura 1. Diagrama esquemático de la configuración del electrofiltro aireado (Goren et al., 2020).

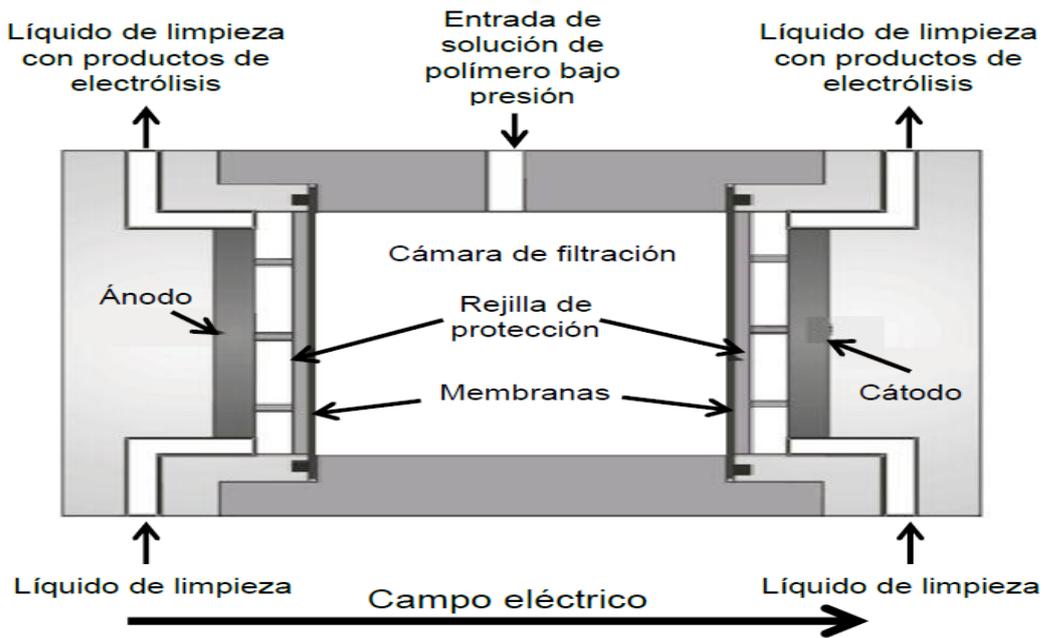


Figura 2. Cámara de electrofiltración (Giraudo, 2012).

2.2.5.2. Electrocoagulación

La electrocoagulación es un tratamiento para aguas residuales como también para agua potable para consumo, los contaminantes de los efluentes son eliminados aplicando básicamente principios de coagulación, en este proceso no se añade coagulante químico, ya que esta función lo realiza la corriente eléctrica que se aplica al agua a tratar (Arévalo, 2016).

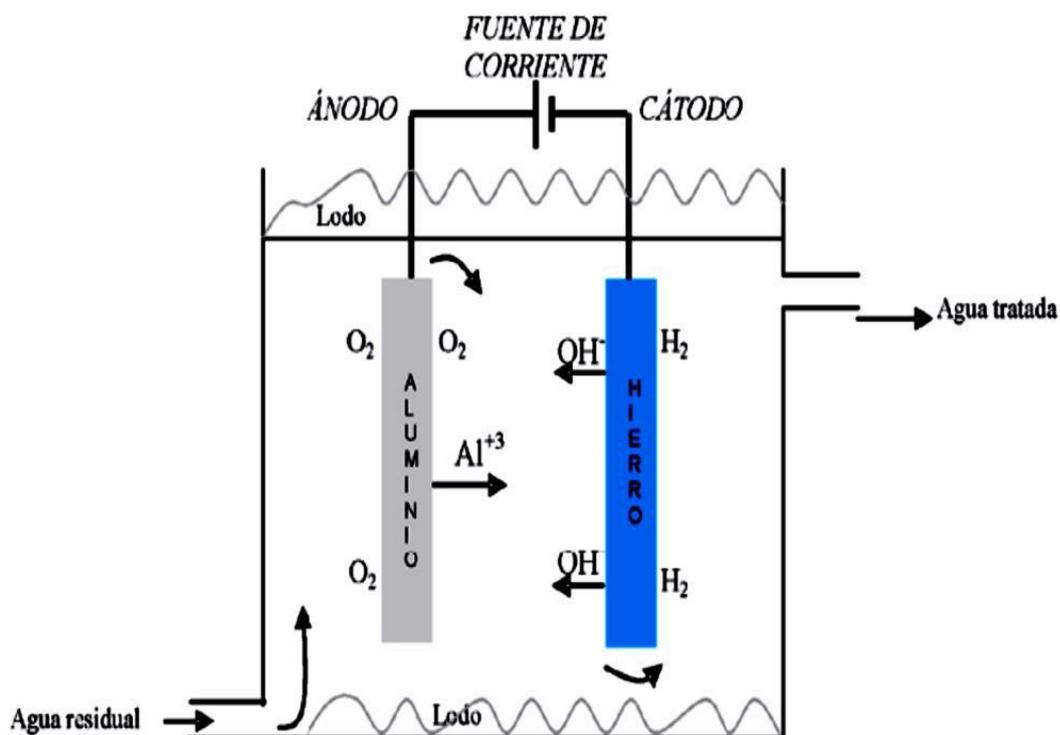


Figura 3. Sistema de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro (Arévalo, 2016).

2.3. Resultados anteriores de investigación

2.3.1. Antecedentes Internacionales

En Alemania, Hofmann, Käßpler y Posten (2006) determinaron en el presente trabajo de investigación “detallar la ampliación de un proceso de electrofiltración con membrana de punto muerto presurizado a escala laboratorio”, Se diseñó un electrofiltro a escala laboratorio en este filtro lo principal es superponer el campo eléctrico a un proceso de filtración con membrana. Los parámetros de los procesos de operación vienen a ser la

intensidad del campo eléctrico y la presión, usando el electrofiltro se logró disminuir el tiempo de filtración se pasó a deshidratar un polisacárido de xantano de 5 g/l en donde se logró minimizar el tiempo de filtración en un 90 % a comparación con un filtro de prensa convencional.

En Singapur, Zhang et al. (2000) realizaron un estudio relacionado con el tema de investigación, cuyo objetivo es el “desarrollo experimental de la filtración en lecho profundo de suspensiones acuosas en donde se utilizara filtro aplicando campos eléctricos a diferentes resistencias”, las variables de operación serán la intensidad del campo eléctrico, la suspensión de los valores del pH. Los resultados obtenidos en este proyecto de investigación destacan la presencia del campo eléctrico, la calidad del filtrado dependerá de la intensidad de campo eléctrico que se aplicara y la conductividad del agua esto mejora la recolección de partículas.

En Taiwán, Yang y Yang (2004) desarrollaron una investigación semejante al tema de estudio el cual tuvo el objetivo “producir agua ionizada de las aguas residuales del pulido mecánico químico” en donde se utilizó como proceso de tratamiento la tecnología de electrofiltración y electrodiálisis. Los experimentos se desarrollaron con un diseño factorial fraccional 2^4 , la electrofiltración de flujo cruzado y la electrodiálisis se realizan simultáneamente con el fin primordial de tratar aguas residuales de CMP mixtas (óxido + metal). Los resultados indican que la intensidad del campo de corriente es el parámetro primordial el cual controla al pH y al potencial de oxidación, la turbidez fue inferior a 1 NTU, el carbono orgánico está en una concentración baja de 3 mg/L y por último los sólidos disueltos totales es menor de 50 mg/L.

En USA, Brunson, Clinton y Watson (1991) en su artículo de investigación titulado “Electrofiltración granular”, plantea un modelo teórico la cual se basa en un balance de fuerza en una partícula suspendida la cual corrobora los valores cuantitativos que se obtuvieron y mediante eso ser una fuente de información que sirva para el diseño de

filtros, se verifico que la electrofiltracion granular es eficaz para la clarificación suspensión diluida de líquidos orgánicos. La electrofiltracion granular es una tecnología muy buena para la generación de efluentes limpios por medio de suspensiones diluidas en líquidos.

En Taiwán, Yang y Li (2007) en su trabajo de investigación buscan “diseñar e implementar dos membranas que contienen oxido de titanio y oxido de aluminio”, serán añadidos a un módulo de electrofiltracion de flujo cruzado con el que se trató las aguas residuales que contienen nano partículas de sílice que se mezcló con agua residual de óxido CMP. Las membranas tubulares de óxido de titanio y oxido de aluminio que se diseñaron son útiles para el tratamiento de aguas residuales de óxido CMP, los cuales removieron en un 90% los sólidos suspendidos y el sílice, también indicar que el nivel de turbidez al pasar por el electrofiltro bajo considerablemente la turbidez era menor a 0.75 NTU, por lo que se indica que el agua que se trato puede servir para diferentes aplicaciones.

En Girona, Martínez et al. (2013) Su trabajo se realizó con el fin primordial de “obtener mejores rendimientos de filtración con la aplicación de un campo eléctrico en un filtro a presión”, la construcción del electrofiltro fue a escala de laboratorio, la aplicación de la presión fue 0.4 bar, la intensidad eléctrica fue de 0 a 2.21 A, se estudió la influencia del campo eléctrico sobre el agua, la presión electro-osmótica, la resistencia específica y el pH del filtrado. Los resultados al aplicar una intensidad de 2.21 A se logró la disminución en un 47% en el tiempo de filtración comparado con la filtración sin presencia del campo eléctrico, la resistencia especifica de la porosidad del filtro disminuyo en un 27%, la presión se incrementó a 29.9 kPA y en el pH de los dos bloques al realizar los experimentos su valor se elevó más.

2.3.2. Antecedentes Nacionales

En Huancayo, Paitan y Palomino (2017) quienes realizaron un estudio de tipo experimental con el objetivo “Determinar la remoción de arsénico del agua potable distrito

de Quero Provincia de Jauja por el método de electrocoagulación”. En consiguiente el proceso de electrocoagulación lo realizaron utilizando electrodos de fierro (ánodo) y electrodos de aluminio como (cátodo), la densidad de corriente con el trabajaron fue de $28,23 \text{ A/m}^2$ y el tiempo de residencia fue de 25 minutos. La concentración inicial de As fue de $0,05453 \text{ mgAs/L}$ se encuentra en cantidades elevadas que superan el ECA del agua que es de $0,01 \text{ mgAs/L}$. Una vez aplicado la electrocoagulación el nivel del arsénico como resultado fue 0.0012 mgAs/L el cual es un valor inferior al ECA y se obtuvo un porcentaje de remoción del 97.73%.

En Trujillo, Castañeda y Choton (2018) realizaron un estudio en el campo de la electrocoagulación teniendo como objetivo del proyecto “Explicar el efecto de la densidad de corriente y tiempo de residencia en el proceso de electrocoagulación sobre control del porcentaje de reducción de Fe^{2+} en soluciones de drenaje acido mina”. Las variables que se estudiaron fueron densidad de corriente de 20, 40 y 80 mA/cm^2 y tiempo de residencia de 10, 20, 40 y 60 minutos. El mayor porcentaje de remoción de Fe^{2+} fue de 76,20% con una intensidad de corriente de 80 mA/cm^2 y tiempo de residencia de 40 minutos y se logró obtener un porcentaje mínimo de 17,97% con una intensidad de corriente de 20 mA/cm^2 y tiempo de residencia de 10 minutos.

En Lima, Westres (2013) en su proyecto se desarrolló la aplicación de la tecnología de electrocoagulación para la remoción de metales pesados, el proyecto de investigación tiene como como objetivo “Estudiar la remoción de metales pesados de un efluente industrial procedente de una planta productora de sulfatos de Zinc y Magnesio mediante la técnica electroquímica de electrocoagulación”. Para conseguir los resultados deseados se tuvo que trabajar con variables óptimos que están directamente relacionados con el proceso de tratamiento. Las variables del proceso de tratamiento vienen a ser la intensidad de corriente 5 A/dm^2 , pH 6-9, Caudal de entrada al reactor de 14 ml/s . Los resultados que se obtuvieron fueron buenos ya que cumplieron la ley general de aguas

DS N° 261-69-AP, también indicar que el nivel de turbidez disminuyó de 36 NTU a 0,2 NTU.

2.3.3. Antecedentes Locales

En Puno, la investigación realizada por Quispe (2015) tiene por objetivo “Evaluar la electrocoagulación para la remoción de mercurio de las aguas residuales procedentes del centro poblado la Rinconada”, se construyó una celda de electrocoagulación, con 5 electrodos de aluminio, tres serán ánodos y dos serán cátodos, en donde se trataron dos muestras de aguas residuales. Las variables de operación son densidad de corriente 3,31 mA/cm² y 6,61 mA/cm², tiempo de electrolisis de 15 y 30 minutos y la concentración de NaCl (m) de 1 y 3 g/l. La concentración inicial del Hg es de 0,596 mg/L de la muestra 1 y la muestra 2 es de 0.522 mg/L. Los resultados óptimos de remoción de Hg para la muestra 1 es de 0.018 mg/L con un porcentaje de remoción de 97.00%, para la muestra 2 es de 0.026 mg/L con un porcentaje de remoción de 94, 93% en un tiempo de electrolisis de 30 minutos, concentración de NaCl 3 g/l y la densidad de corriente de 6 mA/cm².

En Puno, Porto (2014) en su trabajo de investigación que tiene por objetivo “Evaluar la remoción de arsénico por electrocoagulación de aguas mineras”. Se construyó una celda de electrocoagulación tipo batch a escala de laboratorio en el cual se trabajó con electros de aluminio y acero inoxidable, la capacidad de la celda es de 1 L. Los resultados indican que el porcentaje de remoción del arsénico es de 92.57% el cual contiene como concentración final 0.0075 mg As/L se redujo ya que la concentración inicial del arsénico era de 0.101 mg As/L, las condiciones de operación fueron 17,18 minutos de electrolisis y una densidad de corriente 1,87 mA/cm², cumpliendo con la normativa vigente que se establece en el ECA para agua para la categoría 4 el parámetro del arsénico está dentro del límite permitido.

2.4. Marco normativo

Existe norma nacional e internacional sobre la calidad del agua para consumo humano.

2.4.1. Normas nacionales

- El reglamento de la calidad del agua para consumo humano el DS N°031-2010-SA.

2.4.1.1. DS N° 031-2010-SA – Reglamento de la calidad del agua para consumo humano

La finalidad del Reglamento es la disposición con relación a la gestión de la calidad del agua para consumo humano con la finalidad de garantizar su inocuidad, prevenir los factores de riesgos sanitarios, así como proteger y promover la salud y bienestar de la población.

La tabla 2 nos muestra parámetros físicos del reglamento de la calidad del agua para consumo humano como la turbiedad, conductividad eléctrica, temperatura y pH.

Tabla 2
Parámetros físicos del reglamento de la calidad del agua para consumo humano

Parámetros	Unidad de medida	LMP
Turbiedad	UNT	5
Conductividad eléctrica	µmho/cm	1500
Temperatura	°C	-----
pH	Valor de pH	6.5 – 8.5

Fuente: DS N° 031-2010-SA.

La tabla 3 nos muestra parámetros inorgánicos del reglamento de la calidad del agua para consumo humano como el arsénico, cerio, selenio y titanio.

Tabla 3
Parámetros inorgánicos del reglamento de la calidad del agua para consumo humano

Metales inorgánicos utilizados en esta investigación		
Parámetros inorgánico	Unidad de medida	LMP
Arsénico	mg/L	0.010
Cerio	mg/L	---
Selenio	mg/L	0.010
Titanio	mg/L	---

Fuente: DS N° 031-2010-SA.

2.4.2. Norma internacional

- Estándares internacionales para la calidad de agua para consumo humano establecidos por la organización mundial de la salud.

2.4.2.1. Estándares internacionales para la calidad de agua para consumo humano establecidos por la organización mundial de la salud

Todos los países que establecen este tipo de normas nacionales utilizan como parámetro principal de comparación las guías de la OMS para la calidad del agua potable.

La tabla 4 nos muestra Parámetros físicos de los estándares internacionales para la calidad de agua para consumo humano establecidos por la OMS como la turbiedad, conductividad eléctrica, temperatura y pH.

Tabla 4***Parámetros físicos estándares internacionales para la calidad de agua para consumo humano establecidos por la OMS***

Parámetros	Unidad de medida	OMS
Turbiedad	UNT	5
Conductividad eléctrica	uS	1500
Temperatura	°C	-----
pH	Valor de pH	6.5 – 8.5

Fuente: OMS (1993).

La tabla 5 nos muestra Parámetros inorgánicos de los estándares internacionales para la calidad de agua para consumo humano establecidos por la OMS como el arsénico, cerio, selenio y titanio.

Tabla 5***Parámetros inorgánicos estándares internacionales para la calidad de agua para consumo humano establecidos por la OMS***

Metales inorgánicos utilizados en esta investigación		
Parámetros inorgánico	Unidad de medida	OMS
Arsénico	mg/L	0.01
Cerio	mg/L	---
Selenio	mg/L	0.01
Titanio	mg/L	---

Fuente: OMS (1993).

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se realizó en la Mzn (K) Lt (22) de la Urbanización Villa Magisterial salida a cusco de la ciudad de Juliaca – San Román – Puno, también se obtuvo la muestra de agua del lugar indicado y es de origen subterráneo, se hizo la caracterización química de metales pesados totales en el laboratorio Bhios. Este mismo punto nos sirvió para poder obtener más muestras para nuestros experimentos de tratamiento. En la tabla 6 se muestra los datos de ubicación del punto de muestreo.

Tabla 6
Ubicación del punto de obtención de la muestra

Ubicación de punto de muestreo							Limites políticos		
Coordenadas UTM			Datos del punto de muestreo				Distrito	Provincia	Departamento
Este	Norte	Zona	Altitud	Nivel napa freática	Tipo de agua	Tipo de pozo			
376446.43 m E	8290504.31 m S	19 L	3886 msnm	4.40 m	Clara	Tubular	Juliaca	San Román	Puno

- msnm: Metros sobre el nivel del mar.
- UTM: universal transversal mercator.

3.2. Materiales, Insumos y Equipos.

3.2.1. Materiales

- Láminas de acero inoxidable de 22 cm x 11cm marca (A – 36).

- Filtro de sedimentos de 1 micra marca vigaflow de polipropileno.
- Cable THW-90 14AWG rojo de 5m.
- Cable THW-90 14AWG negro de 5m.
- Arco de sierra marco solidos de 12'' modelo 20-206 12'' marca Stanley.
- Alicata universal 8 pulgadas modelo T201-8X marca truper.
- 3 unidades de Lija para metal grano 120 modelo DAT2012OS marca Dewalt.
- 7 unidades de Pinzas de cocodrilo rojos modelo AC285 marca SureGrip.
- 7 unidades de Pinzas de cocodrilo negros modelo AC285 marca SureGrip.
- Balde transparente de 20L marca Hude.
- Cútter profesional marca Truper.
- Cinta aislante negra de 18 m marca Werken.

3.2.2. Insumos

- Peróxido de hidrogeno H₂O₂ al 50% de pureza 2L.

3.2.3. Equipos

- Multitester multímetro digital modelo 10404 marca truper.
- Fuente de alimentación regulable marca UTP1303 modelo Unit-T.
- Medidor portátil de temperatura, pH, EC y TDS modelo HI9811-5 marca Hanna Instruments.
- Turbidímetro digital marca VELP modelo TB1.

3.3. Metodología

3.3.1. Enfoque de la Investigación

La presente investigación se encuentra enmarcado en un enfoque cuantitativo, porque se realizará la recolección de datos (Hernández et al., 2010).

3.3.2. Tipo de Investigación

El presente trabajo de investigación es de tipo experimental, porque se manipulara las variables independientes para verificar los cambios en la variable dependiente (Hernández et al., 2010).

3.3.3. Variables en Estudio

Variable Dependiente: Remoción de metales pesados.

Variable Independiente: Intensidad de la corriente Continua (V: voltios) y Tiempo de tratamiento (T: minutos).

3.3.4. Diseño de Investigación

3.3.4.1. Diseño Factorial 2A2B DCA Completamente al azar

Se aplicara un diseño factorial DCA, donde el factor (A) Intensidad de Corriente continua (V: voltios), y el factor (B) Tiempo de Tratamiento (T: minutos).

3.3.4.2. Factores y Niveles

El factor (A) Intensidad de Corriente continua (V: voltios) el cual tiene 2 niveles, y el factor (B) Tiempo de Tratamiento (T: minutos) el cual tiene 2 nivel, se realizaran 4 experimentos con 3 réplicas.

3.4. Esquema experimental de los tratamientos

La tabla 7 muestra las combinaciones del número de experimentos de acuerdo al diseño estadístico.

Tabla 7
Combinaciones para la prueba de electrofiltración

Experimentos	Replica	Factor (A) ICC (V:voltios)	Factor (B) Tiempo de Tratamiento (T: min)	Distancia entre electrodos	Electrodos
1	3	25	50	1 cm	Acero inoxidable
2	3	30	50	1 cm	Acero inoxidable
3	3	25	60	1 cm	Acero inoxidable
4	3	30	60	1 cm	Acero inoxidable

Nota: ICC: intensidad de corriente continua.

3.5. Análisis e Interpretación de Datos

3.5.1. Análisis de Varianza ANOVA

La corrida de datos serán evaluados mediante un análisis de varianza (ANOVA), en donde se tendrán que distribuir las variables estadísticas y los tratamientos de acuerdo al diseño experimental, se utilizara el Software Statgraphics Centurion XVI, a un nivel de significancia de 95%.

3.6. Diseño del Electrofiltro

3.6.1. Determinación y Preparación del Número de electrodos de Fe

Los electrodos de acero inoxidable que se utilizaron fueron cortados en placas rectangulares de 22 cm largo, 11 cm alto, 0.2 cm de espesor, posterior a ello se procedió a lijarlo, lavarlos con detergente y a enjuagarlos con agua para eliminar suciedad, grasa, polvo, oxido de su superficie. Se trabajó con un distanciamiento entre placas de 1 cm.

Tabla 8
Fórmula para determinar el número de electrodos

Formula	Desarrollo
<i>Número de electrodos</i>	<i>Número de electrodos</i>
$= \frac{(\text{ancho de celda}) - 2 \times (\text{distan. electrodos a lateral})}{(\text{distancia max. entre electrodos} \mp \text{espesor de placa})}$	$= \frac{(280 \text{ mm}) - 2 \times (30 \text{ mm})}{(10 \text{ mm} \mp 20 \text{ mm})}$
	$= 7.333333 \approx 8$

Nota: Se trabajara con un total de 8 electrodos, 4 placas conectadas al ánodo y 4 placas conectadas al cátodos.

3.6.2. Construcción de la celda de electrofiltracion

El electrofiltro es de acero inoxidable, tiene un diseño cilíndrico con las siguientes dimensiones el diámetro es de 28 cm, la altura será de 30 cm la capacidad de recepción del electrofiltro es de 30 L. Ver anexo 2. Los electrodos de acero inoxidable serán ensamblados a un tubo de PVC que tendrá ranuras de 1 cm de separación esto será añadido dentro del electrofiltro. El Filtro de sedimentos de 1 micra de 10'' está ubicado en el centro del electrofiltro que tendrá una salida del agua por un tubo de agua 1/2''.
Apreciar el diseño completo en el Anexo 3.

3.6.3. Densidad de Corriente en el Electrofiltro (mA/cm²)

El área total de contacto del campo electromagnético de la muestra de agua subterránea, De acuerdo con Condori, (2018). Se debe hallar la densidad de corriente de nuestro reactor (Electrofiltro) de la siguiente manera:

Tabla 9
Fórmula para determinación del área efectiva de la reacción del electrodo

Formula	Resultado	Formula	Resultado	Formula	Resultado
Área frontal=(Longitud horizontal del electrodo X longitud vertical del electrodo)	Área frontal=22cm x 11cm= 242 cm ²	Área borde lateral=(espeso r del electrodo X longitud vertical de electrodo)	Área borde lateral= 0.2cmx11cm = 2.2cm ²	Área de la base=(espeso r del electrodo X longitud horizontal del electrodo)	Área de la base= 0.2cmx22cm = 4.4cm ²

Tabla 10**Fórmula para determinación del área efectiva total de reacción**

Formula	Resultado	Formula	Resultado	Formula	Resultado	Suma de áreas
Área total=(área frontal X N° de electrodos)	Área total=242cm ² x8=1936 cm ²	Área total=(área borde lateral X N° de electrodos)	Área total= 2.2cm ² x8= 17.6 cm ²	Área total=(área de la base X N° de electrodos)	Área total= 4.4cm ² x8= 4.4cm ²	Áreas totales= 1988.8 cm ² = 0.1980 m ²

Tabla 11**Fórmula para hallar intensidad de corriente en miliamperios**

Formula	Resultado para 25V	Formula	Resultado para 30V
$I = V/R$	$I = 25V/530 \Omega = 0.047 \text{ mA}$	$I = V/R$	$I = 30V/530 \Omega = 0.057 \text{ mA}$

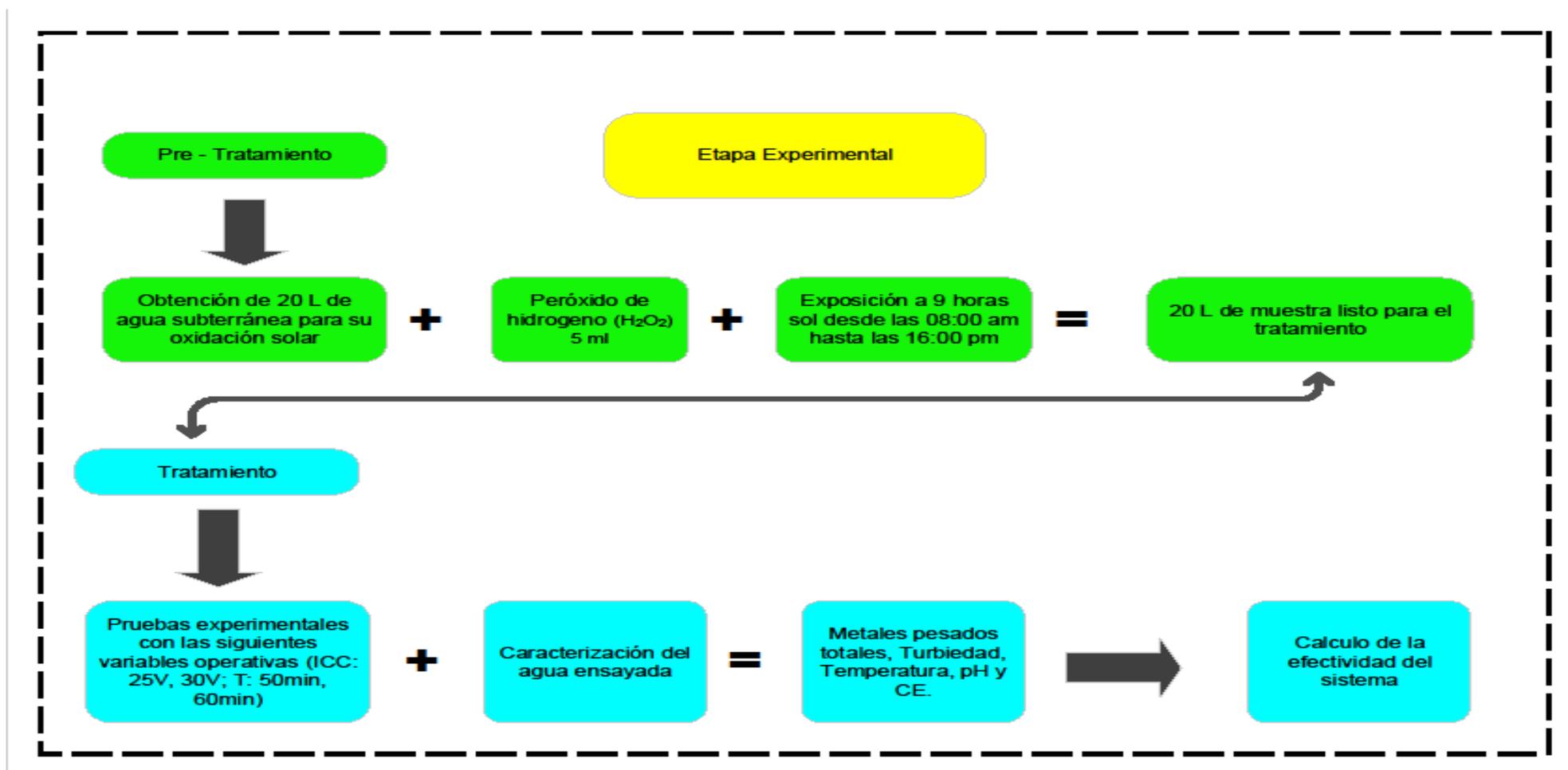
Nota: I = intensidad de corriente, V = voltaje, R = resistencia.

Tabla 12**Fórmula para hallar densidad de corriente en mA/m²**

Formula	Resultado para 25V	Formula	Resultado para 30V
$\delta: \frac{I}{A}$	$\delta: \frac{I}{A} = \frac{0.047 \text{ mA}}{0.1980 \text{ m}^2} = 0.24 \text{ mA/m}^2$	$\delta: \frac{I}{A}$	$\delta: \frac{I}{A} = \frac{0.057 \text{ mA}}{0.1980 \text{ m}^2} = 0.29 \text{ mA/m}^2$

Nota: δ =Densidad de corriente (mA/m²), I=Intensidad de corriente (mA), A=Área total m²

3.7. Esquema de la etapa experimental



ICC: Intensidad de corriente continua, H₂O₂: peróxido de hidrogeno, pH: potencial hidrogeno, CE: conductividad eléctrica.

Figura 4. Etapa experimental.

3.7.1. Etapa Experimental

3.7.1.1. Pre – Tratamiento

Antes de realizar el tratamiento, se tuvo que hacer la oxidación de la muestra como una etapa de pre tratamiento que consiste en la oxidación solar de los metales pesados disueltos en el agua, se trabajó con 12 muestras de 20 L de agua subterránea, se les añadió 5 ml de Peróxido de hidrogeno (H_2O_2) y se expuso a 9 horas de luz solar desde las 08:00 am hasta 16:00 pm en un balde polietileno transparente.

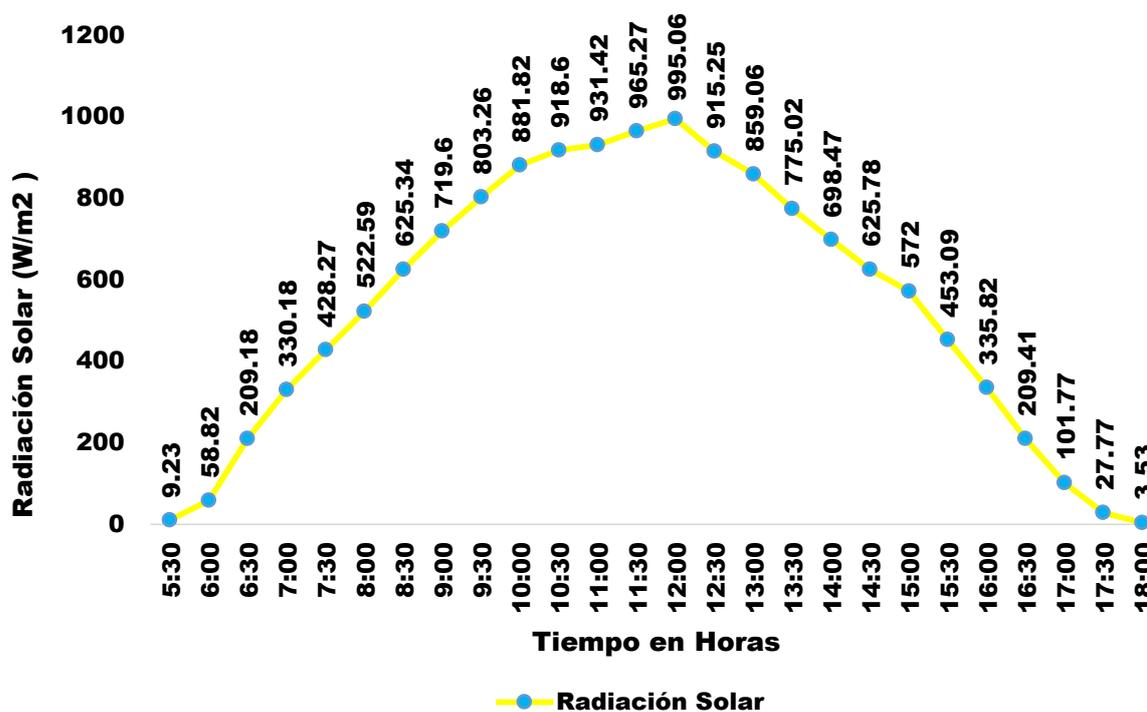
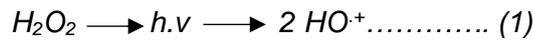


Figura 5. Radiación solar mes de agosto 2020, (Datos de la estación Meteorológica Dawis UPeU – Juliaca).

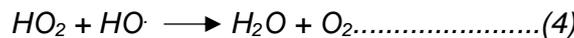
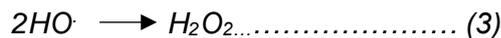
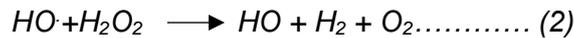
- Proceso de oxidación solar UV/H_2O_2 para los metales pesados

Este proceso de oxidación produce la formación de los radicales $HO\cdot$. Por fotólisis del H_2O_2 y sus demás derivados la medida más comúnmente aceptado para la fotólisis

del H_2O_2 es la separación homolítica del enlace O-O esto debido a la intervención de la acción ultravioleta para formar dos radicales hidroxilo. (Red Tritón, 2019).



El radical HO vendría a reaccionar con el H_2O_2 generando una salida al siguiente patrón de reacciones.



De manera simultanea al estar presente los contaminantes en el medio acuoso, se inician reacciones con los diferentes radicales formados.

3.7.1.2. Tratamiento

Desarrollado el pre-tratamiento se realizó los tratamientos de acuerdo al diseño experimental.

- **Funcionamiento del electrofiltro**

La alimentación de la muestra pre-tratada e insertarla manualmente al electrofiltro y disponerla dentro del reactor batch. El funcionamiento iniciara con una fuente generadora de corriente continua que distribuirá la energía por la tapa del electrofiltro por dos barrillas de acero inoxidable insertadas, la distribución de la energía positiva hacia los 4 electrodos de acero inoxidable y la energía negativas hacia los 4 electrodos de acero inoxidables, los electrodos están insertados y conectados mono polarmente en serie (intercalados) debidamente entrelazados con cabezales de cocodrilo empalmados a los cables, esto con lleva a que reaccionen con la presencia del agua.

La electrofiltración se realizó con las siguientes variables operativas, (Intensidad de corriente continua: 25 voltios, 30 voltios); (Tiempo de tratamiento: 50 minutos, 60 minutos), las variables operativas se distribuyeron de acuerdo a nuestro diseño estadístico que se puede ver en la Tabla 7.

Concluido el tratamiento la muestra tratada pasara por un filtro de sedimentos de 1 micra de porosidad que se encuentra dentro del reactor para retener la generación de los flocs generados in situ, la ruta de salida de la muestra tratada será por la base del electrofiltro por unos tubos metálicos de ½" que están insertados al reactor y alineados a orificio de salida de los filtros.

- **Proceso de remoción de los metales pesados dentro del electrofiltro**

Durante la electrofiltración ocurren procesos físicos como químicos lo que conlleva a la remoción de los contaminantes. Los electrodos proporcionan iones positivos como también negativos, el ánodo proporciona cationes que tienen carga negativa los cuales son atraídos por el cátodo, al ánodo se le conoce también como electrodo de sacrificio ya que la placa metálica se descompone y viene a generarse el proceso de la oxidación, para el caso del cátodo estos proporcionan aniones con carga positiva que son atraídos por el ánodo a diferencia del ánodo el cátodo no se disuelve y se genera el proceso de la reducción. Los iones que se producen en el medio acuoso cumplen la función de desestabilizar las cargas que contienen los contaminantes disueltos disociándolos (Castañeda y Choton, 2018).

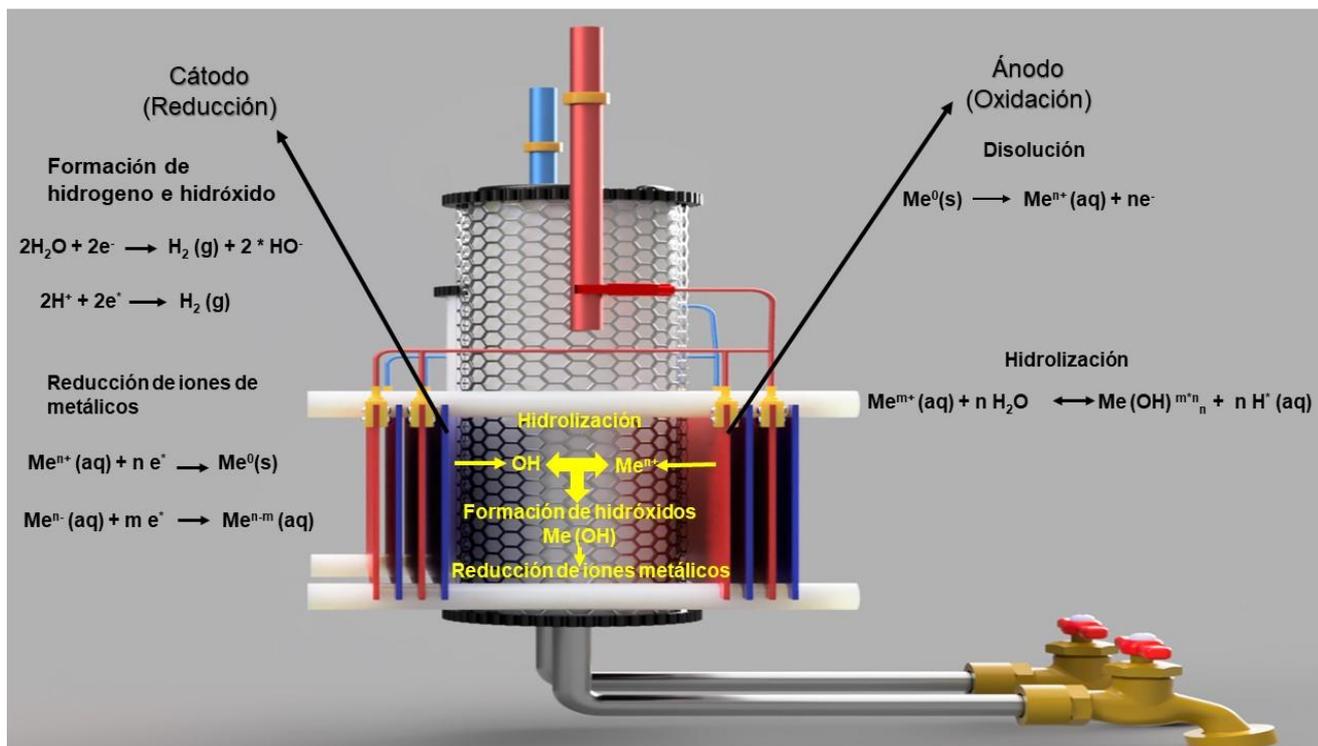


Figura 6. Posibles reacciones químicas en el electrofiltro basados en (Castañeda y Choton, 2018).

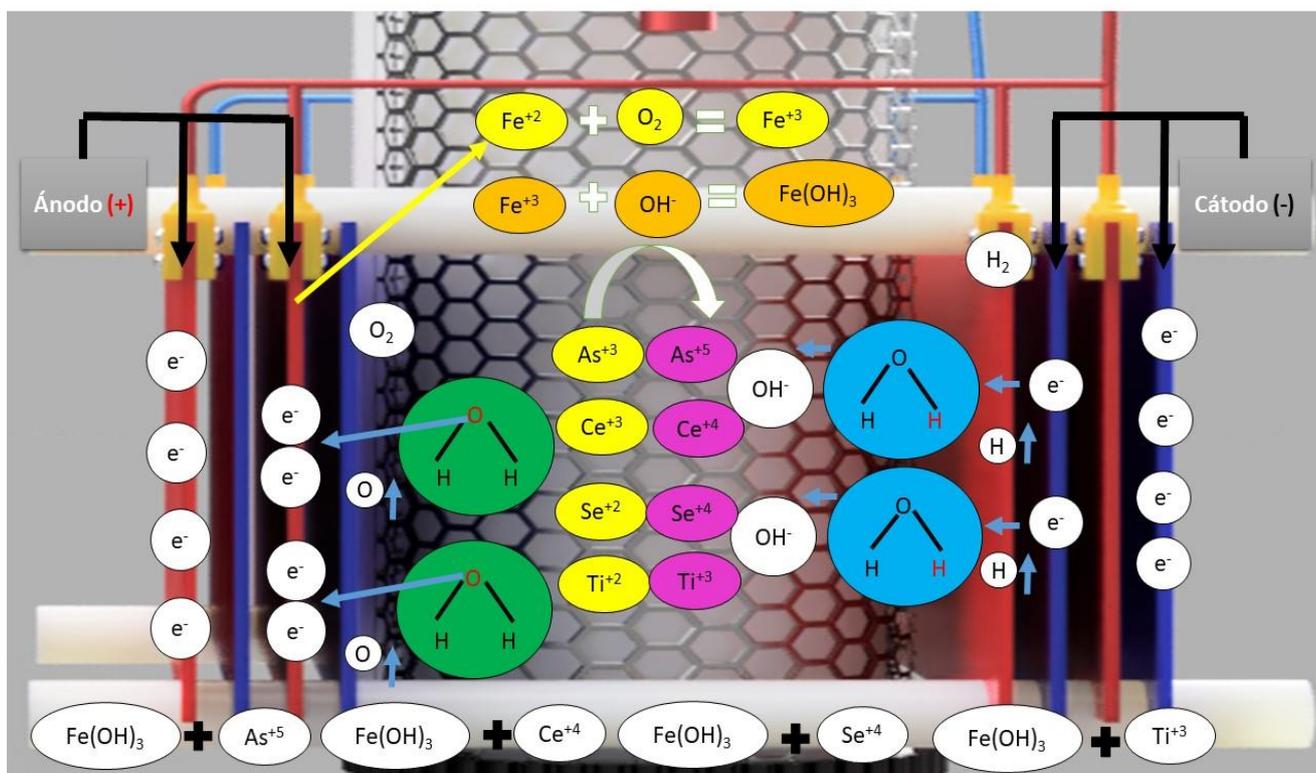


Figura 7. Posibles reacciones químicas en el electrofiltro.



En Aragón (como se citó en Castañeda y Choton, 2018) hace mención que las ecuaciones que se presentan en la mayoría de las investigaciones indican que la disolución principal del hierro es la valencia +2.

La generación de los iones de Fe^{+2} y O_2 ambos liberados por el ánodo al interactuar se da un proceso de oxidación del Fe^{+2} a Fe^{+3} , la producción en el cátodo de (OH^-) dando como resultado la generación el hidróxido de hierro $(FeOH)_3$.

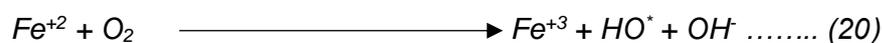


Tabla 13

Parámetros monitoreados

PARAMETRO	Método de Análisis
Metales pesados totales	Metales totales por ICP-MS, Epa Method 6020 B
Potencial hidrogeno - pH	Método digital
Conductividad eléctrica - CE	Método digital
Turbiedad	Método NTP 214.006 1999 - Método Nefelométrico
Temperatura	Método digital

Las muestras obtenidas del electrofiltro pasaran a ser almacenadas en baldes por un periodo de 24 horas para visualizar la decantación de partículas suspendidas que el filtro no pude retener. Realizamos los análisis físicos in situ con nuestro multiparametro medimos la temperatura, pH, conductividad eléctrica. El análisis de turbiedad lo realizamos en el laboratorio de saneamiento ambiental de la Universidad peruana Unión

– Filial Juliaca, los análisis químicos (metales pesados totales) se realizaron en el laboratorio Bhios de la ciudad de Arequipa de cada experimento se obtuvo 200 ml de muestra y se hizo el envío siguiendo los protocolos del laboratorio.

CAPITULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización inicial de muestra de agua subterránea sin tratamiento

La tabla 14 muestra los resultados de la caracterización del agua subterránea obtenida antes de su tratamiento.

Tabla 14
Resultados de la caracterización

Parámetro	Unidad	Resultados Obtenidos	DS N° 031-2010-SA
pH	--	7.2	6.5 – 8.5
Conductividad Eléctrica	µmho/cm	530	1500
Turbiedad	UNT	1.14	5
Temperatura	°C	10.5	--
Arsénico	Mg/L	0.08569	0.010
Cerio	Mg/L	0.00021	--
Selenio	Mg/L	0.0004	0.010
Titanio	Mg/L	0.0036	--

Fuente: Laboratorio Bhios.

La tabla 14 muestra el pH inicial fue de 7.2 < 6.5 – 8.5, el valor de conductividad eléctrica 530 µmho/cm < 1500 µmho/cm, el valor de turbiedad es de 1.14 UNT < 5 UNT y la temperatura 10.5 °C los parámetros físico cumplen con la normativa. El arsénico inicial fue de 0.08569 Mg/L > 0.010 Mg/L, el valor de cerio 0.00021 Mg/L, el valor de selenio 0.0004 Mg/L < 0.010 Mg/L y titanio 0.0036 Mg/L los parámetros químicos en el caso del

arsénico es elevado no cumple con la normativa, el selenio está dentro de lo indicado cumple con la normativa, para el caso del cerio y titanio no existe normativa nacional ni internacional que lo regule.

4.2. Caracterización final de las muestras de agua subterránea con tratamiento

Los resultados de las pruebas post tratamiento se muestran en la tabla 15 donde indican valores iniciales y finales del arsénico, cerio, selenio y titanio.

Tabla 15
Concentraciones de As, Ce, Se y Ti post tratamiento

Número de experimentos	ICC	Tiempo de Tratamiento	CI de As (mg/L)	CF de As (mg/L)	CI de Ce (mg/L)	CF de Ce (mg/L)	CI de Se (mg/L)	CF de Se (mg/L)	CI de Ti (mg/L)	CF de Ti (mg/L)
1	25 voltios	50 minutos	0.08569	0.00981	0.00021	0.00012	0.0004	0.0003	0.0036	0.0011
2	30 voltios	50 minutos	0.08569	0.00936	0.00021	0.00006	0.0004	0.0003	0.0036	0.0008
3	25 voltios	60 minutos	0.08569	0.00331	0.00021	0.00005	0.0004	0.0002	0.0036	0.0004
4	30 voltios	60 minutos	0.08569	0.00655	0.00021	0.00005	0.0004	0.0001	0.0036	0.0005

Nota: ICC: intensidad de corriente continua, CI: concentración inicial, CF: concentración final.

4.3. Arsénico

4.3.1. Oxidación del arsénico

El proceso de pre - oxidación se realizó específicamente para el arsénico, ya que nos basamos en la exhaustiva revisión bibliográfica que realizamos. Según Arévalo (2016) hace referencia que la tecnología de la electrolisis trabaja más eficientemente con el As V que con el As III por su grado de disociación, la disociación del As V es mayor que del As III y debido a esto es que se recomienda realizar una pre oxidación antes de su tratamiento.

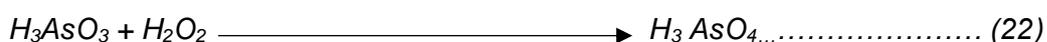
Arévalo (2016) indica que el As III puede llegar a oxidarse a As V con diferentes agentes oxidantes pasaremos a nombrar algunos, hipoclorito de sodio, peróxido de

hidrogeno, permanganato de sodio, ozono, se puede realizar la oxidación catalítica con radiación UV, carbón activado y oxido de cobre.

La oxidación del As III a As V se produjo durante la exposición de 20 litros de agua al sol de manera simultáneamente interactuaron el peróxido de hidrogeno (H₂O₂) que se añadió 5ml a muestra de agua y se expuso a 9 horas sol. Según Arévalo (2016) se produjo la siguiente reacción química:



Reacción de oxidación para el arsenito (As⁺³) a arsenato (As⁺⁵):



4.3.2. Remoción del Arsénico

En la tabla 16 se muestra las combinaciones experimentales del proceso de electrofiltración para el Arsénico.

Tabla 16
Combinaciones de experimento para el Arsénico

Número de experimentos	Intensidad de Corriente continua	Densidad de corriente mA/m ²	Tiempo de Tratamiento	Porcentaje promedio de remoción del Arsénico
1	25 voltios	0.24 mA/m ²	50 minutos	88.6 %
2	30 voltios	0.29 mA/m ²	50 minutos	89.1 %
3	25 voltios	0.24 mA/m ²	60 minutos	96.1 %
4	30 voltios	0.29 mA/m ²	60 minutos	92.4 %

Se muestra las combinaciones de experimentos para el Arsénico en la tabla 16 para el experimento 1: (25V, 50min), experimento 2: (30V, 50min), experimento 3: (25V, 60min) y el experimento 4: (30V, 60min). El experimento 3 fue el más óptimo.

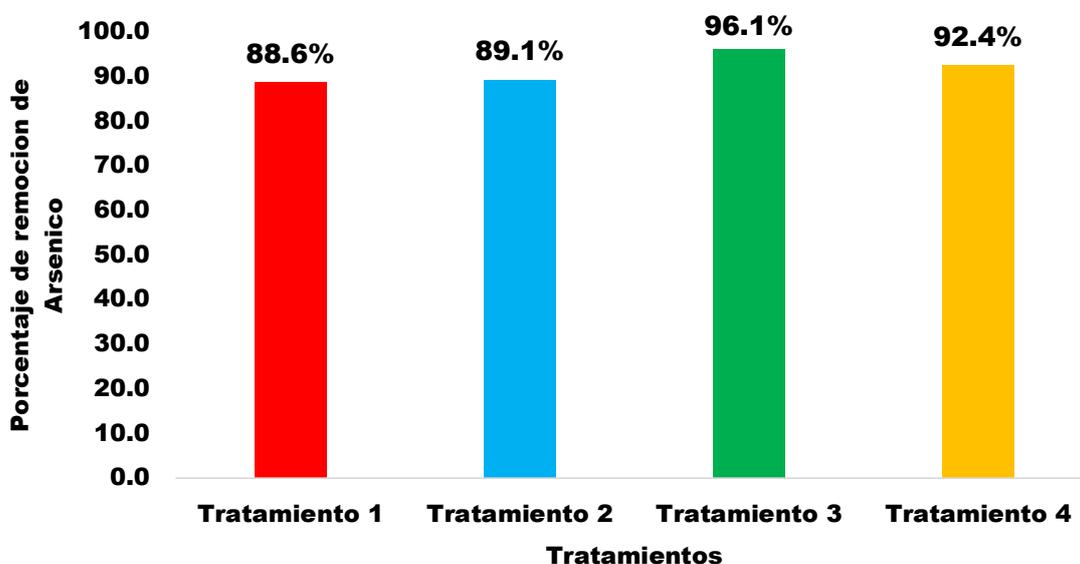


Figura 8. Porcentaje de remoción de As con respecto a los tratamientos.

Como se aprecia en la figura 8 se muestra que los porcentajes de remoción del Arsénico fue de 88.6, 89.1, 96.1, 92.4% para el tratamiento 1, 2, 3, y 4 respectivamente. La generación de $(\text{FeOH})_3$ en el reactor permite la eliminación del As V que ya paso un proceso de oxidación de As III a As V. Por el proceso de adsorción o intercambio iónico el $(\text{FeOH})_3$ adsorberá al As V y por precipitación se sedimentara el Arseniato de Fierro III (FeAsO_4) . De acuerdo Arévalo (2016) con se muestra a continuación el proceso de intercambio iónico del $(\text{FeOH})_3$ y el As V.



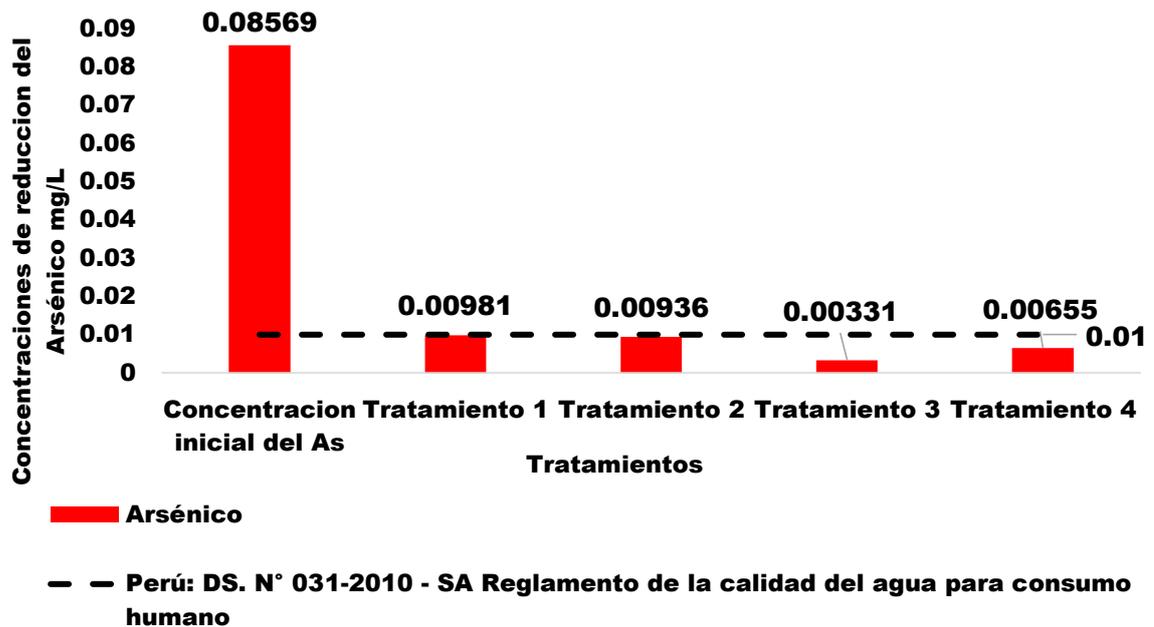


Figura 9. Concentraciones de reducción del Arsénico mg/L comparado con respecto al DS N° 031-2010-SA.

De acuerdo con la figura 9 se presenta concentraciones de reducción del arsénico, la concentración inicial fue de 0.08569 mg/L que supera el DS N° 031-2010-SA, para el tratamiento 1, 2, 3, 4 la concentración de reducción fue de 0.00981, 0.00936, 0.00331, 0.00655 mg/L todos los tratamientos cumplen con el reglamento de la calidad del agua para el consumo humano.

Con respecto a la densidad de corriente el autor Arévalo (2016) indica que la inducción de intensidad de corriente continua es fundamental para la electrolisis o procesos electroquímicos. La densidad de corriente óptima para la eliminación del As en esta investigación fue de 0.24 mA/m² obteniendo 96.1% de remoción no obstante Arévalo (2016) evidencio en su investigación que al incrementar la densidad de corriente se puede obtener resultados eficientes, trabajo con 10, 20, 30, 40 mA/cm² removiendo As en un 51.40; 63.32; 71.11; 78.96% patrón que no se cumplió en esta investigación porque al incrementar la densidad de corriente a 0.29 mA/cm² la eficiencia de remoción decreció a 92.4% tal como se muestra en la (tabla 16). Los resultados de Porto (2014) se asemejan

a la de nuestra investigación logrando obtener la remoción del As en un 92.57% trabajando con un densidad de corriente $1,87 \text{ mA/cm}^2$ otro caso similar se le presento a Paitan y palomino (2017) trabajo con una densidad de 22.58 A/m^2 obteniendo un 86% de eficiencia en la eliminación del As.

En relación al tiempo de residencia o tiempo de tratamiento autores como Porto (2014); Paitan y Palomino (2017); Ríos (2005); Condori (2018); Perales (2019) indican que a mayor tiempo de tratamiento mayor porcentaje de formación de hidróxidos generados por la oxidación y consumo del electrodo de sacrificio que cumple la función de generar coagulante, este coagulante se origina por la Hidrolización espontanea del tipo de electrodo con el que se trabaja, el coagulante generado desestabiliza los iones de contaminantes disueltos en el agua. El tiempo de tratamiento de esta investigación con mayor eficiencia de eliminación de As fue de 60 min obteniendo un 96.1% y el menor fue de 50 min obteniendo un 88.6% (ver tabla 16), patrones similares de remoción se dieron en la investigación de Arévalo (2016) que trabajo con 15, 30, 45, 60 min removiendo un 78.96; 91.34; 99.20; 98.93% de As, esto reafirman nuestros resultados en el cual a mayor tiempo de tratamiento el porcentaje de remoción del As será mucho mayor, pero sin embargo cabe mencionar que existe un límite de exposición del tiempo de tratamiento y la densidad de corriente Castañeda y Choton (2018) expresan que al superar ese límite se generan otros compuestos que provienen de las placas que se usan como electrodos y debido a ellos el porcentaje de remoción decrece, este fenómeno se presentó en nuestros experimentos en específico cuando se trabajó con (25V, 60 min) se obtuvo 96.1% de remoción que fue el más elevado e indicar que este fue límite de exposición de las variables operativas porque al trabajar con (30V, 60 min) se obtuvo 92.4% de remoción la eficiencia de eliminación del As (ver tabla 16) decreció a lo antes ya expuesto y se logró evidenciar este fenómeno.

Pantoja (2012) señala la importancia del material de electrodo con el que se trabaja de acuerdo a ello dependerá la eficiencia de remoción de los metales pesados el aluminio y el hierro ya que son eventualmente los materiales con mayor eficiencia en resultados, también indica que se obtienen reacciones de oxidación y reducción. En esta investigación se utilizó electrodos de hierro (acero inoxidable) logrando porcentajes de remoción de As superiores al 90% de eficiencia y demostrando la efectividad del hierro, resultados similares los obtuvo Porto (2014) que empleo electros de hierro obteniendo un 92.57% de eficiencia con el As, pero Paitan y palomino (2014) experimentaron no solo con electrodos de hierro si no también con el aluminio haciendo una combinación (Ánodo – Hierro; Cátodo – Aluminio), (Ánodo – Aluminio; Cátodo – Hierro) obteniendo un 75 y 86% de eliminación del As.

Gupta y Sangal (2010) refiere que la remoción del As incrementa al reducir el separamiento entre electrodos, el autor nos da a conocer que dimensiones menores a 1cm no inducen a la mejora de eliminación del As. En nuestra investigación se demostró lo indicado por el autor anteriormente citado, se trabajó con distanciamientos de electrodos de 1cm y se logró una eficiencia de 88.6, 89.1, 96.1, 92.4% de remoción de As pero sin embargo lo que evidencio Porto (2014) es que se pueden obtener porcentajes hasta de un 92.57% de remoción de As si se trabaja con una separación 1.5cm valores mayores o menores a este valor no muestran incremento en la remoción del As.

Pauling (1932) plantea que la electronegatividad es la capacidad que tiene un átomo para atraer un electrón hacia sí mismo también desarrollo una escala de electronegatividad para los elementos de la tabla periódica en la que muestra el elemento más electronegativo que viene a ser flúor y que se le otorga el valor 3.98 este está ubicado en el grupo número 17, el valor 0.7 se le otorgo al elemento menos electronegativo que es el francio que está ubicado en el grupo número 1. La electronegatividad va en aumento del lado izquierdo de la tabla periódica al lado derecho.

La electronegatividad del As es de 2.18 y de acuerdo con las escala planteada por Pauling (1932) nos dice que la electronegatividad va en aumento de izquierda a derecha de la tabla, el Arsénico está ubicado en la columna 15 esto nos indica que la electronegatividad es buena para el Arsénico por que la capacidad para atraer electrones es aceptable y se demostró porque los porcentajes de remoción fueron elevados (Ver la tabla 16).

4.3.3. Análisis de varianza ANOVA

La tabla 17 nos indica que por lo menos uno de los tratamientos reporta un porcentaje promedio de remoción de As significativamente diferente que los otros tratamientos. ($P=0.000 < 0,05$; prueba ANOVA). Existe un efecto significativo del factor A, B y AB ($p=0.000 < 0.05$).

Tabla 17
Análisis de Varianza para %Remoción de As - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Tratamiento	99.0	3	33.0	1885.71	0.0000
A:A (Intensidad de Corriente Continua - Voltios)	12.0	1	12.0	685.71	0.0000
B:B(Tiempo de Tratamiento - Minutos)	75.0	1	75.0	4285.71	0.0000
AB	12.0	1	12.0	685.71	0.0000
RESIDUOS	0.14	8	0.0175		
TOTAL (CORREGIDO)	99.14	11			

Nota: Análisis de varianza de anova multifactorial.
Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

4.4. Cerio

4.4.1. Oxidación del Cerio

El uso del peróxido de hidrogeno (H_2O_2), se generara el reactivo de fenton que se consideraran las principales reacciones con el cual los iones Fe^{+2} son oxidados a iones Fe^{+3} . De acuerdo a (Spacu, P.1935) se muestra la siguiente formular:



4.4.2. Remoción de Cerio

En la tabla 18 se muestra las combinaciones experimentales del proceso de electrofiltración para el Cerio.

Tabla 18
Porcentajes de remoción promedios de Cerio

Número de experimentos	Intensidad de Corriente continua	Densidad de Corriente mA/m ²	Tiempo de Tratamiento	Porcentaje promedio de remoción del Cerio
1	25 voltios	0.24 mA/m ²	50 minutos	42.9 %
2	30 voltios	0.29 mA/m ²	50 minutos	71.4 %
3	25 voltios	0.24 mA/m ²	60 minutos	76.2 %
4	30 voltios	0.29 mA/m ²	60 minutos	76.2 %

Se presentan porcentajes promedios de remoción de Cerio en la tabla 18 para el experimento 1: (25V, 50min), experimento 2: (30V, 50min), experimento 3: (25V, 60min) y el experimento 4: (30V, 60min). Los experimentos 3 y 4 son los más óptimos.

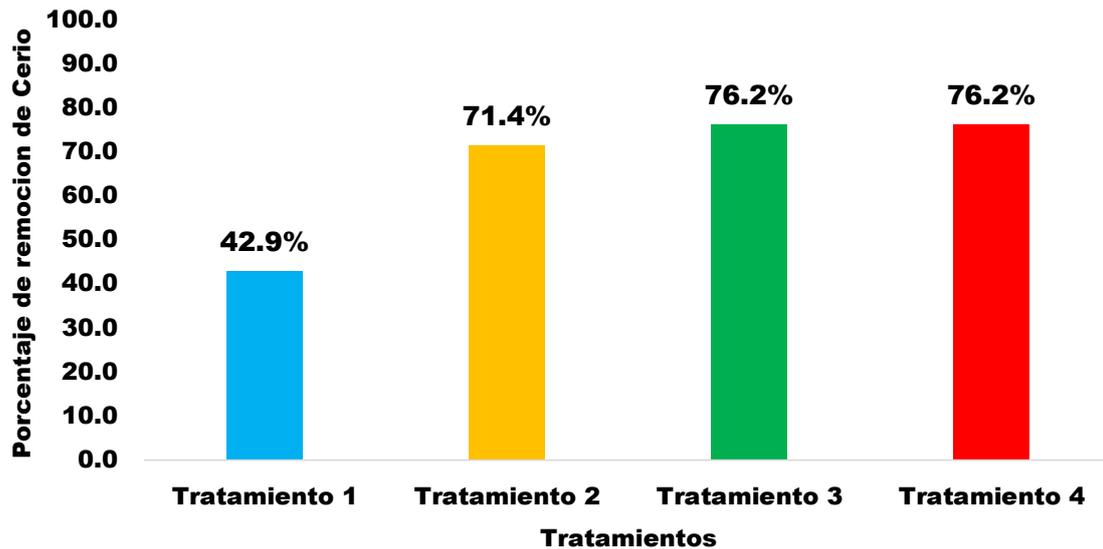


Figura 10. Porcentaje de remoción de Ce con respecto a los tratamientos.

En la figura 10 nos muestra los porcentajes de remoción del Cerio que fue de 42.9, 71,4, 76.2, 76.2% para el tratamiento 1, 2, 3, 4 respectivamente. La generación de $(\text{FeOH})_3$ en el reactor permite la eliminación del Ce por el proceso de adsorción o intercambio iónico el $(\text{FeOH})_3$ adsorberá al CeO_2 y por precipitación se sedimentara. De acuerdo a (Spacu, P.1935) se generara la siguiente reacción.



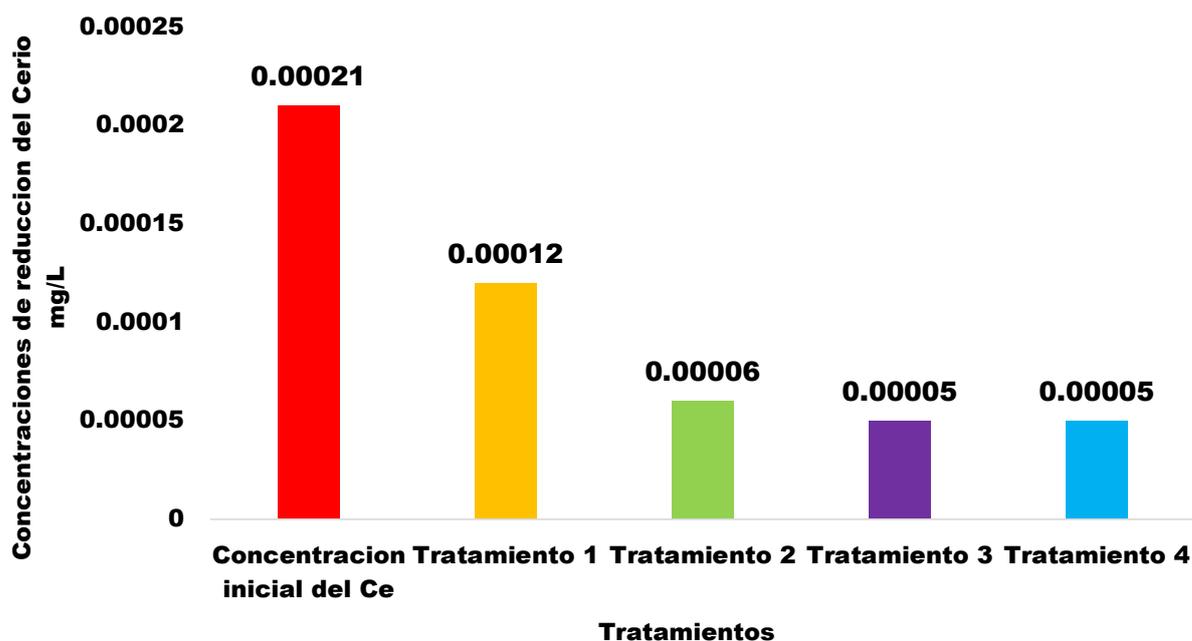


Figura 11. Concentraciones de reducción del cerio con respecto a los tratamientos.

La figura 11 presenta las concentraciones de reducción del Cerio, la concentración inicial fue de 0.00021 mg/L, para el tratamiento 1, 2, 3, 4 la concentración de reducción fue de 0.00012, 0.00006, 0.00005, 0.00005 mg/L. Para el cerio no se realizó un gráfico control por que no cuenta con normativa nacional ni internacional que efectúen las concentraciones aptas del Cerio en el agua para el consumo humano.

Se debe resaltar que esta investigación no cuenta con antecedentes con idénticas condiciones de aplicabilidad para remoción de Cerio por el método de electrofiltración o electrolisis, talvez esto se deba por que no se cuenta con normativa nacional (Peruana) o normativa internacional que regule su concentración indicada para el consumo humano.

La electronegatividad del Cerio es de 1.12 y de acuerdo con las escala planteada por Pauling (1932) nos dice que la electronegatividad va en aumento de izquierda a derecha de la tabla, el Cerio pertenece a la familia de los lantánidos y está ubicado en el grupo 3B esto nos indica que la electronegatividad es baja para el Cerio por que la capacidad para atraer electrones es baja, talvez a raíz de esta teoría el comportamiento de los resultados que obtuvimos son remociones menores a 76.2% (Ver la tabla 18).

4.4.3. Análisis de varianza ANOVA

La tabla 19 nos indica que por lo menos dos de los tratamientos reporta un porcentaje promedio de remoción de Ce significativamente diferente que los otros tratamientos. ($P=0.000 < 0,05$; prueba ANOVA). Existe un efecto significativo del factor A, B y AB ($p=0.000 < 0.05$).

Tabla 19
Análisis de Varianza para %Remoción de Ce - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Tratamiento	2259.0	3	753.0	3911.69	0.0000
A:A (Intensidad de Corriente Continua – Voltios)	588.0	1	588.0	3054.55	0.0000
B:B (Tiempo de Tratamiento – Minutos)	1083.0	1	1083.0	5625.97	0.0000
AB	588.0	1	588.0	3054.55	0.0000
RESIDUOS	1.54	8	0.1925		
TOTAL (CORREGIDO)	2260.54	11			

Nota: Análisis de varianza de anova multifactorial.
Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

4.5. Selenio

4.5.1. Oxidación del Selenio

El uso del peróxido de hidrogeno (H_2O_2), se generara el reactivo de fenton que se consideraran las principales reacciones con el cual los iones Fe^{+2} son oxidados a iones Fe^{+3} . Las especies del selenio químicamente son el selenito, selenato, el proceso de oxidación del selenato (SeO_4^{-2}) a selenito (SeO_3^{-2}). (Franco, 2016).



4.5.2. Remoción del Selenio

En la tabla 20 se muestra las combinaciones experimentales del proceso de electrofiltración para el Selenio.

Tabla 20
Porcentajes promedios de remoción de Selenio

Número de experimentos	Intensidad de Corriente continua	Densidad de Corriente mA/m ²	Tiempo de Tratamiento	Porcentaje promedio de remoción del Selenio
1	25 voltios	0.24 mA/m ²	50 minutos	25.0 %
2	30 voltios	0.29 mA/m ²	50 minutos	25.0 %
3	25 voltios	0.24 mA/m ²	60 minutos	50.0 %
4	30 voltios	0.29 mA/m ²	60 minutos	75.0 %

Se muestran porcentajes promedios de remoción de Selenio en la tabla 20 para el experimento 1: (25V, 50min), experimento 2: (30V, 50min), experimento 3: (25V, 60min) y el experimento 4: (30V, 60min). El experimento 4 es el más óptimo.

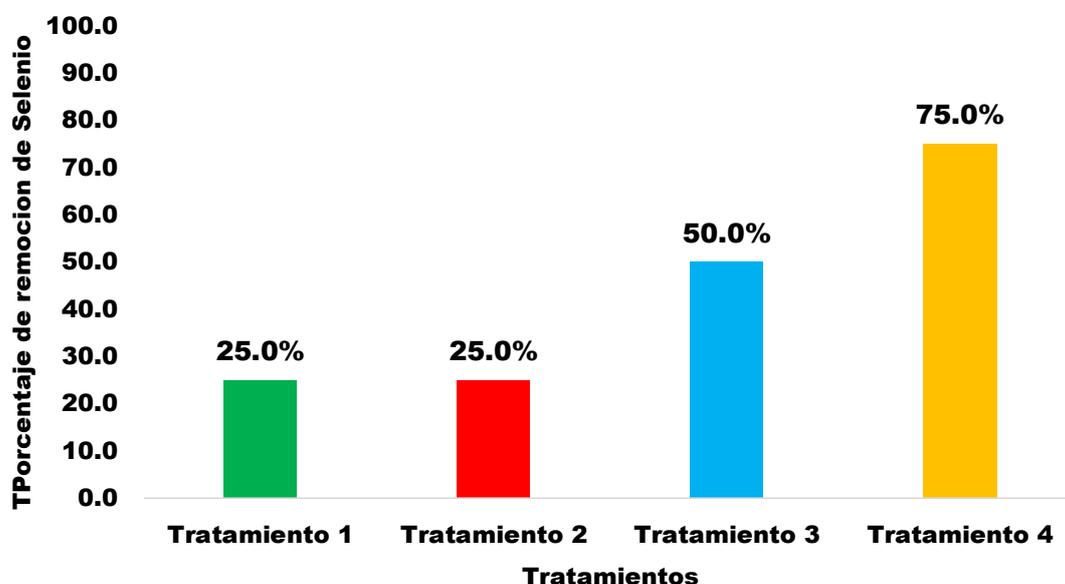


Figura 12. Porcentaje de remoción de Se con respecto a las variables operacionales.

Como se observa en la figura 12 los porcentajes de remoción del Selenio fue de 25.0, 25.0, 50.0, 75.0% para el tratamiento 1, 2, 3, 4 respectivamente. La generación de $(\text{FeOH})_2$ en el reactor permite la eliminación del Selenito (SeO_3^{-2}) que ya paso un proceso de oxidación de selenato (SeO_4^{-2}) a (SeO_3^{-2}). Por el proceso de adsorción o intercambio iónico el $(\text{FeOH})_3$ adsorberá al (SeO_3^{-2}) y por precipitación se sedimentara el $(\text{FeOH})_3 \cdot (\text{SeO}_3^{-2})$. Se muestra a continuación el proceso de intercambio iónico del $(\text{FeOH})_3$ y el (SeO_3^{-2}). (Franco, 2016).

Según lo indicado por Franco (2016) se genera lo siguiente.

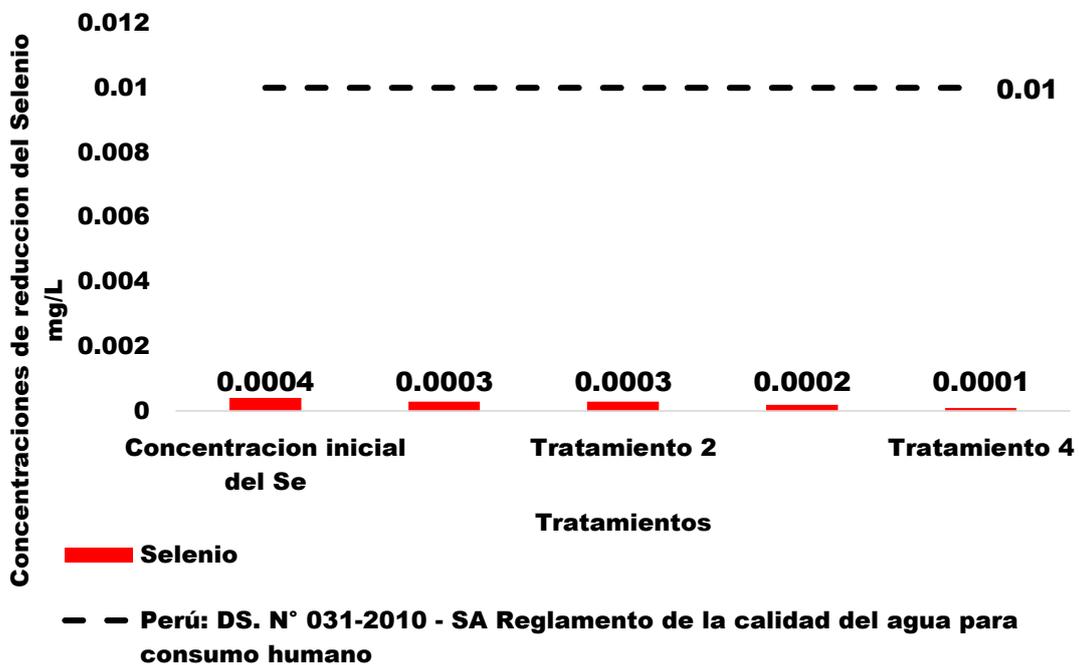
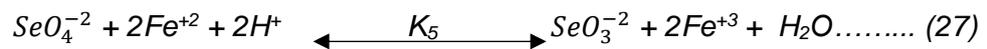


Figura 13. Concentraciones de reducción del Selenio mg/L comparado con respecto al DS N° 031-2010-SA.

En la figura 13 se aprecia las concentraciones reducción del selenio, la concentración inicial fue de 0.0004 mg/L que cumplen el DS N° 031-2010-SA, para el tratamiento 1, 2, 3, 4 la concentración de reducción fue de 0.0003, 0.0003, 0.0002, 0.0001 mg/L todas las

concentraciones tratadas cumplen con el reglamento de la calidad del agua para consumo humano.

Franco (2016) empleo el método de la electrocoagulación para remoción del Selenio añadiendo nanopartículas y peróxido de hidrógeno alcanzando un porcentaje de remoción del 65%, también se añadió solo el peróxido de hidrógeno para que interactúe con las reacciones in situ del ánodo solo se obtuvo un 40% de eliminación. Para nuestra investigación el efecto que tuvo el peróxido de hidrógeno fue de agente oxidante y la eficiencia de eliminación mostro un comportamiento completamente distinto que la investigación antes citada, logramos la remoción del Selenio en un 25.0, 25.0, 50.0, 75.0%, trabajamos con electrodos de hierro (acero inoxidable) con un 1cm de distanciamiento, el peróxido de hidrógeno con la ayuda de la disolución del ánodo lograron oxidar los iones ferrosos a iones férricos los cuales mediante un proceso de óxido reducción lograron eliminar al Selenio disuelto en el agua.

Con respecto a la densidad de corriente y tiempo de tratamiento Franco (2016) nos muestra que la densidad de corriente potencia el proceso de tratamiento presentando un valor óptimo de 100 A/m^2 y las densidades de 10, 200 A/m^2 resultaron no ser eficientes esto se debe posiblemente por la polarización de la concentración generada a valores elevados de densidades o simplemente se da por la inducción en niveles bajos de energía lo que genera que el proceso sea lento. Trabajo con un tiempo de tratamiento de 60, 240, 360 min obteniendo una remoción de Selenio 40, 65, 60% con referente a nuestra investigación la densidad de corriente que utilizamos en los experimentos mostraron patrones de mejora el porcentaje más bajo fue de 25.0% que trabajo con 0.24 mA/m^2 , 50 min y el más alto fue de 75% se trabajó con las condiciones 0.29 mA/m^2 , 60 min a mayor tiempo de exposición la generación de iones de hierro desestabilizan los iones de Selenio para luego proceder a eliminarse.

La electronegatividad del Se es de 2.55 y de acuerdo con las escala planteada por Pauling (1932) nos dice que la electronegatividad va en aumento de izquierda a derecha de la tabla, el Selenio está ubicado en la columna 16 esto nos indica que la electronegatividad es mucho mejor que la del Arsénico por que la capacidad para atraer electrones es mucho mayor, esto potencia a la tecnología de remoción que estamos aplicando ya que el principio de tratamiento es la electrolisis.

4.5.3. Análisis de varianza ANOVA

La tabla 21 nos indica que por lo menos uno de los tratamientos reporta un porcentaje promedio de remoción de Se significativamente diferente que los otros tratamientos. ($P=0.000 < 0,05$; prueba ANOVA). Existe un efecto significativo del factor A, B y AB ($p=0.000 < 0.05$).

Tabla 21
Análisis de Varianza para %Remoción de Se - Suma de Cuadrados Tipo III

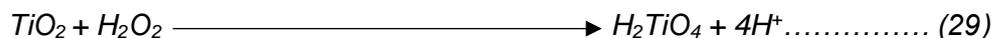
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Tratamiento	5156.25	3	1718.75	6030.70	0.0000
A:A (Intensidad de Corriente Continua – Voltios)	468.75	1	468.75	1644.74	0.0000
B:B (Tiempo de Tratamiento – Minutos)	4218.75	1	4218.75	14802.63	0.0000
AB	468.75	1	468.75	1644.74	0.0000
RESIDUOS	2.28	8	0.285		
TOTAL (CORREGIDO)	5158.53	11			

Nota: Análisis de varianza de anova multifactorial.
Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

4.6. Titanio

4.6.1. Oxidación de Titanio

El uso del peróxido de hidrogeno (H_2O_2), se generara el reactivo de fenton que se consideraran las principales reacciones con el cual los iones Fe^{+2} son oxidados a iones Fe^{+3} . De acuerdo a (Spacu, P.1935) se expone la siguiente reacción:



4.6.2. Remoción del Titanio

En la tabla 22 se muestra las combinaciones experimentales del proceso de electrofiltración para el Titanio.

Tabla 22
Porcentajes de remoción promedios de Titanio

Número de experimentos	Intensidad de Corriente continua	Densidad de Corriente mA/m ²	Tiempo de Tratamiento	Porcentaje promedio de remoción del Titanio
1	25 voltios	0.24 mA/m ²	50 minutos	69.4 %
2	30 voltios	0.29 mA/m ²	50 minutos	77.8 %
3	25 voltios	0.24 mA/m ²	60 minutos	88.9 %
4	30 voltios	0.29 mA/m ²	60 minutos	86.1 %

Se muestran porcentajes promedios de remoción de Titanio en la tabla 22 para el experimento 1: (25V, 50min), experimento 2: (30V, 50min), experimento 3: (25V, 60min) y el experimento 4: (30V, 60min. El experimento 3 es el más óptimo.

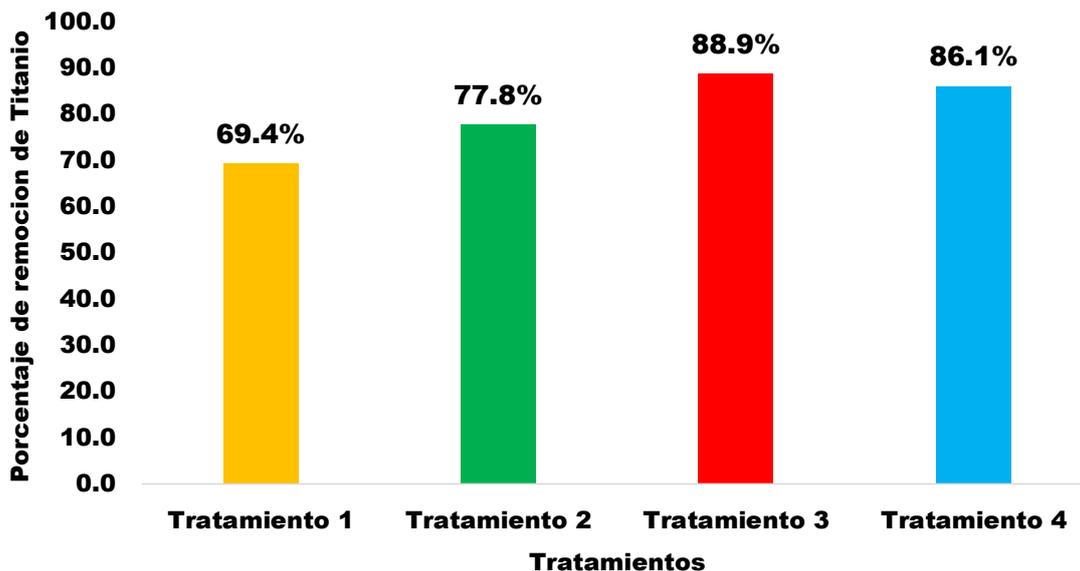


Figura 14. Porcentaje de remoción de Ti con respecto a los tratamientos.

En la figura 14 se indica los porcentajes de remoción del Titanio que fue de 69.4, 77.8, 88.9, 86.1% para el tratamiento 1, 2, 3, 4 respectivamente. La generación de $(FeOH)_3$ en el reactor permite la eliminación del Ti por el proceso de adsorción o intercambio iónico el $(FeOH)_3$ adsorberá al TiO_2 y por precipitación se sedimentara. De acuerdo a (Spacu, P.1935) se generara la siguiente reacción.

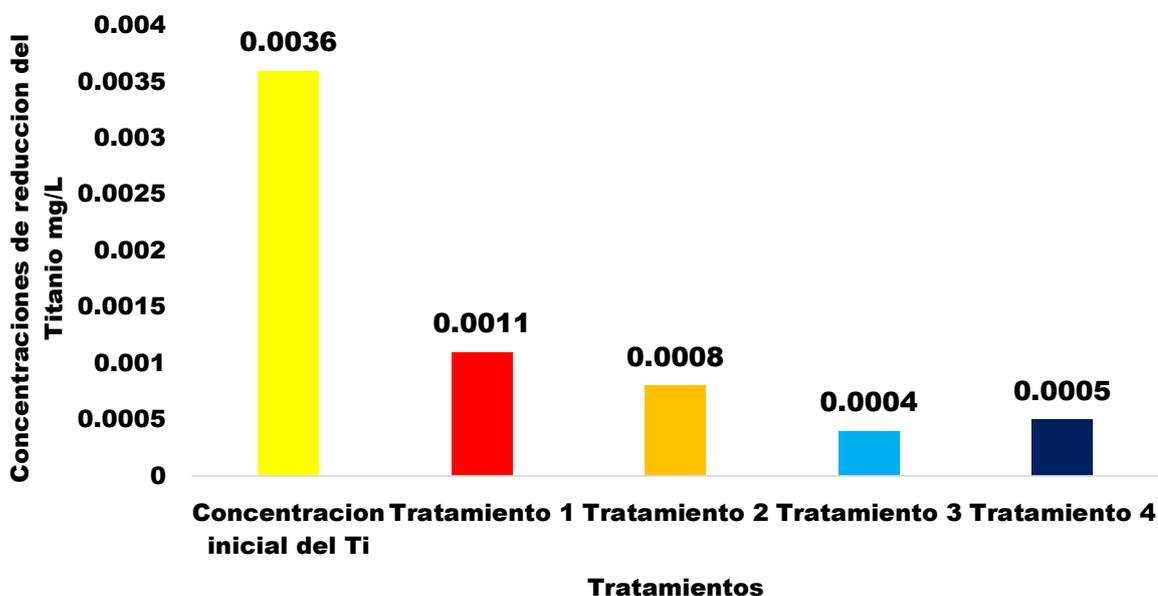


Figura 15. Concentraciones de reducción del Titanio con respecto a los tratamientos.

Como se observa en la figura 15 las concentraciones de reducción del Titanio, la concentración inicial fue de 0.0036 mg/L, para el tratamiento 1, 2, 3, 4 la concentración de reducción fue de 0.0011, 0.0008, 0.0004, 0.0005 mg/L. Para el Titanio no se realizó un gráfico control por que no cuenta con normativa nacional ni internacional que efectúen las concentraciones aptas del Titanio en el agua para el consumo humano.

Se debe resaltar que esta investigación no cuenta con antecedentes con idénticas condiciones de aplicabilidad para remoción de Titanio por el método de electrofiltración o electrolisis, talvez esto se deba por que no se cuenta con normativa nacional (Peruana) o normativa internacional que regule su concentración indicada para el consumo humano.

La electronegatividad del Ti es de 1.54 y de acuerdo con las escala planteada por Pauling (1932) nos dice que la electronegatividad va en aumento de izquierda a derecha de la tabla, el Titanio está ubicado en la columna 4 esto nos indica que la electronegatividad es mucho menor que la del Selenio por que la capacidad para atraer electrones es mucho menor.

4.6.3. Análisis de varianza ANOVA

La tabla 23 nos indica que por lo menos uno de los tratamientos reporta un porcentaje promedio de remoción de Ti significativamente diferente que los otros tratamientos. ($P=0.000 < 0,05$; prueba ANOVA). Existe un efecto significativo del factor A, B y AB ($p=0.000 < 0.05$).

Tabla 23
Análisis de Varianza para %Remoción de Ti - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Tratamiento	723.0	3	241.0	1235.90	0.0000
A:A (Intensidad de Corriente Continua – Voltios)	27.0	1	27.0	138.46	0.0000
B:B (Tiempo de Tratamiento – Minutos)	588.0	1	588.0	3015.38	0.0000
AB	108.0	1	108.0	553.85	0.0000
RESIDUOS	1.56	8	0.195		
TOTAL (CORREGIDO)	724.56	11			

Nota: Análisis de varianza de anova multifactorial.
Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

4.7. Prueba T – Student para los parámetros físicos

4.7.1.1. Prueba T – Student para la Conductividad Eléctrica

En la tabla 24 se muestra la prueba T - Student para la conductividad eléctrica de los tratamientos realizados.

Tabla 24
Estadísticas descriptivas CE

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ	Valor T	Valor P
4	562.5	33.0	16.5	(509.9; 615.1)	-56.75	0.000

Fuente: Software MINITAB versión 19.
 μ : media de población de Conductividad Eléctrica

- Hipótesis nula $H_0: \mu = 1500$
- Hipótesis alterna $H_1: \mu < 1500$

El (p-valor=0.000<0.05, prueba T-student, se trabajó con un nivel de confianza del 95%), esto nos dice que se acepta la hipótesis alterna, la cual indica que nuestros valores

promedios de conductividad eléctrica después de los tratamientos realizados son significativamente inferior a los valores que se encuentran dentro de los LMP organolépticos del reglamento de calidad de agua para consumo humano DS N°031-2010-SA que es 1500 $\mu\text{mho/cm}$.

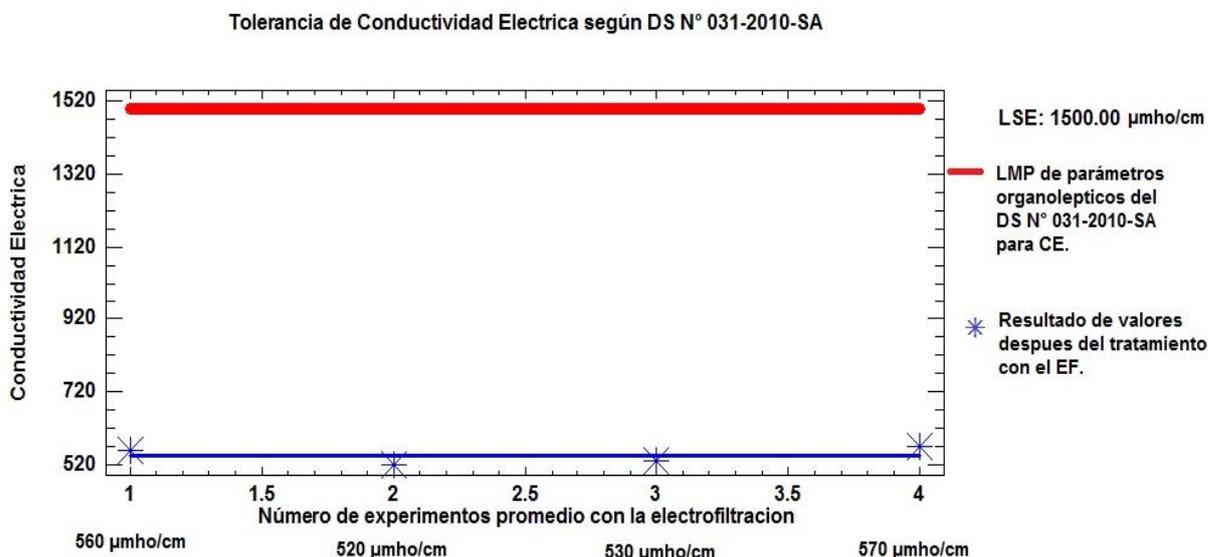


Figura 16. Comparación de los resultados de la conductividad eléctrica con el DS N°031-2010-SA.

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

De acuerdo con Arango (2005) La concentración de la conductividad eléctrica dependerá de los elementos disueltos en el agua, la reducción de este parámetro se da por la inducción de corriente continua, el tiempo de residencia y la adsorción de especies químicas por la reacción del ánodo con los iones presentes en el agua. La conductividad eléctrica para nuestro proyecto no tuvo un cambio exponencial al valor inicial sin tratamiento que fue de 530 $\mu\text{mho/cm}$ mencionaremos los resultados promedios de los tratamientos son de 560 $\mu\text{mho/cm}$, 520 $\mu\text{mho/cm}$, 530 $\mu\text{mho/cm}$, 570 $\mu\text{mho/cm}$ el aumento de la conductividad eléctrica se debió a la generación de iones de Fe^{+2} que estuvieron disueltos en el medio acuoso que se generaron por el ánodo que fue de acero inoxidable (hierro), los valores se encuentran dentro del reglamento de agua para consumo humano.

4.7.1.2. Prueba T – Student para la Turbiedad

En la tabla 25 se muestra la prueba T - Student para la turbiedad del agua de los tratamientos realizados.

Tabla 25
Estadísticas descriptivas turbiedad

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ	Valor T	Valor P
4	1.353	0.795	0.398	(0.087; 2.618)	-9.18	0.003

Fuente: Software MINITAB versión 19.
 μ : media de población de Turbiedad

- Hipótesis nula $H_0: \mu = 5$
- Hipótesis alterna $H_1: \mu < 5$

El (p-valor=0.003<0.05, prueba T-student, se trabajó con un nivel de confianza del 95%), entonces se acepta la hipótesis alterna, la cual indica que nuestros valores promedios de Turbiedad después de los tratamientos realizados son significativamente inferior a los valores que se encuentran dentro de los LMP organolépticos del reglamento de calidad de agua para consumo humano DS N°031-2010-SA que es 5 UNT.

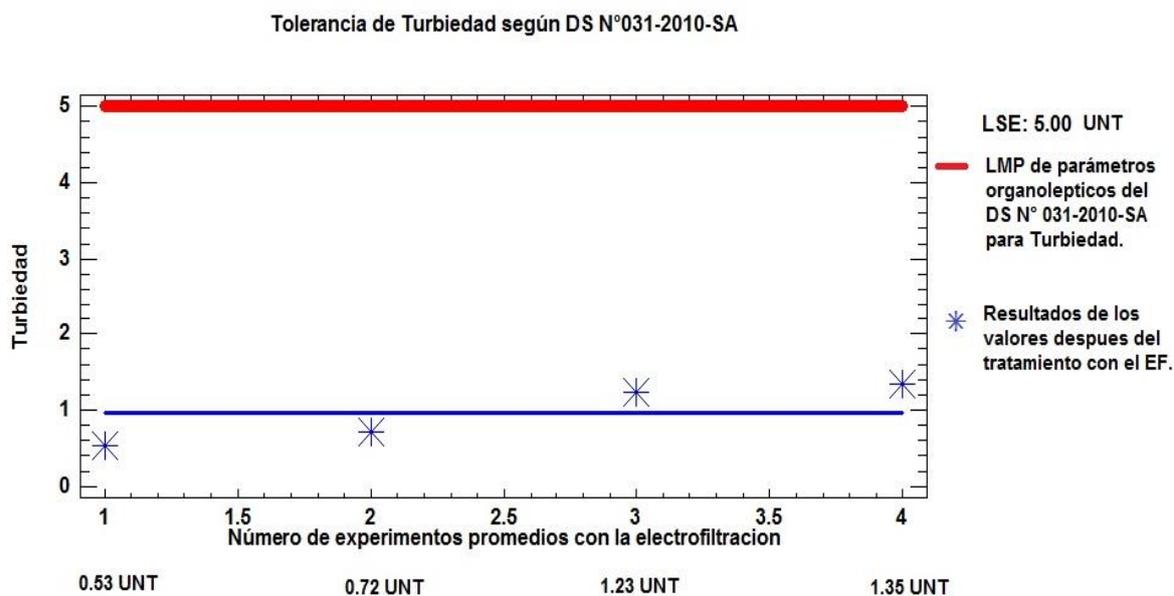


Figura 17. Comparación de los resultados de la turbiedad con el DS N°031-2010-SA.

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Los resultados promedios de la turbiedad del agua fueron 0.53 UNT, 0.72 UNT, 1.23, 1.35 UNT la intensidad de corriente y tiempo de tratamiento fueron fundamentales para la generación de turbiedad y para su disminución, la turbiedad antes de los tratamientos fue de 1.14 UNT se evidencio una remoción de turbiedad cuando se trabajó con (25V, 30V y 50min) pero ocurrió lo contrario cuando se trabajó con (25V, 30V y 60min) por que la turbiedad se elevó por encima del dato inicial esto se debe a la generación de iones Fe^{+2} y al entrar en contacto con el H_2O_2 se oxidaron a Fe^{+3} que a estar disuelta en el agua toma una coloración amarillenta que fue el causante del aumento de la turbiedad.

4.7.1.3. Prueba T – Student para el pH

En la tabla 26 se muestra la prueba T – Student para el pH de los tratamientos realizados.

Tabla 26
Estadísticas descriptivas pH

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ	Valor T	Valor P
4	7.475	0.222	0.111	(7.122; 7.828)	-0.23	0.836

Fuente: Software MINITAB versión 19.

μ : media de población de pH

- Hipótesis nula $H_0: \mu = 7.5$
- Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 7.5$

Los valores del pH de acuerdo al DS N°031-2010-SA el rango es de 6.5 a 8.5 apto para el consumo humano, pero para poder hacer la prueba t student se tuvo que sacar el promedio de los valores antes mostrados obteniendo un resultado de 7.5 para la inserción al software como un valor control de prueba.

El (p-valor=0.836>0.05, prueba T-student, se trabajó con un nivel de confianza del 95%), esto refiere a que se acepta la hipótesis alterna, la cual indica que alguno de nuestros valores promedios de pH son superiores al valor de prueba de control indicado, pero recordar que el valor de prueba utilizado es un promedio de los rangos de valores aceptables del pH. Se concluye que valores brindados después del tratamiento se encuentran por debajo de los LMP organolépticos del reglamento de calidad de agua para consumo humano DS N°031-2010-SA que es 6.5 hasta 8.5.

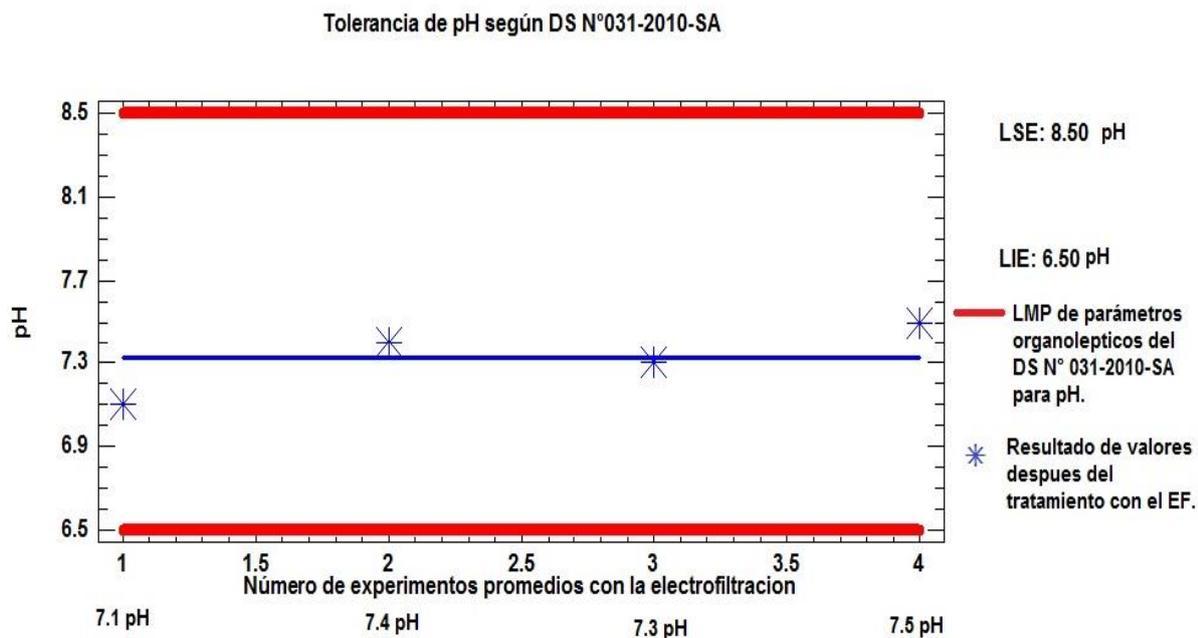


Figura 18. Comparación de los resultados del pH con el DS N°031-2010-SA.

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Con respecto a la modificación de pH en los experimentos Girona et al. (2013).en su investigación aplico la tecnología de la electrolisis en el cual expresa que el OH que se forman en el cátodo son los responsables de aumentar el pH en las muestras de agua por lo que refiere que inducen a la precipitación o co-precipitación de los iones metálicos de hidróxidos de hierro. La variación del pH en las pruebas de esta investigación no fueron de gran envergadura porque se mantuvieron en el rango neutro, el pH inicial sin tratamiento fue de 7.2 los resultados promedios fueron de 7.1 pH, 7.4 pH, 7.3 pH, 7.5 pH, este autor también enfatiza que la densidad de corriente y el tiempo de tratamiento es otro aspecto a tomarse en cuenta en la generación de OH que al incrementar el tiempo de residencia la cantidad de iones de hidróxidos se eleva y la eliminación de los iones de contaminantes se eliminan a través de la adsorción y la co-precipitación por floculos. De acuerdo con Moreno et al. (2009) demuestra que con un pH neutro se puede obtener resultados eficientes en la remoción de contaminantes, aquí se evidencia que trabajar en pH neutro también se puede lograr porcentajes de remoción aceptables ya que con

nuestra investigación se logró comprobar la remoción eficiente de metales pesados en pH neutros.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El sistema de electrofiltración de tipo batch fue eficiente como lo demuestra el análisis de varianza ANOVA de las concentraciones de remoción de los cuatro metales donde el valor $p=0.000<0.05$ que demuestra que los tratamientos son significativamente diferentes.
- La concentración de As, Ce, Se y Ti fue de 0.08569, 0.00021, 0.0004 y 0.0036 mg/L respectivamente de la muestra de agua subterránea.
- Las variables operacionales del prototipo de electrofiltro que presentaron mejores porcentajes de remoción para arsénico fue de 25V a 60min, cerio fue de 25V y 30V a 60min, selenio fue de 30V a 60 min y para el titanio fue de 25V a 60min.
- Los porcentajes de remoción para As fue de 88.6, 89.1, 96.1 y 92.4%; para Ce fue de 42.9, 71.4, 76.2 y 76.2%; para Se fue de 25, 25, 50., 75% y para Ti fue de 69.4, 77.8, 88.9 y 86.1%. para el tratamiento 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda para futuras investigaciones realizar más pruebas sobre la influencia de otras variables operacionales, como el pH, temperatura, conductividad eléctrica, tipos de electrodos, distanciamiento entre electrodos.
- Se recomienda para futuras investigaciones potenciar el proceso de oxidación de los metales pesados, ya sea induciendo aire, añadiendo oxidantes químicos, esto nos permitirá potenciar la remoción y desestabilización de los iones disueltos en el agua.
- Se recomienda que para futuras investigaciones realizar pruebas con filtros a presión de aire o filtros menores a 1 micra de porosidad con el fin de mejorar la eficiencia de filtración de los iones producidos por los electrodos y así disminuir aún más la presencia de turbiedad.
- Para futuras investigaciones se recomienda trabajar con un sistema solar fotovoltaico para disminuir costes en el uso de energía.

REFERENCIAS

- Arango, G. A. y Garcés G. L. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista universal EAFIT*, 43(147): 56-67.
- Arango, R (2005). La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 49-56, Antioquia, Colombia.
- Arévalo, C. P. (2016). *Influencia de la densidad de corriente y tiempo de residencia en la reducción de arsénico de efluentes artificiales mediante el proceso de electrocoagulación*. (Tesis para optar el grado de maestro de gestión de riesgos ambientales y seguridad de empresas). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo – Perú.
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Ana presenta resultados del monitoreo de la calidad del agua superficial y subterránea del río Coata – Puno*. Puno, Perú. Recuperado de <https://www.ana.gob.pe/noticia/ana-presenta-resultados-del-monitoreo-de-la-calidad-del-agua-superficial-y-subterranea-del>
- Bermejo, D. F. (2016). *Remoción de plomo y cadmio presente en aguas residuales mineras mediante biosorción en columnas con bagazo de caña y cascara de cacao*, Cuenca, Ecuador. Recuperado de: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/25710/1/Tesis.pdf>
- Branco, M. S. (1984). *Limnología sanitaria estudio de la polución de aguas continentales*. Washington, D.C. Secretaria general de los estados americanos.
- Brunson, R., R., Clinton, S., D. y Watson, J., S. (1991). Granular electrofiltration. *Elsevier*. 1, (1991), 166-174. [https://doi.org/10.1016/0956-9618\(91\)80011-N](https://doi.org/10.1016/0956-9618(91)80011-N)

- Carmona, K. J. (2018). *Determinación de plomo y dureza cálcica en agua de consumo humano de caja de agua – San Juan de Lurigancho. Febrero – Marzo 2017.* (Tesis de pregrado). Universidad Norbert Wiener. Lima – Perú.
- Castañeda, D., M. y Choton, E., A. (2018). *Estudio de la Densidad de Corriente y Tiempo de Residencia en el Proceso de Electrocoagulación y su Influencia en la Reducción de Fe^{2+} de Solución de Drenaje Acido de Mina.* (Tesis para optar título de Ingeniero en Materiales). Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo – Perú.
- Castro, B. (2015). *Uso de la cáscara de banano (musa paradisiaca) maduro deshidratada (seca) como proceso de bioadsorción para la retención de metales pesados, plomo y cromo en aguas contaminadas.* Universidad de Huayaquil.
- Ccencho, S. (2018). *Uso de biomasa seca (cascara de plátano) como adsorbente de arsénico en agua subterránea, Cruz del Méndano, Mórrope, Lambayeque, a nivel de laboratorio – 2018.* (Tesis de pregrado). Universidad César Vallejo. Lima - Perú.
- Condori, A. M, (2008). *Evaluación de la tratabilidad del efluente generado del efluente generado por un laboratorio metalúrgico aplicando la electrocoagulación.* (Tesis pregrado) Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima-Perú.
- Decreto Supremo N°031-2010-SA- (2010). Reglamento de calidad de agua para consumo humano. Ministerio de Salud.
http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento_Calidad_Agua.pdf
- Díaz del castillo, F. (2008). *Lecturas de ingenierías 7: Principios de electrodeposición.*
Recuperado de
http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/principios%20de%20electrolisis.pdf

- Escarcena, C. R. (2018). Remoción del arsénico de las aguas municipales y pozos domésticos en la ciudad de Juliaca por precipitación alcalina. *Universidad Nacional del Altiplano – Puno*. Recuperado de http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/8400/Escarcena_Flores_Carmen_Rosa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Escobar C., Soto S. C. and Toral M. I. (2005). Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural water and simulated wastewater. *Journal Environmental Manage*(81), 384-391.
- FAO. 2017. Tratamiento de los desechos y eliminación de aguas residuales. [En línea]: Departamento de agricultura, (<http://www.fao.org/docrep/004/T0566S/T0566S14.htm>).
- Fondo de Cooperación para el Desarrollo Social. (2001). *Estudio para el mejoramiento de la calidad del agua de pozos en zonas rurales de Puno*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd53/puno-informe/informe.pdf>
- Franco, S., A. (2016). *Electrocoagulación de selenio desde aguas residuales*. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso – Chile.
- Giraud, N. (2012). Análisis energético de la purificación de polímeros en sistemas discontinuos y semicontinuos mediante electrofiltración. *Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Villa María*. Recuperado de http://www.edutecne.utn.edu.ar/cytal_frvm/CyTAL_2012/TF/TF036.pdf
- Goren, A. Y., Kobya, M. y Oncel, M. S. (2020). Arsenite removal from groundwater by aerated electrocoagulation reactor with Al ball electrodes: Human health risk assessment. *Chemosphere*, Volume 251, 3 – 4. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126363>

- Gupta, R. y Sangal, V. (2010). *Arsenic removal from drinking water by electrocoagulation*. Department of Chemical Engineering Thapar University, Patiala.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación* (5ta Edició). México: Mc Graw Hill. <https://doi.org/>- ISBN 978-92-75-32913-9
- Hofmann, R., Käßler, T. y Posten, C. (2006). Pilot-Scale press electrofiltration of biopolymers. *Science Direct*. 51 (2006) 303–309. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.01.015>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2019). *Contaminación por arsénico y plomo en el agua subterránea del distrito de Mórrope – Lambayeque*. (16). Recuperado de <https://www.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/03/INFORME-DE-EMERGENCIA-N%C2%BA-313-18MAR2019-CONTAMINACI%C3%93N-DE-ARS%C3%89NICO-Y-PLOMO-EN-EL-AGUA-EN-EL-DISTRITO-DE-M%C3%93RROPE-LAMBAYEQUE-36.pdf>
- Khosravanipour, A., Zolfaghari, M. Y Drogui., D. (2016). Electrofiltration technique for water and wastewater treatment and bio – products management: A review. *Elsevier Journal of Water Process Engineering*. 14(2016), 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.10.003>
- Londoño, L., F., Londoño, P. y Muñoz, F., G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteología en el sector agropecuario y agroindustrial*. 14, 2, (145 – 153). DOI: 10.18684/BSAA(14)145-153
- Martínez, D., Llauro, X., Carrasco, F. (2013). Estudio de la electro – Filtración a presión constante de suspensión solido – liquido. *Afinidad*. 70, 564. Recuperado de <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/download/273743/361893>
- Morales, N. y Acosta, G. (2010). Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, 20(1):37.

Moreno, C., Cocke, D.L., Gomes, J.A.G., Morkovsky, P., Parga, J.R., Peterson, E., Garcia, C., 2009. Electrochemical reactions for electrocoagulation using iron electrodes. *ind. eng. chem. res.* 48, 2275–2282.

Organización Mundial de la Salud (1993). *Directrices de la OMS para la calidad del agua potable, establecidos en Génova 1993 son el punto de referencia internacional para el establecimiento de estándares y seguridad del agua potable*. Recuperado de <https://www.lenntech.es/estandares-calidad-agua-oms.htm>

Organización Mundial de la Salud. (2014). *Exposición al arsénico en el agua potable: una gran amenaza inadvertida para la salud en Perú*. Recuperado de <https://www.who.int/bulletin/volumes/92/8/13-128496-ab/es/>

Paitan, L., A. y Palomino, D., C. (2017). *Remoción de arsénico del agua potable del distrito de Quero provincia de Jauja, por el método de electrocoagulación, a nivel de laboratorio*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Centro del Perú. Huancayo – Perú.

Paitan, L., A. y Palomino, D., C. (2017). *Remoción de Arsénico del Agua Potable del Distrito de Quero Provincia de Jauja, por el Metodo de Electrocoagulación, a Nivel Laboratorio*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo – Perú.

Pantoja, E. T. (2012). *Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón*. Tesis de pregrado), Universidad del Valle. Santiago de Cali.

Pauling, L, C. (1932). *Electronegatividad de Pauling*. Recuperado de: <http://www.mineduc.gob.gt/DIGECADE/documents/Telesecundaria/Recursos%20Digitales/3o%20Recursos%20Digitales%20TS%20BY->

SA%203.0/CIENCIAS%20NATURALES/U7%20pp%20161%20electronegatividad.pdf.

Porto, H. (2014). *Evaluación de la remoción de arsénico por electrocoagulación de aguas mineras*. (Tesis para optar el título de Ingeniero Químico), Universidad Nacional del Altiplano. Puno – Perú.

Quispe, K. K. (2015). *Electrocoagulación en la remoción de mercurio de las aguas residuales en el centro poblado la Rinconada – Puno*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano. Puno – Perú.

Red de tratamiento y reciclaje de aguas industriales mediante soluciones sostenibles fundamentadas en los procesos biológicos (Red Tritón).(2019). *Manual de técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*. (Archivo PDF).

Reyes, C., Y., Vergara, I., Torres, O., E., Díaz, M. y González, E., E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*. (16). 66-77.

Reynoso, L. (2018). Evaluación del proceso de electrocoagulación para remoción de arsénico y flúor presentes en agua de consumo humano. *Revista de simulación y laboratorio*. Vol.5 14, 1-12.

Ríos, J., N. (2005). *Remoción de amonio y de metales pesados en los lixiviados del relleno sanitario “La esmeralda” de la ciudad de Manizales por electrocoagulación*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Manizales – Colombia.

Romero, K. P. (2009). Contaminación de metales pesados. *Revista de científica ciencia médica SCEM*. 12 (1). Recuperado de http://www.scielo.org.bo/pdf/rccm/v12n1/v12n1_a13.pdf

- Spacu, P. (1935). Die potentiometrische Bestimmung der Oxalate mit Silbernitrat. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 103(7), 272-274.
- Tovar, C. T., Ortiz, Á. V., & Rangel, V. R. (2012). Biomasa residual para remoción de mercurio y cadmio: una revisión. *Ingenium*, 6(14), 11–21. Retrieved from <http://revistas.usc.edu.co/index.php/Ingenium/article/view/189>
- Trelles, J. A. (2013). *Biosorción de arsénico en medio acuoso empleando biomásas vegetales inertes*. (Tesis para optar grado académico de maestro en ciencias con mención en tratamiento de aguas y reusó de desechos. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú.
- Westres, S. A. (2013). *Diseño de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Procedentes de una Planta Productora de Sulfatos Mediante el Proceso Electroquímico de Electrocoagulación*. (Tesis para optar el título de Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima – Perú.
- Yang, G., C., C. Y Li, C., J. (2007). Electrofiltration of silica nanoparticle-containing wastewater using tubular ceramic membranes. *Elsevier – separation and purification technology*. 58(2007), 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.07.019>
- Yang, G., C., C. y Yang, T., Y. (2004). Reclamation of high quality water from treating CMP wastewater by a novel crossflow electrofiltration / electro dialysis process. *Elsevier – Journal of Membrane Science*. 233(2004), 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.01.011>
- Zea, G. (24 de marzo del 2018). Seda Juliaca: En la ciudad de los vientos, 100 mil pobladores no tienen agua. *Diario el correo*. <https://diariocorreo.pe/peru/seda-juliaca-en-la-ciudad-de-los-vientos-100-mil-pobladores-no-tienen-agua-662083/>

Zhang, S., Tan, R., B., H., Neoh, K. G. y Tien, C. (2000). Electrofiltration of aqueous Suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 228, 393-404. doi:10.1006/jcis.2000.696.

ANEXOS

Anexo 1: Prueba Duncan al 95%

- Análisis estadísticos Duncan para el Arsénico

Tabla 1
Medias por Mínimos Cuadrados para %Remoción de As (Arsénico) con intervalos de confianza del 95.0%

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	12	91.5			
Tratamiento					
1	3	89.0 c	0.0763763	88.8239	89.1761
2	3	89.0 c	0.0763763	88.8239	89.1761
3	3	96.0 a	0.0763763	95.8239	96.1761
4	3	92.0 b	0.0763763	91.8239	92.1761

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

La tabla 1, nos dice que el tratamiento 3, reporta el mejor porcentaje promedio de remoción de As, seguido del tratamiento 4, el tratamiento 1 y 2 en tercer lugar según la (prueba Duncan $p < 0.05$).

Tabla 2
Medias por Mínimos Cuadrados para %Remoción de As (Arsénico) con intervalos de confianza del 95.0%

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	12	91.5			
A					
25	6	92.5 a	0.0540062	92.3755	92.6245
30	6	90.5 b	0.0540062	90.3755	90.6245
B					
50	6	89.0 b	0.0540062	88.8755	89.1245
60	6	94.0 a	0.0540062	93.8755	94.1245
A por B					
25,50	3	89.0 c	0.0763763	88.8239	89.1761
25,60	3	96.0 a	0.0763763	95.8239	96.1761
30,50	3	89.0 c	0.0763763	88.8239	89.1761
30,60	3	92.0 b	0.0763763	91.8239	92.1761

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Se demuestra que en la tabla 2 las letras iguales (C) indican diferencias no significativas entre medias, las letras diferentes (a, b) indican diferencias significativas entre las medias. (Prueba Duncan a 95% de confianza).

Tabla 3

Pruebas de Múltiple Rangos para %Remoción de As (Arsénico) por Tratamiento Método: 95.0 porcentaje Duncan

Tratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos
				Homogéneos
1	3	89.0 c	0.0763763	X
2	3	89.0 c	0.0763763	X
3	3	96.0 a	0.0763763	X
4	3	92.0 b	0.0763763	X

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Tabla 4

Diferencia de contraste para los tratamientos

Contraste	Sig.	Diferencia
1 - 2	NS	0
1 - 3	*	-7.0
1 - 4	*	-3.0
2 - 3	*	-7.0
2 - 4	*	-3.0
3 - 4	*	4.0

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

* indica una diferencia significativa.

La tabla 3 y 4 hace referencia que la diferencia del promedio del tratamiento 1 con el tratamiento 2 son significativamente iguales, (Diferencia no significativa NS). La diferencia del promedio del tratamiento 1 con el tratamiento 3 es significativamente diferentes, (Diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 1 con el tratamiento 4 es significativamente diferentes, (Diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 2 con el tratamiento 3 es significativamente diferentes, (Diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 2 con el tratamiento 4 es significativamente diferentes, (Diferencia significativa *). La diferencia del promedio

del tratamiento 3 con el tratamiento 4 es significativamente diferentes, (Diferencia significativa *).

Tabla 5
Pruebas de Múltiple Rangos para %Remoción de As (Arsénico) por A Método: 95.0 porcentaje Duncan

A:(Intensidad de Corriente Continua)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos
30	6	90.5 b	0.0540062	X
25	6	92.5 a	0.0540062	X

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Tabla 6
Diferencia de contraste para A

Contraste	Sig.	Diferencia
25 – 30	*	2.0

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

* indica una diferencia significativa.

La tabla 5 muestra que el mayor efecto en el tratamiento del factor A: intensidad de Corriente continua viene a ser 25 voltios. La tabla 6 indica que la diferencia del promedio de (A: 25) con el (A: 30) es significativamente diferente.

Tabla 7
Pruebas de Múltiple Rangos para %Remoción de As (Arsénico) por B Método: 95.0 porcentaje Duncan

B: (Tiempo de Tratamiento)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos
50	6	89.0 b	0.0540062	X
60	6	94.0 a	0.0540062	X

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Tabla 8
Diferencia de contraste para B

Contraste	Sig.	Diferencia
50 - 60	*	-5.0

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

* indica una diferencia significativa.

La tabla 7 nos dice que el mayor efecto en el tratamiento del factor B: tiempo de tratamiento viene a ser 60 minutos. La tabla 8 muestra que la diferencia del promedio de (B: 50) con el (B: 60) es significativamente diferente.

- **Análisis estadísticos Duncan para el Cerio**

Tabla 9
Medias por Mínimos Cuadrados para %Remoción de Ce (Cerio) con intervalos de confianza del 95.0%

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	12	66.5			
Tratamiento					
1	3	43.0	0.253311	42.4159	43.5841
2	3	71.0	0.253311	70.4159	71.5841
3	3	76.0	0.253311	75.4159	76.5841
4	3	76.0	0.253311	75.4159	76.5841

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

La tabla 9, nos dice que el tratamiento 3, 4 reportan los mejores porcentajes promedio de remoción de Ce, seguido del tratamiento 2 y por último el tratamiento 1 según la (prueba Duncan $p < 0.05$).

Tabla 10
Medias por Mínimos Cuadrados para %Remoción de Ce (Cerio) con intervalos de confianza del 95.0%

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	12	66.5			
A					
25	6	59.5 b	0.179118	59.087	59.913
30	6	73.5 a	0.179118	73.087	73.913
B					
50	6	57.0 b	0.179118	56.587	57.413
60	6	76.0 a	0.179118	75.587	76.413
A por B					
25,50	3	43.0 b	0.253311	42.4159	43.5841
25,60	3	76.0 c	0.253311	75.4159	76.5841
30,50	3	71.0 a	0.253311	70.4159	71.5841
30,60	3	76.0 c	0.253311	75.4159	76.5841

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Se demuestra que en la tabla 10 las letras iguales (C) indican diferencias no significativas entre medias, las letras diferentes (a, b) indican diferencias significativas entre las medias. (Prueba Duncan a 95% de confianza).

Tabla 11
Pruebas de Múltiple Rangos para %Remoción de Ce (Cerio) por Tratamiento
Método: 95.0 porcentaje Duncan

Tratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1	3	43.0	0.253311	X
2	3	71.0	0.253311	X
3	3	76.0	0.253311	X
4	3	76.0	0.253311	X

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Tabla 12
Diferencia de contrastes para los tratamientos

Contraste	Sig.	Diferencia
1 - 2	*	-28.0
1 - 3	*	-33.0
1 - 4	*	-33.0
2 - 3	*	-5.0
2 - 4	*	-5.0
3 - 4	NS	0

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

* indica una diferencia significativa.

La tabla 11 y 12 hacen referencia que la diferencia del promedio del tratamiento 1 con el tratamiento 2 son significativamente diferentes, (Diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 1 con el tratamiento 3 es significativamente diferentes, (Diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 1 con el tratamiento 4 es significativamente diferentes, (Diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 2 con el tratamiento 3 es significativamente diferentes, (Diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 2 con el tratamiento 4 es significativamente diferentes, (Diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 3 con el tratamiento 4 es significativamente igual, (Diferencia no significativa NS).

Tabla 13
Pruebas de Múltiple Rangos para %Remoción de Ce (Cerio) por A Método: 95.0 porcentaje Duncan

A:	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos
(Intensidad de Corriente Continua)				Homogéneos
25	6	59.5	0.179118	X
30	6	73.5	0.179118	X

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Tabla 14***Diferencia de contraste para A***

Contraste	Sig.	Diferencia
25 - 30	*	-14.0

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

* indica una diferencia significativa.

La tabla 13 muestra que el mayor efecto en el tratamiento del factor A: intensidad de Corriente continua viene a ser 30 voltios. La tabla 14 indica que la diferencia del promedio de (A: 25) con el (A: 30) es significativamente diferente.

Tabla 15***Pruebas de Múltiple Rangos para %Remoción de Ce (Cerio) por B******Método: 95.0 porcentaje Duncan***

B: (Tiempo de Tratamiento)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
50	6	57.0	0.179118	X
60	6	76.0	0.179118	X

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Tabla 16***Diferencia de contraste para B***

Contraste	Sig.	Diferencia
50 - 60	*	-19.0

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

* indica una diferencia significativa.

La tabla 15 nos dice que el mayor efecto en el tratamiento del factor B: tiempo de tratamiento viene a ser 60 minutos. La tabla 16 muestra que la diferencia del promedio de (B: 50) con el (B: 60) es significativamente diferente.

- **Análisis estadísticos Duncan para el Selenio**

Tabla 17

Medias por Mínimos Cuadrados para %Remoción de Se (Selenio) con intervalos de confianza del 95.0%

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	12	43.75			
Tratamiento					
1	3	25.0	0.308221	24.2892	25.7108
2	3	25.0	0.308221	24.2892	25.7108
3	3	50.0	0.308221	49.2892	50.7108
4	3	75.0	0.308221	74.2892	75.7108

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

La tabla 17, nos dice que el tratamiento 4 reporta el mejor porcentaje promedio de remoción de Se, seguido del tratamiento 3 y por último de los tratamientos 2, 1, según la (prueba Duncan $p < 0.05$).

Tabla 18

Medias por Mínimos Cuadrados para %Remoción de Se (Selenio) con intervalos de confianza del 95.0%

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	12	43.75			
A					
25	6	37.5 b	0.217945	36.9974	38.0026
30	6	50.0 a	0.217945	49.4974	50.5026
B					
50	6	25.0 b	0.217945	24.4974	25.5026
60	6	62.5 a	0.217945	61.9974	63.0026
A por B					
25,50	3	25.0 c	0.308221	24.2892	25.7108
25,60	3	50.0 b	0.308221	49.2892	50.7108
30,50	3	25.0 c	0.308221	24.2892	25.7108
30,60	3	75.0 a	0.308221	74.2892	75.7108

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Se demuestra que en la tabla 18 las letras iguales (C) indican diferencias no significativas entre medias, las letras diferentes (a, b) indican diferencias significativas entre las medias. (Prueba Duncan a 95% de confianza).

Tabla 19
Pruebas de Múltiple Rangos para %Remoción de Se (Selenio) por Tratamiento
Método: 95.0 porcentaje Duncan

Tratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos
				Homogéneos
1	3	25.0	0.308221	X
2	3	25.0	0.308221	X
3	3	50.0	0.308221	X
4	3	75.0	0.308221	X

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Tabla 20
Diferencia de contraste para los tratamientos

Contraste	Sig.	Diferencia
1 - 2	NS	0
1 - 3	*	-25.0
1 - 4	*	-50.0
2 - 3	*	-25.0
2 - 4	*	-50.0
3 - 4	*	-25.0

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

* indica una diferencia significativa.

La tabla 19 y 20 hace referencia que la diferencia del promedio del tratamiento 1 con el tratamiento 2 son significativamente iguales, (diferencia no significativa-NS). La diferencia del promedio del tratamiento 1 con el tratamiento 3 es significativamente diferentes, (diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 1 con el tratamiento 4 es significativamente diferentes, (diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 2 con el tratamiento 3 es significativamente diferentes, (diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 2 con el tratamiento 4 es significativamente diferentes, (diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 3 con el tratamiento 4 es significativamente diferentes, (diferencia significativa *).

Tabla 21
Pruebas de Múltiple Rangos para %Remoción de Se (Selenio) por A Método: 95.0 porcentaje Duncan

A:	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos
(Intensidad de Corriente Continua)				Homogéneos
25	6	37.5	0.217945	X
30	6	50.0	0.217945	X

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Tabla 22
Diferencia de contraste para A

Contraste	Sig.	Diferencia
25 - 30	*	-12.5

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

* indica una diferencia significativa.

La tabla 21 muestra que el mayor efecto en el tratamiento del factor A: intensidad de Corriente continua viene a ser 30 voltios. La tabla 22 indica que la diferencia del promedio de (A: 25) con el (A: 30) es significativamente diferente.

Tabla 23

Pruebas de Múltiple Rangos para %Remoción de Se (Selenio) por B Método: 95.0 porcentaje Duncan

B: (Tiempo de Tratamiento)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos
				Homogéneos
50	6	25.0	0.217945	X
60	6	62.5	0.217945	X

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Tabla 24
Diferencia de contraste para B

Contraste	Sig.	Diferencia
50 - 60	*	-37.5

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

* indica una diferencia significativa.

La tabla 23 nos dice que el mayor efecto en el tratamiento del B: tiempo de tratamiento viene a ser 60 minutos. La tabla 24 muestra que la diferencia del promedio de (B: 50) con el (B: 60) es significativamente diferente.

- **Análisis estadísticos Duncan para el Titanio**

Tabla 25
Medias por Mínimos Cuadrados para %Remoción de Ti (Titanio) con intervalos de confianza del 95.0%

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	12	80.5			
Tratamiento					
1	3	69.0	0.254951	68.4121	69.5879
2	3	78.0	0.254951	77.4121	78.5879
3	3	89.0	0.254951	88.4121	89.5879
4	3	86.0	0.254951	85.4121	86.5879

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

La tabla 25, muestra que el tratamiento 3 reporta el mejor porcentaje promedio de remoción de Ti, seguido del tratamiento 4, por último encontramos a los tratamientos 2 y 1, según la (prueba Duncan $p < 0.05$).

Tabla 26
Medias por Mínimos Cuadrados para %Remoción de Ti (Titanio) con intervalos de confianza del 95.0%

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	12	80.5			
A					
25	6	79.0 b	0.180278	78.5843	79.4157
30	6	82.0 a	0.180278	81.5843	82.4157
B					
50	6	73.5 b	0.180278	73.0843	73.9157
60	6	87.5 a	0.180278	87.0843	87.9157
A por B					
25,50	3	69.0 d	0.254951	68.4121	69.5879
25,60	3	89.0 a	0.254951	88.4121	89.5879
30,50	3	78.0 c	0.254951	77.4121	78.5879
30,60	3	86.0 b	0.254951	85.4121	86.5879

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Se muestra que en la tabla 26 las letras diferentes (a, b, c y d) indican diferencias significativas entre las medias. (Prueba Duncan a 95% de confianza).

Tabla 27**Pruebas de Múltiple Rangos para %Remoción de Ti (Titanio) por Tratamiento****Método: 95.0 porcentaje Duncan**

Tratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos
Homogéneos				
1	3	69.0	0.254951	X
2	3	78.0	0.254951	X
4	3	86.0	0.254951	X
3	3	89.0	0.254951	X

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Tabla 28**Diferencia de contrastes para los tratamientos**

Contraste	Sig.	Diferencia
1 - 2	*	-9.0
1 - 3	*	-20.0
1 - 4	*	-17.0
2 - 3	*	-11.0
2 - 4	*	-8.0
3 - 4	*	3.0

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

* indica una diferencia significativa.

La tabla 27 y 28 hace referencia que la diferencia del promedio del tratamiento 1 con el tratamiento 2 es significativamente diferentes, (diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 1 con el tratamiento 3 es significativamente diferentes, (diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 1 con el tratamiento 4 es significativamente diferentes, (diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 2 con el tratamiento 3 es significativamente diferentes, (diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 2 con el tratamiento 4 es significativamente diferentes, (diferencia significativa *). La diferencia del promedio del tratamiento 3 con el tratamiento 4 es significativamente diferentes, (diferencia significativa *).

Tabla 29**Pruebas de Múltiple Rangos para %Remoción de Ti (Titanio) por A Método: 95.0 porcentaje Duncan**

A: (Intensidad de Corriente Continua)			Sigma LS	Grupos Homogéneos
Casos	Media LS			
25	6	79.0	0.180278	X
30	6	82.0	0.180278	X

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Tabla 30**Diferencia de contraste para A**

Contraste	Sig.	Diferencia
25 - 30	*	-3.0

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

* indica una diferencia significativa.

La tabla 29 muestra que el mayor efecto en el tratamiento del factor A: intensidad de Corriente continua viene a ser 30 voltios. La tabla 30 indica que la diferencia del promedio de (A: 25) con el (A: 30) es significativamente diferente.

Tabla 31**Pruebas de Múltiple Rangos para %Remoción de Ti (Titanio) por B Método: 95.0 porcentaje Duncan**

B: (Tiempo de Tratamiento)			Sigma LS	Grupos Homogéneos
Casos	Media LS			
50	6	73.5	0.180278	X
60	6	87.5	0.180278	X

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Tabla 32**Diferencia de contrastes para B**

Contraste	Sig.	Diferencia
50 - 60	*	-14.0

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

* indica una diferencia significativa.

La tabla 31 nos dice que el mayor efecto en el tratamiento del B: tiempo de tratamiento viene a ser 60 minutos. La tabla 32 muestra que la diferencia del promedio de (B: 50) con el (B: 60) es significativamente diferente.

Anexo 2: Panel fotográfico



Figura 1. Toma de muestra del pozo subterráneo.



Figura 2. Envío de muestras al laboratorio.



Figura 3. Medición del pH de la muestra patrón.



Figura 4. Medición de la CE muestra patrón.



Figura 5. Oxidación solar con H₂O₂.



Figura 6. Exposición al sol.



Figura 7. Herramientas del proyecto.



Figura 8. Electrofiltro.



Figura 9. Filtro de sedimentos.



Figura 10. Salidas de los filtros de sedimentos.



Figura 11. Electrodo ensamblados.



Figura 12. Tapa y fuente de alimentación del EF.



Figura 13. Funcionamiento del regulador de ICC. Figura 14. Medición de voltios con un multítester.



Figura 15. Ejecución del tratamiento, medición de los voltajes aplicados al electrofiltro (EF).



Figura 16. Multiparametro HI 98130 y el multímetro digital 10404 Truper.



Figura 17. Fuente de alimentación regulable Hy3005b



Figura 18. Soluciones de calibración del multiparametro.



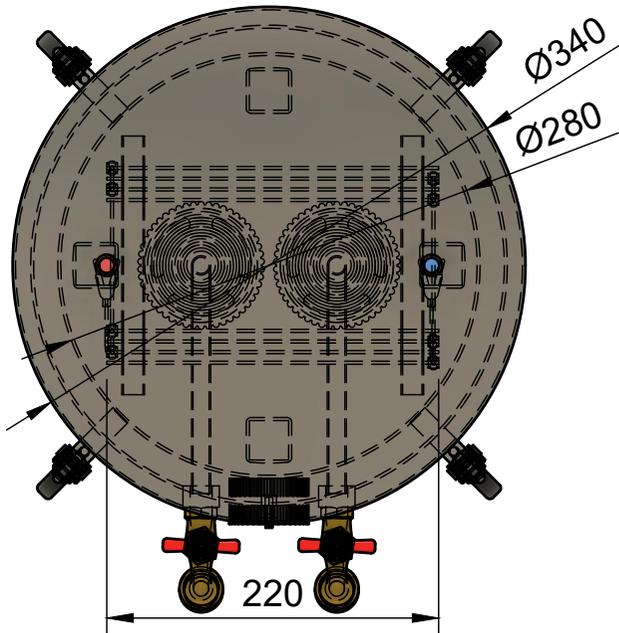
Figura 19. Calibración del pH.



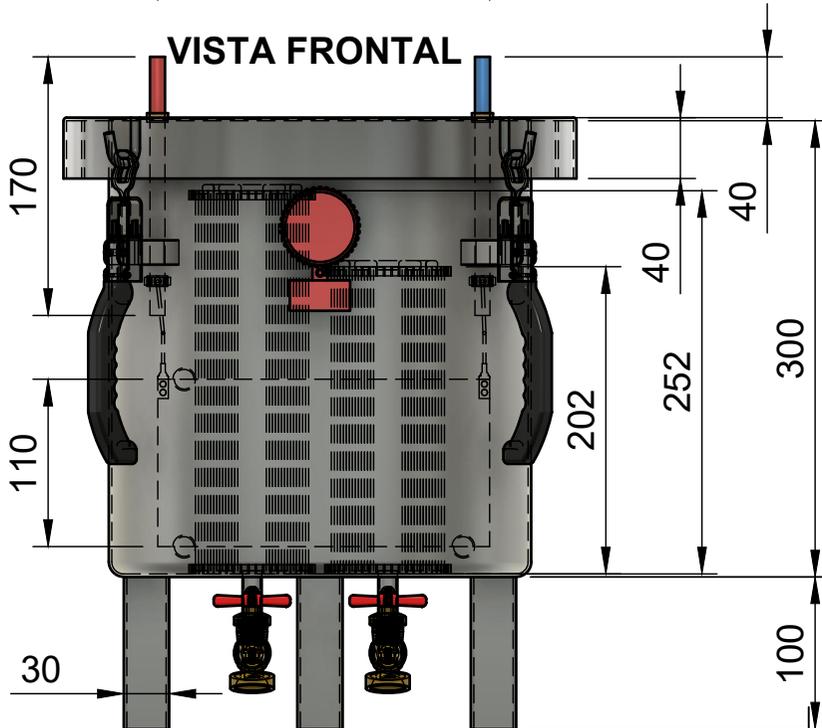
Figura 20. Calibración de la CE

Anexo 3: Diseño de planos

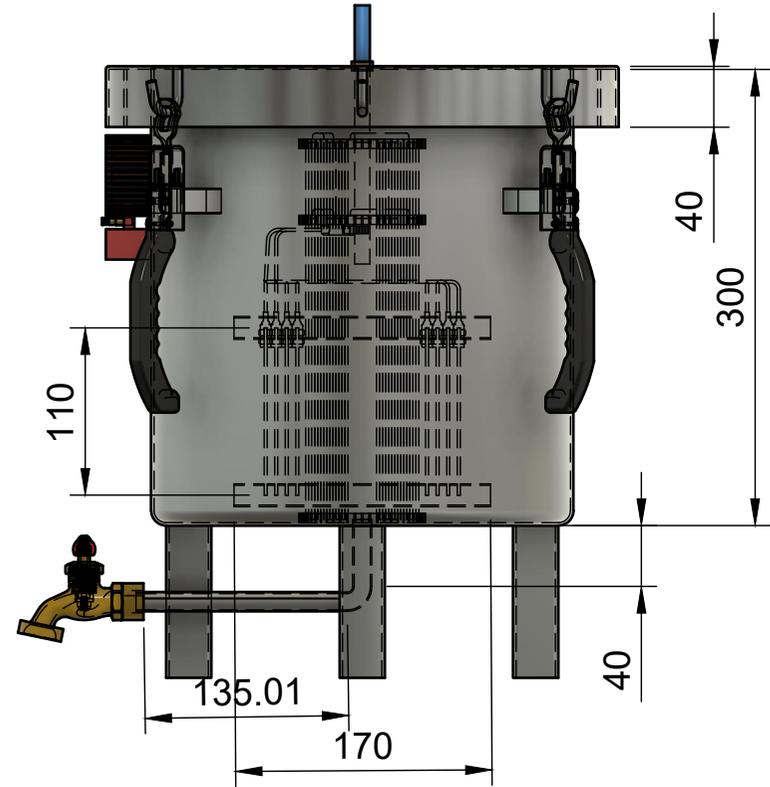
VISTA EN PLANTA



VISTA FRONTAL



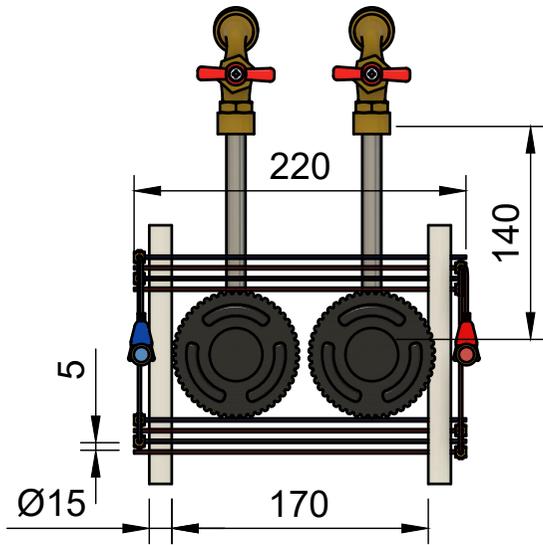
VISTA LATERAL



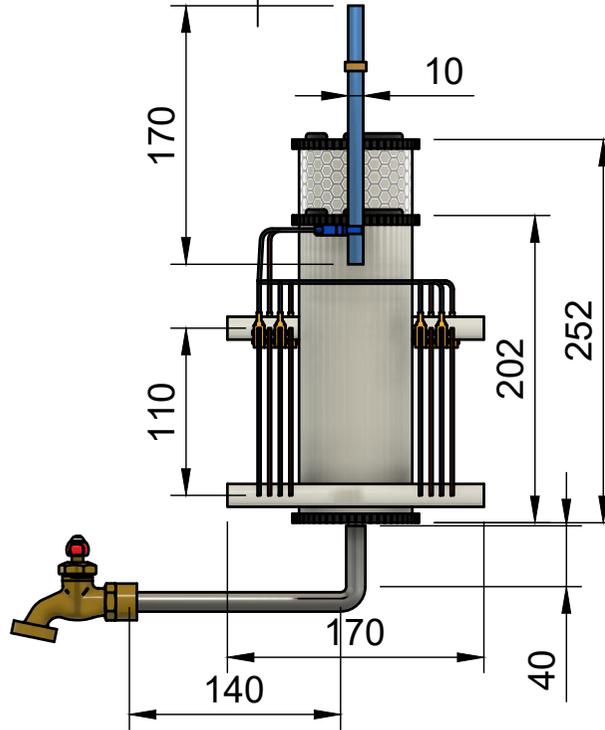
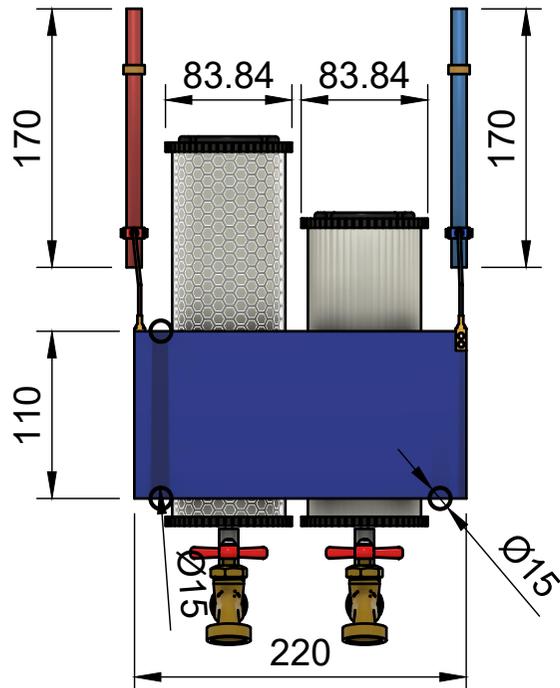
PROYECTO:
ELECTROFILTRACIÓN DE AGUA SUBTERRANEAS PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS A ESCALA DE LABORATORIOS.

DISEÑO: RONALD R. ALANOCCA QUISPE	DPTO: PUNO	PROVINCIA: SAN ROMÁN	DISTRITO: JULIACA	LAMINA:
PLANO: Diseño de Electrofiltro	ESCALA: 1/5	REVISIÓN: 06	FECHA: 26/11/20	01
DIBUJO: RONALD RICARDO ALANOCCA QUISPE				

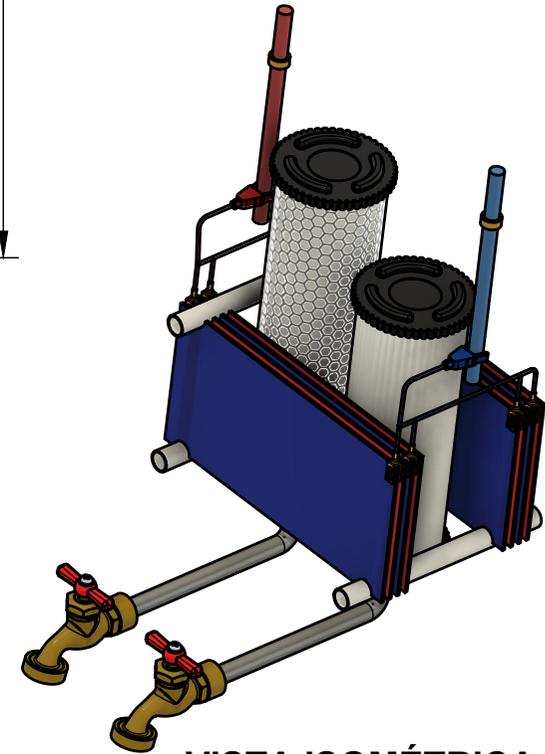
VISTA EN PLANTA



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



VISTA ISOMÉTRICA

PROYECTO:
ELECTROFILTRACIÓN DE AGUA SUBTERRANEAS PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS A ESCALA DE LABORATORIOS.

DISEÑO:
RONALD R. ALANOCCA QUISPE

DPTO:
PUNO

PROVINCIA:
SAN ROMÁN

DISTRITO:
JULIACA

LAMINA:

PLANO:
 Detalles del Electrofiltro

ESCALA:
 1/5

REVISIÓN:
 06

FECHA:
 26/11/20

02

DIBUJO:
RONALD RICARDO ALANOCCA QUISPE

Varilla para conectar

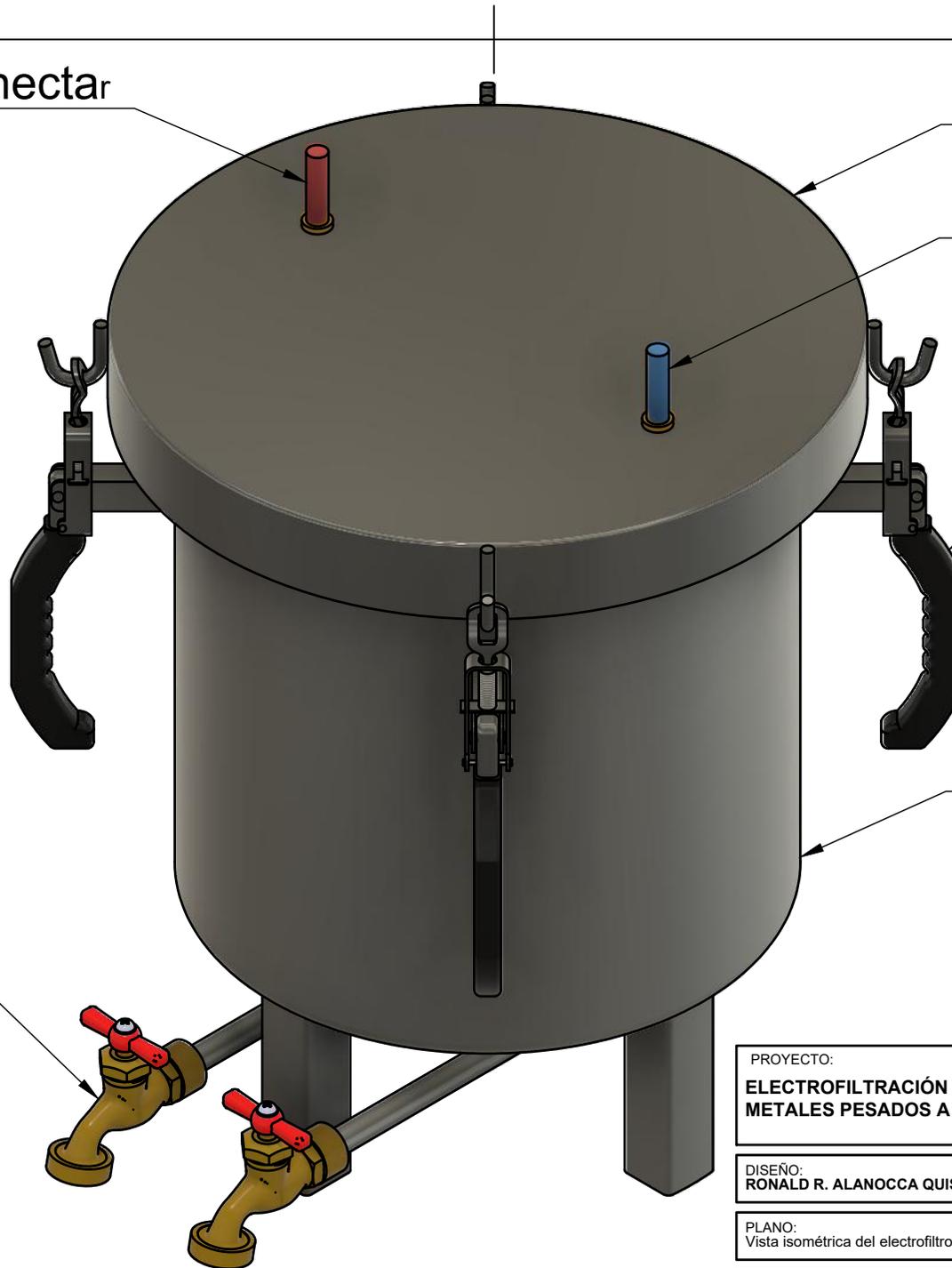
Tapa

Varilla para conectar

Seguro

Olla

Llave $\frac{1}{2}$ "



PROYECTO:
ELECTROFILTRACIÓN DE AGUA SUBTERRANEAS PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS A ESCALA DE LABORATORIOS.

DISEÑO: RONALD R. ALANOCCA QUISPE	DPTO: PUNO	PROVINCIA: SAN ROMÁN	DISTRITO: JULIACA	LAMINA:
--------------------------------------	---------------	-------------------------	----------------------	---------

PLANO: Vista isométrica del electrofiltro	ESCALA: 1/3	REVISIÓN: 06	FECHA: 26/11/20	03
--	----------------	-----------------	--------------------	----

DIBUJO: RONALD RICARDO ALANOCCA QUISPE

Varilla de 17cm X 10mm

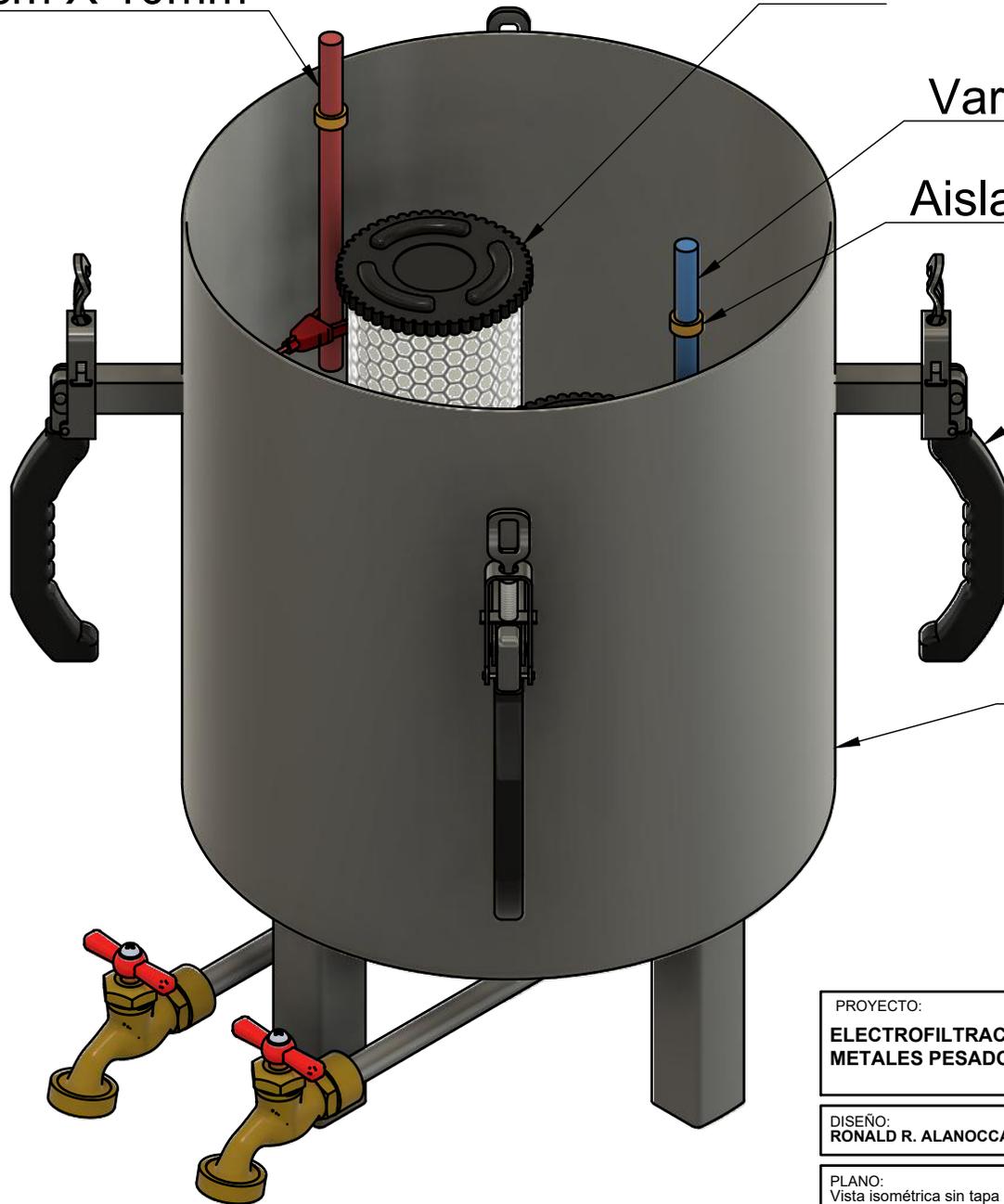
Filtro

Varilla de 17cm X 10mm

Aislante

Seguro

Olla



PROYECTO:
ELECTROFILTRACIÓN DE AGUA SUBTERRANEAS PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS A ESCALA DE LABORATORIOS.

DISEÑO:
RONALD R. ALANOCCA QUISPE

DPTO:
PUNO

PROVINCIA:
SAN ROMÁN

DISTRITO:
JULIACA

LAMINA:

PLANO:
Vista isométrica sin tapa del electrofiltro

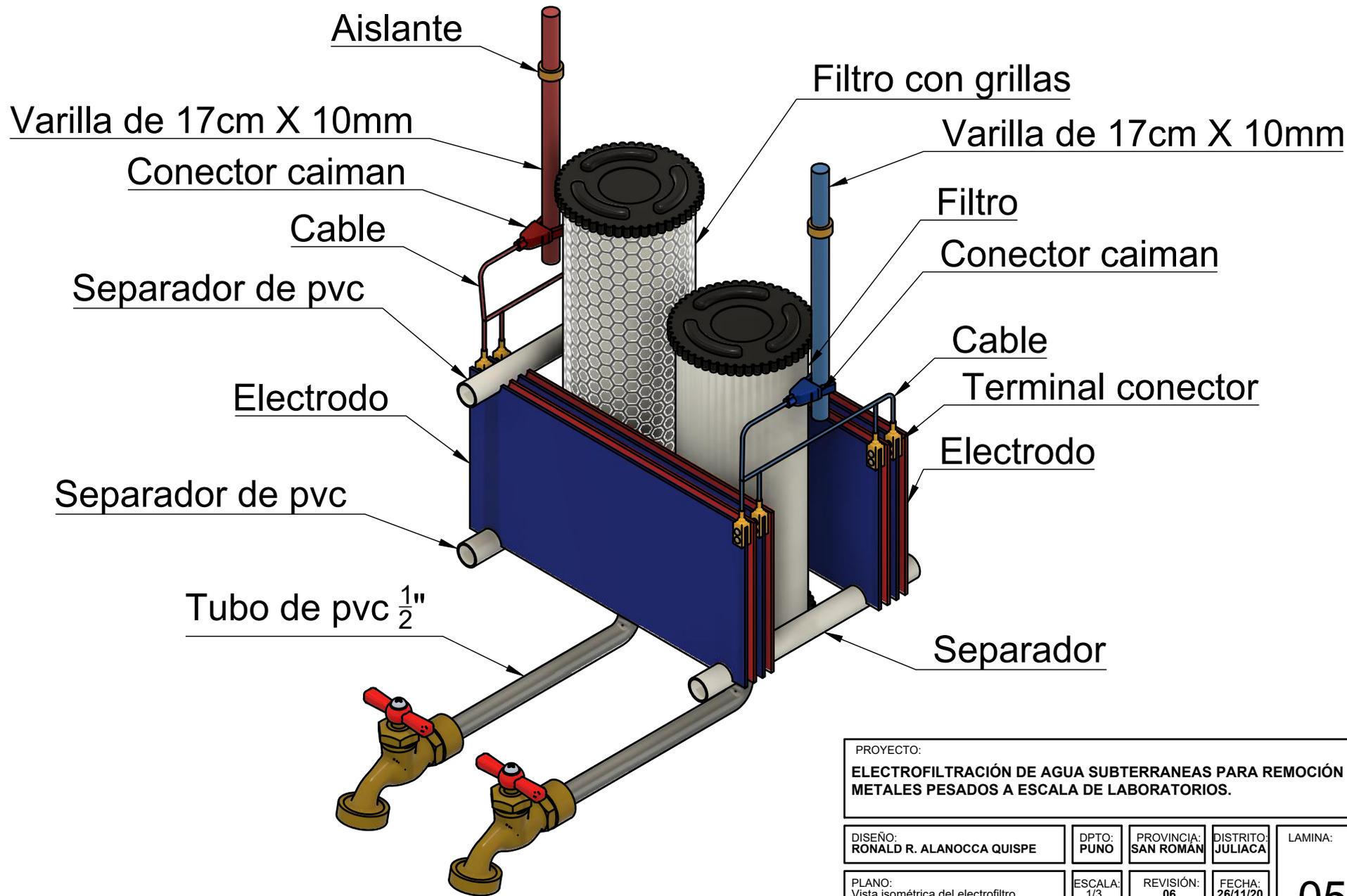
ESCALA:
1/3

REVISIÓN:
06

FECHA:
26/11/20

04

DIBUJO:
RONALD RICARDO ALANOCCA QUISPE



PROYECTO:
ELECTROFILTRACIÓN DE AGUA SUBTERRANEAS PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS A ESCALA DE LABORATORIOS.

DISEÑO:
RONALD R. ALANOCCA QUISPE

DPTO:
PUNO

PROVINCIA:
SAN ROMÁN

DISTRITO:
JULIACA

LAMINA:

PLANO:
 Vista isométrica del electrofiltro

ESCALA:
 1/3

REVISIÓN:
 06

FECHA:
 26/11/20

05

DIBUJO:
RONALD RICARDO ALANOCCA QUISPE