



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**AMBIENTAL Y FORESTAL**



**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN  
ALIMENTADA POR ENERGÍA FOTOVOLTAICA PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA EN EL  
DISTRITO DE CHUPA, PUNO”**

**Bach. Matilde Claret Laura Halanoca**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

**ASESOR:  
Dr. Wile Mamani Navarro**



**JULIACA - PERÚ**  
**2025**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**AMBIENTAL Y FORESTAL**



**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN  
ALIMENTADA POR ENERGÍA FOTOVOLTAICA PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA EN EL  
DISTRITO DE CHUPA, PUNO”**

**Bach. Matilde Claret Laura Halanoca**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

**ASESOR:  
Dr. Wile Mamani Navarro**



**JULIACA - PERÚ**  
**2025**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA**

**AMBIENTAL Y FORESTAL**



**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN  
ALIMENTADA POR ENERGÍA FOTOVOLTAICA PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA EN EL  
DISTRITO DE CHUPA, PUNO”**

**Bach. Matilde Claret Laura Halanoca**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Asesor: Dr. Wile Mamani Navarro

Juliaca – 2025

Laura, M. (2025), Optimización del proceso de electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica para el tratamiento de agua residual doméstica en el distrito de Chupa, Puno, (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca.

**AUTOR:** Matilde Claret Laura Halanoca

**TÍTULO:** Optimización del proceso de electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica para el tratamiento de agua residual doméstica en el distrito de Chupa, Puno

**PUBLICACIÓN:** Juliaca, 2025

**DESCRIPCIÓN:** Cantidad de páginas (119 páginas)

**NOTA:** Tesis Escuela profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal -  
Universidad Nacional de Juliaca.

**CÓDIGO:** 01-000067-01/L29

**NOTA:** Incluye bibliografía.

**ASESOR:** Dr. Wile Mamani Navarro

**PALABRAS CLAVE:** Agua residual, electrocoagulación, energía fotovoltaica, tecnología, tratamiento.

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

## ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y FORESTAL

### “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN ALIMENTADA POR ENERGÍA FOTOVOLTAICA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA EN EL DISTRITO DE CHUPA, PUNO”

#### TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Presentado por:

**Bach. Matilde Claret Laura Halanoca**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

**Dr. Alejandro Félix Taquire Arroyo**

**PRESIDENTE DE JURADO**

**Dr. Godofredo Huanca Chambi**

**JURADO (secretario)**

**Dra. Yesica Magnolia Mamani Arpasi**

**JURADO (Vocal)**

2° MIEMBRO

3° MIEMBRO

**Dr. Wile Mamani Navarro**  
**ASESOR DE TESIS**






# 13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

## Fuentes principales

- 11%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**  
5 caracteres sospechosos en N.º de página  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



## DEDICATORIA

*A Dios por darme sabiduría, fuerza y perseverancia para continuar, mostrándome que su tiempo siempre es perfecto. Por brindarme paz y el consuelo en los momentos más difíciles.*

*A mis padres, Juan y Luz Marina, por ser mi pilar, guía y la razón de mi existencia. por el apoyo incondicional, paciencia y su constante comprensión.*

*A mis hermanos Elmer y Rosmeri, quienes han sido una fuente constante de motivación e inspiración a lo largo de mi trayectoria académica.*

*A mi abuelo José por sus consejos y por cada palabra de aliento que me dio en este camino.*

## **AGRADECIMIENTO**

*A mis padres quienes me han guiado y acompañado durante toda mi formación académica universitaria*

*A la Universidad Nacional de Juliaca y a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal, por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios superiores, ofrecerme una formación académica de calidad y contribuir de manera significativa en mi desarrollo profesional.*

*Al Dr. Wile Mamani Navarro, asesor de la presente tesis, por su valioso tiempo y el apoyo en este proceso*

*Dirijo mi más sincero agradecimiento a los miembros del jurado, Dr. Alejandro Félix Taquire Arroyo, Dr. Godofredo Huanca Chambi y a la Dra. Yesica Magnolia Mamani Arpasi, por sus valiosas sugerencias, observaciones críticas y aportes brindados, los cuales han sido esenciales para enriquecer y mejorar el desarrollo de mi trabajo de investigación.*

*Finalmente, Agradezco a todas esas amistades que estuvieron en todo este proceso motivándome a seguir adelante.*

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ÍNDICE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	viii
RESUMEN.....	9
INTRODUCCIÓN.....	11

### CAPÍTULO I

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación problemática.....	12
1.2. Preguntas de investigación.....	13
1.2.1. Problema general.....	13
1.2.2. Problema específicas.....	13
1.3. Objetivos de investigación.....	14
1.3.1. Objetivo general.....	14
1.3.2. Objetivos específicos.....	14
3.1. Hipótesis de investigación.....	14
3.1.1. Hipótesis general.....	14
3.1.2. Hipótesis específicas.....	14
1.4. Justificación.....	15

### CAPÍTULO II

#### REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes.....	16
2.1.1. A nivel internacional.....	16
2.1.2. A nivel nacional.....	17
2.1.3. A nivel regional.....	19
2.2. Marco teórico.....	20
2.2.1. Aguas residuales.....	20

2.2.2.	Tratamiento de aguas residuales.....	23
2.2.3.	Tipos de tratamiento de agua residual.....	25
2.2.4.	Características del tratamiento de agua residual .....	29
2.2.5.	Indicadores de calidad para Aguas Residuales.....	30
2.2.6.	Tecnología de electrocoagulación.....	33
2.2.7.	Características de la Tecnología de electrocoagulación.....	34
2.2.8.	Dimensiones de la tecnología de electrocoagulación.....	35
2.2.9.	Mecanismos de reacción en el proceso de electrocoagulación .....	36
2.2.10.	Reacciones químicas en el proceso de electrocoagulación .....	38
2.2.11.	Factores que influyen en la eficiencia del proceso de electrocoagulación.....	39
2.2.12.	Ventajas y desventajas del proceso de electrocoagulación .....	41
2.2.13.	Eficiencia de remoción de contaminantes por el proceso de electrocoagulación.....	42
2.2.14.	Energía fotovoltaica .....	44
2.2.15.	Condiciones para la generación de energía eléctrica empleando paneles solares.....	44
2.2.16.	Componentes de los sistemas fotovoltaicos .....	47
2.2.17.	Serie de los sistemas fotovoltaicos .....	48

### **CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1.	Ámbito de estudio.....	51
3.2.	Tipo, diseño y nivel de investigación .....	52
3.2.1.	Tipo.....	52
3.2.2.	Diseño .....	52
3.2.3.	Nivel de investigación.....	52
3.3.	Población y muestra.....	52
3.3.1.	Población.....	52
3.3.2.	Muestra.....	52
3.4.	Equipos y materiales.....	53
3.4.1.	Equipos.....	53
3.4.2.	Reactivos .....	53
3.4.3.	Materiales de laboratorio.....	54
3.4.4.	Otros .....	54

3.5. Métodos .....	54
3.5.1. Determinación de los parámetros de campo que incluyen temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto.....	54
3.5.2. Determinación de concentración de DQO, DBO5, solidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes. ....	56
3.5.3. Electrocoagulación utilizando energía fotovoltaica alimentada por energía fotovoltaica en el tratamiento de agua residual doméstica.....	62

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1 Determinar los parámetros de campo que incluyen temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto.....	67
4.2 Determinación de concentración de DQO, DBO5, solidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes presentes en la muestra de agua residual doméstica del distrito de Chupa. ....	68
4.2 Ensayos de electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica para el tratamiento del agua residual doméstica en el distrito de Chupa, variando el pH, el tiempo y la densidad de corriente. ....	70
4.4 Diseño estadístico de la investigación .....	71
4.5 Análisis estadístico.....	74

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1 conclusiones.....	82
5.2 Recomendaciones .....	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	84
ANEXOS.....	93

## ÍNDICE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Procesos unitarios según la etapa de tratamiento .....	27
<b>Tabla 2</b> Descripción de los mecanismos de reacción en el proceso de EC. ....	37
<b>Tabla 3</b> Reacciones químicas a nivel de electrodos dentro el proceso de EC .....	39
<b>Tabla 4</b> Reacciones químicas a nivel de electrodos dentro el proceso de EC .....	41
<b>Tabla 5</b> Factores a tomar en cuenta .....	63
<b>Tabla 6</b> Matriz del diseño experimental.....	66
<b>Tabla 7</b> Resultados de parámetros de campo del agua residual domestica de Chupa ..	67
<b>Tabla 8</b> Caracterización inicial de parámetros físicos químicos y microbiológicos ....	68
<b>Tabla 9</b> Resultados del proceso de electrocoagulación .....	70
<b>Tabla 10</b> Eficiencia (%) de reducción de materia orgánica medible en DQO.....	72
<b>Tabla 11</b> Coeficientes del modelo de regresión.....	75
<b>Tabla 12</b> Análisis de varianza para el % de eficiencia de reducción de DQO .....	77
<b>Tabla 13</b> Estándares de Límites Máximos Permisibles .....	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Mecanismos de reacción en el proceso de electrocoagulación. ....	38
<b>Figura 2</b> Radiación solar directa y difusa. ....	45
<b>Figura 3</b> Celda, Panel y Arreglo fotovoltaico.....	48
<b>Figura 4</b> Circuito en serie .....	49
<b>Figura 5</b> Circuito en paralelo.....	49
<b>Figura 6</b> Circuito en serie y en paralelo.....	50
<b>Figura 7</b> Mapa de ubicación del área de estudio del distrito de Chupa .....	51
<b>Figura 8</b> Ubicación de punto de muestreo .....	54
<b>Figura 9</b> Flujograma para determinar la concentración de parámetros .....	62
<b>Figura 10</b> Flujograma de electrocoagulación .....	64
<b>Figura 11</b> Relación de los resultados obtenidos de los parámetros con el LMP .....	69
<b>Figura 12</b> Eficiencia de reducción de la materia orgánica (DQO). ....	72
<b>Figura 13</b> Diagrama de Pareto para las variables .....	74
<b>Figura 14</b> Efecto del pH y tiempo para el % eficiencia de reducción de DQO.....	79
<b>Figura 15</b> Efecto de la densidad de corriente y tiempo respecto al porcentaje de remoción de DQO.....	80
<b>Figura 16</b> Efecto del pH y la densidad de corriente respecto al porcentaje de remoción de DQO.....	81

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo I.</b> Análisis de parámetros de campo.....	94
<b>Anexo II.</b> Toma de muestra de agua residual doméstica en el distrito de Chupa.....	94
<b>Anexo III.</b> Proceso de electrocoagulación alimentada con energía fotovoltaica variando factores como el pH, tiempo y densidad de corriente.....	95
<b>Anexo IV.</b> Modificación de pH para luego realizar el proceso de electrocoagulación..	95
<b>Anexo V.</b> Proceso de electrocoagulación en el agua residual domestica.....	96
<b>Anexo VI.</b> Electrocoagulación variando factores como pH, tiempo y densidad de corriente .....	96
<b>Anexo VII.</b> Envío de muestras al laboratorio para su respectivo análisis de parámetros .....	97
<b>Anexo VIII.</b> Análisis de sólidos totales en suspensión posterior al proceso de electrocoagulación .....	97
<b>Anexo IX.</b> Insertado de papel filtro a la mufla.....	98
<b>Anexo X.</b> Solicitud de Acceso al PTARs.....	99
<b>Anexo XI.</b> Hoja de custodia de envío de muestras .....	100
<b>Anexo XII.</b> Informe inicial de análisis de DQO, DBO, aceites y grasas y coliformes termotolerantes .....	103
<b>Anexo XIII.</b> Informe de análisis de los parámetros después de la aplicar el proceso de electrocoagulación .....	106
<b>Anexo XIV.</b> Cálculo de generación de energía por día .....	112
<b>Anexo XV.</b> Estándar de Límites Máximos Permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas o Municipales.....	112
<b>Anexo XVI.</b> Matriz de consistencia.....	113

## RESUMEN

Las aguas residuales domesticas representan un peligro para el medio ambiente y la salud publica debido a su alta concentración de contaminantes. En ese contexto se tiene por objetivo evaluar la eficiencia de la electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica para el tratamiento de agua residual doméstica en el distrito de Chupa. En la etapa inicial se realizó la medición de parámetros in situ y caracterización inicial de parámetros DQO, DBO5, solidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes; en seguida se realizaron las pruebas experimentales de electrocoagulación variando el pH, tiempo y densidad de corriente; para determinar la eficiencia en función al porcentaje de remoción de DQO. Respecto a los resultados muestran que el agua analizada tiene DQO inicial de 643.9 mg/L y DBO5 de 298.3 mg/L, solidos totales en suspensión de 0.0193 mg/L, aceites y grasas de 12.5 mg/L y coliformes termotolerantes de  $3.5 \times 10^{-7}$  NMP/100 mL, de los cuales la DQO, DBO5 y coliformes termotolerantes no se encuentran dentro de los Límites máximos permisibles. tras el tratamiento mediante electrocoagulación empleando electrodos de hierro y aluminio, se alcanzó una reducción de DQO hasta 173.4 mg/L, DBO5 a 87 mg/L y <1.8 NMP/100 mL de coliformes termotolerantes. La eficiencia de remoción de DQO varió entre 42.32 % y 73.07 %, con promedios superiores al 65 %. Las mejores condiciones se lograron con pH 5, 45 minutos de tratamiento y densidades de corriente de 9.8 A/m<sup>2</sup>. Finalmente se concluye que el tratamiento es más eficiente con mayor tiempo, densidad de corriente elevada y pH ácido, logrando reducciones de DQO superiores al 70 % en múltiples ensayos. Por lo que esta tecnología aplicada para el tratamiento de agua residual domestica resulta ser viable, sostenible con el medio ambiente.

**Palabras clave:** Agua residual, DQO, electrocoagulación, tratamiento.

## ABSTRACT

Domestic wastewater poses a threat to the environment and public health due to its high concentration of pollutants. In this context, the objective is to evaluate the efficiency of photovoltaic-powered electrocoagulation for the treatment of domestic wastewater in the district of Chupa. In the initial stage, in situ measurements were taken and an initial characterization of COD, BOD<sub>5</sub>, total suspended solids, oils and fats, and thermotolerant coliforms was performed. Next, experimental electrocoagulation tests were carried out, varying the pH, time, and current density to determine the efficiency in terms of the percentage of COD removal. The results show that the analyzed water has an initial COD of 643.9 mg/L and BOD<sub>5</sub> of 298.3 mg/L, total suspended solids of 0.0193 mg/L, oils and fats of 12.5 mg/L, and thermotolerant coliforms of  $3.5 \times 10^{-7}$  NMP/100 mL, of which COD, BOD<sub>5</sub>, and thermotolerant coliforms are not within the maximum permissible limits. After treatment by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes, a reduction in COD to 173.4 mg/L, BOD<sub>5</sub> to 87 mg/L, and <1.8 NMP/100 mL of thermotolerant coliforms was achieved. The COD removal efficiency varied between 42.32% and 73.07%, with averages above 65%. The best conditions were achieved with a pH of 5, 45 minutes of treatment, and current densities of 9.8 A/m<sup>2</sup>. Finally, it was concluded that the treatment is more efficient with longer treatment times, higher current densities, and acidic pH, achieving COD reductions of over 70% in multiple trials. Therefore, this technology applied to the treatment of domestic wastewater is viable and environmentally sustainable.

**Keywords:** Wastewater, COD, electrocoagulation, treatment.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y las actividades antropogénicas han incrementado la generación de aguas residuales domésticas presentando un reto ambiental, se estima que más del 80 % de las aguas residuales se descargan sin tratamiento adecuado lo que genera impactos negativos en los componentes del medio ambiente y en la salud pública (Bote, 2021). Las aguas residuales presentan un nivel significativo de contaminantes orgánicos, a medida de que aumenta la población, también aumenta la carga de contaminante de estas aguas residuales (Astete et al., 2022). Para frenar esta problemática, se ha hecho énfasis en el desarrollo de tecnologías de tratamiento de agua que sean sostenibles, eficientes y que se puedan integrar en sistemas energéticamente sostenibles (Bardales et al., 2025).

Es una preocupación mundial la contaminación de agua por aguas residuales de origen doméstico. La electrocoagulación es una alternativa eficiente y sostenible basada en procesos electroquímicos, químicos y físicos para disolver iones metálicos catiónicos in situ mediante la oxidación de un ánodo de sacrificio utilizando solo corriente eléctrica (Hussin et al., 2017). La electrocoagulación se ha convertido en una solución alternativa para el tratamiento de aguas residuales debido a su eficacia en la eliminación de sólidos orgánicos suspendidos, turbidez y patógenos. (Ankoliya et al., 2023). Este proceso es conveniente debido a la ausencia de productos químicos para la sedimentación y el grupo de flóculos (Mohamad et al., 2025).

La necesidad del consumo de energía en el planeta está escalando vertiginosamente con el resultado de la industrialización y el crecimiento poblacional, el uso de la energía solar es una alternativa para disminuir y mitigar la crisis energética y a su vez ayuda a cumplir con los objetivos del desarrollo sostenible (Jalca Cabañas et al., 2022). Pocos investigadores han investigado el potencial de la energía solar fotovoltaica para el tratamiento de aguas residuales, estos estudios se centraron en la capacidad de una fuente de energía solar fotovoltaica para eliminar compuestos orgánicos presentes en el agua residual (Hussin et al., 2017). Actualmente la energía solar representa una segunda fuente avanzada en energía renovable de mayor aprovechamiento en el mundo (Velásquez et al., 2018).

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1.Situación problemática

A nivel global, el agua es un recurso esencial para el bienestar humano y la diversidad de ecosistemas de la tierra, las actividades antropogénicas han alterado significativamente la calidad y cantidad de agua (Phu et al., 2025). La contaminación del agua se ha convertido en uno de los principales problemas que afectan tanto a la salud pública como al medio ambiente, debido al crecimiento poblacional y a la ausencia de plantas de tratamiento eficientes para este recurso esencial (González et al., 2020; Ozyonar y Korkmaz, 2022).

El problema de la contaminación del agua en América Latina es notable y significativo debido a que son una de las mayores fuentes de contaminación por su volumen y concentración (Nawarkara y Salkar, 2019), a medida que aumenta la población, también aumenta la carga de contaminante de las aguas residuales en el entorno receptor (Ozyonar y Korkmaz, 2022). El vertido de aguas residuales sin tratar tiene un impacto negativo en la salud, ya que el agua contaminada puede propagar enfermedades infecciosas, como el cólera y la diarrea, contamina las fuentes de agua superficial y subterráneo, generar eutrofización e impacta en la biodiversidad acuática (Alhogbi, 2020).

En el Perú, la contaminación del agua se ha convertido en uno de los problemas ambientales más críticos principalmente derivado de diversas actividades domésticas, agrícolas e industriales (Aguilar, 2018). Estas aguas contienen altos niveles de DQO, DBO, sólidos totales en suspensión, turbidez, aceites y grasas y coliformes termotolerantes lo cual compromete la calidad del agua impidiendo a que sea reutilizada. (Limaymanta, 2023).

La planta de tratamiento de aguas residuales domésticas en el distrito de Chupa, se encuentra inoperativo debido su antigüedad, lo cual limita que puede procesar adecuadamente los efluentes. Actualmente, solo se realiza la separación de material de gran tamaño y seguido a ello es vertida al medio ambiente. Esta situación provoca que, al igual que en otras localidades, las aguas residuales domésticas se viertan sin tratar, contaminando cuerpos de agua y suelos, dañando la flora y fauna, y elevando

significativamente los riesgos para la salud pública. En el año 2023 el Ministerio de Salud reportó 23 casos sobre enfermedades diarreicas agudas y gastrointestinales, teniendo una población de 4975 pobladores en riesgo (Ministerio de Salud, 2023).

Frente a esta situación la electrocoagulación ha ganado gran atención como una técnica prometedora para el tratamiento de aguas residuales con una amplia gama de contaminantes debido a su facilidad de operación, infraestructura de bajo costo y alta eficiencia de eliminación (Phu et al., 2025). estudios recientes indican que la electrocoagulación, pueden reducir los costos operativos hasta en un 70 % en comparación con los sistemas convencionales (González et al., 2020). Este resultado subraya la viabilidad económica de la electrocoagulación, especialmente en zonas con recursos financieros limitados. Además, la implementación de este tipo de tecnologías podría contribuir significativamente a la mejora de la calidad del agua.

## **1.2. Preguntas de investigación**

### **1.2.1. Problema general**

- ¿Cuál es la eficiencia del proceso de electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica en el tratamiento de agua residual domestico en el distrito de Chupa?

### **1.2.2. Problema especificas**

- ¿De qué manera los parámetros de campo como la temperatura, pH, conductividad del agua y oxígeno disuelto influyen en la calidad del agua residual doméstica en el distrito de Chupa?
- ¿Cuál es la concentración inicial de DQO, DBO5, Solidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes en la muestra de agua residual doméstica del distrito de Chupa?
- ¿De qué manera los ensayos de electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica influyen en el tratamiento del agua residual doméstica en el distrito de Chupa, variando el pH, tiempo y la densidad de corriente?

### **1.3. Objetivos de investigación**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar la eficiencia de la electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica para el tratamiento de agua residual doméstica en el distrito de Chupa, Puno.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar los parámetros de campo que incluyen temperatura, pH, conductividad de agua y oxígeno disuelto
- Determinar la concentración inicial de DQO, DBO5, Solidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes en la muestra de agua residual doméstica del distrito de Chupa.
- Realizar ensayos de electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica para el tratamiento del agua residual doméstica en el distrito de Chupa, con variación de pH, el tiempo y la densidad de corriente.

### **3.1.Hipótesis de investigación**

#### **3.1.1. Hipótesis general**

La electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica bajo condiciones óptimos, es probable que se alcance una eficiencia superior al 65 % en reducción de DQO en el agua residual doméstica en el distrito de Chupa

#### **3.1.2. Hipótesis específicas**

- Los parámetros de campo que incluyen temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto influyen en la calidad del agua residual en el distrito de Chupa.
- Las concentraciones de los parámetros DQO, DBO5, solidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes se encontrarán fuera del LMP para efluentes de PTAR

- La tecnología de electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica reduce los parámetros como DQO, DBO5, sólidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes en el agua residual doméstica.

#### **1.4. Justificación**

Desde una perspectiva ambiental, las actividades domésticas generan grandes volúmenes de aguas residuales que contienen una amplia variedad de contaminantes, como materia orgánica, nutrientes, metales pesados y sólidos en suspensión (Apráez y García, 2015). Si estos contaminantes no son tratados adecuadamente, pueden tener efectos devastadores sobre los ecosistemas acuáticos, afectando la calidad del agua, el suelo y el aire. Además, el vertido de aguas residuales sin tratar puede provocar eutrofización en cuerpos de agua adyacentes, lo que resulta en floraciones algales incontroladas que agotan el oxígeno y afectan a las especies acuáticas, alterando así la biodiversidad local (Rodríguez et al., 2021). En este contexto, resulta fundamental analizar los parámetros de las aguas residuales según los Límites Máximos Permisibles establecidos en el D.S. N.º 003-2010 – MINAM.

El distrito de Chupa, el deterioro de la calidad de agua no solo presenta un problema ambiental, sino también una amenaza para el ecosistema y para la salud de la población. El contacto con agua contaminada a nivel de salud pública puede desencadenar enfermedades gastrointestinales, estomacales, cólera, diarrea, y otras infecciones causadas por parásitos (Rodríguez et al., 2021).

La implementación de sistemas de tratamiento de agua residual doméstica está limitada por los costos elevados de inversión, operación y mantenimiento, frente a esto nacen las tecnologías convencionales como la electrocoagulación, es una tecnología sostenible para el tratamiento de aguas residuales ofrece beneficios ambientales y económicos, además de ventajas operativas y a su vez es eficiente en la eliminación de contaminantes (Buslima et al., 2025). Requiere el uso de energía eléctrica para su funcionamiento, en el distrito de Chupa el acceso a la energía eléctrica es costosa y limitada, por ello nace el uso de fuentes sostenibles y eco amigables como la energía fotovoltaica, ya que reduce los costos operativos, mientras que la adopción de tecnologías avanzadas como la electrocoagulación mejora la eficacia del tratamiento del agua (Rodríguez et al., 2021).

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. Antecedentes

##### 2.1.1. A nivel internacional

Abbass et al., (2024), estudiaron el rendimiento del proceso de electrocoagulación para la eliminación de contaminantes orgánicos como DQO y sólidos totales en suspensión en aguas residuales municipales, considerando como variables independientes el tiempo de tratamiento, corriente aplicada y la velocidad de mezcla, emplearon la metodología de superficie respuesta por un diseño box-behnken para modelar y optimizar el proceso de EC. Los resultados mostraron que, bajo condiciones optimizadas de 60 min, 1A de corriente y 50 rpm de velocidad de mezcla se logró una eficiencia máxima de eliminación de DQO del 92.43 %, además una reducción significativa de los sólidos totales en suspensión, alcanzando una concentración de 1299 ppm. Estos resultados evidencian el potencial del proceso de electrocoagulación en la reducción de contaminantes del agua residual.

Macérak et al. (2024), En su trabajo titulado “Electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales municipales: evaluación del impacto del ciclo de vida” con el objetivo de evaluar la eficacia de la electrocoagulación para eliminar parámetros fisicoquímicos y microbiológicos utilizando electrodos de aluminio (Al) y hierro (Fe). Logró las mayores eliminaciones: 47 - 72 % de DQO (mayor DC) y 53 – 78 (menor DC), 69 - 75 % de DBO5 (mayor DC) y 55 – 74 (Menor DC), seguido de la eliminación completa del fósforo total, la turbidez y los parámetros microbianos. Este tratamiento estuvo sujeto a la investigación de la influencia del tiempo de reacción de 10 - 60 min.

Vrsalović et al., (2023), estudiaron las aguas residuales de la planta de tratamiento de Stupe en Split, Croacia con el objetivo se evaluar su composición y determinar parámetros encontrando un pH de 8.18, temperatura de 18°C, conductividad eléctrica de 953  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y DQO de 353,89  $\text{mgO}_2/\text{L}$ , superando los límites establecidos por la normativa Croata. Para mejorar su tratamiento, probaron un método llamado electrocoagulación con zeolita, ajustando factores como pH inicial, tipo de zeolita y el tiempo de tratamiento.

Bote (2021), Evaluó la combinación de electrodos para el tratamiento de aguas residuales domesticas en la remoción de DQO mediante el proceso de electrocoagulación, empleo electrodos de aluminio y hierro, considerando factores como pH (3, 6 y 9), tiempo de reacción (15, 30, 45 Y 60 min) y densidad de corriente (9.23, 20 y 45 A/m<sup>2</sup>). Los resultados muestran la remoción de hasta 87.5 % y 90 % cuando se combinan Al-Al y Fe-Fe. De manera similar se eliminó 87,5 % y 88,89 % de DQO cuando el aluminio y el hierro se combinaron como Al-Fe y Fe-Al respectivamente. Esto indica que la combinación de electrodos influye en la eficiencia de eliminación de DQO.

Nawarkara y Salkar (2019), En su trabajo titulado “Sistema de electrocoagulación con energía solar para el tratamiento de aguas residuales municipales” realizado en India. Con el objetivo fue realizar la investigación de la aplicabilidad de la técnica de electrocoagulación en modo continuo para el tratamiento de aguas residuales municipales mediante el uso de energía solar, estudiaron efectos de los parámetros como la densidad de corriente (8 – 64 A/m<sup>2</sup>) y el tiempo de retención (4 – 24 min), analizando tres parámetros DQO, turbidez, solidos totales en suspensión. Las condiciones óptimas se determinaron en 40 A/m<sup>2</sup> y 20 min, como resultado obtuvieron la remoción de 99.97 % de DQO, 49.78 de solidos totales en suspensión, llegando a concluir que la electrocoagulación alimentada por energía solar es apropiada para tratar aguas residuales municipales.

### **2.1.2. A nivel nacional**

Limaymanta (2023), Se planteo el siguiente objetivo, depurar las aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación, donde evaluó la influencia del tiempo de residencia óptimo, densidad de corriente aplicada, separación de electrodos y el voltaje optimo, donde empleó cátodos de fierro y ánodos de aluminio, realizo 8 pruebas experimentales manteniendo contante las áreas de electrodos, pH. Los resultados mostraron la disminución de DQO de 3000 a 900 mg/L, DBO5 de 1900 a 500 mg/L, pH de 13 a 9.5 y aceites y grasas de 1230 a 150 mg/L.

Ramón (2020), evaluó la eficacia de la electrocoagulación para la eliminación de sólidos suspendidos totales. Se realizó una investigación correlacional aplicada mediante una metodología científica y experimental. Se ajustó la electrocoagulación para modificar la intensidad de la corriente y la duración del tratamiento. Los resultados indicaron que la electrocoagulación eliminó eficazmente los sólidos suspendidos totales, superando el 80 %, con una tasa máxima de eliminación del 89,43 %. Esto indica que la electrocoagulación podría ser un método viable para el tratamiento de aguas residuales.

Pujaico y Acuña (2019), En su investigación titulada “Condiciones óptimas de operación en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales domesticas”, donde se planteó reducir la demanda química de oxígeno (DQO) de las aguas residuales domésticas, para lograr la reducción determinaron las condiciones óptimas de operación en una celda de electrocoagulación variando el pH, densidad de corriente y tiempo de reacción. Como resultado obtuvo un porcentaje de reducción de 63.3 %. Este valor se obtuvo en un medio ácido con valor de 5.60, intensidad de corriente 5.0 amperios y un tiempo de reacción de 42 minutos con la cual cumple con los límites máximos permisibles para los efluentes según el Decreto supremo N° 003 – 2010 – MINAM.

Aguilar (2018), En su investigación determinó la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno mediante el proceso de electrocoagulación, empleando electrodos de aluminio y hierro, los factores que influyeron en el proceso fueron la densidad de corriente, tiempo de tratamiento y pH. Los resultados mostraron 83 y 84 % de DQO con pH de 8,2 y 7, densidad de corriente de 7 A y tiempo de tratamiento de 15 min. Donde se concluye que la densidad de corriente y el tiempo fueron significativos para la variable de respuesta.

Baca (2018), evaluó un método de tratamiento continuo por electrocoagulación en su investigación. En consecuencia, observó disminuciones sustanciales en los indicadores de la variable dependiente que define los efluentes tratados para su reutilización en el riego de áreas verdes. Se logró una reducción del 89.22 % en DBO5, 85.57 % en DQO, 88.23 % en aceites y grasas, 86.83 % en CT y 89.04 % en CE, con un pH de 7.8 y bajo parámetros específicos de caudal, amperios y voltaje, utilizando ánodos y cátodos de aluminio.

### **2.1.3. A nivel regional**

Humpire (2022), evaluó el impacto del pH y el tiempo de tratamiento mediante electrocoagulación en los parámetros físico-químicos del lactosuero residual para cumplir con las normativas nacionales. Se determinaron las condiciones óptimas utilizando un diseño experimental, logrando reducciones significativas en la Demanda Química de Oxígeno y la turbidez. Las condiciones ideales fueron un tiempo de 34 minutos y un pH de 6. El proceso mostró una reducción del 80 % en la DQO y del 91 % en la turbidez, indicando la efectividad de la electrocoagulación en la depuración del lactosuero residual.

Cancapa (2019), en su investigación titulada “Eficiencia de la electrocoagulación en la reducción de materia orgánica presente en las aguas residuales domésticas bajo condiciones altoandinas (Juliaca – Puno)”, evaluó la eficiencia de la electrocoagulación en la reducción de materia orgánica (DQO Y DBO5), para lo cual construyó un reactor de electrocoagulación a escala laboratorio de 12 litros de capacidad, el mejor valor de voltaje con un tiempo de 30 min de tratamiento, siendo el resultado, el valor óptimo de 10V, logrando remover el 52 % de materia orgánica.

## **2.2. Marco teórico**

### **2.2.1. Aguas residuales**

Las aguas residuales son aquellas que han perdido sus propiedades originales como resultado de las actividades humanas. Se caracterizan por ser una mezcla compleja de líquidos, sólidos suspendidos y compuestos químicos que, al ser vertidos al medio ambiente, alteran su calidad física, química y biológica. Este tipo de aguas contiene una variedad de contaminantes, como materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales pesados y productos derivados de la actividad humana (Salazar, 2020). La concentración y naturaleza de los contaminantes dependen principalmente de la fuente y del uso que se haya dado al agua, lo que genera diferentes grados de contaminación que requieren tratamientos específicos (Vázquez, 2020).

De acuerdo con la Organización para la Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2021), las aguas residuales han sufrido cambios en sus características originales debido a actividades antropogénicas, como la actividad industrial, agrícola y doméstica. Estos cambios alteran su calidad y, por tanto, requieren tratamientos previos antes de ser reutilizadas o devueltas al ambiente.

El tratamiento de estas aguas depende del tipo y la concentración de contaminantes presentes, así como del uso final previsto del agua tratada. Por ejemplo, las aguas residuales domésticas (ARD) suelen contener altos niveles de materia orgánica biodegradable, mientras que las aguas residuales industriales (ARI) pueden estar contaminadas con productos químicos tóxicos, metales pesados o aceites. Los sistemas de tratamiento deben ser seleccionados en función de estas características para garantizar la remoción efectiva de los contaminantes y cumplir con las normativas ambientales (Amanca & Ramírez, 2024).

En cuanto a su clasificación, la OEFA (2021), divide las aguas residuales en tres categorías principales: aguas residuales domésticas (ARD), aguas residuales industriales (ARI) y aguas residuales municipales (ARM). Cada una de estas categorías presenta características específicas que requieren tratamientos especializados:

- a) **Aguas residuales industriales (ARI):** Resultantes de procesos industriales, son generalmente más complejas y peligrosas debido a la presencia de productos químicos, metales pesados y compuestos tóxicos. Estas aguas requieren procesos de tratamiento avanzados, como la coagulación-floculación, la adsorción en carbón activado y la ósmosis inversa.
  
- b) **Aguas residuales municipales (ARM):** Generadas por la actividad urbana, contienen una combinación de contaminantes domésticos e industriales, por lo que su tratamiento debe ser un proceso híbrido que integre tecnologías tanto físicas como biológicas (Drouiche et al., 2009).

El tratamiento eficaz de las aguas residuales es crucial para prevenir la contaminación de las masas de agua, salvaguardar los recursos hídricos y proteger la salud pública. La Organización Mundial de la Salud (OMS), afirma que el tratamiento insuficiente de las aguas residuales es responsable del 15 % de las infecciones transmitidas por el agua en los países subdesarrollados, como la diarrea y la fiebre tifoidea, derivadas de la exposición a bacterias peligrosas en agua sin tratar.

Contar con sistemas de tratamiento de aguas residuales eficaces y suficientes es crucial para cumplir con las normas ambientales y reducir los riesgos para la salud y el medio ambiente. La adopción de tecnología sofisticada, como la electrocoagulación y los sistemas fotovoltaicos para alimentar las plantas de tratamiento, constituye una opción sostenible y económicamente viable. La implementación de tecnología de tratamiento de aguas residuales facilita el cumplimiento normativo, a la vez que mejora la calidad de vida, genera empleo local y fomenta economías sostenibles (Paricahua, 2022).

- c) **Aguas residuales domésticas:** Las aguas residuales domésticas, también conocidas como aguas residuales, son los efluentes generados por las actividades residenciales, comerciales y de servicios. Estas aguas provienen de lugares como baños, fregaderos, cocinas y sistemas de drenaje pluvial, y están compuestas por una mezcla de diversos contaminantes, como desechos biológicos, detergentes, grasa, aceite y restos de alimentos (Tapara, 2022).

Estos líquidos están constituidos principalmente por materia orgánica en estado soluble o coloidal y partículas suspendidas, lo que los convierte en una fuente importante de contaminación del agua tanto en regiones urbanas como rurales. Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), las aguas residuales domésticas contribuyen con un 70 % de la carga total de contaminación en cuerpos de agua superficiales, afectando la calidad del agua y el ecosistema acuático.

Además, las aguas residuales domésticas pueden mezclarse con aguas pluviales o con efluentes industriales, lo que incrementa su carga contaminante y puede llevar consigo residuos sólidos de gran tamaño, como animales muertos, basura de las calles o restos de productos químicos (Chakchouk et al., 2017). Esta combinación aumenta la complejidad de su tratamiento, ya que los contaminantes pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos, e incluso contener agentes patógenos que representan un riesgo directo para la salud pública. Debido a su alta carga contaminante, es imperativo que las aguas residuales domésticas pasen por procesos de tratamiento antes de ser vertidas en cuerpos de agua naturales o ser reutilizadas para otros fines.

Los métodos predominantes para el tratamiento de aguas residuales residenciales abarcan la sedimentación, la filtración y los procesos biológicos, incluyendo la digestión anaeróbica y aeróbica. Estos procedimientos facilitan la eliminación de materia orgánica, partículas en suspensión y patógenos, garantizando que el agua tratada cumpla con las normas de calidad ambiental y salud pública (Cuba et al., 2019).

Métodos innovadores, como la electrocoagulación y el uso de energía fotovoltaica para alimentar las plantas de tratamiento, han demostrado su eficacia para mejorar la sostenibilidad del tratamiento de aguas residuales, especialmente en zonas con recursos energéticos limitados. Estas soluciones no solo mitigan el impacto ambiental de las aguas residuales, sino que también impulsan el crecimiento económico (Rani et al., 2020).

### 2.2.2. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales es un proceso esencial para la preservación del medio ambiente y la salud pública, que implica la purificación y descontaminación del agua utilizada en numerosas actividades antes de su reintroducción al medio ambiente o su reutilización. Las aguas residuales pueden albergar numerosos contaminantes, como sustancias orgánicas, productos químicos y microbios patógenos, que podrían representar riesgos significativos si no se tratan adecuadamente (Rani et al., 2020).

El tratamiento de aguas residuales emplea técnicas físicas, químicas y biológicas para disminuir o erradicar la carga contaminante del agua. Las operaciones predominantes abarcan la remoción de sólidos, la descomposición de la materia orgánica y la desinfección para erradicar bacterias peligrosas (Paricahua, 2022). La elección de los métodos de tratamiento depende de criterios como la composición de las aguas residuales, el volumen de tratamiento, la disponibilidad de recursos y la calidad deseada del agua tratada (Rodríguez et al., 2021).

**a) Tratamientos físicos:** Los tratamientos físicos se desarrollaron inicialmente por su simplicidad y eficacia para eliminar partículas en suspensión, los contaminantes predominantes en las aguas residuales urbanas (Mohamad et al., 2021). Estas técnicas no utilizan productos químicos y se basan en principios físicos para eliminar los contaminantes. Los tratamientos físicos típicos incluyen el desbaste, que elimina partículas grandes de residuos; la floculación, que agrega partículas más pequeñas; la sedimentación, que permite la sedimentación de los materiales en suspensión; y la filtración, que captura partículas más finas en medios filtrantes (Paricahua, 2022).

(Ankoliya et al., 2023), indica que los sistemas de sedimentación y filtración pueden eliminar hasta el 80 % de los sólidos en suspensión en aguas residuales durante las fases iniciales de tratamiento, lo que supone una reducción sustancial de la carga contaminante. Estas terapias son cruciales para mejorar la eficacia de los procesos futuros.

- b) Tratamientos químicos:** Los tratamientos químicos emplean reactivos para iniciar procesos químicos que alteran o estabilizan los contaminantes en las aguas residuales, mejorando así su eficiencia de eliminación (Martínez, 2007). Estos procesos facilitan la eliminación de compuestos disueltos y contaminantes que no pueden eliminarse mediante métodos físicos (Mohamad et al., 2021).
- c) Tratamientos biológicos:** El tratamiento biológico es un método muy eficaz y rentable para el tratamiento de aguas residuales, que utiliza microorganismos, principalmente bacterias, para degradar el contenido orgánico del agua (Gómez, 2021). Este proceso puede ocurrir en condiciones aeróbicas, que requieren oxígeno para la descomposición, o en condiciones anaeróbicas, sin oxígeno. El proceso biológico estabiliza las sustancias químicas resultantes, lo que resulta en una reducción sustancial de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), un indicador crítico de la contaminación orgánica del agua.

El tratamiento biológico se emplea con frecuencia en plantas de tratamiento municipales, donde las bacterias aeróbicas pueden reducir hasta en un 95 % la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en aguas residuales. Además, se emplean procesos anaeróbicos en sistemas de tratamiento más pequeños, como sistemas descentralizados o sistemas de digestión de lodos, que facilitan la recuperación de biogás como subproducto, una fuente de energía renovable (Taylor y Cerdón, 2022)

- d) Recuperación y reutilización:** El agua recuperada mediante diversos tratamientos tiene múltiples aplicaciones, dependiendo de la calidad obtenida en el proceso. La ONU en el 2020 afirma que, en numerosas regiones del mundo, el tratamiento de aguas residuales representa no solo una preocupación ambiental, sino también un medio potencial para mejorar la disponibilidad de agua en zonas con escasos recursos hídricos. El agua tratada puede reutilizarse para riego agrícola, aplicaciones industriales o consumo humano, siempre que cumpla con los criterios de calidad requeridos.

Las metodologías tecnológicas que incorporan dimensiones sanitarias, económicas y legales son cruciales para la gestión eficaz y adecuada de las aguas residuales tratadas. La incorporación de tecnología sofisticada, como la electrocoagulación y los sistemas de energía renovable para alimentar las plantas de tratamiento, constituye un enfoque sostenible que reduce los gastos operativos y mejora la eficiencia del proceso (Rafael et al., 2017).

### **2.2.3. Tipos de tratamiento de agua residual**

El tratamiento de aguas residuales se clasifica en tres fases esenciales: tratamiento primario, secundario y terciario. Cada etapa está diseñada para eliminar sistemáticamente las impurezas y mejorar la calidad del agua tratada. La eficacia de cada proceso depende de las características y la concentración de los contaminantes, el volumen de agua a tratar y las tecnologías de tratamiento disponibles (Mohamad et al., 2021).

**a) Tratamiento Primario:** El tratamiento primario busca eliminar las partículas suspendidas y los sedimentos presentes en las aguas residuales. Este proceso utiliza principalmente medios físicos, como la sedimentación, en la que los materiales más grandes se separan del agua por la fuerza gravitacional (Mohamad et al., 2021b). En esta fase, los materiales gruesos, como arena, grasa y partículas orgánicas de mayor tamaño, se eliminan mediante técnicas como la filtración y la decantación.

Un estudio de la EPA de 2021 indica que el tratamiento básico puede eliminar entre el 50 % y el 70 % de las partículas en suspensión en las aguas residuales urbanas, lo que supone una reducción sustancial de la carga contaminante. Esta técnica es inadecuada para eliminar contaminantes disueltos o compuestos orgánicos complejos. Por lo tanto, el tratamiento básico suele complementarse con tratamientos posteriores, incluyendo procedimientos secundarios.

**b) Tratamiento Secundario:** El tratamiento secundario tiene como objetivo eliminar las sustancias orgánicas disueltas y suspendidas que no se extrajeron durante el primer tratamiento. Este procedimiento se ejecuta principalmente mediante métodos biológicos que utilizan microorganismos, como bacterias, para degradar la materia orgánica presente en las aguas residuales (Pariccahua, 2022). Los sistemas biológicos predominantes utilizados en este tratamiento incluyen sistemas de lodos activados, filtros percoladores y reactores biológicos.

Durante este proceso, las bacterias aeróbicas transforman la materia orgánica en dióxido de carbono y agua, mientras que los sólidos biológicos resultantes se eliminan por sedimentación. El tratamiento secundario es esencial, ya que puede reducir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) hasta en un 90 %, mejorando así notablemente la calidad del agua (Taylor y Cordón, 2022). Esta etapa es crucial para garantizar que el agua tratada cumpla con los estándares de calidad para su vertido a cuerpos de agua naturales o, en ciertos casos, para su reutilización.

**c) Tratamiento Terciario:** El tratamiento terciario, o tratamiento avanzado, tiene como objetivo la eliminación de contaminantes específicos que no fueron eliminados durante los tratamientos primario y secundario. Este proceso busca mejorar aún más la calidad del agua tratada para usos específicos, tales como el riego agrícola, la industria o incluso el consumo humano en algunos casos. Los procesos del tratamiento terciario incluyen la eliminación de nutrientes (como nitrógeno y fósforo), la remoción de metales pesados, la desinfección, la filtración avanzada, y la eliminación de compuestos químicos y microorganismos patógenos (Rodríguez et al., 2021).

Uno de los tratamientos terciarios más comunes es la filtración a través de carbón activado, que puede eliminar hasta el 95 % de los compuestos orgánicos disueltos y toxinas presentes en las aguas residuales. Además, tecnologías como la electrocoagulación y la osmosis inversa se utilizan para tratar aguas residuales industriales que contienen concentraciones más altas de contaminantes difíciles de remover con tratamientos convencionales (Arango, 2005).

**Tabla 1***Procesos unitarios según la etapa de tratamiento*

<b>Tratamiento</b>	<b>Operaciones unitarias</b>
Preliminares	Dilaceración, desbaste, filtración, flotación, remoción por gravedad, tanque Imhoff, filtración por membrana, remoción de grasas y aceites, tamizado grueso y fino y micro tamizado.
Primarios	Tamizado, sedimentación primaria
Secundarios	Lodos activados, reactores de lecho fijo, sistemas de lagunaje, sedimentación secundaria, deshidratación.
Terciarios	Coagulación química, floculación, sedimentación seguida de filtración y carbón activado. Intercambio iónico, osmosis inversa, electrocoagulación.

*Fuente:* (Osorio, 2021).

- d) Tratamientos Avanzados:** Los tratamientos avanzados son una categoría de procesos utilizados para mejorar la calidad del agua residual, aplicados especialmente cuando los tratamientos convencionales no son suficientes para eliminar contaminantes específicos. Estos procesos son fundamentales cuando se requiere alcanzar un nivel de pureza más elevado en el agua, ya sea para su reutilización o para su vertido en cuerpos de agua sensibles. La selección de un tratamiento avanzado depende de las características particulares de las aguas residuales y de los tipos de contaminantes presentes, como metales pesados, nutrientes (nitrógeno y fósforo), compuestos orgánicos recalcitrantes, patógenos, entre otros

En términos generales, los tratamientos avanzados pueden eliminar hasta un 99 % de contaminantes específicos, como el fósforo y el nitrógeno, los cuales son responsables de la eutrofización en cuerpos de agua. Métodos como la adsorción con carbón activado, ósmosis inversa y electrocoagulación son comúnmente utilizados en este tipo de tratamiento, dependiendo de la

naturaleza del agua residual y los contaminantes. Estos procesos mejoran significativamente la calidad del agua al reducir los niveles de contaminantes.

- e) **Tratamientos Naturales:** Los tratamientos naturales son aquellos que aprovechan procesos físicos y biológicos que ocurren de manera espontánea en el ambiente para tratar las aguas residuales. Estos métodos son menos intensivos en energía y recursos, y se basan principalmente en la acción de microorganismos, plantas y otros organismos naturales para descomponer la materia orgánica y otros contaminantes presentes en el agua residual (Rodríguez et al., 2021).

Uno de los enfoques más comunes es el uso de humedales construidos, que emplean plantas acuáticas, como la cattail (*Typha spp.*) y la juncia (*Schoenoplectus spp.*), para filtrar y absorber contaminantes, reduciendo los niveles de materia orgánica y nutrientes. Además, estos sistemas proporcionan hábitats para la biodiversidad local, contribuyendo a la restauración ecológica. Según un estudio realizado en la región del Caribe, los humedales construidos pueden eliminar hasta un 70 % de la materia orgánica en aguas residuales, y un 50% de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo (Salazar, 2020).

Aunque los tratamientos naturales son efectivos en determinadas circunstancias, su uso está limitado en áreas urbanas o en situaciones donde las cargas contaminantes son elevadas y los volúmenes de agua son grandes. Sin embargo, son muy beneficiosos en zonas rurales o pequeñas comunidades, donde el acceso a tecnologías avanzadas de tratamiento puede ser limitado.

- f) **Tratamiento de Lodos:** El tratamiento de lodos es una etapa crítica en el manejo de aguas residuales, que se centra en la gestión y el tratamiento de los sólidos y lodos generados durante las fases de tratamiento de aguas residuales. Los lodos son los subproductos sólidos que contienen materia orgánica, nutrientes, metales pesados y patógenos que, si no se tratan adecuadamente, pueden representar un riesgo para la salud humana y el medio ambiente (Ocampo et al., 2018).

El tratamiento de lodos abarca múltiples procedimientos, como la deshidratación, la estabilización biológica y la incineración. Un método común es la digestión anaeróbica, en la que las bacterias descomponen los lodos en un ambiente sin oxígeno, produciendo biogás como subproducto. Este biogás puede facilitar la producción de energía, lo que convierte el tratamiento de lodos en una alternativa más sostenible (Vásquez, 2020).

Una evaluación de la Organización Mundial de la Salud (OMS) indica que un tratamiento eficaz de lodos puede eliminar entre el 50 % y el 90 % de los patógenos presentes en ellos, a la vez que reduce sustancialmente su volumen, facilitando así su posterior eliminación o utilización como fertilizante agrícola. Por cada 1000 metros cúbicos de agua tratada, se pueden producir entre 20 y 30 metros cúbicos de lodos.

#### **2.2.4. Características del tratamiento de agua residual**

- a) **Composición del agua residual:** La composición de las aguas residuales depende de su fuente y puede abarcar una variedad de contaminantes, incluidos restos orgánicos, nutrientes, metales pesados, compuestos químicos y microbios patógenos, entre otros (Osorio, 2021).
- b) **Variabilidad del caudal y carga contaminante:** El caudal y la carga contaminante en las aguas residuales pueden sufrir fluctuaciones sustanciales a lo largo del tiempo debido a influencias estacionales, climáticas, industriales y residenciales, lo que requiere sistemas de tratamiento adaptables que puedan responder a estos cambios (Mohamad et al., 2021).
- c) **Objetivos de tratamiento:** Los objetivos del tratamiento de aguas residuales dependen del destino final del agua tratada, que puede implicar su descarga regulada en cuerpos de agua superficiales, su reutilización para usos no potables como el riego agrícola o la refrigeración industrial, o su procesamiento para cumplir con estándares de calidad particulares para aplicaciones más estrictas (Jiménez et al., 2024).

- d) **Requerimientos regulatorios:** El tratamiento de aguas residuales debe cumplir con la legislación y las normas locales, regionales y nacionales que definen los criterios de calidad del agua, las limitaciones de descarga y las obligaciones de monitoreo para salvaguardar la salud humana y el medio ambiente (Jiménez et al., 2024).
- e) **Tecnologías de tratamiento disponibles:** Abarcan una amplia gama de métodos de tratamiento de aguas residuales, incluidos procesos físicos, químicos y biológicos, cada uno con distintas ventajas, límites y costos relacionados (Cuba, 2023).
- f) **Costos y recursos requeridos:** El tratamiento de aguas residuales requiere inversiones sustanciales en infraestructura, equipos, operaciones, mantenimiento y energía, lo que exige una planificación económica y de recursos a largo plazo (Luicho, 2023).
- g) **Impacto ambiental:** El impacto ambiental del tratamiento de aguas residuales abarca tanto efectos beneficiosos como perjudiciales, como la mitigación de la contaminación en los cuerpos de agua receptores, la liberación de gases de efecto invernadero durante los procesos de tratamiento y la producción de subproductos o residuos sólidos (Muñoz et al., 2022).
- h) **Sostenibilidad y resiliencia:** Implementar estrategias sostenibles y resilientes en el tratamiento de aguas residuales es esencial para la protección del medio ambiente y el acceso a agua potable. Esto requiere mejorar la eficiencia energética, reducir los residuos y adaptarse al cambio climático mediante la integración de nuevas tecnologías y metodologías circulares para establecer sistemas más eficientes con un menor impacto ambiental (Banco Mundial, 2023).

### 2.2.5. Indicadores de calidad para Aguas Residuales

La evaluación de la calidad de los efluentes derivados de aguas residuales, tanto en la entrada como en la salida, es un aspecto crucial de las operaciones de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). La legislación vigente, definida por el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM, establece Límites

Máximos Permisibles (LMP) para diversos criterios de calidad del agua. Estas restricciones son cruciales para garantizar la eficacia del proceso de tratamiento y asegurar que el agua tratada no ponga en peligro el medio ambiente ni la salud pública. Por consiguiente, la vigilancia de estos indicadores debe cumplir con los requisitos ambientales y de salud, garantizando que el tratamiento de aguas residuales cumpla con los criterios de calidad especificados.

Se deben evaluar numerosos criterios en las aguas residuales, tanto en su estado básico como después del tratamiento. Estos indicadores proporcionan información esencial sobre la eficacia del método de tratamiento y sus implicaciones ecológicas. Algunos indicadores importantes a considerar son:

- a) **Aceites y Grasas:** La proporción de aceites y grasas en las aguas residuales constituye un indicador significativo de contaminación industrial o doméstica, especialmente en zonas urbanas e industriales. El límite máximo permisible para este parámetro suele establecerse en aproximadamente 10-20 mg/L, ya que concentraciones elevadas pueden reducir la eficacia operativa de las instalaciones de tratamiento y afectar negativamente a los sistemas de tratamiento de indicadores biológicos (Ticona y Ccasani, 2024).
- b) **Coliformes Termotolerantes:** La cantidad de coliformes termotolerantes, cuantificada en unidades de número más probable (NMP/100 mL), es una métrica crucial para evaluar la calidad microbiológica del agua. Este indicador evalúa la posible contaminación fecal, ya que los coliformes termotolerantes sirven como organismos indicadores de la presencia de patógenos que pueden amenazar la salud humana. El umbral permisible para este indicador debe ser inferior a 1000 NMP/100 mL en efluentes tratados.
- c) **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5):** La DBO5, cuantificada en mg/L, es una métrica común para evaluar el grado de contaminación orgánica en aguas residuales. Esta métrica cuantifica la demanda de oxígeno necesaria para que los microorganismos metabolicen la materia orgánica del agua. Los niveles máximos permisibles de DBO en efluentes tratados no suelen superar los 30 mg/L, aunque los umbrales específicos pueden variar según factores regionales o leyes municipales (EPA, 2021).

- d) Demanda Química de Oxígeno (DQO):** De forma análoga a la DBO5, la DQO cuantifica la concentración agregada de contaminantes orgánicos e inorgánicos en el agua mediante una reacción química con un agente oxidante. Es un parámetro más amplio y se cuantifica en mg/L. Los límites de DQO para efluentes tratados suelen establecerse entre 50 y 150 mg/L, según la normativa local (Navas et al., 2024).
- e) pH:** El pH cuantifica la acidez o alcalinidad del agua. Un pH inadecuado (superior al rango de 6,5 a 9,0) puede afectar negativamente la eficacia de los métodos de tratamiento y representar riesgos para los ecosistemas acuáticos. La supervisión continua de este parámetro es crucial para garantizar que el tratamiento no afecte negativamente a las condiciones del agua (Humpire, 2022).
- f) Sólidos Totales Suspendidos (STS):** Los sólidos suspendidos son partículas que permanecen dispersas en el agua y, si no se eliminan adecuadamente, pueden afectar negativamente la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos. Las concentraciones de SST se cuantifican en mg/L, con umbrales regulatorios para efluentes tratados que generalmente oscilan entre 30 y 50 mg/L (Humpire, 2022).
- g) Turbidez:** La turbidez es una evaluación de la claridad del agua, asociada a la presencia de partículas en suspensión que pueden interrumpir los procedimientos de desinfección. Se cuantifica en unidades nefelométricas de turbidez (UNT), con niveles máximos permisibles típicamente inferiores a 5 UNT para efluentes tratados (Muñoz et al., 2022).
- h) Temperatura:** La temperatura del agua afecta los procesos de tratamiento biológico. Las temperaturas elevadas pueden aumentar la actividad microbiana, aunque también pueden influir en la solubilidad de los gases y el equilibrio químico. El límite máximo de temperatura para los efluentes tratados es generalmente de 30 °C, según lo estipula la legislación ambiental.

### **2.2.6. Tecnología de electrocoagulación**

La electrocoagulación es un método de tratamiento de aguas residuales que emplea corriente eléctrica para eliminar contaminantes como sólidos suspendidos, metales pesados y compuestos orgánicos (Rani et al., 2020). Este proceso aplica un campo eléctrico para coagular y flocular partículas suspendidas en el agua, formando flóculos más grandes que se eliminan fácilmente por sedimentación o filtración, siendo eficaz para eliminar contaminantes finos y coloidales en el tratamiento de aguas residuales (Pujaico & Acuña, 2019). Se emplean electrodos de aluminio o hierro que generan reacciones electroquímicas produciendo iones metálicos y alteran el pH, neutralizando las cargas de las partículas y formando flóculos insolubles (Alhogbi, 2020). Estos flóculos se aglutinan con las partículas suspendidas y se eliminan por sedimentación o filtración. La tecnología es eficaz, consume pocos productos químicos y es fácil de operar (Arango, 2012).

Además, es una de las tecnologías utilizadas para tratar y recuperar efluentes y aguas contaminadas, ya sea por causas antropogénicas o naturales. Se trata de un método sencillo y eficaz que emplea energía eléctrica y coagulación (Gonzales, 2024). Es un proceso electroquímico que utiliza corriente eléctrica para eliminar agentes contaminantes en el agua (Ramón, 2020). El tratamiento electroquímico de contaminantes en el agua se puede aplicar de diversas maneras, como mediante reacciones directas de óxido-reducción con reactivos químicos o liberando sustancias químicas que inducen un proceso físico de eliminación de los contaminantes (Luicho, 2023). La electrodisolución de los ánodos de sacrificio y la generación de productos de hidroxiquetales como coagulantes, junto con la producción de hidrógeno en el cátodo, facilitan la eliminación y separación de contaminantes por flotación (Muñoz et al., 2022).

Este sistema ofrece varias ventajas sobre procesos alternativos, aunque también presenta desventajas típicas de cualquier tecnología. Sin embargo, la falta de modelos sistemáticos impide su consideración como una solución definitiva para aguas residuales, y se requiere inversión para hacer viables los proyectos y prototipos (Santiago, 2020).

### 2.2.7. Características de la Tecnología de electrocoagulación

- a) **Versatilidad:** La electrocoagulación puede tratar una amplia variedad de contaminantes en el agua, como sólidos suspendidos, metales pesados, aceites y grasas, compuestos orgánicos e inorgánicos, colorantes y otros elementos contaminantes (Drouiche et al., 2009).
- b) **Eficiencia de eliminación:** Esta tecnología es altamente efectiva en la eliminación de contaminantes. La coagulación y floculación inducidas por la corriente eléctrica permiten la formación de flóculos que atrapan y aglutinan los contaminantes (Ibrahimi, 2025).
- c) **Bajo consumo de productos químicos:** En contraste con otros procedimientos de tratamiento que necesitan el empleo de sustancias químicas, la electrocoagulación se basa principalmente en la energía para producir los coagulantes requeridos, lo que conduce a un consumo reducido de estos productos químicos (Ayunque y Carhuapoma, 2021).
- d) **Facilidad de operación y mantenimiento:** Los sistemas de electrocoagulación suelen ser relativamente simples en su diseño y operación. Requieren menos equipos y son más fáciles de mantener (Cuba, 2023).
- e) **Flexibilidad en la escala de aplicación:** La tecnología de electrocoagulación puede ser aplicada en una variedad de escalas, desde sistemas pequeños y portátiles hasta instalaciones industriales de mayor capacidad. Esto la hace adecuada para el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales (Oviedo et al., 2023).
- f) **Compatibilidad con otras tecnologías:** La electrocoagulación puede ser combinada con otros procesos de tratamiento, como la filtración, la adsorción, la oxidación avanzada, entre otros, para mejorar aún más la eficacia del tratamiento y abordar una variedad más amplia de contaminantes (Forero, 2020).
- g) **Reducción de residuos:** Algunos sistemas de electrocoagulación pueden generar residuos sólidos que son más fáciles de manejar y desechar en comparación con los lodos generados por otros métodos de tratamiento de aguas residuales (Rani et al., 2020).

### 2.2.8. Dimensiones de la tecnología de electrocoagulación

- a) **Ensayos de electrocoagulación:** Los ensayos de electrocoagulación son pruebas experimentales para evaluar la eficacia y la viabilidad de la tecnología de electrocoagulación en el tratamiento de aguas contaminadas. Realizables a nivel de laboratorio, piloto o a escala completa, dependiendo de los objetivos del estudio (Ramón, 2020).
- b) **Diseño experimental:** Los ensayos de electrocoagulación son diseñados cuidadosamente para abordar los objetivos específicos, incluyendo la selección de contaminante a tratar, parámetros operativos y la elección del tipo de electrodos a utilizar (Rani et al., 2020).
- c) **Selección de la muestra:** Se recolecta una muestra representativa del agua a tratar, la cual puede ser agua residual industrial, agua subterránea contaminada, agua de proceso, entre otros. Es importante caracterizar adecuadamente la muestra para identificar los contaminantes presentes (Humpire, 2022).
- d) **Configuración del sistema:** Se instala un sistema de electrocoagulación que puede consistir en electrodos metálicos sumergidos en la muestra de agua, una fuente de alimentación eléctrica para generar la corriente necesaria, y dispositivos de control y monitoreo para ajustar los parámetros del proceso y registrar los datos relevantes (Carolina et al., 2022).
- e) **Desarrollo del ensayo:** Se lleva a cabo, aplicando corriente eléctrica a los electrodos y monitoreando los cambios en la calidad del agua a lo largo del tiempo. Se registran datos como la concentración de contaminantes antes y después del tratamiento, la eficiencia de remoción y el consumo de energía (Alhogbi, 2020).
- f) **Evaluación de resultados:** Se analizan los datos obtenidos durante el ensayo para evaluar la eficacia del proceso de electrocoagulación en la eliminación de contaminantes (Rafael et al., 2017).

- g) **Optimización del proceso:** En función de los resultados obtenidos, se pueden realizar ajustes en los parámetros operativos del proceso para optimizar su eficiencia y reducir los costos operativos (Rafael et al., 2017).
- h) **pH:** El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución acuosa. Se expresa en una escala numérica que va de 0 a 14, donde 7 es considerado neutro. Un pH por debajo de 7 indica que la solución es ácida, mientras que un pH por encima de 7 indica que la solución es alcalina o básica (Rafael et al., 2017).
- i) **Tiempo:** El tiempo es una medida relativa que se utiliza para cuantificar la duración o el intervalo entre dos eventos, momentos o puntos en el tiempo (Rafael et al., 2017).
- j) **Densidad de corriente:** Es un indicador del volumen de corriente eléctrica que fluye a través de un área específica de un conductor o electrodo en un circuito eléctrico. Normalmente se manifiesta en amperios por metro cuadrado ( $A/m^2$ ) o en unidades de corriente por unidad de superficie superficial (Ccarhuarupay y Nina, 2022).

### 2.2.9. Mecanismos de reacción en el proceso de electrocoagulación

El principio básico de la electrocoagulación (EC) proviene de la “electrólisis”. La electrólisis se basa en separar sustancias mediante el uso de electricidad. Michael Faraday formuló por primera vez el principio de la electrólisis en 1820 (Chen et al., 2020), En ese sentido, el proceso consta de una corriente continua que fluye a través de un electrolito, dando lugar a reacciones químicas en los electrodos y al sistema en general (Gonzales, 2024).

**Tabla 2***Descripción de los mecanismos de reacción en el proceso de EC.*

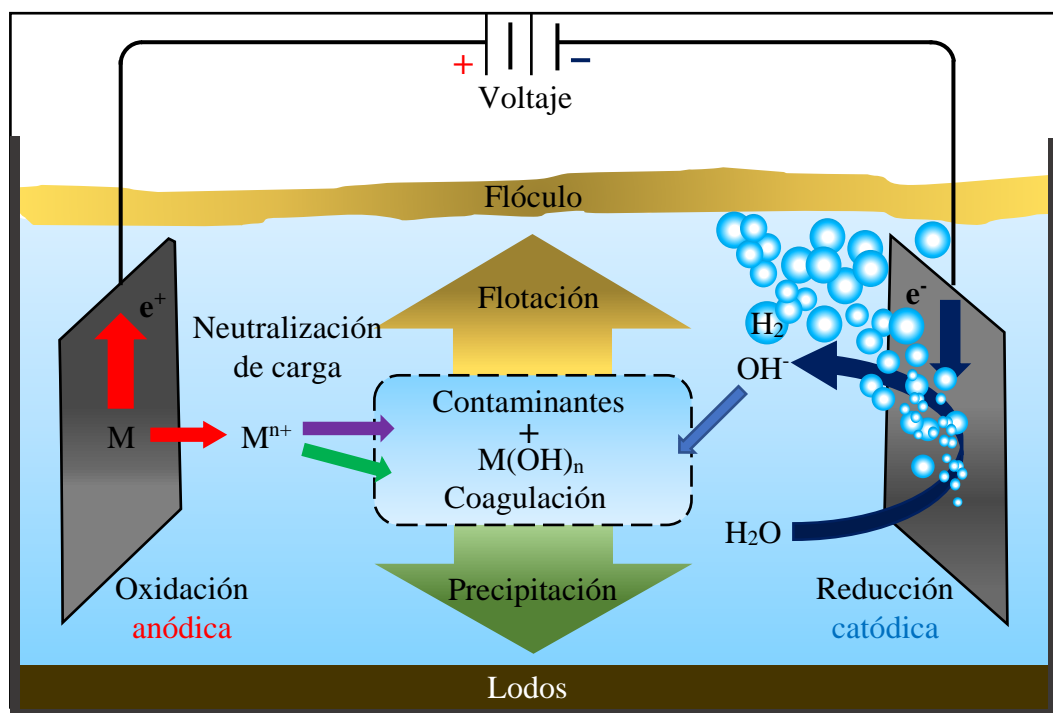
<b>Mecanismos de reacción</b>	<b>Etapas</b>	<b>Descripción</b>
Electrooxidación	Generación electroquímica de coagulantes y OH	Se produce la oxidación del ánodo metálico, dando lugar a la formación de cationes metálicos, y simultáneamente, se oxida el agua para generar oxígeno gaseoso (O <sub>2</sub> ) en la solución de electrolitos. En el cátodo, el agua experimenta una reducción que resulta en la producción de gas hidrógeno (H <sub>2</sub> ) y aniones hidroxilo.
Electrocoagulación	Generación y transferencia de masa de los flóculos	Los cationes metálicos liberados en las reacciones anódicas reaccionan con las especies de hidroxilo generadas en el cátodo, formando hidróxidos metálicos. Este proceso conduce a la coagulación. Posteriormente, como resultado se forma una capa de lodo precipitado que captura y envuelve las partículas disueltas o suspendidas.
Secundarios	Eliminación de contaminantes mediante adsorción de flóculos	Las pequeñas burbujas de H <sub>2</sub> generadas por el cátodo se adhieren a la superficie de los flóculos y contaminantes electrogenerados, provocándolos así a ascender a la superficie del agua residual, donde finalmente son removidos. Los mecanismos de eliminación varían según el tipo de contaminante presente

*Fuente:* (Montes, 2023)

Es importante destacar que existe una variedad de perspectivas en la literatura respecto a los mecanismos de reacción fundamentales. Por lo tanto, se requiere un enfoque estructurado para comprender la electrocoagulación y sus parámetros de control relacionados con el rendimiento del procedimiento. Esto permitirá un pronóstico a priori del tratamiento aplicado a los tipos de contaminantes que se pretenden eliminar (Mukesh et al., 2023).

**Figura 1**

*Mecanismos de reacción en el proceso de electrocoagulación.*



*Fuente:* (Montes, 2023)

### 2.2.10. Reacciones químicas en el proceso de electrocoagulación

Los procesos químicos principales incluyen la disolución de cationes metálicos en el ánodo, junto con la generación de iones hidroxilo y gas hidrógeno en el cátodo (Gonzales, 2024). Los iones liberados contribuyen a contrarrestar las cargas de las partículas, desencadenando el proceso de coagulación y supresión de contaminantes, ya sea mediante la precipitación o la fusi3n de materiales coloidales por flotabilidad (Mukesh et al., 2023).

**Tabla 3***Reacciones químicas a nivel de electrodos dentro el proceso de EC*

Nivel	Reacciones químicas
Ánodo	$M_{(s)} \rightarrow M_{(aq)}^{n+} + ne^{-}$ $2 H_2O_{(l)} \rightarrow 4H^{+}_{(aq)} + O_{2(g)} + 4e^{-}$
Cátodo	$M_{(aq)}^{n+} + ne^{-} \rightarrow M_{(s)}$ $2H_2O_{(l)} + 2e^{-} \rightarrow H_2 + 2OH^{-}_{(aq)}$

*Fuente: (Montes, 2023)*

Donde M, es un metal ya sea hierro o aluminio en estado sólido o en solución acuosa, donde las interacciones en los electrodos de hierro ( $Fe^{+2}$ ) y de aluminio ( $Al^{+3}$ ) generan y emiten iones positivos ( $e^{+}$ ) y también negativos ( $e^{-}$ ). Mientras que en el ánodo libera los iones metálicos y se descompone con el tiempo, el cátodo no se desintegra y se mantiene intacto ( Ezechi et al., 2020). Los iones metálicos formarán hidróxidos metálicos durante las reacciones electroquímicas (Velásquez, 2021). Estos hidróxidos metálicos serán los agentes coagulantes con alta afinidad por los contaminantes que posteriormente terminarán siendo removidos (Tahreen et al., 2020).

### 2.2.11. Factores que influyen en la eficiencia del proceso de electrocoagulación

- a) **Efecto del tipo de electrodo:** La elección del material del electrodo es uno de los pasos principales para obtener la eficiencia del proceso electrocoagulación (Sakti et al., 2024). El hierro y el aluminio son los más usados debido a su fácil disponibilidad, bajo precio monetario y mejor disolución. Se prefiere el Fe porque es relativamente más barato. Sin embargo, se ha identificado que los electrodos de aluminio muestran una mayor eficiencia en comparación con los electrodos de hierro en la reducción de la concentración de aceite y grasas (Boinpally et al., 2023).
- b) **Efecto de la disposición de los electrodos:** La ubicación de los electrodos no es un aspecto menos importante en la eficacia del tratamiento. Los sistemas de electrocoagulación suelen tener electrodos en forma de placas de metal y el agua se desplaza por el espacio entre estas placas, adoptando una dirección

vertical o horizontal (Rodríguez, et al., 2021). Cabe señalar que los electrodos pueden ser de tipo monopolar o bipolar (Contreras, 2021).

- c) **Efecto del pH:** El pH de la solución es otro factor que juega un papel vital en los procesos electroquímicos (Rodríguez, et al., 2021). El pH inicial es un factor fundamental al elegir entre la coagulación química o la electrocoagulación (EC) para el tratamiento del agua. (Farat & Zahraa, 2023). Tiene un efecto sobre la conductividad eléctrica de la solución, la disolución de los electrodos, la formación de los hidróxidos y la potencial zeta de las partículas coloidales (Salgot & Folch, 2018).
  
- d) **Efecto de la densidad de corriente:** La densidad de corriente es el parámetro operativo clave, que afecta no solo el tiempo de respuesta del sistema, sino que también influye en el modo de reducción de contaminantes. En el proceso de electrocoagulación, el espacio entre electrodos es fijo y la corriente variable (Sakti et al., 2024). Debido a que este factor está ligado a asuntos económicos, es relevante profundizar sobre su influencia en la eficiencia a escala real (Palomino & Ramos, 2021).
  
- e) **Efecto del tiempo de reacción:** El tiempo de reacción está relacionado directamente con el incremento de la concentración de partículas, ya que este proceso facilita la unión y asentamiento de los sólidos. Es decir, se forman más burbujas que, al elevarse, arrastran las partículas de residuos hacia la superficie en una capa espumosa, lo cual estimula el desarrollo de los grumos y la sedimentación. Un ligero ajuste en el tiempo tiene un gran impacto en la cantidad de sólidos producidos (Intriago & Vergara, 2024).
  
- f) **Efecto de la temperatura:** El aumento de la temperatura promueve la movilidad molecular, lo que resulta en mayor colisión de partículas, formación de flóculos y eliminación de los contaminantes. Se investigó el efecto de la temperatura en el tratamiento electroquímico del agua de sentina. Se descubrió que el transporte de masa aumentaba con la temperatura de reacción, lo que en consecuencia mejoraba la eliminación de la Demanda Química de Oxígeno (Gonzales, 2024).

**g) Efecto de la conductividad eléctrica:** Un incremento en la capacidad de conducción de energía eléctrica conlleva a un aumento en la intensidad de corriente. Si se conserva el voltaje suministrado a la celda de electrocoagulación y, además, se eleva la capacidad de conducción, manteniendo constante la intensidad de corriente constante, se produce una disminución en la fuerza eléctrica aplicada (Palomino & Ramos, 2021).

### 2.2.12. Ventajas y desventajas del proceso de electrocoagulación

**Tabla 4**

*Reacciones químicas a nivel de electrodos dentro el proceso de EC*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Necesidad reducida de reactivos químicos.	Necesidad de mantenimiento.
Costo operativo reducido ligado al consumo de reactivos químicos.	La capa de óxido en el ánodo podría reducir la eficiencia del proceso al obstaculizar el flujo de corriente eléctrica.
Lodos resultantes en menor cantidad y más compactos.	Necesidad de reemplazo de electrodos.
Menor impacto ambiental debido la cantidad generada de lodos	Necesidad de agua con alta conductividad.
Alta eficiencia en reducción de elementos polucionantes	Podría representar un alto costo de operación, dependiendo del precio de la energía eléctrica de la zona.
Los elementos perjudiciales son transportados por los gases hacia la parte superior.	Los lodos generados podrían contener altas concentraciones de metales.
Bajo requerimiento de energía eléctrica.	Falta de diseño sistemático del reactor.

*Fuente:* (Montes, 2023)

### **2.2.13. Eficiencia de remoción de contaminantes por el proceso de electrocoagulación**

La eficiencia de la electrocoagulación permite que existan diferentes usos y aplicaciones para la recuperación, remoción y reutilización de diversas aguas residuales y aguas contaminadas (Herrera y Vera, 2020). La medición de la eficiencia de este proceso inicia con el ideal de optimizar la eliminación de la turbidez en las aguas residuales (Montes, 2023), seguidamente se amplió con la eliminación de aceites y grasas de los efluentes (Montes, 2023) y la disminución de la concentración de carga orgánica, de esta manera es como se comienza con la medición de su eficacia (Shanker et al., 2022). Luego paso a optimizarse y remover residuos de petróleo, químicos residuales de textilería (Chen et al., 2020). En la actualidad se tratan aguas con pH básicos o ácidos, aguas con concentraciones de metales y demás contaminantes (Shanker et al., 2022).

**a) Eficiencia influenciada por variaciones de pH:** EL pH es un factor que puede afectar el rendimiento de la electrocoagulación (Intriago & Vergara, 2024), no obstante, los diversos estudios también muestran que la electrocoagulación puede neutralizar el pH de las aguas residuales, por consiguiente, se puede obtener un resultado favorable en la neutralización de las aguas residuales con pH que superen los rangos admisibles. (Rodriguez et al., 2021). La eficiencia en cuanto a la eliminación de aceites y grasas, DBO5 y DQO, en función del influente pH. Se ha encontrado que un pH inferior a 6 o superior a 8 reduce significativamente la eficiencia de remoción de contaminantes y otros parámetros fisicoquímicos del agua, disminuyéndola entre un 10 % y un 20 % (Oviedo et al., 2023).

**b) Eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos:** La sílice, la arcilla, el carbón y otros materiales suspendidos en el agua pueden ser removidos hasta en un 98 % a un pH de 7-7.5, y en un 96.59 % a un pH de 6.06 (Chen et al., 2020).

- c) **Eficiencia en la remoción de DBO5 y DQO:** El porcentaje de eficiencia en la remoción del DBO5 y de DQO se puede alcanzar hasta 92 % en aguas residual bajo condiciones óptimas de pH, tiempo y corriente eléctrica adecuada (Moreno, 2018), sin embargo, se han reportado as casos que reportan un grado de remoción entre 76 % y 86 % (Huaman, 2024).
- d) **Eficiencia en aceites y grasas:** La eficiencia de remoción en la concentración de aceite y grasa en aguas residuales puede llegar hasta un 94 % (Rodriguez et al., 2021). Se ha calculado que generalmente esa eficiencia fluctúa en un rango de 95 y 99 % donde han sido aplicadas a industrias alimentarias especialmente (Oviedo et al., 2023).
- e) **Eficiencia en los metales:** La electroflotación y la electrocoagulación en conjunto son una alternativa muy eficiente y poderosa para la eliminación del cromo de las aguas residuales industriales (Palomino & Ramos, 2021). Este es altamente efectivo para descontaminar las aguas de metales solubles por descargas industriales y por otras cargas de más contaminantes. Por ejemplo, el cromo (+6) en el agua es un alto contaminante, el cual es utilizado en industrias de producción de Cr + 6, en la metalúrgica, curtiembres y la industria agrícola (fertilizante y pesticida). Debido al grado de toxicidad es que el cromo necesita métodos altamente regulados para su remoción, que pueden ser por degradación biológica, también por adsorción, e inclusive por precipitación química, siendo estos los más conocidos (Rodriguez et al., 2021). Bajo condiciones óptimas como un pH de 7 se pueden alcanzar valores máximos de remoción de cobre hasta un 80 %. En cuando a otros metales pesados como arsénico, cadmio, cromo, níquel y zinc también pueden ser removidos hasta un entre 95 y 99 % (Oviedo, et al., 2023).

#### 2.2.14. Energía fotovoltaica

La energía fotovoltaica se refiere a la conversión directa de la energía lumínica del sol en electricidad mediante el uso de células fotovoltaicas (García et al., 2022). La energía fotovoltaica es una forma sostenible y renovable de generar electricidad, ya que aprovecha una fuente inagotable de energía: el sol ((Mohamad et al., 2021). Es una tecnología limpia que no produce emisiones de gases de efecto invernadero, ni contaminantes atmosféricos durante su funcionamiento, lo que la convierte en una importante alternativa para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el cambio climático (García et al., 2022).

#### 2.2.15. Condiciones para la generación de energía eléctrica empleando paneles solares

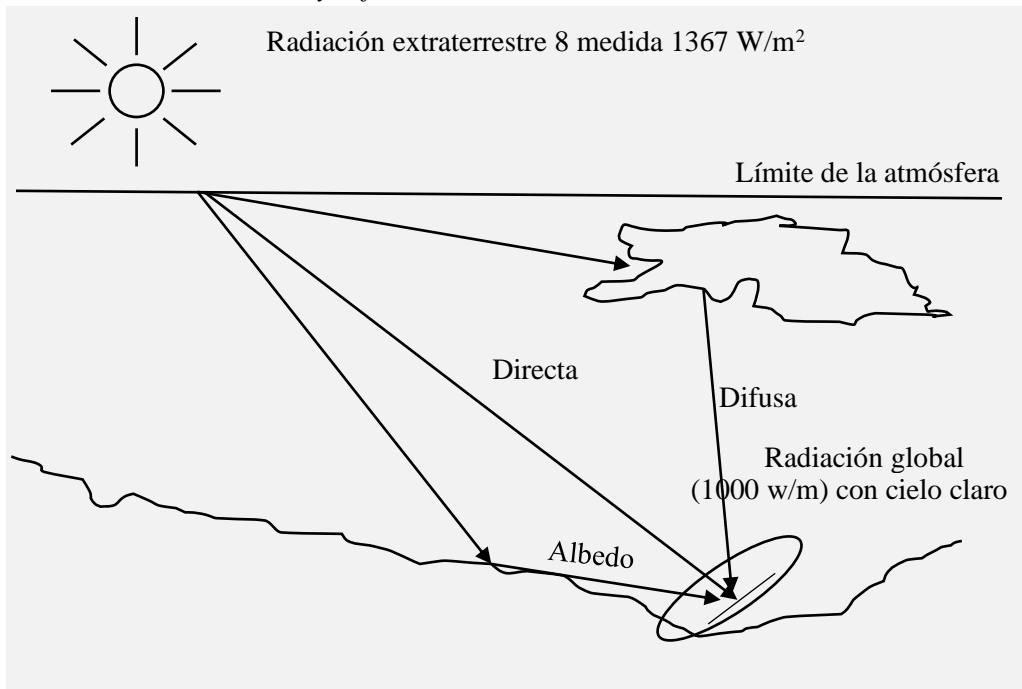
a) **Inclinación y orientación:** La orientación y el ángulo de inclinación que forman los módulos con el plano horizontal es un factor determinante en la eficiencia del generador solar. Los módulos deben tener una inclinación que permita captar los rayos solares del sol de manera perpendicular en su superficie al mediodía. El ángulo de inclinación de los módulos dependerá del uso del generador fotovoltaico (Hospital & González, 2021).

El ángulo óptimo para el panel solar debe ser el ángulo de la latitud del lugar más  $10^\circ$  ó  $15^\circ$ , posición favorable para el invierno, y aceptar una pequeña pérdida energética durante el verano. Los paneles solares fotovoltaicos se deben orientar al sol, según la hora del día, mes del año y lugar geográfico, si se dispone de sistemas de inclinación variables. En el altiplano se recomienda para que los paneles solares tengan un ángulo de inclinación óptima sea de  $30^\circ$ , con orientación hacia el norte (Baltazar, 2020).

b) **Radiación directa y difusa:** La radiación directa es la luz solar que llega sin ser dispersada por la atmósfera, con rayos paralelos que generan sombras y pueden ser concentrados por espejos. En cambio, la radiación difusa es la luz dispersada por la atmósfera (aire, aerosoles, nubes), donde los rayos solares se fragmentan en múltiples direcciones debido a moléculas de aire, gotas y polvo (Arceda & Hernandez, 2021).

**Figura 2**

*Radiación solar directa y difusa.*



*Fuente:* (Baltazar, 2020)

- c) **Altitud, albedo y otros factores:** La altitud influye en la radiación solar, en las zonas altas la radiación solar es más elevada que en lugares a nivel del mar, en zonas altas hay menos nubosidad, porque se encuentran por encima de la cobertura nubosa. También influye el albedo en la radiación solar (Arceda & Hernandez, 2021).
- d) **Sombras y reflejos:** Para ubicar los paneles solares, es esencial un espacio despejado y libre de sombras, ya que incluso una pequeña sombra puede afectar el rendimiento de todo el sistema al generar un sobrecalentamiento en las celdas. Los paneles deben estar a un máximo de 20° de la línea del módulo fotovoltaico para asegurar el paso adecuado de luz. Es crucial evaluar el lugar y, si se detectan efectos negativos, ajustar la ubicación de los paneles (Arizaca, 2022).

- e) **Condiciones climatológicas:** Para el dimensionado de los paneles fotovoltaicos se debe tener en cuenta, si las condiciones climáticas son favorables o no, por lo tanto, es necesario conocer la radiación promedio del lugar, aunque no con exactitud, a no ser que se instale sistemas fotovoltaicos muy grandes (Mejía, 2019).

Para la planificación de los sistemas fotovoltaicos, se requiere determinar la radiación solar beneficiosa en el lugar donde se situará la instalación, en el plano de los paneles solares. Es un indicador crucial del análisis previo, para un consumo eléctrico específico, a mayor cantidad de energía solar captada, se instalan menos paneles solares y viceversa (Arizaca, 2022). Hay dos clases de insolación, los valores inmediatos y los acumulativos. El primero alude a los valores de las radiaciones instantáneas diarias, mientras que el segundo se fundamenta en los promedios mensuales de la energía solar diaria en la zona (Arizaca, 2022).

Para la medición de la radiación solar se requiere el instrumento solarímetro, el cual puede medir tanto la radiación difusa como la directa. Calcular la radiación solar en un instante determinado puede ayudar a conocer cómo funcionaría el sistema, sin embargo, es mejor conocer la radiación durante un periodo de mayor duración ya que puede proporcionar una visión a largo plazo sobre cómo 23 funcionaría el sistema durante todo el año, o durante varios meses y de esta manera poder monitorear el comportamiento del sistema en las diferentes estaciones del año (Herrera & Vera, 2020).

- f) **Polvo y suciedad:** Las pérdidas por polvo y suciedad dependen del lugar de la instalación y de la frecuencia de lluvias, pueden estimarse por inspección visual o mediante medidas específicas. Los valores típicos anuales son inferiores al 4 % para superficies con grado de suciedad alto (Jiménez, 2021).
- g) **Pérdidas de conexionado:** Las pérdidas energéticas en los generadores fotovoltaicos ocurren cuando se conectan módulos de potencias ligeramente diferentes, lo que limita la corriente o tensión del sistema. Esto reduce la potencia total del generador, que es inferior a la suma de las potencias de los

módulos. Estas pérdidas se pueden minimizar mediante una instalación adecuada de los módulos y el uso de diodos de bypass (Arceda y Hernandez, 2021).

- h) Pérdidas angulares y espectrales:** Los módulos fotovoltaicos se prueban bajo condiciones estándar (STC) de 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiancia y 25°C, con radiación incidente normal. Sin embargo, en su operación real, la radiación no siempre incide de manera normal y el espectro varía, lo que genera pérdidas adicionales, especialmente si el ángulo de incidencia es diferente a 0° o si el módulo está sucio (Arceda y Hernandez, 2021).

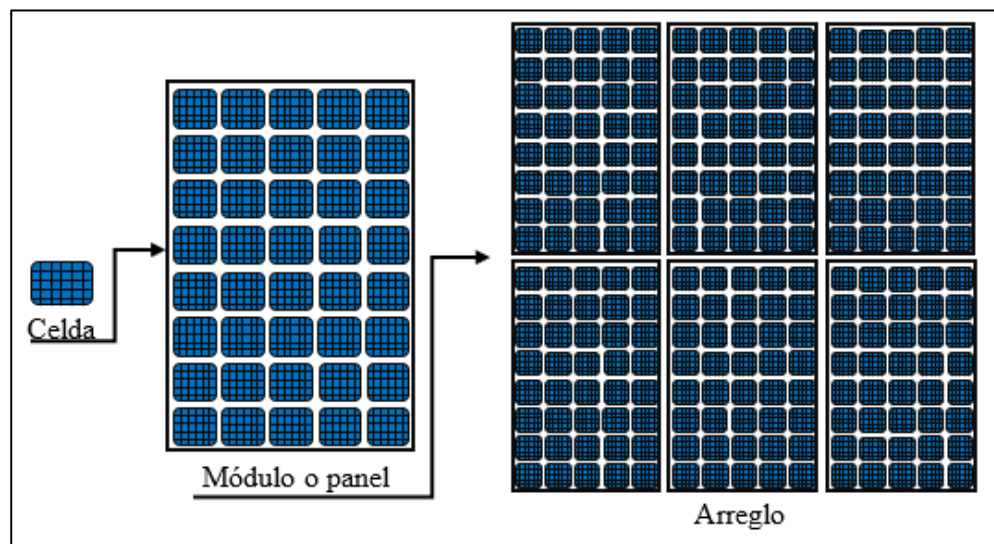
Además, la corriente generada es diferente para cada longitud de onda del espectro solar de la radiación incidente. La variación del espectro solar en cada momento respecto del espectro normalizado puede afectar la respuesta de las células fotovoltaicas, que da lugar a ganancias o pérdidas energéticas (Llanca, 2021).

#### **2.2.16. Componentes de los sistemas fotovoltaicos**

- a) Celda fotovoltaica:** La unidad básica de un sistema fotovoltaico es la celda fotovoltaica. Son dispositivos eléctricos, cuyo principal componente es el silicio, que convierten la luz del sol en corriente eléctrica directa, gracias al efecto fotovoltaico (Díaz, 2018).
- b) Un módulo o panel:** La unidad básica de un sistema fotovoltaico es la celda fotovoltaica. Son dispositivos eléctricos, cuyo principal componente es el silicio, que convierten la luz del sol en corriente eléctrica directa, gracias al efecto fotovoltaico (Maraví, 2018).
- c) Arreglo:** Es un grupo de paneles conectados para producir los valores deseados de corriente y voltaje y están fijos a una estructura de montaje (Huaraco, 2023).

**Figura 3**

*Celda, Panel y Arreglo fotovoltaico*



*Fuente:* (Baltazar, 2020)

Las celdas solares no requieren de componentes móviles para generar energía eléctrica utilizando la energía solar. Una celda, al ser iluminada por la luz solar, libera electrones de su capa de silicio, los electrones se excitan y se produce el voltaje y la corriente que se trasladan desde la celda a un circuito eléctrico. El tiempo medio de vida de un panel es de 20 años, su mantenimiento es escaso, se debe limpiar con un paño seco para prevenir que el polvo obstaculice su funcionamiento óptimo (Huaraco, 2023).

### **2.2.17. Series de los sistemas fotovoltaicos**

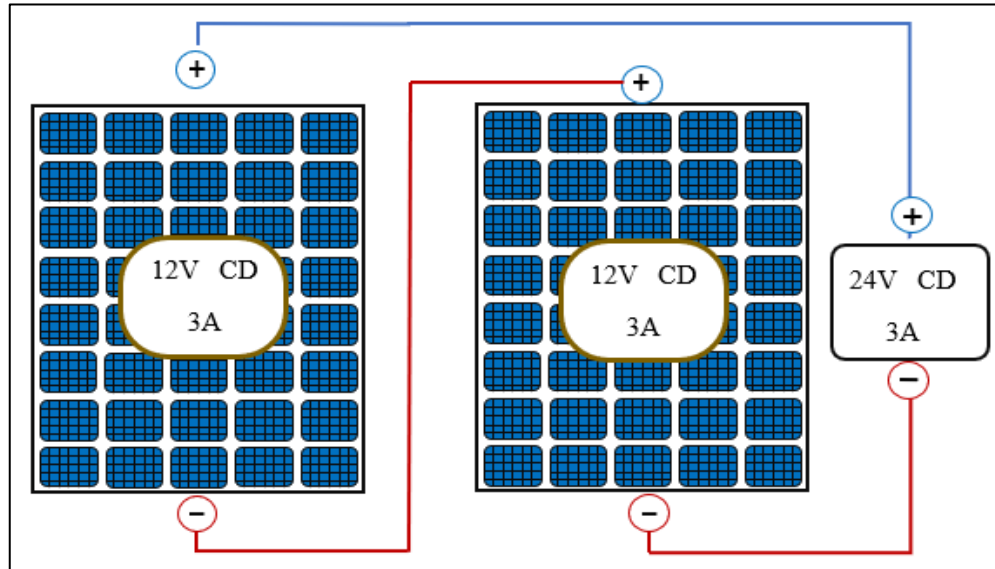
Según Vargas (2020), cada módulo o batería tiene un valor de voltaje o amperaje y pueden conectarse entre sí para obtener el voltaje deseado para el sistema:

- a) **Circuito en serie:** Se forma cuando se conectan el terminal positivo (+) de un módulo al terminal negativo (-) de otro módulo, para incrementar el voltaje; la conexión en serie no aumenta la corriente producida o el amperaje (Chozo, 2019).

Ejemplo: Si se requiere un arreglo de 24 V y 3 A, a partir de dos paneles de 12 V y 3 A, al conectarlos en serie, la potencia se suma.

**Figura 4**

*Circuito en serie*

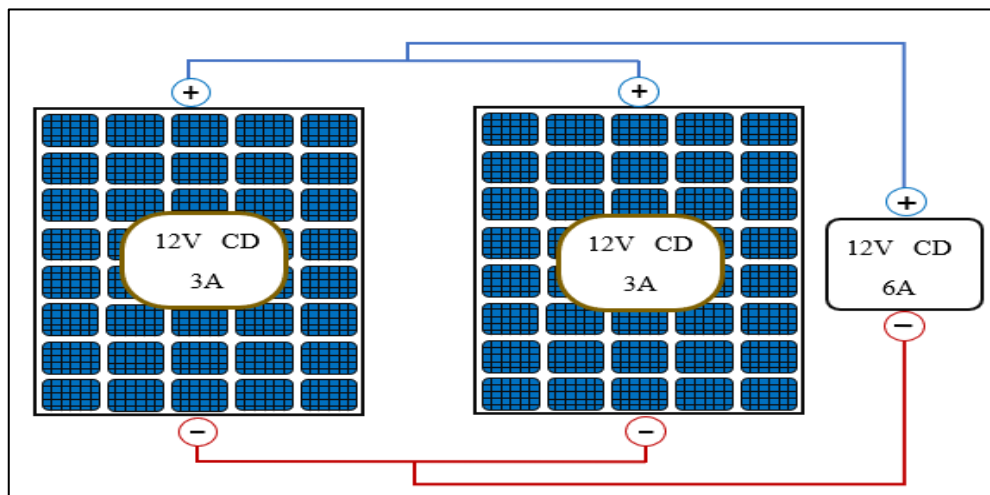


*Fuente:* (Baltazar, 2020)

- b) **Circuito en paralelo:** La conexión de módulos se hace entre los terminales de positivo (+) a positivo (+) y de negativo (-) a negativo (-). Cuando las fuentes se conectan en paralelo, 61 las cargas se suman y el voltaje aplicado al circuito permanece igual. Se utiliza para aumentar el amperaje o corriente de un sistema (Trillo, 2019).

**Figura 5**

*Circuito en paralelo*



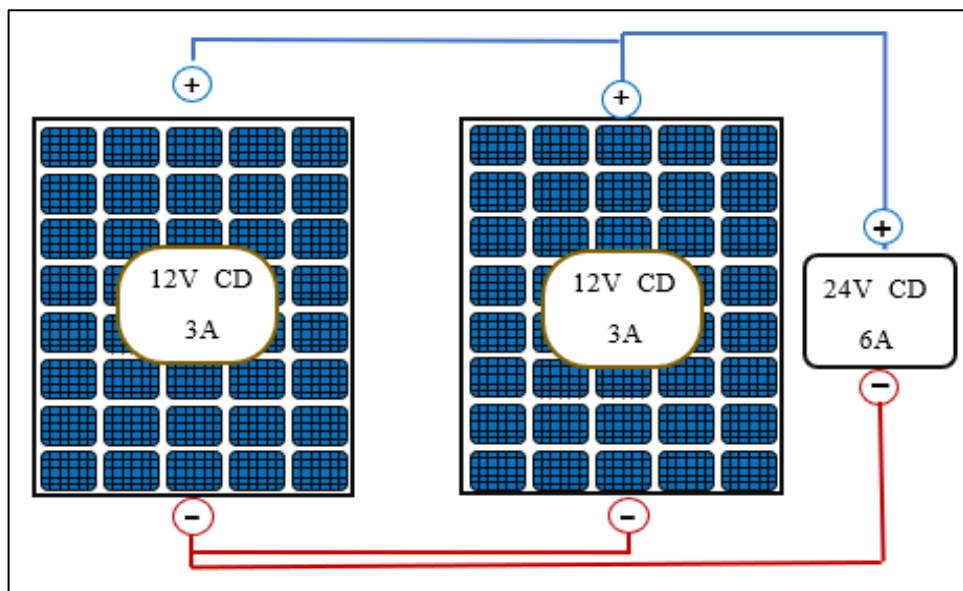
*Fuente:* (Baltazar, 2020).

c) **Circuito en serie y en paralelo:** Los circuitos pueden usar una mezcla de conexiones en serie y en paralelo para obtener los voltajes y las corrientes necesarios (Baltazar, 2020).

En la figura 9, se conectan en modo serie-paralelo cuatro módulos de 12V y 3A. Los módulos se conectan en serie de dos en dos, lo que incrementa el voltaje a 24V. Cada tira se conecta en paralelo incrementando la corriente a 6A. El resultado es un sistema de 24V CD y 6A (Baltazar, 2020).

**Figura 6**

*Circuito en serie y en paralelo*



*Fuente:* (Baltazar, 2020).

# CAPÍTULO III

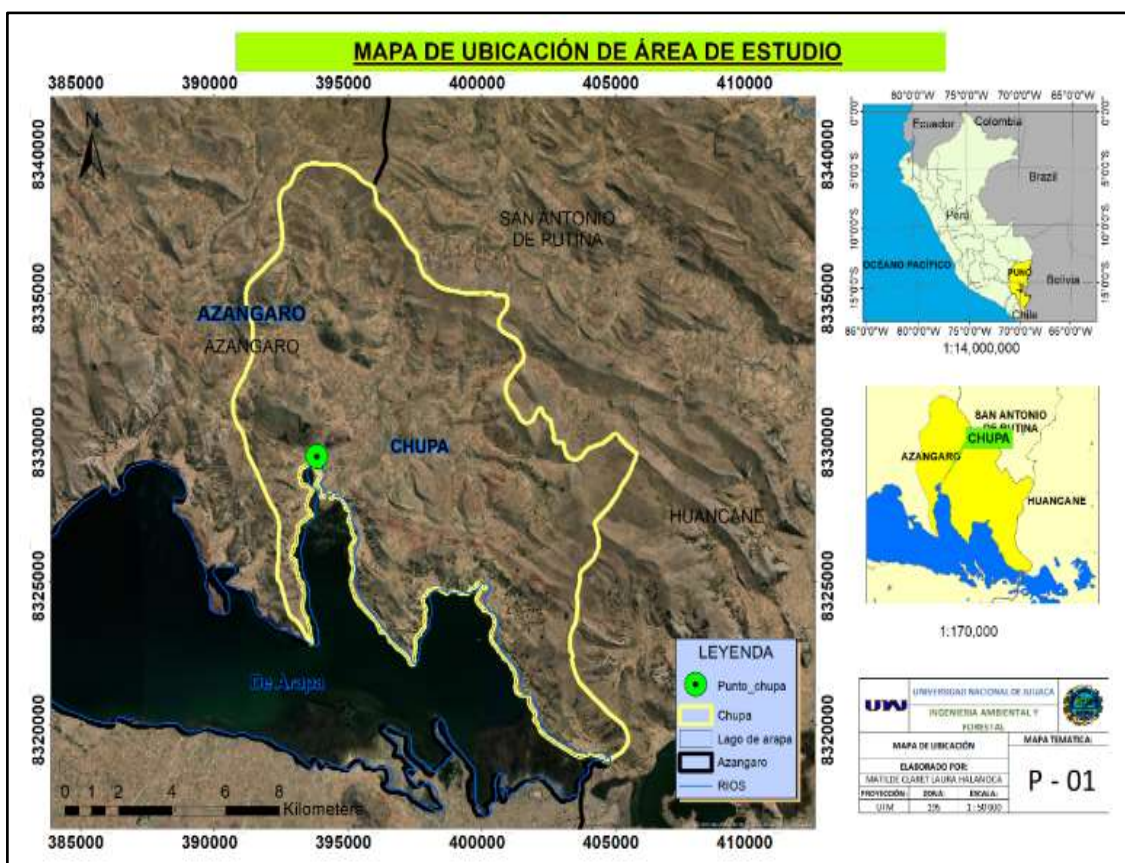
## MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. Ámbito de estudio

El presente estudio se centró en muestras de agua residual obtenidas en el distrito de Chupa, provincia de Azángaro, departamento de Puno, a 3823 m.s.n.m. con una población de 13746 habitantes, constituida por cuatro barrios: San Martín, Por venir, Tupac y Unión Chipinta, con las siguientes coordenadas geográficas GWS -15.1058, -69.9867.

**Figura 7**

*Mapa de ubicación del área de estudio del distrito de Chupa*



*Nota:* La figura muestra la delimitación política territorial del distrito de Chupa dentro de la provincia de Azángaro y su proximidad al lago de Arapa.

## **3.2. Tipo, diseño y nivel de investigación**

### **3.2.1. Tipo**

El tipo de investigación es aplicado con un enfoque cuantitativo debido a la manipulación intencional de una o más variables independientes (pH, tiempo y densidad de corriente) para observar y medir su efecto en una o más variables dependientes (DQO, DBO, sólidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes) (Pacori & Pacori, 2018).

### **3.2.2. Diseño**

Se empleó un diseño experimental basado en el diseño box-behnken para investigar el efecto de factores (pH, tiempo y densidad de corriente) sobre la remoción de contaminantes

### **3.2.3. Nivel de investigación**

La presente investigación se enmarca dentro del nivel explicativo, busca identificar las causas de eventos y fenómenos físicos o sociales, explicando la ocurrencia del fenómeno y las condiciones en las que se manifiesta (Pacori & Pacori, 2018).

## **3.3. Población y muestra**

### **3.3.1. Población**

La población de estudio estuvo constituida por aguas residuales domésticas generados por distrito de Chupa, provincia de Azángaro, Departamento de Puno. Con un caudal promedio de  $17.28 \text{ m}^3/\text{día}$  de agua residual.

### **3.3.2. Muestra**

Se tomó 120 L de muestra de agua residual doméstica en un punto cuidadosamente seleccionado de acceso fácil y seguro, en el centro del flujo, a media altura del paso del agua, evitando bordes y fondo. Se realizó la toma de una muestra compuesta según el protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de las aguas residuales domésticas o municipal (Ministerio de vivienda, 2015), de los cuales se empleó 5 litros para determinar la concentración inicial de los parámetros físico químicos y microbiológicos

establecidas según el D.S. N°003-2010-MINAM y 115 litros para realizar corridas experimentales.

### **3.3.3. Variables de investigación**

#### **Variables independientes**

- pH: 5, 6 y 6.5
- Densidad de corriente: 4, 6.5 y 9.8 A/m<sup>2</sup>
- Tiempo de tratamiento: 15, 30 y 45 minutos

#### **Variable dependiente**

- DQO (mg/L)
- DBO5 (mg/L)
- Sólidos totales en suspensión (mg/L)
- Aceites y grasas (mg/L)
- Coliformes termo tolerantes (NMP/100mL)

### **3.4. Equipos y materiales**

#### **3.4.1. Equipos**

Multiparámetro WTW 340, cronómetro digital (Casio HS-80TW-1EF), cámara fotográfica (Xiaomi REDMI NOTE 11), balanza analítica, Estufa eléctrica, Mufla, Bomba de vacío, digestor de bloque para DQO, colorímetro, incubadora, agitador magnético, autoclave, regulador de energía o fuente de poder 0.20 A.

#### **3.4.2. Reactivos**

Ácido clorhídrico (HCl) a una concentración de 1M e hidróxido de sodio (NaOH) con un grado de 98% de pureza, solución de digestión (mezcla entre dicromato de potasio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>), viales de digestión DQO, sulfato de mercurio (HgSO<sub>4</sub>), solución de hidróxido de sodio con yoduro potasio (NaOH/KI), ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), sulfato de magnesio (MnSO<sub>4</sub>), tiosulfato de sodio 0.025 N ((Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), solución de almidón, solución de nitrato y amonio, ácido sulfámico (H<sub>3</sub>NSO<sub>3</sub>), ftalato de hidrogeno de potasio patrón (KHC<sub>8</sub>H<sub>4</sub>O<sub>4</sub>), solución de tampón fosfato

( $\text{HPO}_4^{2-}$ ), solución de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ), solución de cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), sulfato de sodio anhidro, caldo lactoso y agua destilada.

### 3.4.3. Materiales de laboratorio

Vasos precipitados de 100 mL, 500 mL, 250 mL y 100 mL, pipeta graduada, pera de succión, frascos de winkler, buretas, matraces, tubos de ensayo, gradilla, embudos de separación, pinza metálica, crisol, bureta, equipo de titulación, papel filtro, luna de reloj, jeringas, varilla de vidrio y papel aluminio.

### 3.4.4. Otros

Cooler, cubeta, marcador indeleble, libreta de apuntes, guantes látex, barbijo y bata de laboratorio.

## 3.5. Métodos

### 3.5.1. Determinación de los parámetros de campo que incluyen temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto.

#### *Figura 8*

*Ubicación de punto de muestreo*



*Nota:* La figura muestra el punto geográfico del muestreo del agua residual

La determinación de temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto se realizó según el protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de las aguas residuales domésticas o municipal (Ministerio de vivienda, 2015). El cual establece que los equipos empleados deben contar con una calibración según los lineamientos del fabricante. Para ello, se empleó un equipo multiparámetro de HI9828-10101 previamente calibrado.

- **Procedimiento de calibración:**

**pH:** Se utilizaron las soluciones buffer de pH 4, 7 y 10 para calibrar el pH

**Conductividad eléctrica:** se utilizó una solución estándar de conductividad de 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Oxígeno disuelto:** se realizó una calibración de dos puntos utilizando el método de calibración en aire saturado de humedad y una solución de oxígeno cero, para la calibración en oxígeno cero se utilizó una solución de sulfito de sodio.

- **Procedimiento de medición:**

Se realizó la calibración del medidor de estándares, se tomó una muestra de 1L de agua residual doméstica en un vaso precipitado. Se sumergieron las sondas, asegurando su completa inmersión y ausencia de burbujas alrededor de los sensores, y se esperó a que el equipo se estabilice hasta que las lecturas de pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto sean constantes para registrar los datos correspondientes. Para mayor precisión, se hicieron mediciones duplicadas, cuyo promedio fue calculado para obtener el valor representativo.

### 3.5.2. Determinación de concentración de DQO, DBO5, sólidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes.

#### a. Determinación de demanda química de oxígeno (Método colorímetro).

Para la determinación de la concentración de la demanda química de oxígeno (DQO) en las unidades de tratamientos, se procedió con los protocolos establecidos en los “métodos normalizados para análisis de aguas potables y residuales Ed: 2017. Demanda Química de Oxígeno, Reflujo Cerrado, Método Colorimétrico” Part 5220 D (SMEWW-APHA-AWWA-WEF, 2017).

##### - Preparación de la muestra

Homogeneizar la muestra de agua o efluente antes del análisis, si se sospechan concentraciones altas de DQO, realizar diluciones adecuadas. Para la digestión se realizó la toma de muestra vial de digestión DQO, posteriormente se añadió con una micropipeta un volumen conocido de muestra (generalmente 2 mL, dependiendo del rango), seguidamente se tapó bien el vial y se realizó la mezcla suavemente invirtiéndolo varias veces, así mismo se colocó viales en el digestor de bloque a 150° C durante 2 horas y finalmente se dejó enfriar los viales a temperatura ambiente.

##### - Medición colorimétrica

Respecto a la medición colorimétrica se colocó el vial en el colorímetro o espectrofotómetro, que permitió leer la absorbancia a la longitud de onda recomendada por el fabricante (normalmente 600 nm), para luego usar la curva de calibración para determinar la concentración de oxígeno equivalente (en mg O<sub>2</sub>/L).

##### - Cálculo de la DQO

Para calcular la DQO, se aplicará la siguiente ecuación:

$$DQO \text{ mg } O_2/L = \frac{C \times 1000}{T} \quad (1)$$

**Donde:**

**C:** Muestra obtenida en la curva de calibración

**T:** Cantidad de muestra tomada para la prueba (mL)

## **b. Determinación de demanda bioquímica de oxígeno (Método Winkler)**

Para determinar las concentraciones de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) en las unidades de tratamientos, se procedió con los protocolos establecidos en los “métodos normalizados para análisis de aguas potables y residuales Ed: 2017. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): prueba de DBO de 5 días” Part 5210 B. (SMEWW-APHA-AWWA-WEF, 2017).

### **- Preparación de la muestra**

Para la preparación de muestra se homogenizó la muestra sin agitar en exceso (evitar oxigenación artificial), seguidamente fue necesario, realizar diluciones con agua libre de DBO<sub>5</sub>, previamente aireada y enriquecida con nutrientes, para añadir el inóculo bacteriano si se trabaja con aguas muy tratadas o pobres en microorganismos.

### **- Llenado de botellas BOD**

Este procedimiento consistió en llenar completamente las botellas BOD (evitando burbujas de aire), para luego tapar herméticamente para evitar el intercambio de gases, seguidamente se procedió a la fijación del oxígeno disuelto inicial (OD<sub>i</sub>) – Método Winkler, consecuentemente se Añadió 1 mL de sulfato de manganeso (MnSO<sub>4</sub>) para luego añadir 1 mL de solución alcalina yodurada y posterior a ello se realizó el tapado de forma cuidadosa para luego agitar la mezcla, en donde se formó un precipitado marrón-anaranjado (hidróxido de manganeso oxidado), posteriormente a ello se procedió a esperar que el precipitado se asiente, para luego añadir 1 mL de ácido sulfúrico concentrado, tapar y agitar hasta disolver el precipitado y liberar el yodo (color marrón) alcanzándose tomar un volumen conocido (normalmente 203 mL) para titulación.

### **- Toma de OD<sub>2</sub> (después de incubación)**

Respecto a la incubación de la segunda botella a 20 °C durante 5 días, se volvió a repetir el mismo procedimiento anterior (pasos 4.3.1 a 4.3.6) para fijar y titular el oxígeno disuelto final.

- **Valoración**

Respecto a la valoración se procedió a titular con tiosulfato de sodio 0.025 N hasta que el color marrón se vuelva pálido, para luego añadir unas gotas de solución de almidón (la mezcla se torna azul oscuro), seguidamente se continuo con la titulación hasta que desaparezca el color azul y finamente se procedió a registrar el volumen de tiosulfato consumido.

- **Cálculo de la DBO5**

Para calcular la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), se hará uso la siguiente ecuación:

$$DBO5 = \frac{OD_1 - OD_2}{P} \quad (2)$$

**Donde:**

**OD<sub>1</sub>:** Contenido inicial de Oxígeno disuelto

**OD<sub>2</sub>:** Contenido final de Oxígeno disuelto

**P:** Porción de la muestra analizada

**c. Sólidos totales en suspensión**

Para determinar se siguió los procedimientos establecidos, basados en los métodos normalizados para análisis de aguas potables y residuales Ed: 2017, Sólidos: Total de sólidos suspendidos secados a 103- 105 °C Part 2540 D (SMEWW-APHA-AWWA-WEF, 2017).

- **Preparación del filtro**

Para la preparación de filtro se colocó el filtro de fibra de vidrio en el crisol o en un porta-filtros adecuado en la que se lavó el filtro con agua destilada caliente para eliminar impurezas seguidamente se hizo el secado del filtro en estufa a 120 °C durante 1 hora, luego se retiró el filtro con pinzas, enfriar en desecador durante 20-30 minutos y pesar con precisión (anotar como B) y finalmente se repitió el ciclo de secado-enfriado-pesado hasta obtener un peso constante (variación  $\leq 0.5$  mg).

#### - **Filtración de la muestra**

Para la filtración de la muestra se procedió con la medición con exactitud un volumen conocido de muestra (normalmente 100 mL o más si se sospecha baja concentración de sólidos), asimismo se agito bien la muestra antes de tomar el volumen, para asegurar homogeneidad y finamente se hizo el filtrado de la muestra bajo vacío suave, asegurando que todo el sólido quede retenido en el filtro.

#### - **Secado del residuo**

Este procedimiento consistió en retirar cuidadosamente el filtro con los sólidos retenidos y colocarlo nuevamente en la estufa, para luego secar a 103 – 105 °C durante al menos 1 hora (o hasta peso constante), seguidamente se procedió a enfriar en desecador durante 20 – 30 minutos y finalmente se efectuó el pesado del filtro seco con los residuos.

#### - **Cálculo de los STS**

El cálculo se efectúa con la siguiente ecuación:

$$STS \frac{mg}{L} = \frac{(A-B) \times 1000}{v} \quad (3)$$

**Donde:**

**A:** Peso del filtro más el residuo seco (mg)

**B:** Peso del filtro (mg)

**V:** Volumen de la muestra (mL)

#### **d. Determinación de Aceites y grasas**

Para determinar la cantidad de aceites y grasas se siguió los procedimientos establecidos en los métodos normalizados para análisis de aguas potables y residuales. Aceites y grasas, método gravimétrico de partición Part 5520 B (SMEWW-APHA-AWWA-WEF, 2017).

#### - **Preparación de la muestra**

Para la preparación de muestra se homogenizo la muestra sin agitación excesiva para evitar emulsificación, si la muestra es alcalina, acidifico con HCl hasta pH 2 para asegurar la extracción eficiente de grasas.

#### - **Extracción**

Este procedimiento consistió en medir un volumen conocido de muestra y transferirlo al embudo de separación, para luego añadir 30 – 50 mL del disolvente orgánico (hexano o éter de petróleo), seguidamente se hizo el tapado del embudo y agitar vigorosamente durante 2 – 3 minutos, liberando presión periódicamente, para luego dejar en reposo para que las fases se separen y se logre recuperar la fase orgánica (superior si es hexano; inferior si es cloroformo) en un vaso o cápsula limpia y seca, seguidamente se repitió la extracción 2 veces más con porciones frescas de disolvente y finalmente unir todos los extractos.

#### - **Secado y evaporación**

Respecto al secado y evaporación se procedió a pesar el extracto combinado por sulfato de sodio anhidro para eliminar trazas de agua, para luego transferir el extracto a una cápsula de evaporación previamente tarada en la que se registró el peso, posteriormente para la evaporación del disolvente en baño María o plancha calefactora en campana extractora, hasta sequedad visible, en la cápsula con residuo a 103 – 105 °C durante 30 – 60 minutos y finalmente se enfrió en desecador y pesar y se realizó el registro de peso final.

#### - **Cálculo de Aceites y Grasas**

$$\text{Aceites y grasas (mg/L)} = \frac{(A-B) \times 1000}{V} \quad (4)$$

#### **Donde:**

A = Peso de la cápsula con residuo seco (mg)

B = Peso de la cápsula vacía (mg)

V = Volumen de muestra analizado (mL)

#### **e. Determinación de Coliformes termotolerantes**

Para determinar la concentración de los Coliformes termotolerantes se seguirá los procedimientos establecidos en los métodos normalizados para análisis de aguas potables y residuales Ed. 2017; Técnica de fermentación en tubos múltiples para miembros del grupo de coliformes.

##### **- Fase presuntiva (detección de coliformes totales)**

Este procedimiento consistió en la preparación de series de tubos con caldo lactosado y campana de gas (Durham) en diluciones de 3 tubos con 10 mL de muestra, 3 tubos con 1 mL de muestra, 3 tubos con 0.1 mL de muestra e incubar a  $35 \pm 0.5$  °C durante 24 – 48 horas y finalmente observar presencia de gas en las campanas Durham y/o turbidez como resultado positivo.

##### **- Fase confirmativa (coliformes termotolerantes)**

A partir de cada tubo positivo en la fase presuntiva, se transfirió con material estéril con una alícuota a tubos con caldo EC o medio selectivo, seguidamente se incubo a  $44.5 \pm 0.2$  °C durante  $24 \pm 2$  horas, un tubo se considera positivo si hay formación de gas dentro del tubo de Durham.

##### **- Interpretación de resultados**

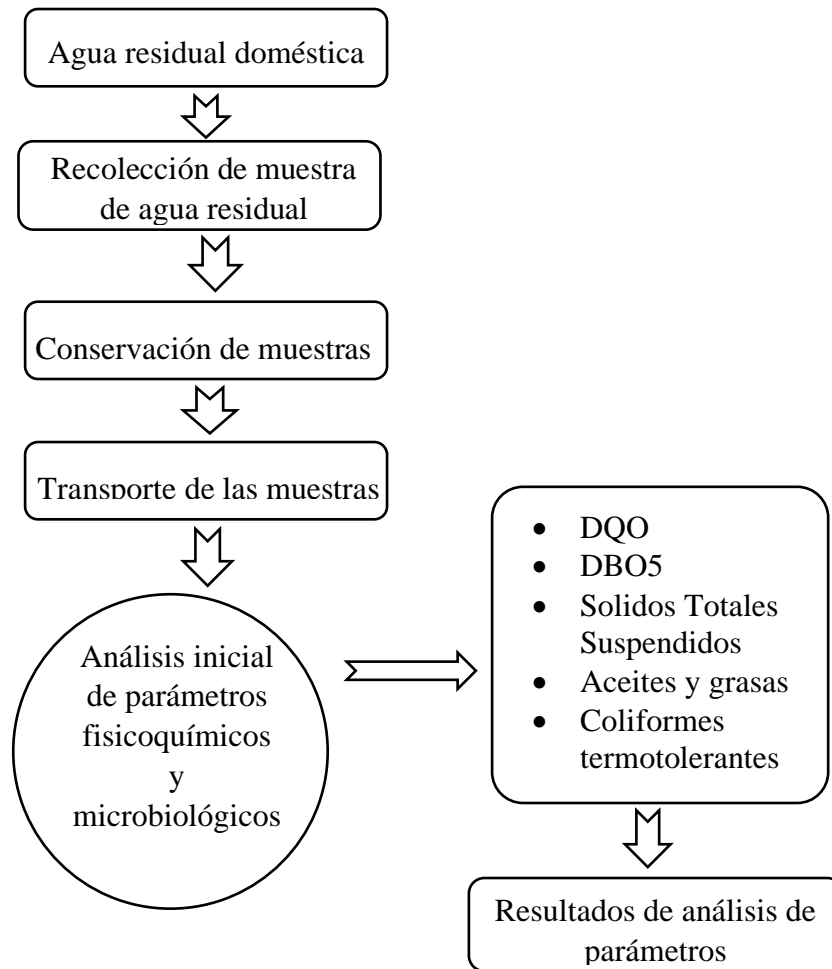
Para la interpretación de resultados se contó el número de tubos positivos en cada serie de dilución y finalmente se verifico y comparo con la tabla de NMP para obtener el número más probable de coliformes termotolerantes por 100 mL.

##### **- Expresar el resultado como:**

Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)

**Figura 9**

*Flujograma para determinar la concentración de parámetros*



*Nota:* El flujograma muestra la secuencia metodológica para la obtención de datos

### **3.5.3. Electrocoagulación utilizando energía fotovoltaica alimentada por energía fotovoltaica en el tratamiento de agua residual doméstica.**

Se utilizó un reactor de electrocoagulación con dimensiones 26 cm de largo, 15 cm de ancho, 13 cm de altura, con una capacidad de 5.07 litros. Los electrodos empleados fueron placas rectangulares metálicas de hierro y aluminio dispuestas en paralelo; empleando 6 placas por cada electrodo; ambos electrodos con las mismas dimensiones, 7 cm x 10 cm con un espesor de 3 mm, con una distancia de 1.5 cm entre placas (Apaza, 2018). La recolección de muestras de agua residual tratada fue mediante una llave de paso en la zona inferior de la celda. La fuente de energía del reactor de electrocoagulación fue la energía fotovoltaica que incluye un panel solar monocristalino de 24V/380 W de potencia, un inversor

must de 1200 WTS y una batería leoch cuadrado de 12V-100AH. Con una inclinación directa al sol para que aumente la eficiencia y producción de energía (Mohamad et al., 2021). Con una generación de 1976 Wh, el cual se puede visualizar en el anexo 8.

#### a. Ensayos de electrocoagulación

Se realizaron ensayos de electrocoagulación variando factores como pH, tiempo y densidad de corriente, se realizaron 12 corridas con 2 veces de repetición en el centro.

- **pH:** Los experimentos se realizaron a tres niveles de pH (las cuales se ajustarán empleando ácido clorhídrico e hidróxido de sodio)
- **Tiempo:** Se trabajo con 3 niveles de tiempo de exposición
- **Densidad de corriente:** La densidad de corriente se varió en tres distintos niveles.

**Tabla 5**

*Factores a tomar en cuenta*

Factores	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
pH	5	6	6.5
Tiempo	15 min	30 min	45 min
Densidad de corriente	4 A/m <sup>2</sup>	6.5 A/m <sup>2</sup>	9.8 A/m <sup>2</sup>

- **Cálculo del porcentaje de remoción (Eficiencia del tratamiento en función a DQO)**

El porcentaje de remoción de DQO se calculará según la siguiente ecuación:

$$\%R = \frac{(C_0 - C_f)}{C_0} \times 100 \quad (5)$$

**Donde:**

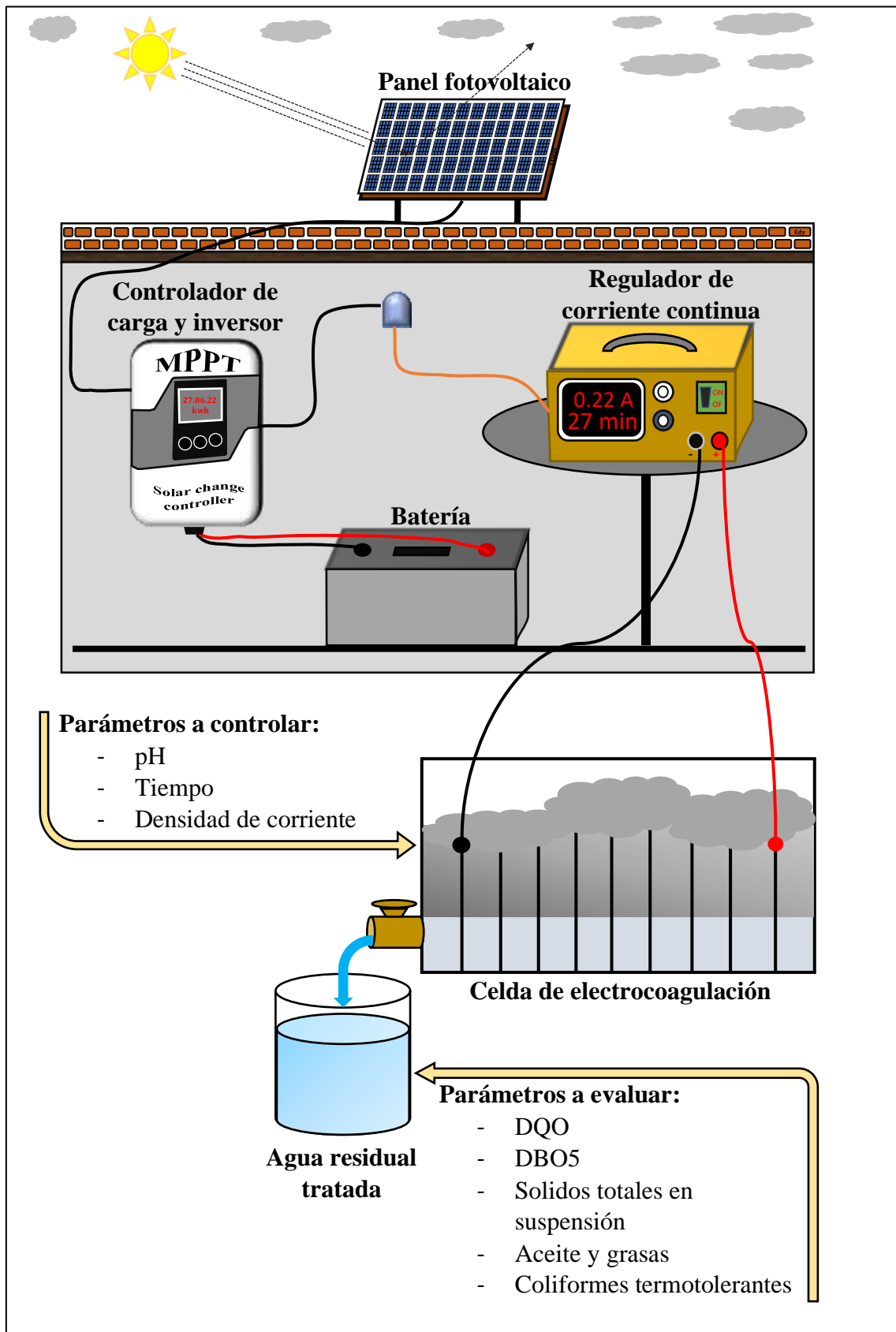
**%R:** Porcentaje de remoción

**C<sub>0</sub>:** Concentración inicial de DQO (mg/L)

**C<sub>f</sub>:** Concentración final de DQO (mg/L)

**Figura 10**

*Flujograma de electrocoagulación*



## b. Diseño experimental

Para estimar las combinaciones de factores pH, tiempo y densidad de corriente se utilizará el diseño Box-Behnken de 12 combinaciones con 3 repeticiones en los puntos centrales haciendo un total de 15 tratamientos. El modelo matemático que se ajusta a un diseño Box-Behnken viene determinada por la siguiente ecuación:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (6)$$

Donde,  $\beta_0$  es el término independiente,  $\beta_i$  y  $\beta_{ii}$  son los coeficientes de los  $i$ -ésimo

efectos principales y su efecto cuadrático respectivamente,  $\beta_{ij}$  es el coeficiente de interacción entre el  $i$ -ésimo i el  $j$ -ésimo y es el error aleatorio

Esta ecuación, al contar con términos cuadráticos, proporciona una superficie de respuesta con cierta curvatura, pudiéndose así aproximar mejor al modelo real que en el caso del diseño k-factorial. El número de experimentos (N) necesarios para el desarrollo de este diseño se define como:

$$N = 2k(k - 1) + c_0 \quad (7)$$

Donde,  $k$  es el número de factores y  $c_0$  es el número de puntos centrales. La tabla 2 contiene el número de experimentos del diseño Box-Behnken de tres factores y tres niveles, en donde el valor máximo, mínimo y medio de cada factor en el rango seleccionado está codificado como “1”, “-1” y “0” respectivamente. Los niveles de los factores pH, tiempo y densidad de corriente serán aplicados de acuerdo a matriz experimental que se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6***Matriz del diseño experimental*

N°	X1	X2	X3	Factores		
				pH (Und.)	Tiempo (Min)	Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )
1	-	-	0	5	15	6.5
2	-	+	0	5	45	6.5
3	+	-	0	6.5	15	6.5
4	+	+	0	6.5	45	6.5
5	-	0	-	5	30	4
6	-	0	+	5	30	9.8
7	+	0	-	6.5	30	4
8	+	0	+	6.5	30	9.8
9	0	-	-	6	15	4
10	0	-	+	6	15	9.8
11	0	+	-	6	45	4
12	0	+	+	6	45	9.8
13	0	0	0	6	30	6.5
14	0	0	0	6	30	6.5
15	0	0	0	6	30	6.5

Factores	Niveles		
	-	0	+
pH	5	6	6.5
Tiempo	15	30	45
Densidad de corriente	4	6.5	9.8

*Nota:* Esta tabla muestra la matriz de diseño experimental, consta de 15 corridas experimentales empleando 3 factores (pH, tiempo y densidad de corriente) en 3 niveles.

Se desarrollará un análisis de los resultados considerando diagramas de Pareto, modelos de regresión, análisis de varianza (ANOVA), diagramas de superficie de respuesta y gráficos de contorno.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Determinar los parámetros de campo que incluyen temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto.

**Tabla 7**

*Resultados de parámetros de campo del agua residual domestica de Chupa*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Valor</b>	<b>LMP</b>
Temperatura	°C	17.12	< 35
pH	-	5.70	6.5 – 8.5
Conductividad	μS/cm	2070	--
Oxígeno disuelto	mg/L	1.37	--

*Nota:* La tabla detalla los resultados de los parámetros in situ

La tabla 7 muestra una temperatura de 17.12 °C, pH de 5.70, conductividad eléctrica de 2070 μS/cm y oxígeno disuelto de 1.37 mg/L. comparados con los Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR, donde el pH no cumple con el valor establecido revelando un medio ácido fuera de rango (6.5 – 8.5).

La temperatura de 17.12 °C, un valor inferior al LMP para efluentes de PTAR, lo cual no representa un problema. Este hallazgo se alinea la literatura, de Vrsalović et al., (2023), estudiaron las aguas residuales de la planta de Stupe en Croacia, determinaron una temperatura similar de 18 °C, mientras que Humpire (2022), reportaron una temperatura de 19.5 °C en condiciones similares, indicando que la variabilidad se debe a factores como el uso de agua caliente doméstica y condiciones ambientales locales.

Vrsalović et al., (2023), registró un pH de 8.18, ligeramente alcalino. Este valor se encuentra dentro de rangos comunes en aguas residuales con presencia de materia orgánica y sales disueltas. En comparación con Abbass et al., (2024), obtuvo un pH de 7.68, también cercano a la neutralidad, y señalaron que esta variación se debe principalmente a la composición de agua residual- En contraste, en este estudio se obtuvo un pH de 5.70, el cual es ácido, esta diferencia puede deberse a factores como el tipo y origen del agua residual.

Respecto a la conductividad, en el estudio de Vrsalović et al., (2023), reporto una conductividad de 953  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Por su parte, Abbass et al., (2024), registro una conductividad mucho más alta de 2990  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , evidenciando una elevada contaminación general por materia orgánica y una mayor presencia de sales. Ambos estudios muestran que la conductividad del agua residual puede variar según el tipo de actividad y la composición del agua. En comparación con estos autores, en nuestro estudio se obtuvo una conductividad de 2070  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , un valor intermedio entre los reportados por Vrsalović y Abbass. Este nivel indica contaminación significativa, con una elevada presencia de carga orgánica, lo que confirma la necesidad de un tratamiento adecuado antes de verter estas aguas al cuerpo receptor.

#### **4.2 Determinación de concentración de DQO, DBO5, solidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes presentes en la muestra de agua residual doméstica del distrito de Chupa.**

**Tabla 8**

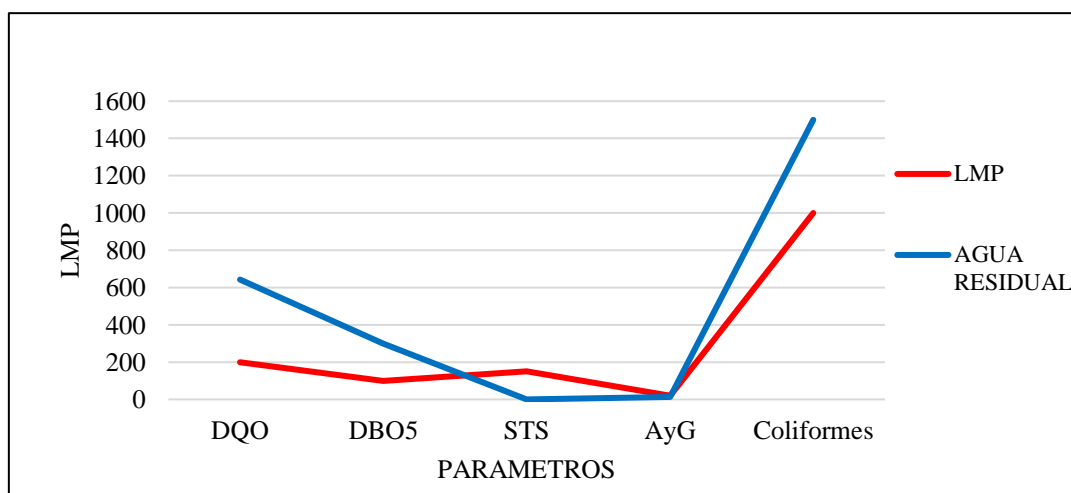
*Caracterización inicial de parámetros físicos químicos y microbiológicos*

<b>N°</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Valor</b>	<b>LMP</b>
1	DQO	mg/L	643.9	200
2	DBO5	mg/L	298.3	100
3	Solidos totales en suspensión	mg/L	0.0193	150
4	Aceites y grasas	mg/L	12.5	20
5	Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	$3.5 \times 10^7$	1000

*Nota.* Los valores reportados corresponden a la caracterización inicial del efluente y se comparan con los LMP establecidos por la normativa vigente.

**Figura 11**

*Relación de los resultados obtenidos de los parámetros con el LMP*



*Nota:* El grafico permite visualizar de manera comparativa el comportamiento de cada parámetro respecto al LMP.

La tabla 8, se observa los valores de los parámetros evaluados del agua residual domestica del distrito de Chupa, los cuales reflejan una alta carga contaminante en el agua analizada. La DQO fue de 643.9 mg/L y DBO5 de 298.3 mg/L. Lo cual indica la presencia de materia orgánica biodegradable y no biodegradable y coliformes termotolerantes de  $3.5 \times 10^7$  NMP/100 mL evidencian una fuerte contaminación fecal, representando un riesgo sanitario considerable. Estos parámetros superan los Límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento y finalmente se tiene aceites y grasas de 12.5 mg/L y sólidos totales en suspensión de 0.0193 mg/L, que se encuentra dentro del LMP.

Respecto al parámetro de DQO que se reporta con un valor de 643.9 mg/L y DBO de 298.3 mg/L, en contraste con estudios realizados por Cancapa (2019) y Pujaico y Acuña (2019), que reporto una concentración de DQO de 394 mg/L y DBO de 98.7, los cuales fueron tomadas de la estación de bombeo de agua residual N° 085 – Lurín, en cambio Aguilar (2018), reporto DQO inicial de 347 mg/L y DBO5 de 182 mg/L en las aguas residuales del PTAR de la facultad de ingeniería química por, esta variación de valores puede deberse a la composición del agua residual ya que son de diferentes lugares, valores que superan ampliamente el límite de 200 mg/L.

El valor inicial de sólidos totales en suspensión fue de 0.0193 mg/L, siendo notablemente inferior a los 1300 mg/L reportados por Nawarkara y Salkar (2019), lo que sugiere que la carga contaminante es predominantemente disuelta. De manera similar, la concentración de aceites y grasas fue de 12.5 mg/L, valor que también es menor a los 112° mg/L reportados por Limaymanta (2023). En contraste, los coliformes termotolerantes fue de  $3.5 \times 10^7$  NMP/100mL, lo cual es superior los >160 000 NMP/100mL reportados por Baca (2018), esto subraya la extrema severidad de la contaminación fecal en el agua residual domestica del distrito de Chupa.

#### 4.2 Ensayos de electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica para el tratamiento del agua residual doméstica en el distrito de Chupa, variando el pH, el tiempo y la densidad de corriente.

**Tabla 9**

*Resultados del proceso de electrocoagulación*

Unidad de muestra	Factores			DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	Sólidos totales en suspensión (mL/L)	Aceites y grasas (mg/L)	Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)
	pH	Tiempo (min)	Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )					
1	5	15	6.5	203.0	104.7	0.0057	<5.00	2200.0
2	5	45	6.5	173.4	87.0	0.0046	<5.00	950.0
3	6.5	15	6.5	229.5	105.2	0.0061	<5.00	3500.0
4	6.5	45	6.5	189.9	89.4	0.0059	<5.00	1600.0
5	5	30	4	203.1	96.0	0.006	<5.00	7800.0
6	5	30	9.8	180.0	88.2	0.0058	<5.00	13.0
7	6.5	30	4	289.7	150.1	0.0068	<5.00	9200.0
8	6.5	30	9.8	186.6	90.3	0.0074	<5.00	<1.8
9	6	15	4	371.4	177.0	0.0052	<5.00	8100.0
10	6	15	9.8	249.7	132.0	0.0068	<5.00	220.0
11	6	45	4	280.9	146.3	0.0067	<5.00	1600.0
12	6	45	9.8	179.0	87.0	0.0053	<5.00	<1.8
13	6	30	6.5	202.0	105.4	0.005	<5.00	7200.0
14	6	30	6.5	210.5	108.8	0.0057	<5.00	7000.0
15	6	30	6.5	206.0	106.5	0.0060	<5.00	7050.0
Límites máximos permisibles (LMP)				200	100	150	20	1000

*Nota:* Esta tabla muestra el comportamiento de los parámetros de calidad de agua al aplicar distintas combinaciones de pH, tiempo y densidad de corriente.

La tabla 9, muestra los valores de DQO y DBO5 los cuales disminuyen significativamente con tiempos de 30 a 45 minutos y mayor densidad de corriente, como en las muestras 6, 8 y 12. Los sólidos totales en suspensión se mantienen bajos 0.0046 - 0.0074 mg/L en todas las muestras. Los aceites y grasas están por debajo del límite de detección <5 mg/L en todas las pruebas, mostrando remoción efectiva. Los coliformes termotolerantes bajan drásticamente con mayor corriente y tiempo, llegando incluso a valores <1.8 NMP/100 mL.

La demanda química de oxígeno (DQO) se redujo de un valor inicial de 643.9 mg/L a un mínimo de 173.4 mg/L, representando una eficiencia de remoción del 73.07 %, De igual modo, la DBO5 disminuyó de 298.3 mg/L a un mínimo de 87.0 mg/L (muestras 2 y 12) alineándose con los resultados de Pujaico y Acuña (2019), Respecto a los sólidos totales en suspensión, las concentraciones variaron entre 0.0046 y 0.0074 mg/L, cifras muy por debajo del promedio típico de aguas residuales domésticas, esta reducción podría deberse al atrapamiento de partículas coloidales por las burbujas de gas y los flóculos metálicos generados, como lo describen Macérak et al. (2024), En cuanto a aceites y grasas, todos los valores estuvieron por debajo del límite de detección, demostrando una remoción completa, lo cual coincide con estudios de Limaymanta (2023), quien resalta la alta eficiencia de la electrocoagulación para este tipo de compuestos hidrofóbicos. Los resultados más destacables se observan en la reducción de coliformes termotolerantes, que disminuyeron de un valor inicial de  $3.5 \times 10^{-7}$  NMP/100 mL a menos de 1.8 NMP/100 mL en los tratamientos 8 y 12 superando el 99.9 % de eliminación, similares a los resultados obtenidos por Ozyonar y Korkmaz (2022) y Ramón (2020).

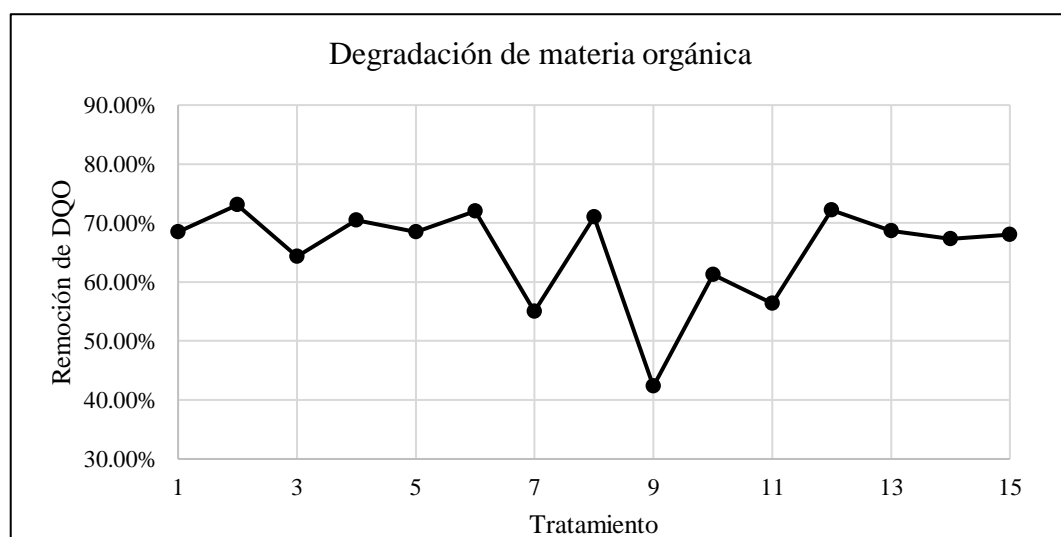
#### **4.4 Diseño estadístico de la investigación**

Las variables en estudio fueron el pH, el tiempo de tratamiento, y la densidad de corriente; la variable respuesta fue la eficiencia de reducción de DQO. Las variables se evaluaron a través del diseño Box Behnken. Los resultados de la eficiencia de reducción de DQO en los diseños se muestran en las tablas siguientes:

Las eficiencias alcanzadas en degradación de la materia orgánica, mediante las pruebas de electrocoagulación a determinadas condiciones de pH, tiempo y densidad de corriente se muestran en la tabla 10.

**Tabla 10***Eficiencia (%) de reducción de materia orgánica medible en DQO*

Unidad Muestra	Factores			DQO (Inicial)	DQO (Final)	Remoción (%)
	pH	T (min)	Corriente (A/m <sup>2</sup> )			
1	5	15	6.5	643.9	203	68.47
2	5	45	6.5	643.9	173.4	73.07
3	6.5	15	6.5	643.9	229.5	64.36
4	6.5	45	6.5	643.9	189.9	70.51
5	5	30	4	643.9	203.1	68.46
6	5	30	9.8	643.9	180	72.05
7	6.5	30	4	643.9	289.7	55.01
8	6.5	30	9.8	643.9	186.6	71.02
9	6	15	4	643.9	371.4	42.32
10	6	15	4	643.9	280.9	56.38
11	6	45	9.8	643.9	249.7	61.22
12	6	45	9.8	643.9	179	72.20
13	6	30	6.5	643.9	202	68.63
14	6	30	6.5	643.9	210.5	67.31
15	6	30	6.5	643.9	206	68.01

*Nota: Los datos reflejan la eficiencia del proceso de electrocoagulación***Figura 12***Eficiencia de reducción de la materia orgánica (DQO).**Nota: La figura muestra la variación de la eficiencia de remoción de DQO*

En la tabla 10 y figura 12 se evidencia que la eficiencia de reducción de DQO varió entre 42.32 % y 73.07 %, con un promedio superior al 65 % en la mayoría de las condiciones evaluadas. La mayor eficiencia de remoción fue de 73.07 % (experimento 2), en condiciones de pH 5, 45 minutos de tratamiento y una densidad de corriente de 6.5 A/m<sup>2</sup>, por el contrario, la menor eficiencia se visualiza en el (experimento 9) con remoción de 42.32 % de DQO a pH 6, 15 minutos de tratamiento y corriente de 4 A/m<sup>2</sup>.

Estos resultados se pueden comparar con la investigación realizada por Bote (2021), investigación sobre la combinación de electrodos para la eliminación de aguas residuales domesticas mediante electrocoagulación, logro mayor eliminación de DQO al aumentar el tiempo de reacción y la densidad de corriente, logrando 87.5 % de remoción de DQO, empleando pH de 9, densidad de corriente de 45 A/m<sup>2</sup> en un tiempo de 60 min, empleando una distancia de 1cm entre los electrodos. Asimismo, Nawarkara y Salkar (2019), lograron una remoción de 92.01 % y 90 % de DQO al emplear densidad de corriente de 48 A/m<sup>2</sup> en un tiempo de 16 min, con distancia de 1 cm entre electrodos. Ozyonar y Korkmaz (2022), obtuvieron una remoción de 90.2 % de DQO a un pH de 7.8, densidad de corriente de 100 A y en un tiempo de 20 min.

Aguilar (2018), indica que a mayor intensidad de corriente la eliminación de DQO es más rápida, debido a la producción de oxígeno esto similar a los hallazgos de Pujairo y Acuña (2019), quienes obtuvieron una eficiencia de 64.8 % de remoción de DQO a un pH de 5.6, densidad de corriente 6.5 en un tiempo de 42 minutos, se observó una tendencia general a mejores rendimientos con pH ácido, similar a nuestro trabajo donde en el tratamiento 3 se obtuvo el mayor % de remoción de DQO en un medio acido.

En resumen, En todas las investigaciones mencionadas se observa que a medida que aumenta la densidad de corriente y a medida que aumenta el tiempo de reacción, aumenta la eficiencia de eliminación de DQO. Los mayores porcentajes de remoción se asocian a tiempos de tratamiento  $\geq 30$  minutos y densidades de corriente  $\geq 6.5$  A/m<sup>2</sup>, alcanzando eficiencias de hasta 73.07 %, lo que valida la efectividad de la electrocoagulación alimentada con energía fotovoltaica como una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

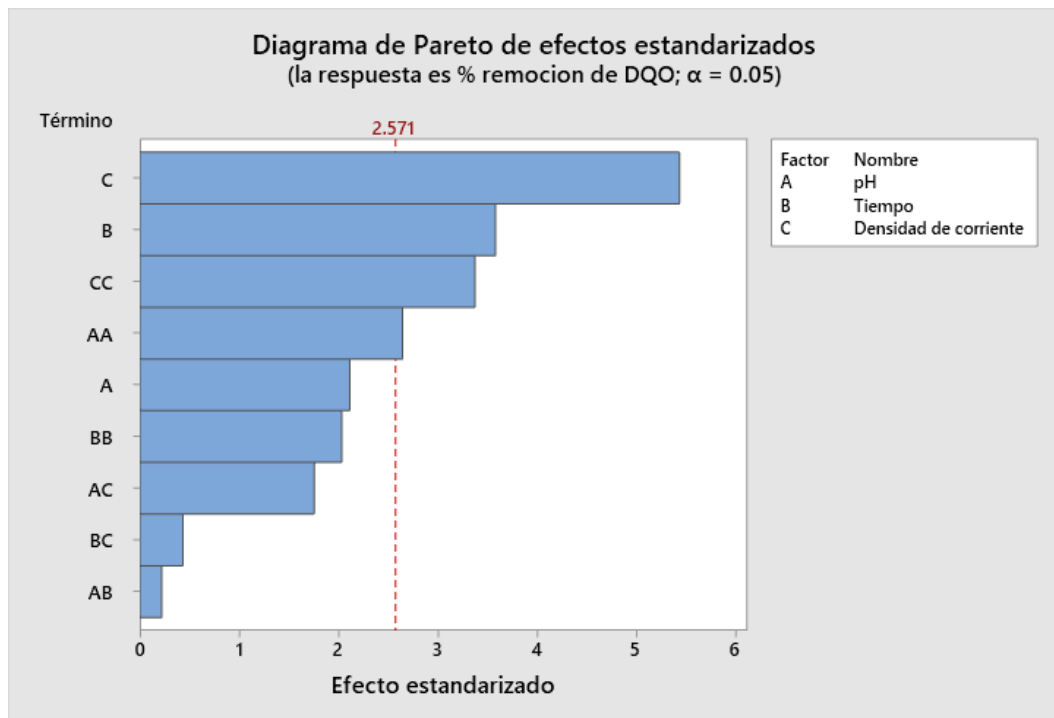
## 4.5 Análisis estadístico

### - Diagrama de Pareto

Los diagramas de Pareto se graficaron utilizando el paquete Minitab 19. En la figura 12, se muestra el diagrama de Pareto en la cual se representan los efectos estandarizados de las variables como el pH, tiempo de tratamiento y densidad de corriente para un nivel de confianza del 95 % ( $p = 0.05$ ).

### Figura 13

*Diagrama de Pareto para las variables*



*Nota:* La figura muestra los factores con mayor impacto en la eficiencia del proceso de tratamiento

En la figura 13, se evidencia que la variable densidad de corriente tiene el mayor efecto estandarizado y excede el umbral de significancia (2.571), lo que significa que es el factor más influyente en la eficiencia de remoción de DQO. La variable Tiempo también es estadísticamente significativo, aunque con un efecto menor al de la corriente. La interacción cuadrática de la densidad de corriente también supera el umbral de significancia, lo que representa que la relación no lineal de la corriente con la remoción de DQO es significativa, interpretando que valores extremos de corriente (muy altos o muy bajos) no se comportan linealmente. Los términos pH cuadrático, pH y tiempo cuadrático están por debajo del umbral crítico, por lo tanto,

no son significativos en este modelo con  $\alpha = 0.05$ , es decir, que, aunque el pH influye en la eficiencia de tratamiento, su efecto no es estadísticamente significativo comparado con los otros factores. Finalmente, Las interacciones dobles (pH-corriente, tiempo-corriente, pH-Tiempo) tienen efectos estandarizados muy bajos, y no son significativas.

La densidad de corriente y el tiempo de tratamiento son los factores más importantes para mejorar la remoción de DQO en este proceso. La optimización del tratamiento de electrocoagulación debe enfocarse principalmente en ajustar estos dos parámetros.

#### - Modelos de regresión

Se utilizó el paquete Minitab 19 para la determinación de los coeficientes de regresión del modelo. Los resultados se muestran en la tabla 11.

**Tabla 11**

*Coefficientes del modelo de regresión*

<b>Término</b>	<b>Coef</b>	<b>EE del coef.</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
Constante	67.98	2.04	33.28	0.000	
pH	-2.64	1.25	-2.11	0.088	1.00
Tiempo	4.47	1.25	3.58	0.016	1.00
Densidad de corriente	6.79	1.25	5.43	0.003	1.00
pH*pH	4.86	1.84	2.64	0.046	1.01
Tiempo*Tiempo	-3.74	1.84	-2.03	0.098	1.01
Densidad de corriente*Densidad de corriente	-6.21	1.84	-3.37	0.020	1.01
pH*Tiempo	0.39	1.77	0.22	0.835	1.00
pH*Densidad de corriente	3.10	1.77	1.76	0.140	1.00
Tiempo*Densidad de corriente	-0.77	1.77	-0.44	0.682	1.00

*Nota:* Esta tabla muestra el efecto de los factores y sus interacciones en el proceso

Así mismo, el modelo de regresión en términos de sus variables naturales se representa mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{\% remoción de} &= 67.98 - 2.64\text{pH} + 4.47\text{T} + 6.79\text{C} + 4.86 \text{pH}^2 - 3.74\text{T}^2 - 6.21\text{C}^2 \\ \text{DQO} &+ 0.39\text{pH}*\text{T} + 3.10\text{pH}*\text{C} - 0.77\text{T}*\text{C} \end{aligned}$$

Donde:

pH : pH

T : Tiempo

C : densidad de corriente

En el análisis de modelo de regresión de la talla 11, se observa que la densidad de corriente (coef = 6.79, p = 0.003) es el factor más influyente en la eficiencia de remoción de DQO, con una relación positiva significativa, esto indica que a mayores densidades de corriente favorecen la generación de coagulantes, mejorando la remoción de materia orgánica como lo indica Abbass et al., (2024). El tiempo de tratamiento también tiene una relación positiva y significativa (coef = 4.47, p = 0.016), lo que respalda la idea de que más tiempo de electrocoagulación mejora la eficiencia de remoción de DQO, Nawarkara y Salkar (2019).

Por otro lado, el pH muestra una relación negativa marginalmente significativa (coef = -2.64, p = 0.088), sugiriendo que pH más bajos favorecen la remoción de DQO, lo cual está en línea con la literatura que señala que valores alcalinos pueden dificultar la coagulación.

Respecto a las interacciones entre los factores pH, tiempo y densidad de corriente no son significativas, ya que sus valores p son mayores a 0.05, lo que indica que los efectos individuales de cada factor tienen mayor impacto que sus combinaciones.

#### - **Análisis de varianza**

En la tabla 12 se muestran los análisis de varianza para el % eficiencia de reducción de DQO. En el análisis de varianza, se evaluó la significancia de todos los efectos e interacciones del modelo de regresión obtenido para un nivel de probabilidad del 5 %.

**Tabla 12***Análisis de varianza para el % de eficiencia de reducción de DQO*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	924.308	102.701	8.20	0.016
Lineal	3	584.864	194.955	15.57	0.006
pH	1	55.915	55.915	4.47	0.088
Tiempo	1	160.116	160.116	12.79	0.016
Densidad de corriente	1	368.833	368.833	29.46	0.003
Cuadrado	3	297.908	99.303	7.93	0.024
pH*pH	1	87.345	87.345	6.98	0.046
Tiempo*Tiempo	1	51.681	51.681	4.13	0.098
Corriente*Corriente	1	142.333	142.333	11.37	0.020
Interacción de 2 factores	3	41.536	13.845	1.11	0.429
pH*Tiempo	1	0.601	0.601	0.05	0.835
pH*Densidad de corriente	1	38.564	38.564	3.08	0.140
Tiempo*Densidad de corriente	1	2.372	2.372	0.19	0.682
Error	5	62.599	12.520		
Falta de ajuste	3	61.727	20.576	47.20	0.021
Error puro	2	0.872	0.436		
Total	14	986.906			

*Nota:* Esta tabla indica que los factores y términos cuadráticos tiene influencia significativa en la eficiencia de reducción de DQO.

Según la tabla 12, el modelo en conjunto es significativo (valor  $p = 0.016 < 0.05$ ), lo que indica que los factores considerados explican de manera importante la variabilidad en el porcentaje de remoción de DQO.

Efectos lineales: El efecto lineal de los factores también es significativo (valor  $p = 0.006$ ), por lo que las variables pH, tiempo y densidad de corriente, consideradas individualmente, tienen un impacto notable en la remoción de DQO.

Factores individuales:

- pH: No es estadísticamente significativo al nivel de 0.05 (Valor  $p = 0.088 > 0.05$ ), aunque muestra una tendencia a influir.
  - Tiempo: Es significativo (valor  $p = 0.018$ ), indicando que el tiempo de tratamiento tiene un efecto considerable en la remoción de DQO.
  - Densidad de corriente: Es altamente significativo (valor  $p = 0.003$ ), siendo uno de los factores más influyentes en el proceso de tratamiento.
- Términos cuadráticos (efectos de segundo orden):
- El conjunto de términos cuadrados es significativo (valor  $p = 0.024$ ), lo que sugiere que existe una curvatura en la relación entre los factores y la remoción de DQO.
  - $pH^2$ : Es significativo (valor  $p = 0.046$ ), indicando que los efectos no lineales del pH son importantes.
  - $Tiempo^2$ : No es significativo (valor  $p = 0.098$ ), aunque se acerca al nivel de significancia.
  - $Corriente^2$ : Es significativo (valor  $p = 0.020$ ), confirmando que el efecto cuadrático de la densidad de corriente tiene un impacto notable.

#### Interacciones de dos factores:

- El conjunto de interacciones no es significativo (valor  $p = 0.429$ ), indicando que la interacción combinada entre los factores no explica de manera importante la variabilidad de la remoción de DQO.
- Individualmente:
  - $pH * Tiempo$ : No es significativo (valor  $p = 0.835$ ).
  - $pH * Densidad\ de\ corriente$ : No es significativo (valor  $p = 0.140$ ).
  - $Tiempo * Densidad\ de\ corriente$ : No es significativo (valor  $p = 0.682$ ).

Error: El error es relativamente bajo (62.599), lo que indica que el modelo captura adecuadamente la mayor parte de la variabilidad.

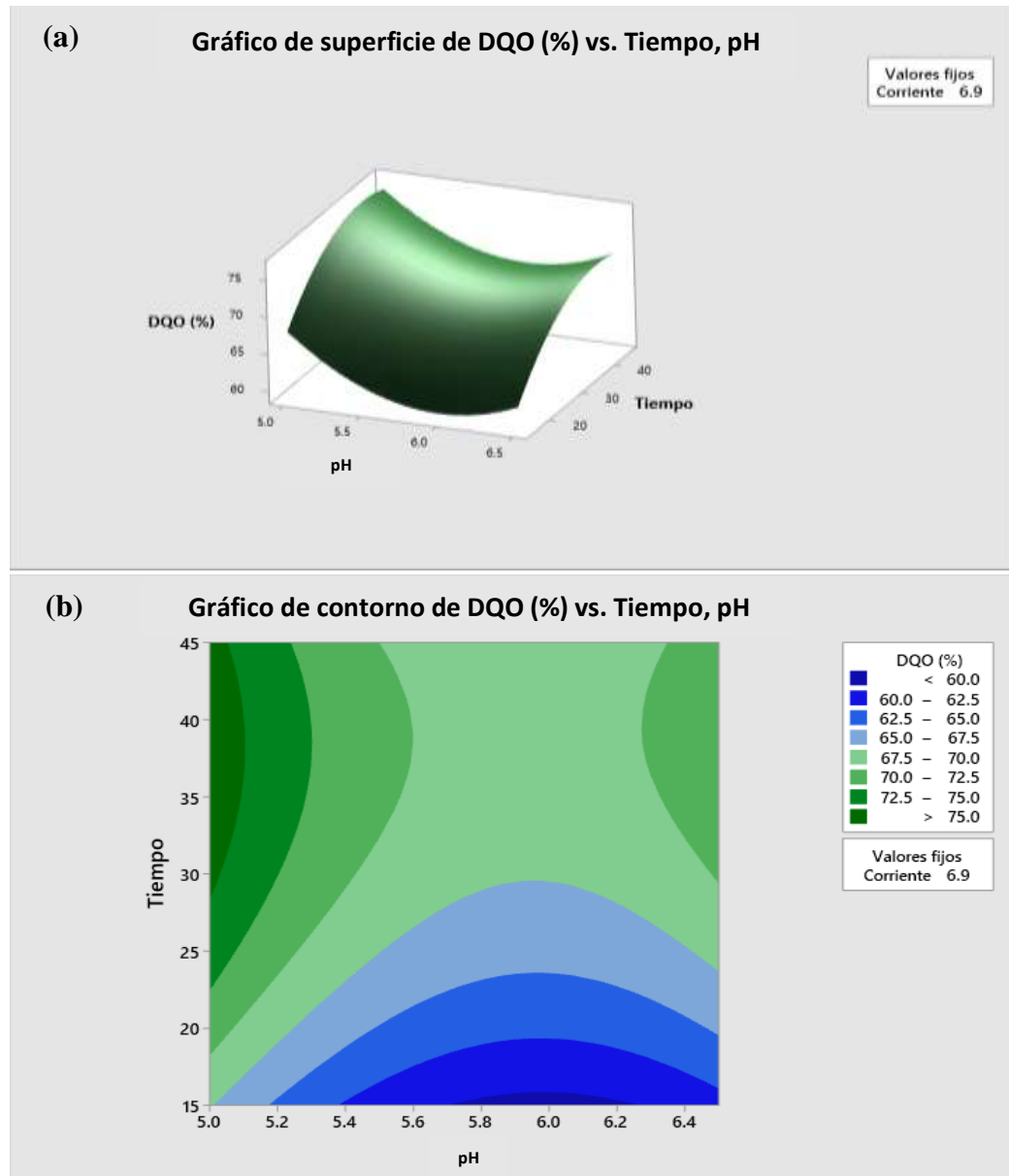
Falta de ajuste: Existe una falta de ajuste significativa (Valor  $p = 0.021$ ), lo cual sugiere que el modelo podría mejorarse (por ejemplo, incorporando otros términos o factores no considerados en el análisis actual).

- **Superficie de respuesta y gráfico de contorno**

En las figuras 14 se representan las superficies de respuesta y gráficos de contorno de los modelos de regresión para el porcentaje de la eficiencia de reducción de la DQO.

**Figura 14**

*Efecto del pH y tiempo para él % eficiencia de reducción de DQO*

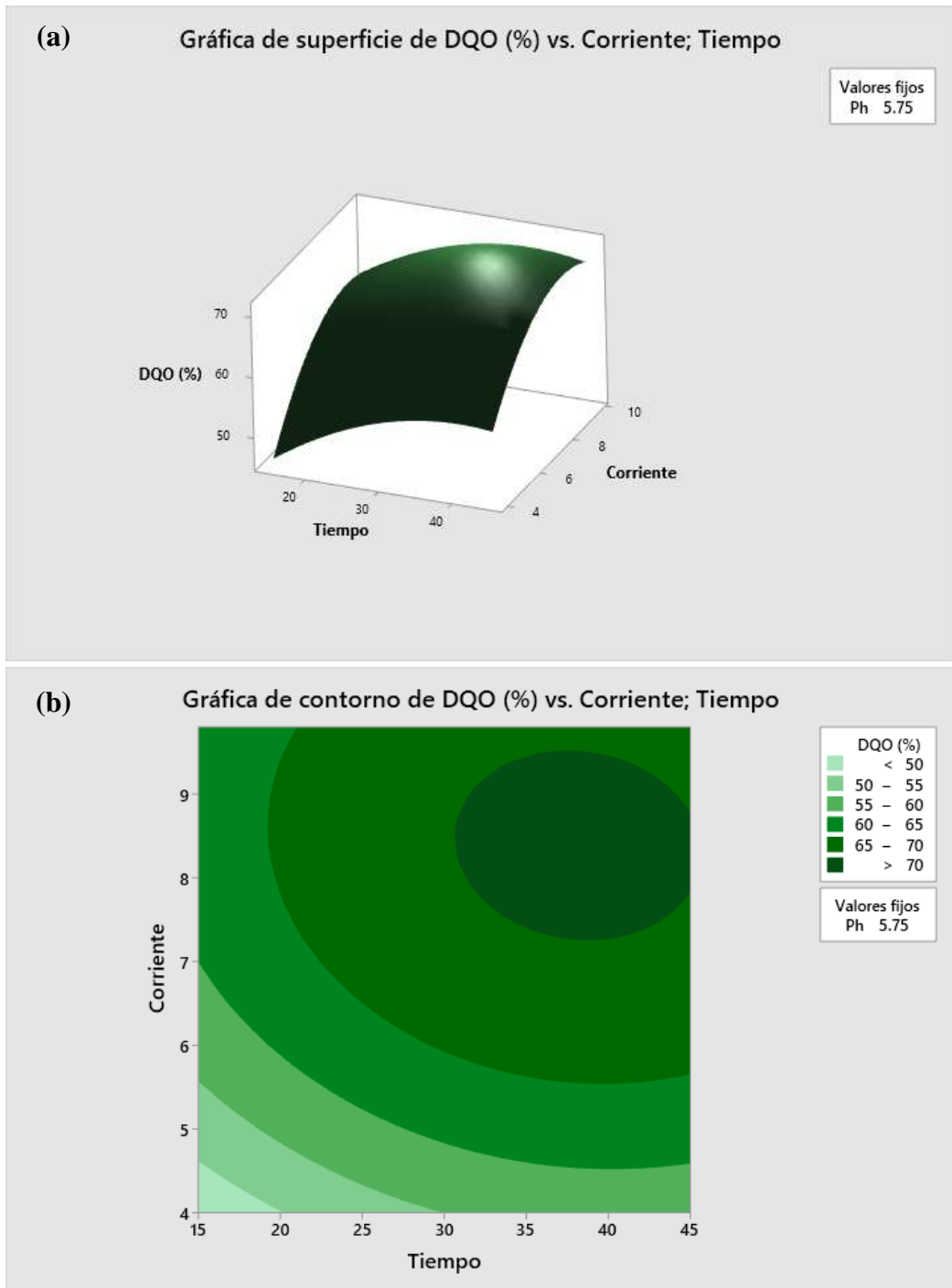


*Nota:* Esta figura permite identificar las condiciones óptimas de pH y tiempo

En la figura 14, se visualiza que se pueden obtener un alto porcentaje de eficiencia de reducción de materia orgánica medible en DQO mayor al 75 % en el intervalo de pH de 5.0 a 5.10 y tiempo de 28.6 a 45 minutos.

**Figura 15**

*Efecto de la densidad de corriente y tiempo respecto al porcentaje de remoción*

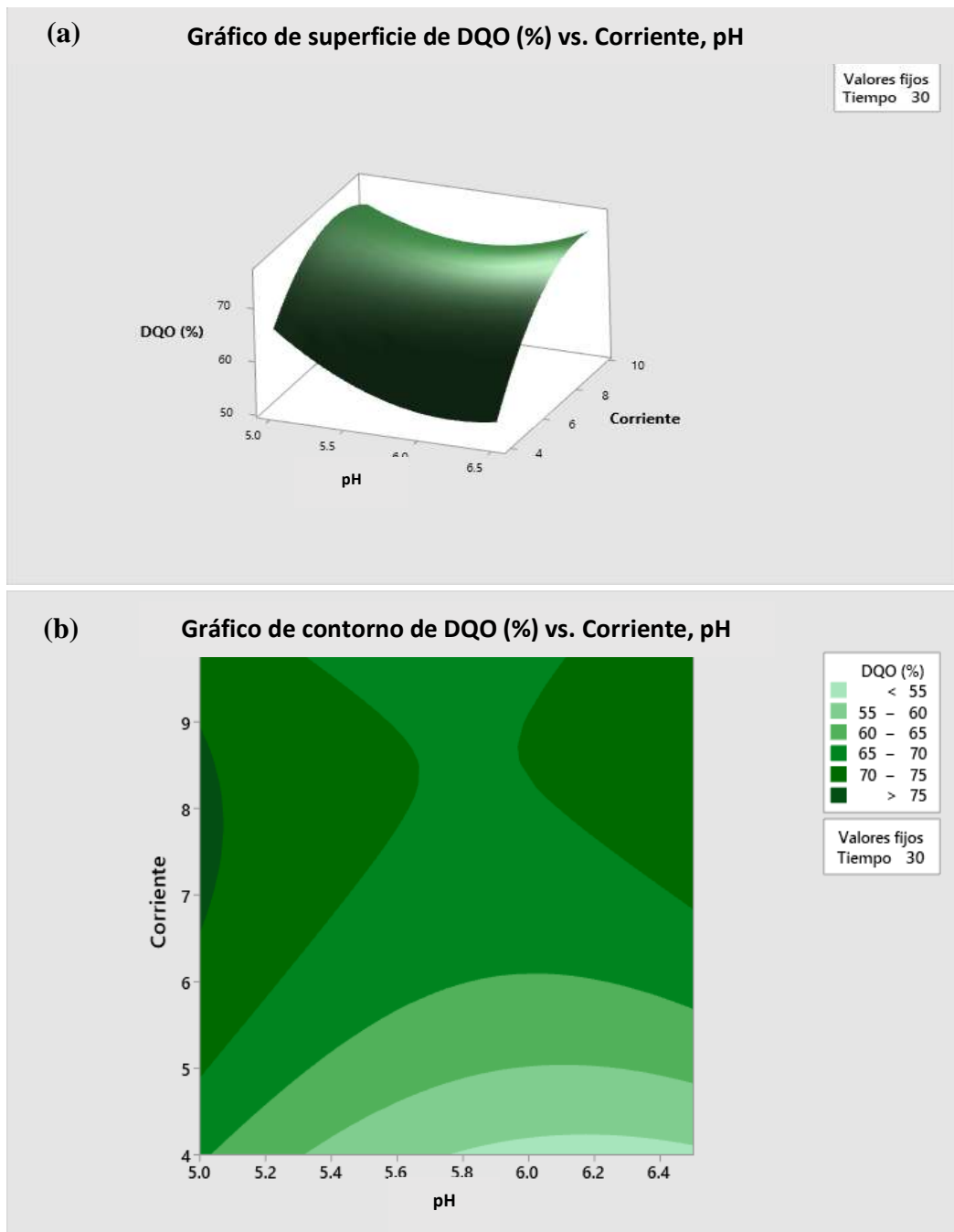


*Nota:* Esta figura muestra la interacción de densidad de corriente y el tiempo sobre la eficiencia de remoción de DQO

La Figura 15, se observa que a una densidad de corriente de 8.4 A/m<sup>2</sup> y tiempo de tratamiento 38.5 minutos se obtiene un porcentaje de eficiencia de reducción de materia orgánica medible en DQO de 70.94 %.

**Figura 16**

*Efecto del pH y la densidad de corriente respecto al porcentaje de remoción de*



*Nota:* Esta figura muestra la interacción de pH y la densidad de corriente sobre la eficiencia de remoción de DQO mediante el gráfico de superficie y contorno

La figura 16, se observa que en el rango de pH de 5 a 5.07 y densidad de corriente de 6.6 a 8.9 A/m<sup>2</sup> se obtiene un porcentaje de eficiencia de reducción de materia orgánica representada como DQO mayor al 75 %.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 conclusiones

El análisis de los parámetros de campo de las aguas residuales del distrito se Chupa presentó: Temperatura de 17.12 °C, pH de 5.70, Conductividad eléctrica de 2070  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y oxígeno disuelto de 1.37 mg/L.

La caracterización inicial de parámetros fisicoquímicos y biológica de las aguas residuales domesticas provenientes del distrito de Chupa presentaron las siguientes concentraciones: DQO de 643.9 mg/L, DBO5 de 298.3 mg/L, solidos totales en suspensión de 0.0193 mg/L, aceites y grasas de 12.5 mg/L y coliformes termotolerantes de  $3.5 \times 10^{-7}$  NMP/100mL donde los parámetros como DQO, DBO5 y coliformes termotolerantes superan significativamente los límites máximos permisibles.

Tras aplicar el proceso de electrocoagulación alimentada con energía fotovoltaica redujo la concentración de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de agua residual doméstica. Los factores tiempo y densidad de corriente tienen un efecto significativo en la remoción de DQO, se redujo de un valor inicial de 643.9 mg/L a un mínimo de 173.4 mg/L (Tratamiento 2), DBO5 de 298.3 a 87.0 mg/L, solidos totales en suspensión de 0.0193 a 0.005 mg/L, aceites y grasas de 12.5 a <5 mg/L, coliformes termotolerantes de  $3.5 \times 10^7$  a <1.8 NMP/100mL.

## 5.2 Recomendaciones

Se recomienda trabajar con densidad de corriente elevada, a mayor tiempo, tomar en cuenta el espacio de las celdas como un factor y además evaluar el material del electrodo

Se recomienda tener control con los parámetros pH y temperatura del agua residual posterior al proceso de la electrocoagulación.

Se recomienda incluir la evaluación de la turbiedad como una variable de respuesta clave, parámetro que permite medir de forma directa la eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos.

Se recomienda aplicar otro diseño experimental con el objetivo de optimizar con mayor precisión el proceso de electrocoagulación.

Se recomienda continuar con la investigación enfocadas en la investigación enfocadas en la optimización del proceso de electrocoagulación, mediante la modificación de variables independientes con el objetivo de incrementar la remoción de contaminantes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbass, R. F., Amooey, A. A., & Yasir AlJaberi, F. (2024). Electrocoagulation removal of COD and TDS from real municipal wastewater sourced from the Euphrates River using multipole arrangement. *Results in Chemistry*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101613>
- Aguilar, E. A. (2018). Elimination of chemical oxygen demand from domestic residual water by electrocoagulation with aluminium and iron electrodes. *Revista Ambiente e Agua*, 9(3). <https://doi.org/doi:10.4136/ambi-agua.2240>
- Alhogbi, B. G. (2020). Uso De La Electrocoagulación Como Alternativa Para La Eliminación De Microplásticos Presentes En Las Aguas Residuales Urbanas. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 21–25.
- Amanca, H., & Ramírez, J. (2024). Tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de anta mediante el proceso de electrocoagulación. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Ankoliya, D., Mudgal, A., Sinha, M. K., Patel, V., & Patel, J. (2023). Aplicación del proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales lácteas: Una mini revisión. *Materials Today: Proceedings*, 77, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.254>
- Apaza, H. (2018). Sistema combinado electrocoagulación-filtro biológico para la remoción de carga orgánica de los efluentes lácteos. *Universidad Nacional Agraria La Molina*, 127.
- Apráez Aragón, C. S., & García Garay, J. S. (2015). Universidad de La Salle Análisis de la electrocoagulación como tecnología eficiente para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil Citación recomendada. 1–99.
- Arango, Á. (2012). Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Producción + Limpia*, 7(1), 59–67.
- Arango Ruiz, Á. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 49–56.

- Arceda, M., & Hernandez, A. (2021). Proyecto de riego por goteo utilizando energía solar para el cultivo de aguacate en la finca ojo de agua en la localidad de san francisco libre. Managua: Universidad nacional de ingeniería.
- Arizaca, A. (2022). Energía fotovoltaica aplicado en un sistema de riego por aspersión en el Centro Experimental Chuquibambilla. Universidad Nacional del Altiplano, 1 - 11.
- Ayunque, J., & Carhuapoma, j. (2021). Eficiencia de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio para tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica. Huancavelica: Universidad Nacional de Huancavelica.
- Astete, R., Astete-Tebes, R., Gallegos Rojas, E., Apaza, F. H., & Torres Cruz, E. (2022). *Electrocoagulación en las aguas residuales de las plantas queseras*.
- Baca N. Máximo F. (2018). “Evaluación De Un Sistema De Tratamiento Continuo Por Electrocoagulación Para Los Efluentes Domésticos Y Su Reúso En El Riego De Jardines Y Áreas Verdes.” *Univerdidad Nacional Del Callao*, 1, 84. <http://hdl.handle.net/20.500.12952/5053>
- Baltazar, M. (2020). Sistema de bombeo solar fotovoltaica para abastecimiento de agua en la I.E.P. Apóstol San Pedro del distrito tres de diciembre. Huancayo: Universidad Nacional del control del Perú
- Banco Mundial. (2023). Perú: Acciones Estratégicas para la Seguridad Hídrica. Washington: World Bank Publications.
- Bardales, M. C., Azabache, Y. D., Ordoñez, K. M., & Chuquimbalqui, M. (2025). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: Análisis bibliométrico de publicaciones científicas y revisión de resultados. *Rev. Amaz. Cienc. Ambient. Ecol*, 4(1). <https://doi.org/10.51252/reacae.v4i1.e802>
- Boinpally et al. (2023). A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. *Water Cycle*, 26–36.
- Bote, M. E. (2021a). Studies on electrode combination for COD removal from domestic wastewater using electrocoagulation. *Heliyon*, 7(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08614>

- Buslima, F. A., Abu Hasan, H., Alias, J., Jaganathan, J. S., Buhari, J., Subramanian, S. V., & Abdullah, S. R. S. (2025). Performance of Integrated Biofilm-Phytoremediation Process in Reclaiming Water from Domestic Wastewater. *Water (Switzerland)*, *17*(2). <https://doi.org/10.3390/w17020163>
- Cancapa, A. (2019). Eficienci de la electrocoagulación en la reducción de materia orgánica presente em las aguas residuales domesticas bajo condiciones alto andinas (Juliaca - Puno). *UPeU*, 174.
- Carolina, L., Huertas, C., Alberto, C., & Huapaya, A. (2022). Condiciones técnicas del proceso de electrocoagulación para una remoción eficiente de cromo y DQO en aguas residuales industriales de curtiembre. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *6*(2), 917–942. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v6i2.1929](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i2.1929)
- Ccarhuarupay, I., & Nina, D. (2022). Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en la comunidad campesina de Laspay, distrito de Huanoquite, provincia de Paruro, región Cusco - 2021. Cusco: Universidad Continental.
- Cuba, M. (2023). “Tratamiento de agua residual procedente de lavadoras por el método de electrocoagulación para la reutilización en riego de vegetales - Ate Vitarte. *2020 Orange Book of Results - Volume 3*, 236–237. <https://doi.org/10.18356/9789210057738c109>
- Drouiche, N., Lounici, H., Drouiche, M., Mameri, N., & Ghaffour, N. (2009). Eliminación de fluoruro de aguas residuales fotovoltaicas mediante electrocoagulación y características de los productos. *Desalination and Water Treatment*, *7*(1–3), 236–241. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.694>
- Forero Buitrago, G. A. (2020). Electrocoagulación para la desalinización del agua de mar. *Revista de Tecnología*, *17*(1), 94–99. <https://doi.org/10.18270/rt.v17i1.2956>

- García-Orozco, V. M., Linares-Hernández, I., Natividad, R., Balderas-Hernández, P., Alanis-Ramírez, C., Barrera-Díaz, C. E., & Roa-Morales, G. (2022b). Electrocoagulación solar-fotovoltaica de aguas residuales de un chocolate. industria manufacturera: Efecto material anódico (aluminio, cobre y zinc) y evaluación del ciclo de vida. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107969>
- Gómez, A. (2021). Diseño de un proceso de tratamiento de aguas residuales urbanas para una pequeña población. Estudio comparativo. *Universidad de Valladolid*, 31.
- González-Fragozo, H. E., Zabaleta-Solano, C., Devia-González, J., Moya-Salinas, Y., & Afanador-Rico, O. (2020). Effect of irrigation with treated wastewater on microbiological quality of the soil and King Grass. *Actualidad and Divulgacion Cientifica*, *23*(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1513>
- Hernandez - Sampieri, R., Fernandez - Collado, C., & Baptista, M. del P. (2014). Metodología de la Investigación. In *Metodología de la investigación* (5th ed.). Mac Graw-Hill Interamericana.
- Huaman, D. (2024). *Remoción de contaminantes fisicoquímicos en aguas residuales domésticas a nivel de laboratorio adsorción*. Huancayo: Universidad Continental.
- Huaraco, R. (2023). *Evaluación de las condiciones de instalación del sistema de bombeo con paneles fotovoltaicos para el abastecimiento de agua potable en el distrito de Atuncolla-Puno*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Humpire, F. (2022). *Efecto del pH y tiempo en la depuración de lactosuero residual por electrocoagulación*. 1–110.
- Hussin, F., Abnisa, F., Issabayeva, G., & Aroua, M. K. (2017). Removal of lead by solar-photovoltaic electrocoagulation using novel perforated zinc electrode. *Journal of Cleaner Production*, *147*, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.096>
- Ibrahimi, S. (2025). *Machine Translated by Google Revista de Ingeniería de Procesos del Agua Tratamiento de nanofiltración y electrocoagulación del*

*Baño Morisco Aguas residuales para riego: estudio de de de Túnez Djamel*  
*Machine Translated by Google.*

Intriago, B., & Vergara, W. (2024). *Electrocogulación para tratamiento de aguas residuales en el hato porcino de la espam MFL*. Calceta-Ecuador: Escuela superior politécnica agropecuaria de Manabí Mnuel Félix López.

Jalca Cabañas, E., Espinoza Canaza, F., Gosgot Angeles, W., & Rivera López, R. Y. (2022). Análisis energético de un sistema híbrido fotovoltaico-térmico bajo las condiciones climáticas de Chachapoyas, Amazonas, Perú. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 6(1), 66–73. <https://doi.org/10.25127/aps.20221.856>

Jiménez, R. (2021). *Estudio y diseño de una instalación solar fotovoltaica para el bombeo de agua para riego de 14 hectareas para viñedo en el fundo “El Cortijo” - Chile*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.

Limaymanta, M. M. (2023). *Depuración de aguas residuales urbanas por el Método de electrocoagulación del colector San Juan - Cerro de Pasco*.

Llanca, W. (2021). *Diseño de un sistema hidráulico de extracción de agua salobre de pozo profundo para satisfacer la demanda de planta de tratamiento de agua para la empresa*. Callao: Universidad nacional del Callao.

Luicho, E. (2023). “Estudios realizados sobre la tecnología de electrocogulación para la disminución de turbidez y demanda química de oxígeno en el tratamiento de aguas residuales de la industria lactea.” *Ucv*, 0–116.

Macérak, A. L., Dudukovic, N., Kiss, F., Slijepcevic, N., Pesic, V., & Kerkez, D. (2024). *Electrocoagulation in treatment of municipal wastewater – life cycle impact assessment*. 355(March). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141701>

MINAM. (2010). *Límites Máximos Permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas o municipales*.

- Ministerio de Salud. (2023). *Casos notificados de enfermedades diarreicas agudas*.
- Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento. (2015). *Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales*. Lima, 31.
- Martínez Navarro, F. (2007). Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. In *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.  
<https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/984/251> Tratamiento de aguas residuales industriales.pdf
- Mejía, E. (2019). Diseño de un sistema fotovoltaico autónomo para el suministro de energía eléctrica al laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Amazónica. *Revista Científica Pakamuros*, 73 - 88.
- Mohamad, H. A. E. D., Hemdan, M., Bastawissi, A. A. E. D., Bastawissi, A. E. D. M., Panchal, H., & Sadasivuni, K. K. (2021a). Industrial wastewater treatment by electrocoagulation powered by a solar photovoltaic system. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*.  
<https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1950870>
- Montes, M. (2023). *Evaluación de la eficiencia de la electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales de la junta administradora de servicios de saneamiento bello horizonte (Arequipa)*. Lima: Universidad Científica.
- Muñoz Espitia, M. Á., Cortés Bermúdez, J. D., & Agudelo Valencia, R. N. (2022). Electrocoagulación con electrodos de aluminio para tratamiento de aguas residuales de curtiembres en Villapinzón, Cundinamarca, Colombia. *Revista Mutis*, 12(1). <https://doi.org/10.21789/22561498.1783>
- Navas-Gallo, N. A., Vargas-Díaz, C. E., & Rodríguez-Esteban, L. M. (2024). Alteración de la calidad del agua por el vertido de aguas residuales en el municipio de San Benito, Colombia. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 3(1), e634. <https://doi.org/10.51252/reacae.v3i1.634>

- Nawarkar, C. J., & Salkar, V. D. (2019). Solar powered Electrocoagulation system for municipal wastewater treatment. *Fuel*, 237, 222–226. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.140>
- Ocampo-Rodríguez, D. B., Quero-Gutiérrez, E., & León-Castelazo, Y. (2018). Tratamiento de lodos generados por electrocoagulación de lixiviados del relleno sanitario El Huixmí. *Revista de Tecnologías En Procesos Industriales*, 2(5), 1–6.
- Osorio-Rivera, M. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. *Pol.Con.*, 6(3), 228245. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2360>
- Ozyonar, F., & Korkmaz, M. U. (2022). Sequential use of the electrocoagulation-electrooxidation processes for domestic wastewater treatment. *Chemosphere*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133172>
- Pacori, E. W., & Pacori, A. K. (2018). Metodología y diseño de la investigación científica. FFECAAT E.I.R.L.
- Palomino, G., & Ramos, C. (2021). *Revisión sistemática sobre la aplicación de electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea*. Lima: Universidad César Vallejo.
- Paricahua, E. (2022). *Evaluación de la operatividad de la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Ayaviri, provincia de Melgar - Puno*. 191.
- Phu, T. K. C., Nguyen, P. L., & Phung, T. V. B. (2025). Recent progress in highly effective electrocoagulation-coupled systems for advanced wastewater treatment. In *iScience* (Vol. 28, Issue 3). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.111965>
- Pujaico, J. F., & Acuña, G. (2019). *Condiciones óptimas de operación en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en las aguas residuales domésticas*.
- Rafael, J., Cuicas, P., Lisbeth, R., & Cuadra, A. (2017). Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable. *Química Viva*, 16, 56–69.

- Ramón, Y. (2020). Aplicación de la electrocoagulación como alternativa de remoción de sólidos suspendidos totales presentes en las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, 2020. *Tesis*, 1–60.
- Rani, P., Chakraborty, M. K., Sah, R. P. R. P. R. P., Subhashi, A., Disna, R., UIP, P., Chaudhary, D. P., Kumar, A. A. A. A. A., Kumar, R. R., Singode, A., Mukri, G., Sah, R. P. R. P. R. P., Tiwana, U. S., Kumar, B., Madhav, P., Manigopa, C., Z, A. H., Anita, P., Rameshwar, P. S., ... Kumar, A. A. A. A. A. (2020). La electrocoagulación como alternativa de tratamiento para la reducción de los niveles de DQO en las aguas residuales industriales de la empresa un solo proveedor S.A.S, ubicada en el municipio de Itagüí Antioquia. *Range Management and Agroforestry*, 4(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.020>
- Rodríguez, Y.; Fuentes, M.; Beleño, O.; & Montoya, L. (2021). *Electrocoagulación como alternativa de tratamiento de aguas residuales mixtas originadas en la industria del procesamiento de lácteos y cárnicos*. 25(67), 26–39.
- Salazar, J. (2020). Evaluación del impacto de las aguas residuales sobre la calidad del agua del río Tarma en el periodo 2015 - 2019. *Tesis*, 1–120.
- Salgot, M., & Folch, M. (2018). Wastewater treatment and water reuse. . *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 64–74.
- Santiago, M. (2020). *Tratamiento por electrocoagulación O3/UV para la degradación de índigo carmín presente en agua contaminada*.
- Sakti, A., K Laohhasurayotin, K., & Opaprakasit, P. (2024). Water-Energy Nexus Flow Analysis of a Wastewater Treatment Plant in Thailand. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1-14.
- SMEWW-APHA-AWWA-WEF. (2017). *Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Prueba de DBO de 5 días. En Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales* (23 ed.). Madrid: Diaz de Santos.
- Tahreen, A., Jami, M., & Ali, F. (2020). Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. *Journal of Water Process Engineering*, 1 - 23.

- Tapara, V. (2022). *Electrocoagulación en la depuración de aguas residuales de una planta de productos lácteos*. Huancayo: Universidad Nacional del Peru
- Taylor Tórrez, A. R., & Cordon Suárez, E. (2022). Calidad de agua potable y su efecto en la salud de la comunidad de Kamla, Costa Caribe Norte de Nicaragua. *Ciencia e Interculturalidad*, 20(1), 78–93. <https://doi.org/10.5377/rci.v20i1.4855>
- Ticona, M., & Ccasani, G. (2024). *Optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales con contenido de grasas y aceites producto del lavado de vehículos de carga pesada por electrocoagulación*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustin de Arequipa.
- Trillo, F. (2019). *Bombeo mediante energía solar fotovoltaica para riego de Olivar*. Jaen: Universidad de Jaen.
- Vásquez perdomo, F. (2020). Tratamiento de aguas residuales, por sistema compacto de aireación extendida para el riego de áreas verdes en el distrito de Comas. *Tesis Doctoral*, 223 Pag.
- Velásquez, M. J., Aguilar, D. A., & Puin, H. D. (2018). *Panel fotovoltaico de 10 W diseñado usando COMSOL Multiphysics*. 1(1). <https://doi.org/10.14483/issn.2248-4728>
- Vrsalović, L., Medvidović, N. V., Svilović, S., & Pavlinović, A. (2023). Taguchi method in the optimization of municipal wastewater treatment by electrocoagulation integrated with zeolite. *Energy Reports*, 9, 59–76. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.03.086>

# **ANEXOS**

**Anexo I.** Análisis de parámetros de campo



**Anexo II.** Toma de muestra de agua residual doméstica en el distrito de Chupa



**Anexo III.** Proceso de electrocoagulación alimentada con energía fotovoltaica variando factores como el pH, tiempo y densidad de corriente



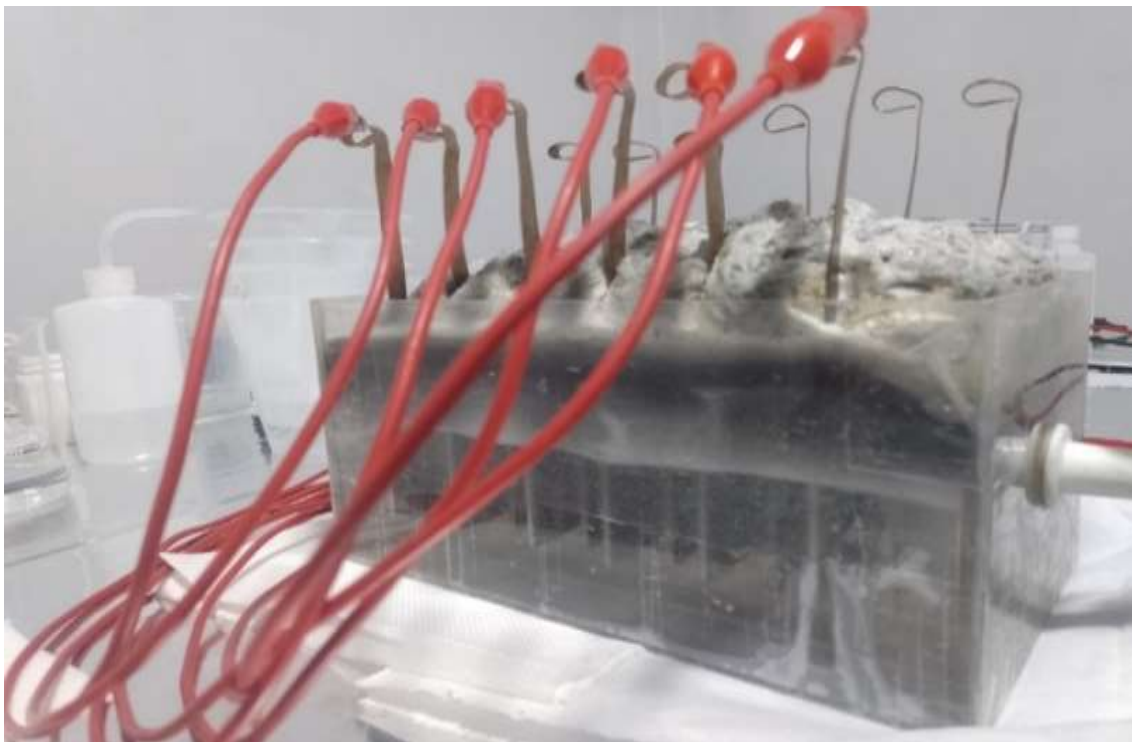
**Anexo IV.** Modificación de pH para luego realizar el proceso de electrocoagulación



**Anexo V.** Proceso de electrocoagulación en el agua residual domestica



**Anexo VI.** Electrocoagulación variando factores como pH, tiempo y densidad de corriente



**Anexo VII.** Envío de muestras al laboratorio para su respectivo análisis de parámetros



**Anexo VIII.** Análisis de sólidos totales en suspensión posterior al proceso de electrocoagulación



**Anexo IX.** Insertado de papel filtro a la mufla



**Anexo X. Solicitud de Acceso al PTARs**

"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA  
INDEPENDENCIA, Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS  
DE JUNÍN Y AYACUCHO"

ASUNTO: ACCESO A LA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE  
DISTRITO DE CHUPA.

Lic. ANTONIO MACHACA MAMANI  
Alcalde de la Municipalidad Distrital de Chupa



Yo, Matilde Claret Laura Halanoca, Bachiller en ingeniería ambiental y forestal, identificado con DNI N° 70283348 y con domicilio en la Urb. Naciones Unidas del distrito san Miguel y con lugar de origen del centro poblado de Chocco con el debido respeto me dirijo y expongo lo siguiente.

Que, con motivos de realizar trabajo de investigación de monitoreo de aguas residuales **SOLICITO SE ME PUEDA DAR FACILIDADES PARA ACCEDER A LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL DISTRITO DE CHUPA** durante los meses de SETIEMBRE Y OCTUBRE del año en curso.

Conocedor de su espíritu colaborador, esperando su comprensión y acceso a mi petición, hago propicia la ocasión para expresarle las muestras de mis mas sinceras consideraciones.

28 de agosto del 2024

  
Matilde Claret Laura Halanoca  
DNI: 70283348

Anexo XI. Hoja de custodia de envío de muestras

CADENA DE CUSTODIA - MATRIZ AGUA		ALAB								
<b>Estado del cliente</b> Razon Social: <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA</b> Persona de contacto: <b>Geovanna Guzmán, Hovian Guzman</b> Nombre del proyecto: <b>Caracterización del medio de electrocoagulación, elutriado, por energía fotovoltaica, con el tratamiento de AR.</b>		Orden de servicio: <b>05-2024-6210</b> Pto de Muestreo: <b>CE-106566</b> Informe de muestreo: <b>16-10-2024</b> Procedencia o lugar de muestreo: <b>Distrib. de Chosico - Acapulco - Puno</b>								
Punto de muestreo / Estación	Código de identificación	Muestra	Clasificación	Unificación	N° Frascos	PARAMETROS A ANALIZAR				OBSERVACIONES
						PH	CO	DT	OT	
1	M7	F-16/10/24 H-10/10/24	Agua residual	Residuos líquidos	3					
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
<b>Reservación de espacios utilizados:</b> Nombre de espacio:		<b>Legenda:</b> V: Voto / F: Faltante / E: Error / P: Puntaje / S: Solicitud / D: Diferencia / O: Otro								
Nombre: <b>Geovanna Guzman</b> Fecha: <b>16/10/2024</b> Firma:		Fecha: <b>17 OCT 2024</b> Hora: <b>13:03</b> Lugar: <b>ALAB</b>								

Nota: La cadena de custodia en el muestreo de aguas residuales es fundamental para garantizar la integridad y validez legal de las muestras desde su recolección hasta su análisis.



**QALAB** Cadena de custodia - MATRIZ AGUA

Nombre local: **UNIVERSIDAD NACIONAL DE JUJUY**  
 Dirección: **Av. Gálvez, 4500 - Salta, Salta**  
 Teléfono: **0348 425 1000**

Orden de servicio: **65-9884-62.10** Pág. **01** de **01**  
 Fecha de elaboración: **16-04-2010**  
 Sistema de registro: **65-9884-62.10**  
 Presentación a cargo de: **Juana María Sosa**

Código interno del equipo	Marca	Modelo	Material	Medida	Fecha	Uso	Observaciones
T0	AR	Domestic	333436	4	3		
T10	AR	Domestic	333436	4	3		
T11	AR	Domestic	333436	4	3		
T12	AR	Domestic	333436	4	3		
T13	AR	Domestic	333436	4	3		
T14	AR	Domestic	333436	4	3		
T15	AR	Domestic	333436	4	3		

**OT: 66651**

Elaborado por: **[Signature]**

Revisado por: **[Signature]**

Fecha: **19 OCT 2014**

Horario: **11:00**

Ubicación: **Matr. de Agua - Salta**

Procedimiento: **18/10/14**

Observaciones: **[Blank]**

Este documento es propiedad de QALAB. No se permite su reproducción o uso no autorizado sin el consentimiento escrito de QALAB.

**Anexo XII.** Informe inicial de análisis de DQO, DBO, aceites y grasas y coliformes termotolerantes



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 096



**INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-30740**

NP Id. 0000130403

**I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE**

- 1.- RAZÓN SOCIAL: UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
- 2.- DIRECCIÓN: AV. NUEVA ZELANDIA NRO. 631 PUÑO - SAN ROMAN - JULIACA
- 3.- PROYECTO: OPTIMIZACION DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACION ALIMENTADA POR ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA EL TRATAMIENTO DE A. R.
- 4.- PROCEDENCIA: DISRTITO DE CHOPA - AZANGARO - PUÑO
- 5.- SOLICITANTE: PAZ LABORATORIOS S.R.L.
- 6.- PRODUCTO: Agua Residual

**II.- DATOS DEL SERVICIO**

- 1.- ORDEN DE SERVICIO N°: 000006210-2024-0000
- 2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME: 2024-10-30

**III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO**

- 1.- MUESTREO POR: MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA
- 2.- NÚMERO DE MUESTRAS: 1
- 3.- FECHA DE RECEPCIÓN: 2024-10-17
- 4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN: En buen estado de conservación y preservación
- 5.- PERÍODO DE ENSAYO: 2024-10-17 al 2024-10-30

  
**Erika Aliaga Ibarra**  
 Jefe de Laboratorio  
 CIP N° 100391

  
**Marleni V. Rivera Castromonte**  
 Superviso de Laboratorio de Microbiología e Hidrobiología  
 CBP N° 16639

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág 1 de 3

<p>● SEDE PRINCIPAL                  Av. Guardia Chocoma N° 1077,                  Belmóndiz, Cusco.                  Telf: (+511) 713 9756 / 713 0039                  Cel: 977 516 679 / 837 312 329 /                  953 368 774</p>	<p>● SEDE AREQUIPA                  CODESA SUCURSAL MD. S. L. S.                  AREQUIPA                  Telf: (+514) 330 860                  Cel: 982 383 043</p>	<p>● SEDE PUNO                  UIC. San Isidro de El Alto                  No. 50 U. 50,                  Cuzco - Puno                  Telf: (+070) 542 335</p>	<p>● SEDE TRUJILLO                  Urb. 100 de Trujillo MA A L 26,                  Nto. Solimay - Trujillo                  Telf: (+043) 713 0634                  Cel: 963 766 529</p>
---	--	---	---

[www.alab.com.pe](http://www.alab.com.pe)

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-30740**

N° Id.: 0000130403

**IV.- METODOS DE ENSAYO**

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	CONDICIÓN DE ACREDITACIÓN / LUGAR DE ANÁLISIS
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. / Part 4500-OH, 24th Ed. 2023	Biochemical Oxygen Demand (BOD), 5-Day BOD Test / Oxygen (dissolved), Optical-Probe Method	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed. 2023	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Acetatos y Grasas	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5520B, 24th Ed. 2023	Oil and Grease by Liquid-Liquid, Partition-Gravimetric Method	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 F.2, 24th Ed. 2023	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group, Escherichia coli Procedure Using Fluorogenic Substrate, Simultaneous Determination of Thermotolerant Coliforms and E.coli.	INACAL LE - 096 AREQUIPA

\*SMEWW\* : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater  
\*APHA\* : American Public Health Association

Pág 2 de 3

● SEDE PRINCIPAL  
Av. Guerra Chacabamba N° 3177,  
Boschán, Callao  
Tel: (+51) 1 713 7550 / 713 0234  
Cbx: 877 530 079 / 837 122 379 /  
883 366 774

● SEDE AREQUIPA  
CALLE SANCOSUMAZA N. 311 S,  
AREQUIPA  
TEL: (+51) 84 830 842  
Cbx: 862 363 041

● SEDE PIURA  
Urb. San Isidro O'Hagan,  
Mz. 03 LL 53,  
Calle 8 - Piura  
TEL: (+010) 542 235

● SEDE TRUJILLO  
Urb. San José Trujillo 800, A 11-29,  
Río Supe - Trujillo  
TEL: (+01) 713 0631  
Cbx: 803 766 829

 [www.alab.com.pe](http://www.alab.com.pe)

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-30740**

N° Id. 0000130403

**V.- RESULTADOS**

ITEM		1		
CÓDIGO DE LABORATORIO		M-24-91234		
CÓDIGO CLIENTE <sup>(A)</sup>		M1		
COORDENADAS - UTM WGS 84 <sup>(B)</sup>		E: 0083671 N: 8329352		
PRODUCTO <sup>(C)</sup>		Agua Residual		
SUB PRODUCTO <sup>(D)</sup>		Agua Residual Doméstica		
FECHA y HORA DE MUESTREO <sup>(E)</sup>		16-10-2024 10:40		
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (TNP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	35 000 000,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	298,3
Aceites y Grasas (*)	mg/L	2,00	5,00	12,25
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	643,9

<sup>(A)</sup> Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, \*<= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, \*<= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

<sup>(E)</sup> Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

**VI.- OBSERVACIONES**

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Pág. 3 de 3

◆ SEDE PRINCIPAL  
 Av. Guerra Checa N° 1877,  
 Bolsones, Callao.  
 Telf: (+51) 713 7750 / 713 0836  
 Cel: 977 518 878 / 837 322 378 /  
 883 364 774

◆ SEDE AREQUIPA  
 ODDP 28000000 M. S. L. S.  
 Arequipa  
 Telf: (+51) 84 630 843  
 Cel: 962 361 241

◆ SEDE PIURA  
 Dpto. San Isidro B. Esca  
 Mo. 09 U. 02,  
 Ciudad - Piura  
 Telf: (+51) 842 338

◆ SEDE TRUJILLO  
 Urb. Torre de Inca N° 411 20,  
 Alto Survestro - Trujillo  
 Telf: (+51) 713 0836  
 Cel: 963 768 828

www.alab.com.pe

**Anexo XIII.** Informe de análisis de los parámetros después de la aplicar el proceso de electrocoagulación



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 096



**INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-31026**

N° ID: 0000130689

**I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE**

- 1.- RAZON SOCIAL: UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
- 2.- DIRECCIÓN: AV. NUEVA ZELANDIA NRO. 631 PUÑO - SAN ROMAN - JULIACA
- 3.- PROYECTO: OPTIMIZACION DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACION ALIMENTADA POR ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA EL TRATAMIENTO A.R.
- 4.- PROCEDENCIA: JULIACA - SAN ROMAN - PUÑO
- 5.- SOLICITANTE: PAZ LABORATORIOS S.R.L.
- 6.- PRODUCTO: Agua Residual

**II.- DATOS DEL SERVICIO**

- 1.- ORDEN DE SERVICIO N°: 000006210-2024-0000
- 2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME: 2024-10-28

**III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO**

- 1.- MUESTREO POR: MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA
- 2.- NÚMERO DE MUESTRAS: 14
- 3.- FECHA DE RECEPCIÓN: 2024-10-19
- 4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN: En buen estado de conservación y preservación
- 5.- PERÍODO DE ENSAYO: 2024-10-19 al 2024-10-28

  
**Erika Aliaga Ibarra**  
 Jefe de Laboratorio  
 CIP N° 100391

  
**Marleni V. Rivera Castromonte**  
 Supervisor de Laboratorio de Microbiología e Hidrobiología  
 CBP N° 16639

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág 1 de 6

<p>● SEDE PRINCIPAL                  Av. Guardia Chulaca N° 1077,                  Bellavista, Callao.                  Telf: (+51) 713 956 1713 (030)                  Cel: 977 518 679 / 837 182 379 /                  983 368 774</p>	<p>● SEDE AREQUIPA                  COOP. SUCURSA S. R. L. S.                  AREQUIPA                  Telf: (+51) 84 530 860                  Cel: 982 382 043</p>	<p>● SEDE PIURA                  UTE. SUCURSA (E) S.A.S.                  PIURA                  Telf: (+51) 87 713 0631                  Cel: 983 796 529</p>	<p>● SEDE TRUJILLO                  Urb. San de Trujillo S.A. A. E. 24,                  Nto. Subsemy - Trujillo                  Telf: (+51) 713 0631                  Cel: 983 796 529</p>
---	---	--	--

[www.alab.com.pe](http://www.alab.com.pe)

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-31026**

N° Id.: 0000130689

**IV.- METODOS DE ENSAYO**

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	CONDICIÓN DE ACREDITACIÓN / LUGAR DE ANÁLISIS
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. / Part 4500-OH, 24th Ed. 2023	Biochemical Oxygen Demand (BOD), 5-Day BOD Test / Oxygen (dissolved), Optical-Probe Method	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed. 2023	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Acetatos y Grasas	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5520B, 24th Ed. 2023	Oil and Grease by Liquid-Liquid, Partition-Gravimetric Method	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 F.2, 24th Ed. 2023	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group, Escherichia coli Procedure Using Fluorogenic Substrate, Simultaneous Determination of Thermotolerant Coliforms and E.coli.	INACAL LE - 096 AREQUIPA

\*SMEWW\* : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

\*APHA\* : American Public Health Association

Pág 2 de 6

● SEDE PRINCIPAL  
Av. Guerra Chocoma N° 3177,  
Boschán, Callao  
Tel: (+51) 713 7556 713 (03L)  
Cbx: 877 530 079 / 837 122 379 /  
883 366 774

● SEDE AREQUIPA  
CALLE SANCOSUMAZA N. 3 L. 8,  
AREQUIPA  
TEL: (+51) 84 830 840  
Cbx: 862 363 041

● SEDE PIURA  
Urb. San Isidro O' Hagan,  
Mz. 03 L. 03,  
Calle 8 - Piura  
TEL: (+010) 542 235

● SEDE TRUJILLO  
Urb. San José Trujillo 800, A 11-29,  
Río Supe - Trujillo  
TEL: (+01) 713 0631  
Cbx: 903 766 829

 [www.alab.com.pe](http://www.alab.com.pe)

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-31026**

N° Id. 0000130689

**V.- RESULTADOS**

ITEM	1	2	3	4
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-24-92313	M-24-92314	M-24-92315	M-24-92316
CÓDIGO CUENTE (*)	T1	T2	T3	T4
COORDENADAS - UTM WGS 84 (*)	E:0392487 N:8341431	E:0392487 N:8341431	E:0392487 N:8341431	E:0392487 N:8341431
PRODUCTO (**)	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual
SUB PRODUCTO (**)	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica
FECHA y HORA DE MUESTREO (**)	18-10-2024 18:00	18-10-2024 18:10	18-10-2024 17:55	18-10-2024 14:20

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (TAMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,6	2200,0	950,0	3500,0	1600,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	104,7	87,0	105,2	89,4
Aceites y Grasas (*)	mg/L	2,00	5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	203,1	173,4	229,5	189,9

(\*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

(\*\*) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-31026**

N° Id.: 0000130689

ITEM	5	6	7	8			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-24-92317	M-24-92318	M-24-92319	M-24-92320			
CÓDIGO CLIENTE <sup>(*)</sup>	T5	T6	T7	T8			
COORDENADAS - UTM WGS 84 <sup>(**)</sup>	E:0392487 N:8341431	E:0392487 N:8341431	E:0392487 N:8341431	E:0392487 N:8341431			
PRODUCTO <sup>(**)</sup>	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual			
SUB PRODUCTO <sup>(**)</sup>	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica			
FECHA y HORA DE MUESTREO <sup>(**)</sup>	18-10-2024 17:58	18-10-2024 17:25	18-10-2024 15:20	18-10-2024 14:47			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	7800,0	13,0	9200,0	<1,8
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	96,0	88,2	150,1	90,3
Acetes y Grasas (*)	mg/L	2,00	5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	203,1	180,0	289,7	186,6

<sup>(\*)</sup> Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

<sup>(\*\*)</sup>Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-31026**

N° Id.: 0000130689

ITEM	9	10	11	12			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-24-92321	M-24-92322	M-24-92323	M-24-92324			
CÓDIGO CLIENTE <sup>(*)</sup>	T9	T10	T11	T12			
COORDENADAS - UTM WGS 84 <sup>(**)</sup>	E:0392487 N:8341431	E:0392487 N:8341431	E:0392487 N:8341431	E:0392487 N:8341431			
PRODUCTO <sup>(**)</sup>	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual			
SUB PRODUCTO <sup>(**)</sup>	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica			
FECHA y HORA DE MUESTREO <sup>(**)</sup>	18-10-2024 13:00	18-10-2024 13:12	18-10-2024 12:20	18-10-2024 11:28			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	8100,0	220,0	1600,0	<1,8
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	177,0	132,0	146,3	87,0
Acetres y Grasas (*)	mg/L	2,00	5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	371,4	249,7	280,9	179,0

<sup>(\*)</sup> Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

<sup>(\*\*)</sup>Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-31026**

N° Id.: 0000130689

ITEM	13	14	15			
	M-24-92325	M-24-92326	M-24-92327			
CÓDIGO CLIENTE <sup>(1)</sup>	T13	T14	T15			
COORDENADAS - UTM WGS 84 <sup>(2)</sup>	E:0392487 N:8341431	E:0392487 N:8341431	E:0392487 N:8341431			
PRODUCTO <sup>(3)</sup>	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual			
SUB PRODUCTO <sup>(4)</sup>	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica			
FECHA y HORA DE MUESTREO <sup>(5)</sup>	18-10-2024 11:00	18-10-2024 11:00	18-10-2024 11:00			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS		
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (TNP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	7200,0	7000,0	7050,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	105,4	108,8	106,5
Aceites y Grasas (*)	mg/L	2,00	5,00	<5,00	<5,00	<5,00
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	202,0	210,5	205,3

<sup>(1)</sup> Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

<sup>(2)</sup> Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

**VI - OBSERVACIONES**

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Pág 5 de 6

SEDE PRINCIPAL  
Av. Guerra Checa N° 1827,  
Boschitz, Callao.  
Tel: (+51) 713 750 1 713 0536  
Cel: 977 518 879 / 837 122 378 /  
983 564 734

SEDE AREQUIPA  
CALLE DE LA UNIÓN N° 1111,  
PUNTA  
Tel: (+51) 84 630 943  
Cel: 983 361 341

SEDE PIURA  
CALLE DEL COMERCIO N° 1000,  
Mz. D3 U. 02,  
Calleja - Piura  
Tel: (+51) 842 335

SEDE TROJILLO  
CALLE DEL COMERCIO N° 1111,  
Mz. D3 U. 02,  
Calleja - Piura  
Tel: (+51) 713 0536  
Cel: 983 758 829

 www.alab.com.pe

#### Anexo XIV. Cálculo de generación de energía por día

$$Ep = Pp \times HSP \times PR$$

Donde:

Ep = Energía producida

P-p = Potencia del panel

HSP = Horas pico sol

PR = factor de rendimiento (0.8)

$$Ep = 380W \times 6.5 \times 0.8$$

$$Ep = 1976 Wh$$

Convertido a Kilovatios – hora (KWh)

$$Ep = \frac{1976 Wh}{1000}$$

$$Ep = 1.976 kWh$$

**Anexo XV.** Estándar de Límites Máximos Permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas o Municipales

**Tabla 13**

*Estándares de Límites Máximos Permisibles*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas</b>
Aceites y Grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	Unidad	6.5 – 8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
<i>Temperatura</i>	°C	<35

*Nota:* D.S. N° 003-2010-MINAM

## Anexo XVI. Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Dimensiones	Indicadores	Metodología
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Independiente			
¿Cuál es la eficiencia del proceso de electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica en el tratamiento de agua residual domestico en el distrito de Chupa?	Evaluar la eficiencia de la electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica para el tratamiento de agua residual doméstica en el distrito de Chupa, Puno.	La electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica bajo condiciones óptimos, es probable que se alcance una eficiencia superior al 65 % en reducción de DQO en el agua residual doméstica en el distrito de Chupa	Nivel de los factores experimentales de electrocoagulación	pH Tiempo Densidad de corriente	5, 6 y 6.5 15, 30 y 45 min 4, 6.5 y 9.8 A/m <sup>2</sup>	i. Muestreo de agua residual domestica ii. Determinar la concentración inicial de parámetros de la muestra de agua residual domestica iii. Tratamiento de agua residual domestico mediante electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica iv. Análisis de resultados mediante superficie respuesta
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Dependiente			
¿Cuál es la concentración inicial de DQO, DBO5, Solidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes en la muestra de agua residual doméstica del distrito de Chupa?	Determinar la concentración inicial de DQO, DBO5, Solidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes en la muestra de agua residual doméstica del distrito de Chupa.	Las concentraciones de los parámetros DQO, DBO5, solidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes se encontrarán fuera del LMP para efluentes de PTAR	Remoción de parámetros del agua residual domestica	- DQO - DBO5 - Solidos totales en suspensión - Aceites y grasas - Coliformes termotolerantes	% de Remoción de DQO	
¿De qué manera los ensayos de electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica influyen en el tratamiento del agua residual doméstica en el distrito de Chupa, variando el pH, tiempo y la densidad de corriente?	Realizar ensayos de electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica para el tratamiento del agua residual doméstica en el distrito de Chupa, con variación de pH, el tiempo y la densidad de corriente.	La tecnología de electrocoagulación alimentada por energía fotovoltaica reduce los parámetros como DQO, DBO5, solidos totales en suspensión, aceites y grasas y coliformes termotolerantes en el agua residual doméstica.				

UNW



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

*"Universidad Pública de Calidad"*