



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE PROTECCIÓN  
AMBIENTAL**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN LA REMOCIÓN  
DE MANGANESO DE LAS AGUAS DEL RÍO CHACAPALCA,  
OCUVIRI - PUNO**

**PRESENTADA POR:**

**YESSENIA VELASQUEZ ZÚÑIGA**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**MAGISTER SCIENTIAE EN TECNOLOGÍAS DE PROTECCIÓN  
AMBIENTAL**

**PUNO, PERÚ**

**2023**

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**EVALUACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN LA REMOCIÓN DE MANGANES O DE LAS AGUAS DEL RÍO CHACAPALCA , OCUVIRI - PUNO**

AUTOR

**YESSENIA VELASQUEZ ZÚÑIGA**

RECuento DE PALABRAS

**25068 Words**

RECuento DE CARACTERES

**121225 Characters**

RECuento DE PÁGINAS

**137 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**14.9MB**

FECHA DE ENTREGA

**Aug 3, 2023 6:34 AM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Aug 3, 2023 6:36 AM GMT-5**

● **9% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base c

- 7% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossr

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

**VB CIEPG**  
**Similitud General**  
**9 %**



Firmado digitalmente por ZUÑIGA  
SANCHEZ Riginio Alberto FAU  
20145496170 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 03.08.2023 09:56:38 -05:00



Firmado digitalmente por LUQUE  
COYLA Ruben Jared FAU  
20145496170 hard  
Motivo: Soy Vº Bº  
Fecha: 03.08.2023 12:43:53 -05:00

Resumen



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL**

**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN LA REMOCIÓN  
DE MANGANESO DE LAS AGUAS DEL RÍO CHACAPALCA,  
OCUVIRI – PUNO**



**PRESENTADA POR:**

**YESSENIA VELASQUEZ ZÚÑIGA**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**MAGISTER SCIENTIAE EN TECNOLOGÍAS DE PROTECCIÓN  
AMBIENTAL**

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

**PRESIDENTE**



Firmado digitalmente por  
BENAVENTE FERNANDEZ Sofia  
Lourdes FAU 20145496170 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 31.08.2023 13:33:25 -05:00

.....  
**Dra. SOFÍA LOURDES BENAVENTE FERNÁNDEZ**

**PRIMER MIEMBRO**



Firmado digitalmente por GALLEGOS  
PASCO Pedro Alvaro Edwin FAU  
20145496170 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 31.08.2023 10:47:44 -05:00

.....  
**D.Sc. PEDRO ÁLVARO EDWIN GALLEGOS PASCO**

**SEGUNDO MIEMBRO**



Firmado digitalmente por LLERENA  
PEREDO Georges Florencio FAU  
20145496170 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 30.08.2023 12:16:18 -05:00

.....  
**M.Sc. GEORGES FLORENCIO LLERENA PEREDO**

**ASESOR DE TESIS**



Firmado digitalmente por ZUÑIGA  
SANCHEZ Higinio Alberto FAU  
20145496170 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 30.08.2023 10:07:19 -05:00

.....  
**Mtro. HIGINIO ALBERTO ZÚÑIGA SÁNCHEZ**

Puno, 20 de abril del 2023

**ÁREA :** Medio Ambiente.

**TEMA :** Evaluación de la Electrocoagulación en la Remoción de Manganeseo de las Aguas del Río Chacapalca, Ocuvi - Puno.

**LÍNEA:** Recursos Naturales y Medio Ambiente.



## DEDICATORIA

- A Dios padre celestial, quien me ha acompañado en cada paso de mi vida, dándome aliento y fortaleza para no desmayar y ser valiente durante mi formación profesional y en el cumplimiento de este reto tan anhelado.
- A mis padres por sus valiosos consejos, por inculcarme que la perseverancia supera a las dificultades y ante todo siempre se debe conservar un corazón integro, por su apoyo incondicional en mis alegrías y tristezas se los dedico de todo corazón.



## AGRADECIMIENTOS

- Agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano, a la Escuela de Posgrado por haberme permitido estudiar la Maestría en Tecnologías de Protección Ambiental, a todos los docentes por haberme brindado sus conocimientos y al esfuerzo del personal administrativo en el cumplimiento de los tramites respectivos.
- A los señores Miembros del Jurado: Dra. Sofía Lourdes Benavente Fernández, D.Sc. Pedro Álvaro Edwin Gallegos Pasco y al M.Sc. Georges Florencio Llerena Peredo, por sus acertadas observaciones y recomendaciones en el desarrollo de la presente tesis.
- A mi asesor de tesis Mtro. Higinio Alberto Zúñiga Sánchez por guiarme en el transcurso de esta tesis.
- Al M.Sc. Fidel Huisa Mamani y al Laboratorista Nemesio Carreón Coila por permitirme realizar las pruebas experimentales de mi investigación en el Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la Facultad de Ingeniería de Minas de la UNA - PUNO.
- A los colegas Ing. Roxana Nila Medrano, al Ing. Jared Luque que me ayudaron a mantener el ánimo para llevar adelante el presente trabajo.
- A mi amiga Noemi Callata Callata por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias.



## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1

### CAPÍTULO I

#### REVISIÓN DE LA LITERATURA

1.1. Marco teórico	3
1.1.1. Manganeso	3
1.1.1.1. Contaminación del manganeso en el agua	4
1.1.1.2. Efectos en el medio ambiente	4
1.1.1.3. Consecuencias en la salud	4
1.1.1.4. Estándares de Calidad Ambiental del Agua	4
1.1.2. Electrocoagulación	5
1.1.2.1. Mecanismos de la electrocoagulación	6
1.1.2.2. Reacciones presentes en el proceso de electrocoagulación	6
1.1.2.3. Factores que afectan la electrocoagulación	8
1.1.2.4. Ventajas y desventajas de la electrocoagulación	12
1.1.2.5. Diseño de una celda de electrocoagulación	13
1.1.3. Río Chacapalca	14
1.1.3.1. Parámetros físicos y químicos de las aguas residuales	14
1.1.4. Diseño experimental central compuesto (DCC)	16
1.1.4.1. Estimación del modelo matemático de segundo orden	18
1.2. Antecedentes	19
1.2.1. Antecedentes a nivel local	19
1.2.2. Antecedentes a nivel nacional	19



1.2.3. Antecedentes a nivel internacional	20
---	----

## **CAPÍTULO II**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

2.1. Identificación del problema	23
2.2. Enunciados del problema	24
2.2.1. Enunciado general	24
2.2.2. Enunciados específicos	24
2.3. Justificación	24
2.3.1. Justificación técnica	24
2.3.2. Justificación económica	24
2.3.3. Justificación social	25
2.3.4. Justificación académica	25
2.4. Objetivos	26
2.4.1. Objetivo general	26
2.4.2. Objetivos específicos	26
2.5. Hipótesis	26
2.5.1. Hipótesis general	26
2.5.2. Hipótesis específicas	26

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1. Lugar de estudio	27
3.1.1. Ubicación	27
3.1.1.1. Localización del punto de muestreo	27
3.1.1.2. Localización del lugar de investigación	28
3.2. Población	29
3.3. Muestra	30
3.4. Método de investigación	30
3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	30
3.5.1. Variables de estudio	30
3.5.2. Materiales, equipos e insumos químicos	31
3.5.3. Parte experimental	33
3.5.3.1. Método del primer objetivo: Construcción de la celda de electrocoagulación	33



3.5.3.2. Método del segundo objetivo: Caracterización del Río Chacapalca antes del tratamiento	35
3.5.3.3. Método del segundo objetivo: Caracterización del Río Chacapalca después del tratamiento	38
3.5.3.4. Método del tercer objetivo: Evaluación de la densidad de corriente y tiempo	40

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1. Resultados y discusión del primer objetivo: Construcción de la celda de electrocoagulación a escala laboratorio	44
4.1.1. De la celda de electrocoagulación (primer objetivo)	44
4.1.2. De los electrodos (primer objetivo)	45
4.2. Resultados y discusión del segundo objetivo: Determinar las características físico-químicas del Río Chacapalca antes y después del tratamiento	48
4.2.1. Caracterización de las aguas del Río Chacapalca antes del tratamiento (segundo objetivo)	48
4.2.2. Caracterización de las aguas del Río Chacapalca después del tratamiento (segundo objetivo)	55
4.3. Resultados y discusión del tercer objetivo: Evaluar la densidad de corriente y el tiempo para la determinación del porcentaje de remoción de Mn	65
4.3.1. Evaluación en el diseño central compuesto (tercer objetivo)	65
4.3.2. Análisis estadístico para la prueba de hipótesis y valores óptimos (tercer objetivo)	68
4.3.2.1. Prueba de hipótesis (tercer objetivo)	68
4.3.2.2. Valores óptimos (tercer objetivo)	72
4.3.3. Mejores porcentajes de remoción de Mn (tercer objetivo)	76
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>80</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>81</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>82</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>90</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Propiedades químicas del manganeso	3
2. Diseño central compuesto rotatable con diferentes números de factores	17
3. Matriz del diseño central compuesto de 2 factores	18
4. Coordenadas de los puntos de muestreo	28
5. Coordenadas del Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental	29
6. Operacionalización de variables	31
7. Método de análisis físico-químico y de manganeso de muestras de agua	37
8. Variables del diseño central compuesto	40
9. Método de análisis de manganeso por ICP-OES	42
10. Concentración final de Mn de las muestras del PMS1 y PMS2	42
11. Diseño central compuesto de la remoción de Mn del PMS1 y PMS2	43
12. Caracterización de las muestras de agua antes del tratamiento	48
13. Caracterización de las muestras de agua después del tratamiento	56
14. Densidad de corriente y tiempo de las muestras del PMS1	65
15. Densidad de corriente y tiempo de las muestras del PMS2	66
16. Diseño central compuesto de los ensayos del PMS1	68
17. Diseño central compuesto de los ensayos del PMS2	69
18. Coeficientes del modelo de 2do orden de los ensayos del PMS1	69
19. Análisis de varianza de la remoción de manganeso del PMS1	70
20. Coeficientes del modelo de 2do orden para los ensayos del PMS2	71
21. Análisis de varianza de la remoción de manganeso del PMS2	71
22. Comparación de valores óptimos obtenidos	75
23. Datos del mejor experimento obtenido con las muestras del PMS1 y PMS2	76
24. Insumos químicos de manganeso rango bajo	91
25. Cantidad de aluminio disuelto en las muestras del PMS1 y del PMS2	92
26. Amperaje y voltaje de las muestras del PMS1	93
27. Amperaje y voltaje de las muestras del PMS2	93
28. Consumo de energía en el tratamiento de las muestras del PMS1	94
29. Consumo de energía en el tratamiento de las muestras del PMS2	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Celda electrolítica con ánodo y cátodo	5
2. Reactores con electrodos monopares en paralelo (a) y en serie (b)	14
3. Distribución de puntos del diseño rotable	17
4. Ubicación geográfica del PMS1 y PMS2 del Río Chacapalca	28
5. Ubicación geográfica del Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la UNA - PUNO	29
6. Celdas con válvula de descarga	33
7. Fuentes de energía	33
8. Conectores positivo y negativo	34
9. Placas de aluminio	34
10. Regiones de la celda de electrocoagulación	35
11. Frascos enjuagados para la toma de muestras	36
12. Muestras enviadas al laboratorio	37
13. Diagrama de flujo de la remoción de manganeso por electrocoagulación	39
14. Niveles de las variables del DCC rotatable	41
15. Características de la celda electrocoagulación	44
16. Área útil de aluminio activo	45
17. Sistema de electrocoagulación antes del tratamiento	47
18. pH de las muestras del PMS1 y PMS2 antes del tratamiento	49
19. Conductividad eléctrica de las muestras del PMS1 y PMS2 antes del tratamiento	49
20. Turbidez de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento	50
21. Dureza de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento	51
22. Cloruros de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento	52
23. Nitratos de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento	53
24. Sulfatos de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento	53
25. Manganeso de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento	54
26. Sistema de electrocoagulación después del tratamiento	55
27. Muestra contaminada y tratada	55
28. pH del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento	57
29. Conductividad eléctrica del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento	58
30. Turbidez del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento	59
	vii



31. Dureza del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento	60
32. Cloruros del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento	61
33. Nitratos del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento	62
34. Sulfatos del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento	63
35. Manganeso del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento	64
36. Gráfica de contorno %Remoción de Mn del PMS1	73
37. Gráfica de superficie respuesta %Remoción de Mn del PMS1	73
38. Gráfica de contorno %Remoción de Mn del PMS2	74
39. Gráfica de superficie respuesta %Remoción de Mn del PMS2	74
40. Concentración final de Mn del PMS1 y PMS2	77
41. Porcentajes de remoción de Mn del PMS1 y PMS2	77
42. Muestras de agua en el PMS1 (izquierdo) y en el PMS2 (derecho)	119
43. Electrodo de aluminio distribuidos en paralelo	119
44. Ajuste de amperaje antes del tratamiento	119
45. Muestras durante el tratamiento	120
46. Muestras después del tratamiento (izquierdo) y filtración (derecho)	120
47. Fotómetro en el análisis de Mn (izquierdo) y multiparámetro para análisis de pH y C.E (derecho)	120



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Determinación de la concentración final manganeso	90
2. Cantidad de aluminio generado en el proceso de electrocoagulación	92
3. Amperaje y voltaje aplicados en el tratamiento de las muestras PMS1 y PMS2	93
4. Consumo de energía en el tratamiento de las muestras del PMS1 y PMS2	94
5. Informe de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento	95
6. Informe de las muestras PMS1 y PMS2 después del tratamiento	101
7. Informe de las muestras tratadas del PMS1 y PMS2 con los valores óptimos del diseño experimental	107
8. Constancia de desarrollo de pruebas experimentales en el Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental	110
9. Normas Legales de los Estándares de la Calidad Ambiental del Agua	111
10. Evidencias fotográficas	119
11. Prototipo de la celda de electrocoagulación	121
12. Plano de ubicación de las muestras colectadas en el PMS1 y en el PMS2 del Río Chacapalca	122

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

<b>PMS1</b>	: Punto de muestreo 1
<b>PMS2</b>	: Punto de muestreo 2
<b>D</b>	: Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )
<b>T</b>	: Tiempo (min)
<b>C<sub>o</sub></b>	: Concentración inicial de manganeso (mg/L)
<b>C<sub>f</sub></b>	: Concentración final de manganeso (mg/L)
<b>%R</b>	: Porcentaje de remoción de manganeso (%)
<b>Mn</b>	: Manganeso
<b>Mn(OH)<sub>2</sub></b>	: Hidróxido de manganeso
<b>NTU</b>	: Unidades Nefelométricas
<b>C.E</b>	: Conductividad eléctrica
<b>CaCl<sub>2</sub></b>	: Cloruro de calcio
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	: Calcio
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	: Magnesio
<b>Ca(CO)<sub>3</sub></b>	: Carbonato de calcio
<b>Cl<sup>-</sup></b>	: Cloruros
<b>(NO<sub>3</sub>)<sup>-</sup></b>	: Nitratos
<b>(SO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup></b>	: Sulfatos
<b>LMEA</b>	: Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental
<b>LAS</b>	: Laboratorio Analítico del Sur
<b>ECA</b>	: Estándar de Calidad Ambiental del Agua
<b>MINAM</b>	: Ministerio del Ambiente
<b>OEFA</b>	: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
<b>ANA</b>	: Autoridad Nacional del Agua
<b>Al</b>	: Aluminio
<b>Al(OH)<sub>3</sub></b>	: Hidróxido de aluminio
<b>O<sub>2</sub></b>	: Oxígeno gaseoso
<b>H<sub>2</sub></b>	: Hidrógeno gaseoso
<b>NaCl</b>	: Cloruro de sodio
<b>DCC</b>	: Diseño Central Compuesto
<b>ANOVA</b>	: Análisis de varianza

## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue evaluar la electrocoagulación en la remoción de manganeso de las aguas del Río Chacapalca, Ocuvi - Puno. En los métodos se realizaron: la construcción de dos celdas de electrocoagulación con material acrílico y se emplearon en cada celda 5 electrodos de aluminio, 2 como cátodos y 3 como ánodos de sacrificio; se realizó la caracterización del Río Chacapalca antes y después del tratamiento; se evaluó la densidad de corriente y tiempo en un diseño central compuesto. Obteniendo los siguientes resultados: los ánodos de cada celda presentaron un área de  $297.6 \text{ cm}^2$  que desprendió los iones aluminio para su conversión en el coagulante hidróxido de aluminio; en la caracterización antes y después del tratamiento, se observó en ambas muestras tratadas PMS1 y PMS2 del Río Chacapalca un incremento en el pH, cloruros y nitratos; sin embargo, la conductividad eléctrica, turbidez, dureza, sulfatos y manganeso disminuyeron sus niveles hasta por debajo de los ECA del agua en la categoría 3; en la evaluación de la densidad de corriente y tiempo, se consiguieron en ambas muestras tratadas valores óptimos de  $6.2 \text{ mA/cm}^2$  y tiempo de 30 minutos, para aplicarlos en un volumen de muestra de 1 L y con electrolito NaCl de 20 mL. Se concluye que la electrocoagulación es un método eficiente que disminuye la concentración de manganeso en el PMS1 de 0.98 a 0.048 mg/L y en el PMS2 de 0.95 a 0.037 mg/L, logrando porcentajes de remoción 95.10 % y 96.11 % respectivamente.

**Palabras clave:** Aguas residuales, densidad de corriente, electrocoagulación, manganeso, remoción.

## ABSTRACT

The research objective was to evaluate the electrocoagulation in the manganese removal from the Chacapalca River waters, Ocuvi - Puno. In the methods, were performed: the construction of two electrocoagulation cells with acrylic material and 5 aluminum electrodes were used in each cell, 2 as cathodes and 3 as sacrificial anodes; was made the characterization of the Chacapalca River before and after the treatment; were evaluated current density and time in a composite central design. Obtaining the following results: the anodes of each cell presented an area of  $297.6 \text{ cm}^2$  that released the aluminum ions for their conversion in the coagulant aluminum hydroxide; in the characterization before and after the treatment was observed in both treated samples PMS1 and PMS2 from the Chacapalca River, a increase in pH, chlorides and nitrates; however, electrical conductivity, turbidity, hardness, sulfates, and manganese decreased their levels until below the "ECA" of water in category 3; in the evaluation of the current density and time, optimal values of  $6.2 \text{ mA/cm}^2$  and a time of 30 minutes were achieved in both treated samples, to be applied in a sample volume of 1 L and with NaCl electrolyte of 20 mL. It is concluded that electrocoagulation is an efficient method that decreased the manganese concentration in PMS1 from 0.98 to 0.048 mg/L and in PMS2 from 0.95 to 0.037 mg/L, achieving removal percentages of 95.10 % and 96.11 % respectively.

**Keywords:** Current density, electrocoagulation, manganese, removal, wastewater.

## INTRODUCCIÓN

El Río Chacapalca se encuentra en el Distrito de Ocuvi, Provincia de Lampa y Departamento de Puno, actualmente sus aguas se encuentran contaminadas debido a la operación, plan de cierre y descarga de efluentes mineros de la Unidad Minera Arasi; el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental realizó la Evaluación Ambiental en la Cuenca Pucará y reportó una alta concentración de manganeso de 0.92 mg/L en el Río Chacapalca (OEFA, 2016). La Autoridad Nacional del Agua ejecutó el monitoreo de la Calidad del Agua Superficial en la Unidad Hidrográfica de Pucará en el cual se registró una alta concentración de manganeso de 1.036 mg/L en el Río Chacapalca (ANA, 2020). Ambos resultados superaron los Estándares de Calidad Ambiental para el agua en la categoría 3 de riego de vegetales y bebidas de animales de 0.2 mg/L (MINAM, 2017).

Pobladores de la comunidad de Chacapalca del distrito de Ocuvi, relatan que antiguamente en las enormes montañas, vivían las alpacas, se alimentaban de los extensos bofedales y bebían el agua que bajaba de las cumbres, hoy en día este panorama se contrasta debido a las operaciones de explotación de oro que se venía realizando desde el año 2007 en la Unidad Minera Arasi perteneciente a la empresa minera Aruntani SAC, actividades que contaminaron las aguas del Río Chacapalca ocasionando la muerte de peces, envenenamiento de ganado y daños en los cultivos de la zona aledaña, como también ha deteriorado la salud de los habitantes del distrito de Ocuvi que consumen estas aguas (La República, 2018).

En los efluentes mineros, el manganeso se encuentra como ion manganeso ( $Mn^{2+}$ ) y es más soluble en aguas residuales ácidas que en aguas residuales alcalinas, en algunas aguas de pozos poco profundos, se puede encontrar compuestos orgánicos y coloides de manganeso (Rakhtshah *et al.*, 2022).

Kwakye *et al.* (2015), mencionan que niveles elevados de manganeso en el agua potable causa afecciones en los pulmones, hígado y sistemas vasculares, disminución de la presión sanguínea, daños neurológicos como la enfermedad de Parkinson mangánico. Así mismo ALTowyan *et al.* (2022), afirman que niveles altos de manganeso en los niños pueden causar daños en el cerebro, reduciendo la capacidad de aprendizaje, como la dificultad de hablar y caminar.

Para tratar aguas residuales contaminadas con manganeso, se han empleado métodos convencionales como la coagulación química, la precipitación alcalina, resinas de intercambio iónico, las cuales se han mostrado ineficientes (Akter *et al.*, 2022); estos métodos tradicionales presentan lodos difíciles de tratar, requieren de grandes cantidades de insumos químicos y su consumo energético es elevado (Ingelsson *et al.*, 2020).

La electrocoagulación se presenta como una alternativa competente en el tratamiento de aguas residuales, en este proceso se aplica corriente eléctrica a los electrodos de hierro o de aluminio que son los más utilizados en la oxidación de los ánodos de sacrificio, para la formación in situ del coagulante (Kambuyi *et al.*, 2021). En el medio acuoso se desestabiliza las partículas contaminadas que son adsorbidas por el coagulante formado Sediqi *et al.* (2021). Los efluentes líquidos de diferentes procesos industriales que han sido tratados mediante electrocoagulación, han obtenido resultados alentadores en la remoción de contaminantes (Garcia *et al.*, 2017).

Por lo descrito la presente investigación se realizó en el área de Medio Ambiente, en la línea de Recursos Naturales y Medio Ambiente, con el tema de Evaluación de la Electrocoagulación en la Remoción de Manganeso de las Aguas del Río Chacapalca, Ocuwiri – Puno. El propósito fue conseguir los parámetros adecuados que permitan mejorar la técnica de electrocoagulación para la remoción de manganeso de las aguas residuales mineras e industriales; para lo cual se desarrollaron métodos como la construcción de dos celdas de electrocoagulación a escala laboratorio, se realizó el análisis físico-químico a las muestras de agua del PMS1 y PMS2 del Río Chacapalca antes y después del tratamiento; se evaluó la densidad de corriente y el tiempo en un diseño central compuesto para la obtención del porcentaje de remoción de manganeso.

La estructura del informe consta de cuatro capítulos: en el capítulo I, se desarrolló el marco teórico empleando las bases teóricas y los antecedentes, se eligieron de acuerdo al tema de investigación; en el capítulo II, se consideró el planteamiento del problema, el objetivo general, los objetivos específicos con sus respectivas hipótesis y la justificación de realizar la presente investigación. En el capítulo III, se detalla los métodos utilizados que dieron cumplimiento a los objetivos planteados. En el capítulo IV, se muestra los resultados obtenidos con su respectiva interpretación y discusión utilizando los fundamentos teóricos y los antecedentes elegidos. Por último, se expone las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LA LITERATURA

#### 1.1. Marco teórico

##### 1.1.1. Manganeso

Hernandez (2019), indica que el manganeso es un metal de transición blanco grisáceo, sus estados de oxidación son (2+, 3+, 4+, 6+ y 7+), debido a su gran afinidad con el oxígeno se presenta en forma de óxidos, se utiliza como aditivo para mejorar el octanaje del combustible.

Röllin y Nogueira (2019), explican que el manganeso se utiliza en la fabricación de fuegos artificiales, baterías secas, pinturas, acero; también se utiliza en el  $\text{KMnO}_4$ , que es un reactivo de laboratorio muy común debido a sus propiedades oxidantes.

Tabla 1

*Propiedades químicas del manganeso*

Nombre	Manganeso
Símbolo	Mn
Numero atómico	25
Valencia	2,3,4,6,7
Estado de oxidación	2
Configuración electrónica	$[\text{Ar}]3d^54s^2$
Masa atómica (g/mol)	54.94
Densidad (g/mL)	7.43
Punto de ebullición (°C)	2150

Fuente: Lazo (2012).

#### **1.1.1.1. Contaminación del manganeso en el agua**

Rakhtshah *et al.* (2022), mencionan que el manganeso usualmente se encuentra en el medio acuoso como ion manganeso ( $Mn^{2+}$ ) y es más soluble en aguas residuales acidas que en aguas residuales alcalinas, en algunas aguas de pozos poco profundos, se puede encontrar compuestos orgánicos y coloides de manganeso.

#### **1.1.1.2. Efectos en el medio ambiente**

Lazo (2012), sostiene que concentraciones altas de manganeso causan el desarrollo de tumores en animales, limitan el proceso fotosintético en las plantas; cuando las plantas absorben en exceso el manganeso por medio de sus raíces, generan inflamación de su pared celular y aparecen puntos marrones en sus hojas.

#### **1.1.1.3. Consecuencias en la salud**

Kwakye *et al.* (2015), señalan que niveles elevados de manganeso en el agua potable causa afecciones en los pulmones, hígado y sistemas vasculares, disminución de la presión sanguínea, daños neurológicos como la enfermedad de Parkinson mangánico. AlTowyan *et al.* (2022), indican que niveles altos de manganeso en los niños pueden causar daños en el cerebro, reduciendo las capacidades motrices, como la dificultad de hablar y caminar.

#### **1.1.1.4. Estándares de Calidad Ambiental del Agua**

Según el Decreto Supremo N° 004-2017 del Ministerio del Ambiente se aprueban los Estándares de Calidad Ambiental del agua y se establecen disposiciones complementarias:

- Para la Categoría 1-A; aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable el nivel máximo admitido para el manganeso es 0.4 mg/L.
- Para la Categoría 1-B; aguas superficiales destinadas para recreación el límite máximo establecido en el manganeso es de 0.1 mg/L.
- Para la Categoría 3; para riego de vegetales (D1) y bebida de animales (D2) el límite máximo permitido en el manganeso es de 0.2 mg/L (MINAM, 2017).

### 1.1.2. Electrocoagulación

Para Kambuyi *et al.* (2021), la electrocoagulación se presenta como una alternativa competente en el tratamiento de aguas residuales, en este proceso se aplica corriente eléctrica a los electrodos de hierro o de aluminio que son los más utilizados en la oxidación de los ánodos de sacrificio, para la formación in situ del coagulante y Sediqi *et al.* (2021) indica que en el medio acuoso se desestabilizan las partículas contaminadas que son adsorbidas por el coagulante formado.

Tegladza *et al.* (2021), detallan que una celda electrolítica en su forma más sencilla tiene un ánodo y un cátodo, las cuales están conectados a una fuente de energía. El potencial suministrado en el ánodo conduce a la reacción de oxidación, mientras que en el cátodo se da la reacción de reducción.

Según Garcia *et al.* (2017), las aguas residuales de diferentes actividades industriales que han sido tratadas por electrocoagulación, han obtenido resultados alentadores en la remoción de contaminantes.

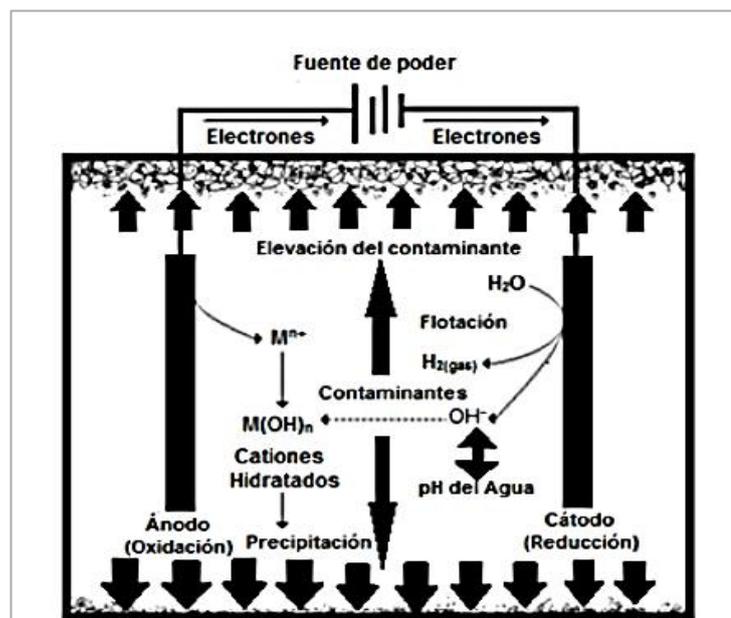


Figura 1. Celda electrolítica con ánodo y cátodo  
Fuente: Arboleda y Herrera (2015).

### 1.1.2.1. Mecanismos de la electrocoagulación

**Formación del coagulante.** Se presenta por oxidación electrolítica del ánodo, el cual desprende los cationes metálicos; mientras que en la superficie del cátodo se da la hidrólisis del agua y se obtiene los iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), ambos iones se unen y forman el coagulante in situ (Akter *et al.*, 2022).

**Desestabilización de los contaminantes.** Es la desestabilización de partículas en suspensión, partículas coloidales que sufren un rompimiento en su estructura, debido a la compresión de su doble capa difusa, cuyas cargas negativas de los contaminantes son neutralizadas por las cargas positivas de los complejos metálicos del medio acuoso (Sediqi *et al.*, 2021).

**Eliminación de contaminantes por adsorción de flóculos.** El coagulante formado in situ, adsorbe las partículas desestabilizadas y conduce las partículas coloidales en forma de flóculos hacia la superficie, por medio de los gases generados en el ánodo de  $\text{O}_2$  y en el cátodo de  $\text{H}_2$  (Tegladza *et al.*, 2021).

### 1.1.2.2. Reacciones presentes en el proceso de electrocoagulación

En el proceso de electrocoagulación se forman las siguientes reacciones químicas descritas por Ingelsson *et al.* (2020):

Para el metal:

- En el ánodo ocurre la reacción de oxidación:

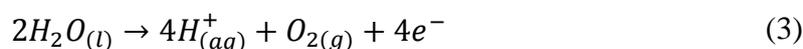


- En el cátodo se presenta la reacción de reducción:



En el agua ocurre la electrolisis:

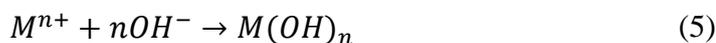
- En el ánodo se presenta la liberación del gas oxígeno:



- En el cátodo se presenta la liberación de los iones hidroxilo y la del gas hidrógeno como se muestra en la ecuación (4):



Los iones metálicos desprendidos por el ánodo unidos con los iones hidroxilo liberados en el cátodo, se forma el coagulante:



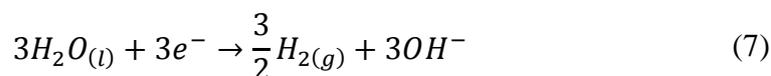
Tegladza *et al.* (2021) afirman que, cuando los electrodos son de aluminio la disolución del ánodo produce iones  $Al^{3+}$  al combinarse con los iones  $(OH)^-$  del agua reaccionan para formar especies monoméricas y poliméricas que dependen del pH de la solución para transformarse en  $Al(OH)_3$ .

Según Othmani *et al.* (2022), el coagulante formado tiene gran afinidad por las partículas contaminantes, que son llevados a la zona de flotación por los gases liberados durante el proceso, las reacciones que se forman son:

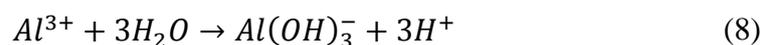
En el ánodo:



En el cátodo:



En el medio acuoso:



Arturi *et al.* (2019), explican que el hidróxido de aluminio  $Al(OH)_3$  es el coagulante formado, es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que presenta un área superficial con características adsorbentes en la remoción de contaminantes.

### Reacción con el manganeso

Casquino (2018), menciona que el  $Al(OH)_3$  libera los iones hidroxilo, que se unen a los iones  $Mn^{2+}$  para formar especies precipitadas de  $Mn(OH)_2$  ocasionando un incremento en el pH del medio acuoso y se representa con la siguiente ecuación:



Al culminar el tratamiento por electrocoagulación se separan los especies precipitadas por filtración permitiendo que se regule el pH a valores entre 6 a 8 (Arturi *et al.*, 2019).

### 1.1.2.3. Factores que afectan la electrocoagulación

#### a) Densidad de corriente

Mousazadeh *et al.* (2021), mencionan que la densidad de corriente es un factor clave para la electrocoagulación y que debe emplearse una densidad de corriente adecuada entre 1 a 20 mA/cm<sup>2</sup>.

Para Melo y Sacristan (2018), la densidad de corriente se considera como la relación que existe entre la corriente que se suministra al sistema y el área de la superficie de los ánodos los cuales desprenden los iones aluminio, estos en contacto con el medio acuoso forman el coagulante in situ hidróxido de aluminio, el cual realiza la remoción de contaminantes.

Por otro lado, Arboleda y Herrera (2015) indican que después de haber alcanzado una corriente óptima, un aumento en la densidad de corriente no incrementa la eficiencia del tratamiento, debido a que la energía eléctrica se convierte en energía calorífica generando un calentamiento en el medio acuoso.

#### b) Tiempo

Aguilar (2015) menciona que, a mayor tiempo mayor es la cantidad de flóculos formados, que son llevados hacia la superficie por el gas oxígeno (O<sub>2</sub>) liberado en el ánodo y por el gas hidrógeno (H<sub>2</sub>) liberado en el cátodo para su posterior precipitación.

Para Prieto *et al.* (2012) a medida que transcurre el tiempo aumenta la eliminación de contaminantes hasta alcanzar su máxima eficiencia, un aumento adicional en el tiempo ya no es significativo en la eficiencia del proceso debido al consumo de electrodos.

Según Melo y Sacristan (2018), la optimización del tiempo de operación es un factor importante que permite alcanzar la condición adecuada, para una mejor eficiencia en la eliminación del contaminante.

### c) Efecto del pH

Varía durante el proceso de electrocoagulación, esta variación es dependiente del material de los electrodos, del pH inicial del agua a tratar y actúa como regulador durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas y disminuir para aguas residuales alcalinas (Arturi *et al.*, 2019).

Cuando la muestra problema tiene un pH de inicio menor a 6 es de carácter ácido y es recomendable el uso de electrodos de aluminio; si el pH de la muestra problema es neutro o alcalino lo adecuado es el uso de electrodos de hierro (Kobyá *et al.*, 2016).

### d) Temperatura

En el proceso de electrocoagulación, la temperatura se incrementa hasta 60° C para luego decrecer, efecto que aumenta la velocidad de las reacciones químicas y a su vez permite la muerte de microorganismos (Sediqi *et al.*, 2021).

El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuido al aumento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio que se presenta en la superficie de los electrodos (Poma y Quispe, 2016).

### e) Conductividad

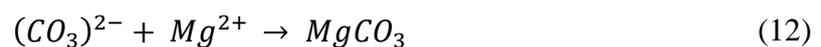
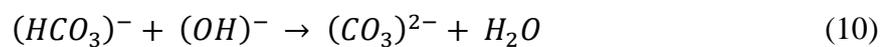
Cuando la conductividad no es elevada, es frecuente la adición de electrolitos como KCl y NaCl, consiguiéndose así una disminución en el potencial de la celda y un ahorro energético (Othmani *et al.*, 2022).

Se recomienda el uso del electrolito NaCl para aumentar la conductividad eléctrica, que a su vez permite el incremento de la densidad de corriente, cuya función es la liberación de los iones  $Al^{+3}$  que al unirse con los iones  $(OH)^{-}$  generados en el cátodo, se forma el coagulante in situ hidróxido de aluminio que cumplirá con la remoción de contaminantes (Ebba *et al.*, 2022).

Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente, cuando se mantiene constante el voltaje de la celda de electrocoagulación; adicionalmente, si se incrementa la conductividad, manteniendo constante la densidad de corriente, ocasiona la disminución del voltaje (Castañeda y Choton, 2018).

#### f) Electrolito de soporte

Pantoja (2012), menciona que el NaCl es utilizado para incrementar el contenido de los iones cloruro, para que puedan reducir los efectos que ocasionan los iones  $(\text{HCO}_3)^-$  y  $(\text{SO}_4)^{2-}$ , al precipitarse con los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  como la generación de una envoltura en las paredes de los electrodos, disminuyendo así la eficiencia del tratamiento, según las siguientes reacciones químicas descritas por Barboza (2011):

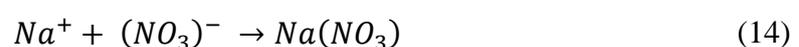


Para Xu *et al.* (2017), el contenido de iones cloruro en las muestras de agua impiden que los iones sulfato  $(\text{SO}_4)^{2-}$ , se precipiten con los iones calcio  $\text{Ca}^{2+}$  y formen una capa de aislamiento en los ánodos, indicando que los iones cloruro son los que se unen con los iones calcio como se muestra:

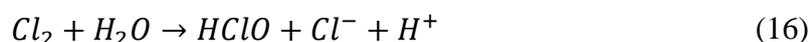


Según Ebba *et al.* (2022) para evitar la pasivación del ánodo de sacrificio es importante la adición de un electrolito como el NaCl, que permite mejorar la disolución del ánodo.

Sin embargo, Abdel *et al.* (2020) indican que se debe controlar la dosis de cloruro de sodio (NaCl), para evitar que un exceso de iones  $\text{Na}^+$  se precipiten con los iones  $(\text{NO}_3)^-$  según la siguiente ecuación:



Kamel *et al.* (2022), recomiendan añadir a la muestra a tratar la sal cloruro de sodio (NaCl), para que los iones cloruros ( $Cl^-$ ) en presencia de corriente eléctrica produzcan electrolíticamente el ácido hipocloroso (HClO), cuya función es la desinfección del agua y su formación se muestra a continuación.



### g) Material de electrodo y distribución

Ingelsson *et al.* (2020), explican que es necesario elegir adecuadamente el material de las placas o electrodos, porque de estos dependerán que ocurran las reacciones de oxidación y reducción, las placas más utilizadas son el hierro y el aluminio.

Por otro lado, Yu *et al.* (2019) indican que la deficiencia del uso de los placas de hierro, se debe a la generación de un color amarillo durante el tratamiento lo que incrementa la turbidez, sugiriendo que una buena alternativa son las placas o electrodos de aluminio.

En el estudio realizado por Porto (2014), se menciona que se obtuvieron bajos porcentajes de remoción de arsénico empleando distancias de separación menores a 1.5 cm en los electrodos, debido al choque de flóculos que se presentaron en la superficie de los electrodos, que impidieron la circulación correcta del medio acuoso.

Para Melo y Sacristan (2018), una distancia de separación mayor a 2 cm, consume mayor voltaje y energía eléctrica.

Según AlJaberi *et al.* (2020), los factores más importantes que afectan la electrocoagulación, son la densidad de corriente y tiempo; sin embargo, si la muestra problema presenta conductividad baja, se debe considerar añadir un electrolito de soporte para elevar la conductividad.

#### 1.1.2.4. Ventajas y desventajas de la electrocoagulación

##### A. Ventajas

Las principales ventajas de la electrocoagulación son las siguientes:

- Los tratamientos convencionales son costosos, en comparación con el tratamiento por electrocoagulación (Kambuyi *et al.*, 2021).
- En muestras acidas el pH se incrementa entre 6 a 8 y en muestras alcalinas el pH disminuye hasta llegar a valores cercanos al neutro (Arturi *et al.*, 2019).
- Genera lodos con menor contenido de agua y presenta menor dificultad de disposición final de estos lodos (Sediqi *et al.*, 2021).
- Los flóculos son de mayor tamaño en comparación a los flóculos formados en la coagulación química (Tegladza *et al.*, 2021).
- Se obtienen resultados eficientes, en la eliminación de una amplia variedad de contaminantes (García *et al.*, 2017)
- La electrocoagulación presenta menor cantidad de sólidos disueltos en las aguas tratadas, en comparación con la coagulación química, que requiere de insumos químicos, lo cual permite reducir los costos de tratamiento de las aguas contaminadas, para su reutilización (Kobyá *et al.*, 2016).
- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras (Akter *et al.*, 2022).
- Los gases producidos en el tratamiento contribuyen a la disminución de contaminantes, debido a que estos llevan a los contaminantes a la superficie (Kambuyi *et al.*, 2021).

##### B. Desventajas

Las principales desventajas del proceso de electrocoagulación son:

- La capa de óxido formado en el ánodo, imposibilita el paso de la corriente eléctrica en el sistema, ocasionando una disminución en la eficiencia del tratamiento (Ingelsson *et al.*, 2020).
- Es preciso reemplazar los electrodos de sacrificio (Akter *et al.*, 2022).

- Según el material del electrodo utilizado como ánodo de sacrificio, se presentará alto contenido de hierro y aluminio en los lodos (Mousazadeh *et al.*, 2021).

#### 1.1.2.5. Diseño de una celda de electrocoagulación

En el diseño de una celda de electrocoagulación se consideran las siguientes características descritas por Das y Nandi (2021):

- Tipo de operación, por lotes (batch) o continuo.
- El flujo de corriente dentro del reactor debe ser óptima para garantizar la transferencia de electrones desprendidos de los ánodos de aluminio en el medio acuoso.
- Si la conductividad de la solución es baja se debe añadir un electrolito.
- El material de electrodos y la distancia de separación deben ser los adecuados.

Yu *et al.* (2019), mencionan que el volumen de la celda electrolítica y el número de electrodos son determinantes en la formación de flóculos, en el correcto movimiento de los gases liberados en el proceso de electrocoagulación, antes de aplicar una densidad de corriente al sistema, se debe considerar la concentración inicial del contaminante y el volumen de la muestra de agua a tratar.

Othmani *et al.* (2022), indican que el voltaje empleado tiene relación directa con el consumo energético y puede variar de acuerdo a la conductividad alta o baja de una muestra de agua, así como también la distancia entre electrodos influye en el consumo energético.

Das y Nandi (2021), afirman que la conexión eléctrica puede ser monopolar, cuando los electrodos o placas están conectados en paralelo y sometidos al mismo voltaje; o puede ser bipolar cuando las placas de los extremos se conectan hacia la fuente y las placas restantes toman la polaridad contraria a la placa que tienen en frente a la que se le denomina conexión en serie.

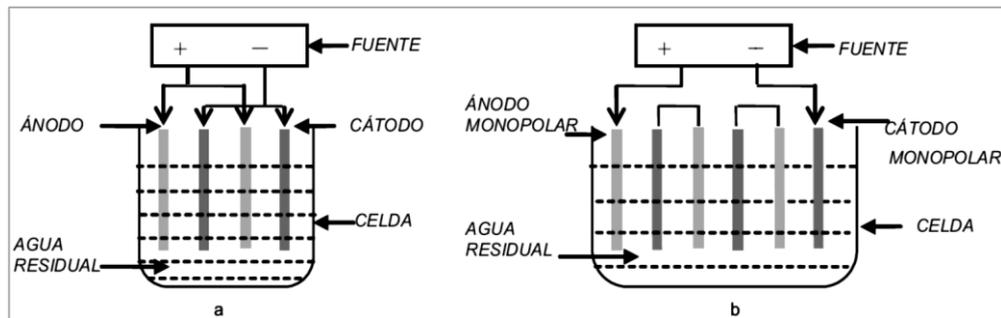


Figura 2. Reactores con electrodos monopolares en paralelo (a) y en serie (b)  
Fuente: Restrepo *et al.* (2006).

### 1.1.3. Río Chacapalca

El Río Chacapalca se encuentra en el distrito de Ocuvi, provincia de Lampa y Departamento de Puno, sus aguas se encuentran contaminadas debido a la descarga de los efluentes mineros de la Unidad Minera Arasi, perteneciente a la empresa Minera Aruntani SAC.

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental realizó la Evaluación Ambiental en la Cuenca Pucará, en la época de avenida y mediante el Informe N° 100 – 2016 – OEFA/ DE – SDLB – CEAL, reportó una alta concentración de manganeso de 0.92 mg/L en el Río Chacapalca (OEFA, 2016).

Según el Informe Técnico N° 120 – 2020 – ANA – AAA. TIT – AT/ RWAA, la Autoridad Nacional del Agua, en la época de estiaje ejecutó el Monitoreo de la Calidad del Agua Superficial en la Unidad Hidrográfica de Pucará, registrando una alta concentración de manganeso de 1.036 mg/L en el Río Chacapalca (ANA, 2020). Valor que superó los Estándares de Calidad Ambiental del agua en la categoría 3: (D1) riego de vegetales y (D2) bebidas de animales de 0.2 mg/L (MINAM, 2017).

#### 1.1.3.1. Parámetros físicos y químicos de las aguas residuales

##### a) pH

Es la manera de expresar la concentración de iones hidrógeno, un pH menor a 6 indica solución ácida, un pH mayor a 8 revela que la solución es alcalina y un pH de 7 es neutro (Miranda, 2012).

### **b) Conductividad eléctrica**

Es la expresión numérica de la habilidad del agua para transportar una corriente eléctrica, mide el contenido total de iones disueltos en el agua (Poma y Quispe, 2016).

### **c) Turbidez**

La turbidez es una medida en el cual el agua pierde su transparencia, debido a la presencia de partículas en suspensión, los valores altos de turbidez se deben a la presencia de partículas como algas, arcillas, partículas orgánicas y sustancias solubles en el agua (Barboza, 2011).

### **d) Dureza**

Miranda (2012), indica que la dureza representa el contenido total de cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y se cuantifica como  $\text{CaCO}_3$  según la siguiente clasificación: “Aguas blandas de 0 a 75 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ; aguas moderadamente duras de 75 a 150 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ; aguas duras de 150 a 300 mg/L como  $\text{CaCO}_3$  y aguas muy duras más de 300 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ” (p. 181).

### **e) Cloruros**

Las aguas naturales contienen cloruros en concentraciones que varían ampliamente, las aguas de manantiales usualmente tienen una concentración baja de cloruros, mientras que las aguas de río o subterráneas usualmente tienen una cantidad considerable (Miranda, 2012).

### **f) Nitratos**

La presencia de nitratos en fuentes hídricas es el resultado indirecto del empleo intensivo de fertilizantes, a base de nitrógeno que se infiltran en los suelos por las diferentes prácticas agrarias (Melo y Sacristan, 2018).

### **h) Sulfatos**

Los sulfatos se encuentran de manera natural en los minerales sulfurados, es por ello que se encuentran presentes en las aguas ácidas de mina; en altas

concentraciones ocasionan efectos laxantes e irritación gastrointestinal (Mamelkina *et al.*, 2017).

### i) Manganeso

El manganeso se encuentra en las aguas residuales industriales y mineras; como óxido de manganeso (MnO); en estado coloidal se presenta en la turbiedad como hidróxido de manganeso  $Mn(OH)_2$  y como partículas suspendidas relativamente gruesas como óxido mangánico ( $Mn_2O_3$ ) (Rakhtshah *et al.*, 2022).

#### 1.1.4. Diseño experimental central compuesto (DCC)

AlJaberi *et al.* (2020), explican que el diseño central compuesto de Box-Wilson conocido como rotatable, es uno de los diseños más utilizados por su gran flexibilidad, cuando se busca ajustar los datos experimentales de una investigación, cuya base es un diseño factorial  $2^k$  que presenta factores menores de 5 variables ( $k < 5$ ).

En el diseño central compuesto se considera puntos adicionales ( $2k$ ) en los ejes de coordenadas a una distancia del punto central del diseño  $(\pm\alpha, 0, \dots, 0)$ ,  $(0, \pm\alpha, \dots, 0)$ ,  $(0, 0, \dots, \pm\alpha)$ , que permiten analizar la existencia de curvatura y describir acerca los efectos cuadráticos; a su vez se considera los puntos replicados en el centro del diseño para hallar la varianza del error experimental, según AlJaberi *et al.* (2020).

El número de pruebas experimentales del diseño central compuesto, está dado por la siguiente relación descrita por Montgomery (2020):

$$N = 2^k + 2k + n_o \quad k < 5 \quad (18)$$

Donde  $N$  es el número de pruebas experimentales,  $2^k$  es el número de puntos factoriales,  $2k$  es el número de puntos estrella y  $n_o$  es el número de observaciones replicadas en el centro del diseño como lo señala Montgomery (2020).

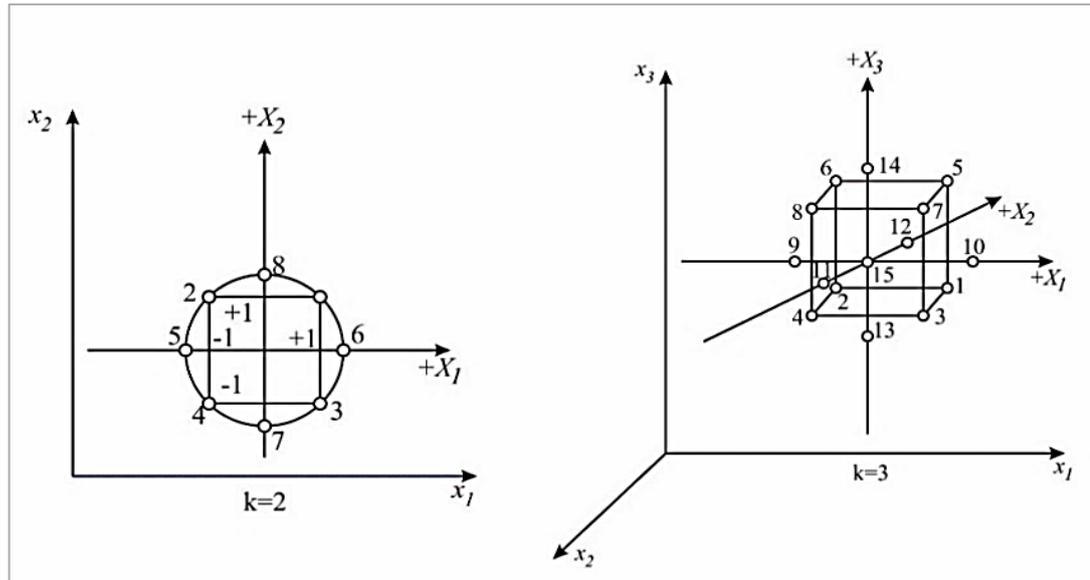


Figura 3. Distribución de puntos del diseño rotable

Fuente: Lazic (2004).

Lazic (2004), menciona que un diseño central compuesto se hace rotable mediante la elección adecuada del espaciamiento axial ( $\alpha$ ).

Tabla 2

*Diseño central compuesto rotable con diferentes números de factores*

Numero de factores (k)	2	3	4	5	6
Puntos Factoriales, ( $n_f$ )	4	8	16	32	64
Puntos Axiales, ( $n_a$ )	4	6	8	10	12
Valor de ( $\alpha$ )	1.414	1.682	2	2.378	2.828
Puntos centrales máximos ( $N_o$ )	5	6	7	10	15
Puntos centrales mínimos ( $n_o$ )	2	3	4	5	6

Fuente: Lazic (2004).

Tabla 3

*Matriz del diseño central compuesto de 2 factores*

N°	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	+1.414	0
6	-1.414	0
7	0	+1.414
8	0	-1.414
9	0	0
10	0	0

Fuente: Montgomery (2020).

#### 1.1.4.1. Estimación del modelo matemático de segundo orden

Montgomery (2020), indica que en un diseño central compuesto se debe considerar por lo menos 5 niveles en cada factor, para estimar la curvatura del gráfico de superficie respuesta y se representa con un modelo matemático de segundo orden.

$$Y = \beta_0 + \beta_i X_1 + \beta_j X_2 + \beta_{ii} X_1^2 + \beta_{jj} X_2^2 + \beta_{ij} X_1 X_2 \quad (19)$$

Donde:

- Y es la variable respuesta.
- X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub> son las variables codificadas.
- $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  son los coeficientes del modelo matemático.

## 1.2. Antecedentes

### 1.2.1. Antecedentes a nivel local

En el estudio realizado por Mayta (2012), se removió 98.85 % de cromo y 47.65 % de DQO de las agua residuales de curtiembre, aplicando un voltaje de 10 V y un tiempo de 45 minutos.

Porto (2014), evaluó la variación de la densidad de corriente en un rango de 3.5 a 7.0 mA/cm<sup>2</sup> y el tiempo de 10 a 20 minutos encontrando valores óptimos de 5.3 mA/cm<sup>2</sup> y tiempo de 17.18 minutos, como resultado se disminuyó la concentración de arsénico a 0.0075 mg/L y se obtuvo porcentaje de remoción del 92.57 %.

Quispe (2015), empleo electrodos de aluminio en la celda de electrocoagulación, cada electrodo presento una superficie de 6.3 cm de altura por 8 cm de ancho sumergida con la muestra problema y el área efectiva de reacción de aluminio fue de 302.4 cm<sup>2</sup>; se evaluó la densidad de corriente en un rango de 3.31 a 6.61 mA/cm<sup>2</sup> y el tiempo de 15 a 30 minutos obteniendo valores óptimos de 6.61 mA/cm<sup>2</sup> y 30 minutos, los cuales disminuyeron la concentración de mercurio en la muestra M-1 a 0.018 mg/L con un 97.00 % de remoción y en la muestra M-2 a 0.026 mg/L consiguiendo un 94.93 % de remoción de mercurio.

Lopez (2017), evaluó la recuperación de manganeso por medio del proceso de precipitación alcalina para lo cual, se utilizó como coagulante al Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> y como floculantes al NaOH e Ca(OH)<sub>2</sub>, recuperándose un 94.09 % de manganeso con NaOH y 98.10 % de manganeso con Ca(OH)<sub>2</sub>.

Humpire (2017), aplico la electrocoagulación en la remoción de la turbidez, para lo cual construyo una celda de material acrílico, que presento resistencia contra impactos y caídas; con electrodos de aluminio que disminuyo la turbidez a 324 NTU obteniendo un porcentaje de remoción del 91 % con valores óptimos: pH de 6 y tiempo de 34 min.

### 1.2.2. Antecedentes a nivel nacional

En el estudio realizado por Barboza (2011), se disminuyó la conductividad eléctrica de 649 uS/cm a 628 uS/cm a condiciones óptimas: tiempo de 25 min, densidad de corriente de 12.5 mA/cm<sup>2</sup> y pH de 7.34; en el que se removió un 94.65 % de turbidez, un 65.1 % de coliformes fecales y un 64.8 % de DBO.

Lazo (2012), aplico la técnica de oxidación - filtración, para lo cual utilizo insumos químicos de 6 mg/L de óxido de calcio, 2.5 mg/L de hipoclorito de calcio y 6 mg/L de sulfato de aluminio, después del tratamiento se obtuvo un porcentaje de remoción de manganeso del 83 %.

Aguilar (2015), realizo el tratamiento por electrocoagulación en el cual se disminuyó la turbiedad de 660 NTU a 17 NTU con remoción del 97 % del agua residual sintética aplicando una intensidad de 5 Amperios, pH de 7.12 y tiempo de 15 minutos.

Huayta (2017), aplico la electrocoagulación y obtuvo la disminución de sulfatos de 2098 a 27.33 mg/L; a su vez consiguió porcentajes de remoción: 98.69 % de sulfatos, 98.06 % de cloruros y 78.28 % de calcio a condiciones óptimas de trabajo: tiempo de 1 hora, voltaje de 70 voltios y se empleó electrolito de NaCl.

Castañeda y Chotón (2018), consiguieron porcentaje de remoción de hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) de 76.20 % de drenaje ácido de mina, aplicando valores óptimos: densidad de corriente de 80 mA/cm<sup>2</sup>, pH de 6 y tiempo de 40 minutos.

Casquino (2018), analizo las aguas del Río Rímac cuya concentración inicial de manganeso fue 0.392 mg/L; en el tratamiento utilizó ánodos y cátodos de aluminio en la celda electrolítica, después del tratamiento la concentración final de manganeso se disminuyó en 0.017 mg/L con porcentaje de remoción del 96.01 %; la variación de los parámetros antes y después del tratamiento fueron: turbidez de 3.20 a 0.97 NTU, pH de 9.02 a 8.30 y conductividad eléctrica de 450 uS/cm a 220.87 uS/cm.

### 1.2.3. Antecedentes a nivel internacional

Shafaei *et al.* (2010), removieron manganeso de soluciones sintéticas de sulfato de manganeso  $\text{Mn}(\text{SO}_4)$ ; para lo cual emplearon en la celda electrolítica ánodos y cátodos de aluminio; usaron cloruro de sodio (NaCl) para incrementar la conductividad eléctrica; se obtuvo un 94.4 % de remoción de manganeso aplicando densidad de corriente de 9.4 mA/cm<sup>2</sup> y tiempo de 60 minutos y se registró un pH final de 7.

Pantoja (2012), realizó la electrocoagulación a las aguas residuales de mina con electrodos de hierro; se obtuvo porcentajes de remoción: hierro de 99 % y cinc del 94 % a condiciones óptimas: densidad de corriente de 9.1 mA/cm<sup>2</sup> y tiempo de 24

minutos, los cuales tuvieron influencia para incrementar el pH de 2.4 a 6.14 y disminuir la conductividad eléctrica de 16000 a 4450 uS/cm al culminar el tratamiento.

Ramírez (2013), diseñó una celda con 4 ánodos y 4 cátodos de cobre con una distancia de separación entre electrodos de 1 cm a condiciones de operación: voltaje de 7.5 voltios, intensidad de 26.82 amperios y tiempo de 15 minutos; se obtuvieron porcentajes de remoción de hierro 45.97 % y manganeso de 24.27 % de aguas de pozo.

Nariyan *et al.* (2017), emplearon ánodos de hierro y cátodos de acero inoxidable en la celda electrolítica, se obtuvo remoción del cinc del 78.2 % con densidad de corriente a 70 mA/cm<sup>2</sup> y tiempo de 120 minutos; sin embargo, en el manganeso solo se removió un 23.4 % con la misma densidad de corriente de 70 mA/cm<sup>2</sup> y tiempo de 60 minutos.

Xu *et al.* (2017), removieron los iones zinc (Zn<sup>+2</sup>) y manganeso (Mn<sup>+2</sup>) de las aguas residuales de fundición de hierro, el cual presentó alto contenido de iones (SO<sub>4</sub>)<sup>-2</sup>, los cuales formaron una película pasiva en la superficie de los electrodos, causando un efecto negativo en la eliminación de los iones manganeso por lo que se obtuvieron porcentajes de remoción de 70.37 % de Mn<sup>+2</sup> y 99.16 % de Zn<sup>+2</sup>.

Arturi *et al.* (2019), realizaron el tratamiento de las aguas residuales de gelatina para lo cual, emplearon electrodos de aluminio como ánodos y cátodos en la celda con distancia de separación entre electrodos de 1.5 cm; después del tratamiento se observó una máxima disminución de turbidez de 460 a 27 NTU, cuando el pH se incrementó a valores entre 6 y 8 lo que permitió alcanzar un porcentaje de remoción de turbidez del 94.13 %.

Salman (2019), evaluó el efecto de la concentración inicial de manganeso, el efecto de la densidad de corriente y el tiempo; se obtuvieron valores óptimos: concentración inicial de 100 mg/L, densidad de corriente de 4 mA/cm<sup>2</sup> y tiempo de 120 min; en el proceso se utilizó electrolito de sulfato de sodio (0.1 M), que permitió alcanzar una remoción de manganeso del 90.16 %.

AlJaberi *et al.* (2020), realizaron el tratamiento de las aguas residuales de aceite por electrocoagulación con electrodos de aluminio y emplearon un diseño experimental en el cual sus variables de estudio fueron la densidad de corriente y tiempo obteniendo valores óptimos de 1.63 amperios y tiempo de 40 minutos que les permitió conseguir



porcentajes de remoción de sólidos totales suspendidos del 80 % y de bicarbonatos del 60.38 %; así mismo, en el diseño experimental se realizó el análisis de varianza que dio un valor de probabilidad menor a 0.05 indicando que las variables de estudio, densidad de corriente y tiempo tienen influencia sobre el porcentaje de remoción.

Das y Nandi (2021), obtuvieron mejores resultados utilizando electrodos de aluminio en ánodos y cátodos en la celda; se empleó NaCl como electrolito, después del tratamiento por electrocoagulación, se logró disminuir la conductividad eléctrica de 656 a 498 uS/cm, la turbidez de 10.1 a 0.7 NTU y a su vez se incrementó el pH de 7.25 a 7.52; obteniendo porcentaje de remoción de manganeso de 97.99 % en 40 minutos y 6.85 mA/cm<sup>2</sup>; se recomendó no emplear densidades de corriente superiores debido a que liberan mayor contenido de iones aluminio (Al<sup>+3</sup>) y se convierten en contaminantes secundarios en el agua tratada.

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1. Identificación del problema

La contaminación de manganeso en las aguas del Río Chacapalca se originó debido a las actividades que realiza la Minera Arasi SAC, ubicado en el Distrito de Ocuvi, Provincia de Lampa y Departamento de Puno, lo cual ha generado un impacto negativo en el medio ambiente con la muerte de peces, envenenamiento de ganado y daños en los cultivos de la zona aledaña, como también ha deteriorado la salud de los habitantes del distrito de Ocuvi que consumen estas aguas (La República, 2018). La Autoridad Nacional del Agua ejecuto el monitoreo de la Calidad del Agua en la Unidad Hidrográfica de Pucara en el cual se registró una alta concentración de manganeso de 1.036 mg/L en el Río Chacapalca (ANA, 2020). Valor que supero los Estándares de Calidad Ambiental para agua de 0.2 mg/L en la categoría 3 de riego de vegetales y bebidas de animales (MINAM, 2017).

Concentraciones elevadas de manganeso en el agua puede causar complicaciones en el sistema respiratorio, hígado, disminución de la presión arterial, trastornos neurológicos como el mal de Parkinson mangánico (Kwakye *et al.*, 2015). En el medio ambiente la elevada concentración de manganeso, causa tumores en los animales, limitan el proceso fotosintético de las plantas generando manchas marrones en las hojas (Lazo, 2012).

Se han empleado métodos convencionales en el tratamiento de aguas contaminadas con manganeso como la coagulación química, la precipitación alcalina, resinas de intercambio iónico, los cuales requieren de un alto costo económico y generan residuos secundarios (Akter *et al.*, 2022). Ante la problemática mencionada, se presenta la alternativa. “Evaluación de la electrocoagulación en la remoción de manganeso de las aguas del Río Chacapalca, Ocuvi - Puno”.

## 2.2. Enunciados del problema

### 2.2.1. Enunciado general

¿Influirá la evaluación de la electrocoagulación en la remoción de manganeso de las aguas del Río Chacapalca, Ocuviri - Puno?

### 2.2.2. Enunciados específicos

- ¿Cuáles son las características que debe tener la celda de electrocoagulación?
- ¿Qué características físico - químicas tendrán las aguas del Río Chacapalca antes y después del tratamiento por electrocoagulación?
- ¿La evaluación de la densidad de corriente y tiempo en un diseño experimental determinara el porcentaje de remoción de manganeso?

## 2.3. Justificación

### 2.3.1. Justificación técnica

La técnica de electrocoagulación implica el empleo de electrodos, si son de aluminio se libera los iones aluminio en los ánodos que se unen con los iones hidroxilo generados por los cátodos y se forma in situ el coagulante hidróxido de aluminio, siendo una de las ventajas debido a que no requiere del empleo de un coagulante comercial para la remoción de contaminantes, además en el tratamiento por electrocoagulación se regula el pH, en muestras acidas se incrementa (Arturi *et al.*, 2019). Por lo que esta investigación, se centra en la evaluación de la electrocoagulación para la remoción de manganeso de las aguas del Río Chacapalca, con pruebas experimentales que permitan conseguir los parámetros óptimos que contribuyan a mejorar esta técnica para su aplicación en sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales y mineras.

### 2.3.2. Justificación económica

Para tratar aguas residuales con manganeso los métodos tradicionales se han mostrado deficientes debido a que presentan lodos difíciles de tratar, requieren de grandes cantidades de insumos químicos y su consumo energético es elevado (Ingelsson *et al.*, 2020). Eso nos motivó a buscar otra alternativa como la electrocoagulación, la cual no

requiere del empleo de insumos químicos y no demanda de un alto consumo energético, considerándose viable económicamente para la remoción de manganeso de las aguas del Río Chacapalca.

### **2.3.3. Justificación social**

El manganeso es un metal pesado que tiene dificultad para degradarse y se acumula en el organismo de los seres vivos. Según el monitoreo realizado por la Autoridad Nacional del Agua en la Unidad Hidrográfica de Pucara, se registró una alta concentración de manganeso de 1.036 mg/L en el Río Chacapalca (ANA, 2020). La elevada concentración de manganeso en el medio ambiente, causa tumores en los animales y disminuye el proceso fotosintético de las plantas (Lazo, 2012). Por lo mencionado, se considero importante disminuir la concentración de manganeso en el Río Chacapalca hasta niveles aceptados según el D.S. N° 004-2017-MINAM de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua en la categoría 3: riego de vegetales (D1) y bebida de animales (D2) que indica que el límite de manganeso no debe exceder de 0.2 mg/L (MINAM, 2017). Con el tratamiento de las aguas del Río Chacapalca se contribuirá a mejorar la calidad de vida de los pobladores de la comunidad de Chacapalca que utilizan el recurso hídrico para riego de sus cultivos y bebida de sus animales.

### **2.3.4. Justificación académica**

La presente investigación está dirigido a la comunidad científica y al público en general que tiene interés en el tratamiento de las aguas contaminadas de los ríos y otros cuerpos hídricos causado por las actividades industriales y mineras, con un nuevo método eficiente y económico como la electrocoagulación que consta de una celda electrolítica de instalación sencilla y con el empleo de electrodos accesibles para su adquisición. A su vez, este método requiere de tiempos cortos para la remoción de metales pesados incluido el manganeso y los lodos generados después del tratamiento son más compactos y menos hidratados lo que facilita su disposición final; en comparación a los métodos tradicionales que requieren de tiempos prolongados y generan residuos secundarios difíciles de tratar, contaminando otros ecosistemas. Por lo tanto, se considera a la electrocoagulación como una tecnología limpia y ambientalmente amigable para la descontaminación de los cuerpos hídricos de nuestra región altiplánica.

## 2.4. Objetivos

### 2.4.1. Objetivo general

Evaluar la electrocoagulación en la remoción de manganeso de las aguas del Río Chacapalca, Ocuvi - Puno.

### 2.4.2. Objetivos específicos

- Construir una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para la remoción de manganeso.
- Determinar las características físico-químicas de las aguas del Río Chacapalca antes y después del tratamiento por electrocoagulación.
- Evaluar la densidad de corriente y el tiempo en un diseño experimental que determine el porcentaje de remoción de manganeso.

## 2.5. Hipótesis

### 2.5.1. Hipótesis general

La evaluación de la electrocoagulación influirá significativamente en la remoción de manganeso de las aguas del Río Chacapalca, Ocuvi - Puno.

### 2.5.2. Hipótesis específicas

- Empleando una celda de electrocoagulación con electrodos de aluminio como ánodos de sacrificio se contribuirá a reducir el manganeso de las aguas del Río Chacapalca.
- La caracterización físico - química a las aguas del Río Chacapalca antes del tratamiento establecerá factores de operación que permitirán reducir el manganeso después del tratamiento por electrocoagulación, hasta niveles aceptables según la categoría 3 de los estándares de la calidad ambiental del agua.
- La evaluación de la densidad de corriente y tiempo en el diseño central compuesto de Box Wilson determinara adecuadamente el porcentaje de remoción de manganeso.

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Lugar de estudio**

El estudio se realizó con muestras de agua provenientes del Río Chacapalca del Distrito de Ocuvi, Provincia de Lampa y Departamento de Puno. Las aguas del Río Chacapalca se encuentran contaminadas debido a la operación, plan de cierre y aun descarga de los efluentes de la Unidad Minera Arasi perteneciente a la empresa Minera Aruntani SAC.

La parte experimental como la construcción de las dos celdas de electrocoagulación, la caracterización antes y después del tratamiento por electrocoagulación de las muestras de agua del Río Chacapalca; así como la evaluación de la densidad de corriente y tiempo en la determinación del porcentaje de remoción de manganeso, se ejecutaron en el laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la Facultad de Ingeniería de Minas de la UNA – PUNO.

#### **3.1.1. Ubicación**

##### **3.1.1.1. Localización del punto de muestreo**

##### **a) Ubicación política**

- País: Perú
- Región: Puno
- Provincia: Lampa
- Distrito: Ocuvi

## b) Ubicación geográfica

Se tomaron muestras de agua en el PMS1 a 1 Km de la confluencia del Río Azufrini con el Río Pataqueña; en el PMS2 a 0.93 Km aguas abajo del PMS1 y a 0.5 Km al norte del Cerro Villacollio de acuerdo a las siguientes coordenadas UTM.

Tabla 4

*Coordenadas de los puntos de muestreo*

Muestra	Coordenadas UTM		Altitud
	Este	Norte	
PMS1	299889	8312555	4474
PMS2	299797	8313478	4428



Figura 4. Ubicación geográfica del PMS1 y PMS2 del Río Chacapalca  
Fuente: Google Eart Pro (2022).

### 3.1.1.2. Localización del lugar de investigación

#### a) Ubicación política

- País: Perú
- Región: Puno
- Provincia: Puno

- Distrito: Puno

### b) Ubicación geográfica

Las pruebas experimentales se realizaron en el Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental, con las coordenadas UTM de la tabla 5.

Tabla 5

*Coordenadas del Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental*

Coordenadas UTM		Altitud
Este	Norte	
391321.30	8250389.3	3854



*Figura 5. Ubicación geográfica del Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la UNA - PUNO*

Fuente: Google Eart Pro (2022).

### 3.2. Población

La población estuvo orientado al tratamiento de las aguas contaminadas del PMS1 y del PMS2 del Río Chacapalca del Distrito de Ocuvi, Provincia de Lampa y Departamento de Puno; información obtenida del monitoreo de la Calidad de Agua Superficial de la Unidad Hidrográfica de Pucara, en el cual se registró una alta concentración de manganeso de 1.036 mg/L en el Río Chacapalca como lo reporta la ANA (2020); valor

que supero a los Estándares de Calidad Ambiental para agua en la categoría 3: (D1) riego de vegetales y (D2) bebidas de animales de 0.2 mg/L descrito por el MINAM (2017).

### **3.3. Muestra**

No probabilística, se colectaron muestras puntuales en zonas de máximo caudal, evitando la remoción de sedimentos, se tomaron muestras de agua de 14 L en el PMS1 y 14 L en el PMS2 y se almacenaron con hielo refrigerante entre 5 a 7 °C, para su traslado siguiendo el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (ANA, 2016).

### **3.4. Método de investigación**

El tipo de investigación tiene un enfoque cuantitativo debido a que se centró en cuantificar la recopilación de datos para su análisis. A su vez esta investigación es de nivel explicativo (Hernandez *et al.*, 2010). Los ensayos de la presente investigación fueron experimentales a escala laboratorio y se analizaron para encontrar el máximo valor de la remoción de manganeso.

### **3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos**

#### **3.5.1. Variables de estudio**

En el presente trabajo de investigación se evaluaron las siguientes variables de estudio:

Variable Independiente:

- Evaluación de la Electrocoagulación

Variable dependiente:

- Remoción de manganeso de las aguas del Río Chacapalca.

Variable Interviniente:

- Condiciones de operación

A continuación, se presenta la tabla 6 de operacionalización de variables:

Tabla 6

*Operacionalización de variables*

<b>Variab</b> les	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>
<b>Independiente</b>  Evaluación de la electrocoagulación	Evaluación de la densidad de corriente y tiempo	Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )
		Tiempo (min)
<b>Dependiente</b>  Remoción de manganeso de las aguas del Río Chacapalca	Características Físico-químicas (antes y después del tratamiento)	pH
		Conductividad Eléctrica (uS/cm)
		Turbidez (NTU)
		Dureza (mg/L)
		Cloruros (mg/L)
		Nitratos (mg/L)
		Sulfatos (mg/L)
Concentración de manganeso al inicio y al final de la remoción	Porcentaje de remoción de manganeso (%R)	
<b>Interviniente</b>	Condiciones de operación	Volumen de la muestra (L)
		Distancia entre electrodos de aluminio (cm)
		Volumen del electrolito de NaCl (mL)

### 3.5.2. Materiales, equipos e insumos químicos

#### a) Materiales

- En la construcción de las 2 celdas de electrocoagulación se emplearon: 10 placas de acrílico, 2 válvulas de descarga, 10 placas de aluminio, 6 conectores positivos y 4 conectores negativos.

- En la toma de muestras de agua: 4 frascos de polietileno de 1 L y de 0.5 L; 2 baldes de plástico 14 L cada uno; equipo de protección personal como guantes, cofia y mascarillas.
- En el tratamiento por electrocoagulación y análisis de manganeso: probetas volumétricas de 50, 100 y 1000 mL; matraces Erlenmeyer de 250, 500 y 1000 mL; vasos precipitados de 50, 500 y 1000 mL; pipetas de 1, 5 y 10 mL; micropipeta de 100 a 1000 uL; soporte de embudos, embudos de vidrio, papel filtro Whatman N° 42, pinzas, soporte universal y frasco lavador.

#### **b) Equipos**

- En la ubicación de los puntos de muestreo: Se utilizo el GPS (Garmin).
- En la toma de muestras de agua: Se uso un multiparámetro (Hanna HI 98194).
- Para el tratamiento de las muestras: Se empleo una fuente de energía (P - 3005D).
- En el análisis de manganeso: Se uso el fotómetro (Hanna HI 83200).

Los equipos de la presente investigación fueron calibrados, antes de su uso con los siguientes insumos, para obtener resultados confiables.

#### **c) Insumos químicos**

- Para la toma de muestras de agua: Se calibró el multiparámetro (Hanna HI 98194) con solución tampón de pH 4, 7 y 10; con solución de calibración para conductividad de 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (HI 7031L) y con solución de almacenamiento de electrodo de pH (HI 70300L).
- En el tratamiento por electrocoagulación: Se empleo cloruro de sodio NaCl (9 %).
- Para el análisis de manganeso rango bajo: Se utilizó ácido ascórbico con código de insumo (HI 93748A-0), solución cianuro alcalino (HI 93748B-0) e indicador PAN 0.1% (HI 93748C-0).

### 3.5.3. Parte experimental

#### 3.5.3.1. Método del primer objetivo: Construcción de la celda de electrocoagulación

Se construyeron 2 celdas y cada una contenía las siguientes características:

- a) 5 placas de acrílico de 12 cm de largo, 10 cm de ancho y 12 cm de alto que conformo un volumen total de 1.44 L; al cual se le acondiciono 1 válvula de descarga para toma de muestra.



Figura 6. Celdas con válvula de descarga

- b) 1 fuente de energía (P-3005D): 0 – 30 Voltios y 0 – 5 Amperios para cada celda.



Figura 7. Fuentes de energía

- c) Se empleo 3 conectores de polo positivo y 2 conectores de polo negativo para conectarlos a los electrodos.



*Figura 8.* Conectores positivo y negativo

- d) En cada celda se utilizó 5 placas de aluminio con un espesor de 0.1 cm, las cuales se cortaron de acuerdo al diseño propuesto por Quispe (2015).



*Figura 9.* Placas de aluminio

- e) Al distribuir los electrodos en la celda, se consideró una distancia entre electrodos de 2 cm y una distancia de electrodos ( $e_s$ ) a la cara lateral de la celda de 1 cm.

- f) Para el cálculo del número de electrodos ( $N^{\circ} E_s$ ), se consideró los valores de longitud de la celda, distancia de los electrodos a cara lateral de la celda, distancia máxima entre electrodos y espesor de la placa de acuerdo a la ecuación descrita por Arango y Garcés (2007).

$$N^{\circ} E_s = \frac{(largo\ celda) - 2(distancia\ electrodo\ cara\ lateral)}{distancia\ máx.\ entre\ electrodos + espesor\ de\ placa} \quad (20)$$

En el diseño de la celda de electrocoagulación, se consideró una distribución volumétrica que incluye tres regiones descritas por (Arango y Garcés, 2007).

- Una región superior para el depósito de los lodos de menor densidad, llamada zona de flotación.
- Una zona media donde se desarrollan las reacciones electroquímicas, llamada zona de reacción en donde se encuentran los electrodos.
- Una zona inferior, llamada zona de sedimentación en el cual se depositan por precipitación los lodos de mayor densidad

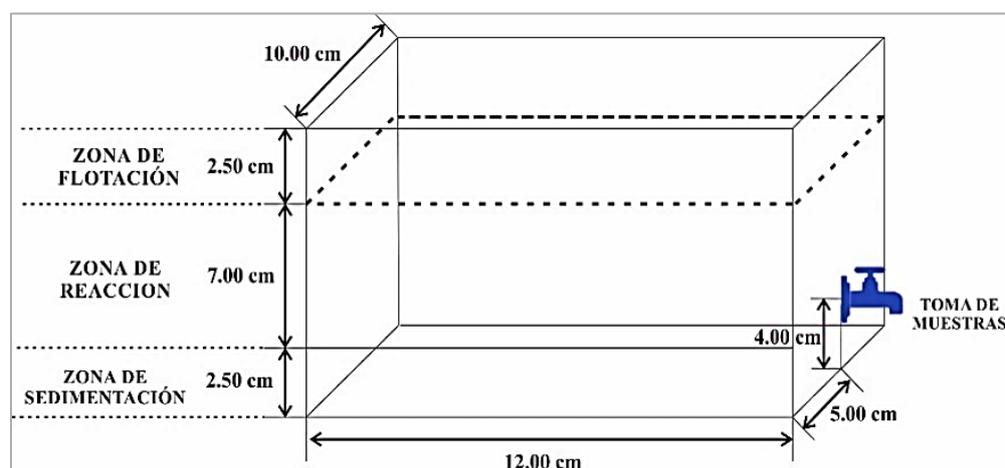


Figura 10. Regiones de la celda de electrocoagulación

### 3.5.3.2. Método del segundo objetivo: Caracterización del Río Chacapalca antes del tratamiento

En la caracterización de las aguas del Río Chacapalca antes del tratamiento, se tomaron muestras de agua de 2 puntos distintos PMS1 y PMS2, siguiendo el

Protocolo de Monitoreo de la Calidad de Recursos Hídricos Superficiales (ANA, 2016).

- Primero; los frascos de polietileno enviados por el Laboratorio Analítico del Sur, se enjuagaron 3 veces con la muestra a colectar como se visualiza en la figura 11 del extremo izquierdo.
- Segundo; se colectaron las muestras en dirección contraria a la corriente del Río Chacapalca y con 30 cm de profundidad como se muestra en la figura 11 del lado derecho.



*Figura 11.* Frascos enjuagados para la toma de muestras

- Tercero; al momento de la toma de muestras del PMS1 y del PMS2 se midió el pH y la conductividad con el multiparámetro (HI 98194).
- Cuarto; se tomaron volúmenes de 12.5 L en el PMS1 y 12.5 L en el PMS2, se almacenaron en recipientes de polietileno con destino al Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la UNA-PUNO para su tratamiento por electrocoagulación.
- Quinto; a su vez, del PMS1 se colectaron muestras de 1 L para el análisis físico-químico y 0.5 L para el análisis de manganeso, los mismos volúmenes se tomaron en el PMS2 y se almacenaron en recipientes de polietileno, como se muestra en la figura 12.



Figura 12. Muestras enviadas al laboratorio

- Sexto; las muestras se llevaron al Laboratorio Analítico del Sur acreditado por INACAL para el análisis de los parámetros mostrados de la tabla 7.

Tabla 7

*Método de análisis físico-químico y de manganeso de muestras de agua*

Parámetro	Técnica empleada	Rango de método analítico
pH	Método electrométrico.	[0 - 14] unidades de pH
Conductividad eléctrica	Método de ensayo estándar para la conductividad eléctrica en agua.	[0 - 50] mS/cm
Turbidez	Método de ensayo estándar para la turbidez del agua.	[1.2 - 10000] NTU
Dureza total	Método de ensayo estándar para la dureza del agua.	[0.2 - 24973] mg/L
Cl <sup>-</sup>	Método de nitrato mercurico para cloruros en agua.	[0.82 - 1000] mg/L
(NO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>	Método espectrofotométrico ultravioleta de segunda derivada para nitratos en agua.	[0.5 -1000] mg/L
(SO <sub>4</sub> ) <sup>2-</sup>	Método turbidimétrico para sulfatos en agua.	[10 - 4000] mg/L
Manganeso	Método ensayo estándar para manganeso en agua por absorción atómica.	[0.052 - 250] mg/L

Fuente: Métodos utilizados por el Laboratorio Analítico del Sur (LAS).

### **3.5.3.3. Método del segundo objetivo: Caracterización del Río Chacapalca después del tratamiento**

Para cumplir con este apartado, se realizó el tratamiento por electrocoagulación a las muestras de agua colectadas en el PMS1 y en el PMS2 del Río Chacapalca de acuerdo al siguiente procedimiento descrito por Quispe (2015):

1. Se realizó una limpieza previa a los electrodos, que consistió en lijar suavemente la superficie de los electrodos de aluminio y se enjuago con agua destilada.
2. A continuación, se colocaron 5 electrodos de aluminio en la celda, con una separación de 2 cm, empleando una distribución paralela y alternada para la conexión de 3 ánodos y 2 cátodos.
3. Luego se colocó en la celda, 1 litro de agua contaminada a tratar.
4. Así mismo, se colocó un volumen de 25 mL de electrolito de NaCl por litro de muestra a tratar.
5. Seguidamente, los 3 ánodos se unieron a los conectores de color rojo que representaron al polo positivo y los 2 cátodos se unieron a los conectores de color negro que fueron el polo negativo hacia la fuente de energía.
6. Se encendió la fuente de energía de corriente continua con el amperaje y tiempo establecidos para aplicar el tratamiento por electrocoagulación, al culminar el tratamiento se desconectó la fuente de energía.
7. Se retiraron los conectores de polo positivo y negativo, los electrodos y se mantuvo en reposo la celda con la muestra tratada por un tiempo de 30 minutos con la finalidad de que los sólidos suspendidos se sedimenten.
8. Después del tiempo de reposo, se procedió a la filtración de las muestras tratadas en papel filtro Whatman N° 42 y se almacenaron en recipientes para su respectivo análisis físico-químico y análisis de manganeso siguiendo los métodos de la anterior tabla 7, realizados por el Laboratorio Analítico del Sur acreditado por INACAL con registro N° LE - 050.

A continuación, se muestra las etapas del tratamiento por electrocoagulación.

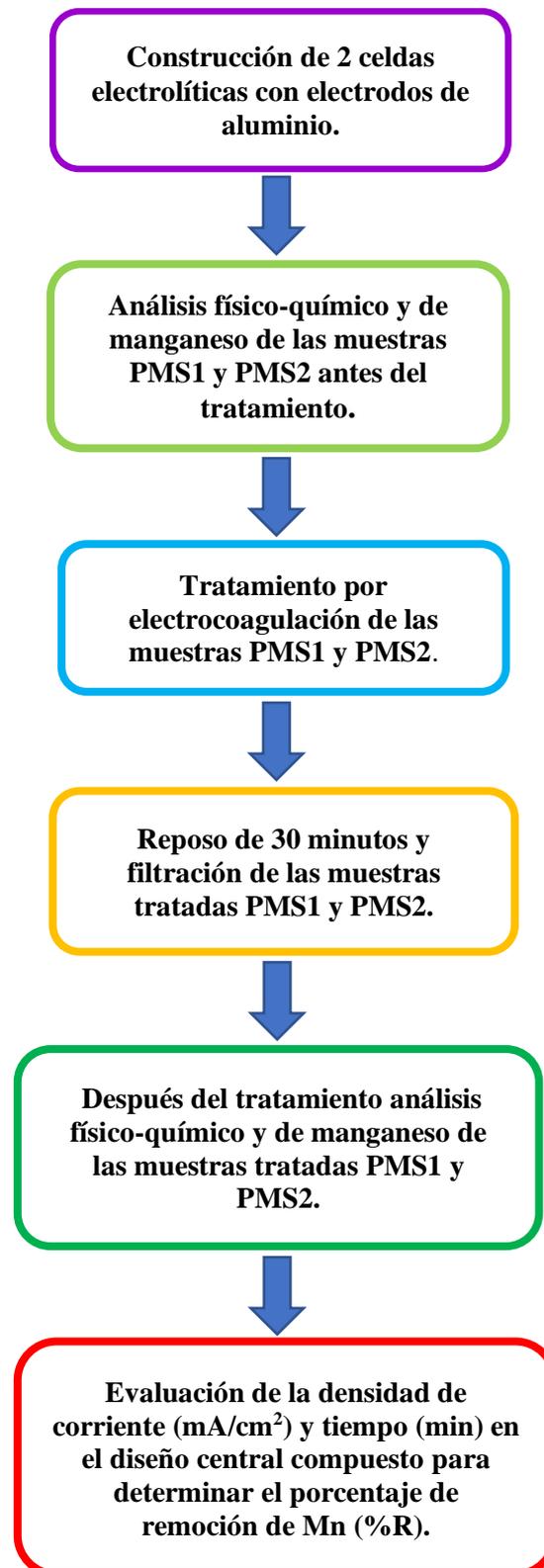


Figura 13. Diagrama de flujo de la remoción de manganeso por electrocoagulación

### 3.5.3.4. Método del tercer objetivo: Evaluación de la densidad de corriente y tiempo

En la evaluación de la densidad de corriente y tiempo se realizó la variación de sus niveles, en un diseño experimental central compuesto de Box Wilson (rotable), en el cual se aplicó el tratamiento por electrocoagulación a cada ensayo.

#### A. Evaluación en el diseño central compuesto (DCC)

Los niveles a evaluar de la densidad de corriente y tiempo se colocaron en una matriz central compuesta; en el cual AlJaberi *et al.* (2020), indica que existe una distancia de los puntos estrella al origen que se denota por “ $\alpha$ ” y se obtiene según la ecuación (21).

$$\alpha = 2^{k/4} \quad (21)$$

Donde:  $k = 2$

$$\alpha = 2^{\frac{2}{4}} = 1.414 \quad (22)$$

#### A.1. Rango de estudio de la densidad de corriente y tiempo

Se establecieron rangos para la densidad de corriente de 4.13 a 8.26 mA/cm<sup>2</sup> y tiempo de 20 a 40 minutos, con volumen constante de la muestra a tratar de 1 L. En la tabla 8, se presenta las variables independientes con sus respectivos niveles que se estandarizaron -1, 0, 1 y los puntos axiales  $+\alpha$  y  $-\alpha$  según Montgomery (2020).

Tabla 8

*Variables del diseño central compuesto*

Variables Independientes	Niveles				
	$-\alpha$	-1	0	1	$\alpha$
X <sub>1</sub> : Densidad de corriente (D), mA/cm <sup>2</sup>	3.28	4.13	6.2	8.26	9.11
X <sub>2</sub> : Tiempo (T), min	15.86	20	30	40	44.14
Variable Dependiente					
Y: Porcentaje de remoción de Mn (%)					

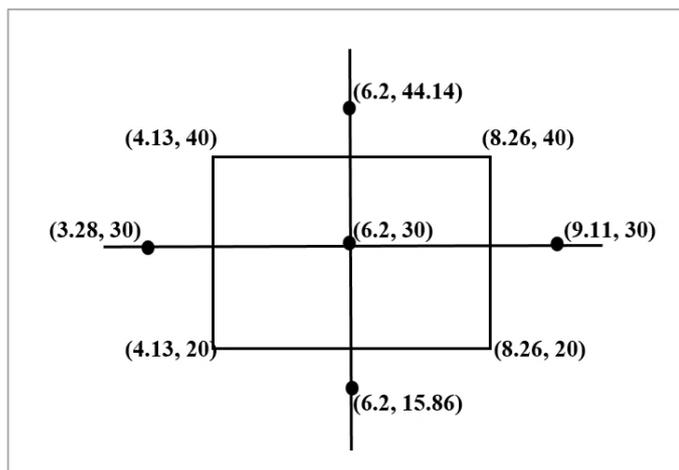


Figura 14. Niveles de las variables del DCC rotatable

## A.2. Determinación del número de experimentos

Montgomery (2020), menciona que para determinar el número de experimentos ( $N$ ) en el diseño central compuesto se debe considerar el valor de  $k=2$  que es el número de factores;  $2k$  es el número de puntos de estrella y  $n_0$  es el número de puntos centrales, el cálculo obtenido se realizó mediante la ecuación (23).

$$N = 2^k + 2k + n_0 \quad (23)$$

$$N = 2^2 + 2(2) + 2 = 10 \quad (24)$$

Dando como resultado 10 experimentos donde: 4 corresponden a un diseño factorial, 4 experimentos son los puntos estrella y 2 son las réplicas en el centro. Para lo cual, primero se trataron por electrocoagulación 9 experimentos en las muestras de agua del PMS1 y 9 experimentos con las muestras de agua del PMS2.

Al culminar el tratamiento de los 9 experimentos de cada muestra del PMS1 y PMS2, se midió la concentración final de manganeso con el procedimiento descrito en el (Anexo 1). El experimento que obtuvo la más baja concentración de manganeso se repitió otra vez, completando un total de 10 experimentos para cada muestra de agua. Este último ensayo fue llevado al Laboratorio Analítico del Sur para el análisis de la concentración final de Manganeso por ICP - OES, método acreditado por INACAL, el cual se detalla en la tabla 9.

Tabla 9

*Método de análisis de manganeso por ICP-OES*

Parámetro	Técnica empleada	Rango de método analítico
Mn	Determinación de metales traza en aguas residuales por ICP – OES. Método de ensayo acreditado. EPA 200.7 revisión 4.4.	[0 – 2.5] mg/L

Fuente: Método utilizado por el Laboratorio Analítico del Sur (LAS).

Las concentraciones finales de manganeso se colocaron en la tabla 10.

Tabla 10

*Concentración final de Mn de las muestras del PMS1 y PMS2*

N°	D (mA/cm <sup>2</sup> )	T (min)	PMS1 C <sub>f</sub> (mg/L) (Mn)	PMS2 C <sub>f</sub> (mg/L) (Mn)
1	4.13	20	C <sub>a</sub>	C <sub>a</sub>
2	8.26	20	C <sub>b</sub>	C <sub>b</sub>
3	4.13	40	C <sub>c</sub>	C <sub>c</sub>
4	8.26	40	C <sub>d</sub>	C <sub>d</sub>
5	<b>3.28</b>	30	C <sub>e</sub>	C <sub>e</sub>
6	<b>9.11</b>	30	C <sub>f</sub>	C <sub>f</sub>
7	6.2	<b>15.86</b>	C <sub>g</sub>	C <sub>g</sub>
8	6.2	<b>44.14</b>	C <sub>h</sub>	C <sub>h</sub>
9	6.2	30	C <sub>i</sub>	C <sub>i</sub>
10	6.2	30	C <sub>j</sub>	C <sub>j</sub>

Conociendo las concentraciones finales de manganeso se empleó la ecuación (25) para el cálculo del porcentaje de remoción de manganeso planteado por AlJaberi *et al.* (2020):

$$\%R = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} * 100 \quad (25)$$

Donde:

C<sub>i</sub>: Concentración inicial de manganeso antes del tratamiento (mg/L).

C<sub>f</sub>: Concentración final de manganeso después del tratamiento (mg/L).

%R: Porcentaje de remoción de manganeso (%).

Seguidamente los porcentajes conseguidos se colocaron en la tabla 11.

Tabla 11

*Diseño central compuesto de la remoción de Mn del PMS1 y PMS2*

N°	D (mA/cm <sup>2</sup> )	T (min)	PMS1 %Remoción (Mn)	PMS2 %Remoción (Mn)
1	4.13	20	R <sub>a</sub>	R <sub>a</sub>
2	8.26	20	R <sub>b</sub>	R <sub>b</sub>
3	4.13	40	R <sub>c</sub>	R <sub>c</sub>
4	8.26	40	R <sub>d</sub>	R <sub>d</sub>
5	<b>3.28</b>	30	R <sub>e</sub>	R <sub>e</sub>
6	<b>9.11</b>	30	R <sub>f</sub>	R <sub>f</sub>
7	6.2	<b>15.86</b>	R <sub>g</sub>	R <sub>g</sub>
8	6.2	<b>44.14</b>	R <sub>h</sub>	R <sub>h</sub>
9	6.2	30	R <sub>i</sub>	R <sub>i</sub>
10	6.2	30	R <sub>j</sub>	R <sub>j</sub>

De la tabla 11, se eligió el experimento con el más alto porcentaje de remoción de manganeso en las muestras tratadas del PMS1 y PMS2 y se consideró a los valores de densidad de corriente y tiempo utilizados como los más adecuados, para aplicar la técnica de electrocoagulación y se compararon con los valores óptimos obtenidos del software estadístico desarrollado en el siguiente apartado.

### A.3. Análisis estadístico para la prueba de hipótesis y valores óptimos

Para la prueba de hipótesis y los valores óptimos se desarrollaron pruebas estadísticas en el diseño experimental central compuesto de Box Wilson (rotable), con el programa estadístico STATGRAPHICS Centurión XVIII. El cual proporciona los siguientes análisis:

- Prueba de hipótesis
- Valores óptimos.

## CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se muestran los resultados que dan cumplimiento a los objetivos planteados en la presente investigación; a través de tablas y figuras, así como la interpretación y la discusión realizada con los antecedentes y marco teórico.

### 4.1. Resultados y discusión del primer objetivo: Construcción de la celda de electrocoagulación a escala laboratorio

#### 4.1.1. De la celda de electrocoagulación (primer objetivo)

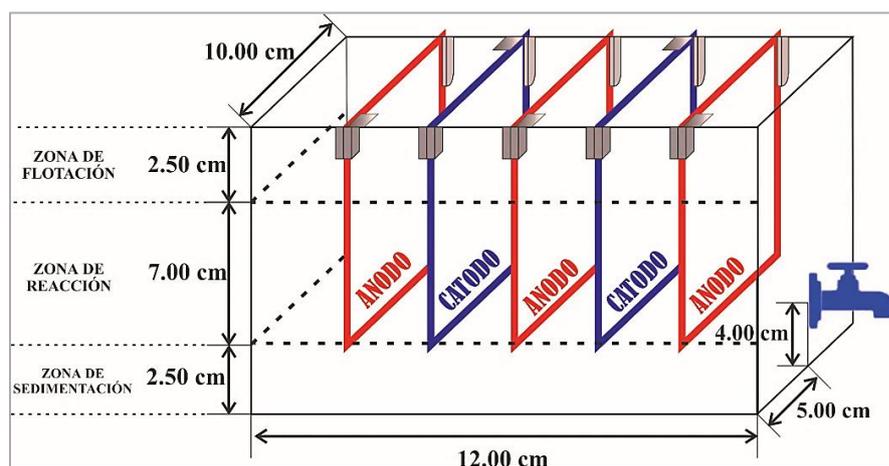


Figura 15. Características de la celda electrocoagulación

En la figura 15 se observa la celda de electrocoagulación con dimensiones: 12 cm de largo, 10 cm de ancho y 12 cm de altura formando un volumen de 1.44 L de capacidad y con una válvula de descarga para la toma de muestras; estas características se consideraron para la construcción de las dos celdas de electrocoagulación.

## Discusión

En el estudio realizado por Humpire (2017), se eligió el material acrílico en la celda por ser resistente contra impactos y caídas. Para Arango y Garcés (2007), en las regiones de la celda se debe considerar tres zonas importantes; la zona de flotación, donde se encuentran los lodos menos densos en forma de espumas; la zona de reacción, donde se ubican los electrodos y se generan las reacciones electroquímicas y por último la zona de sedimentación, en el cual se depositan los lodos más densos o precipitados. Según lo mencionado para las dos celdas se eligió el material acrílico y se tomó las dimensiones adecuadas en cada celda considerando la zona de flotación, reacción y sedimentación.

### 4.1.2. De los electrodos (primer objetivo)

En el diseño de los electrodos se siguió el modelo propuesto por Quispe (2015).

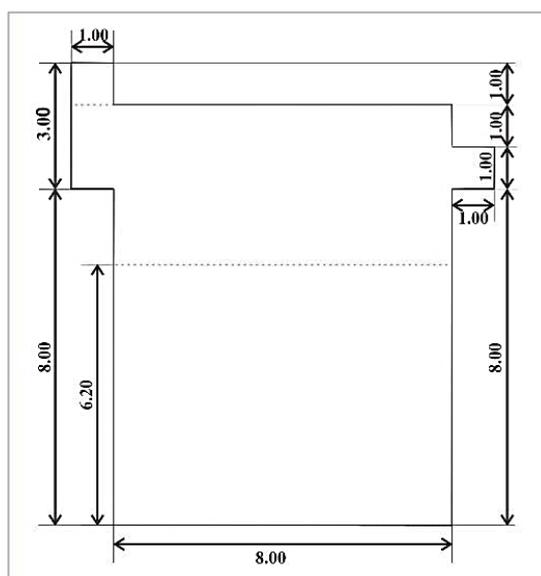


Figura 16. Área útil de aluminio activo

En la figura 16 se observa que los electrodos de nuestros ensayos tenía una superficie de electrodo de 6.2 cm de altura por 8 cm de ancho sumergida con el agua a tratar; en la determinación del número de electrodos se utilizó la siguiente ecuación (26) descrita por Arango y Garcés (2007), en la cual se reemplazó los valores de longitud de la celda de 12 cm, distancia de los electrodos a cara lateral de la celda de 1 cm, distancia máxima entre electrodos de 2 cm y espesor de electrodo de 0.1 cm.

$$N^{\circ} \text{ electrodos} = \frac{(\text{largo celda}) - 2(\text{distancia electrodos cara lateral})}{\text{distancia máx. entre electodos} + \text{espesor de placa}} \quad (26)$$

$$N^{\circ} \text{ de electrodos} = \frac{(12 \text{ cm}) - 2(1 \text{ cm})}{2 \text{ cm} + 0.1 \text{ cm}} = 4.76 = 5 \quad (27)$$

De acuerdo al resultado se emplearon 5 electrodos en cada celda, de los cuales 3 se utilizaron como ánodos y 2 como cátodos.

Para el cálculo del área se empleó la siguiente ecuación de Arango y Garcés (2007):

$$A_s = \text{Ancho} \times \text{Altura} \quad (28)$$

$$A_s = (8.00 \text{ cm})(6.20 \text{ cm}) = 49.6 \text{ cm}^2 \quad (29)$$

En la determinación del área efectiva total de reacción de los ánodos se empleó la ecuación (30) planteada por Arango y Garcés (2007):

$$A_t = (2A_s)(N^{\circ} \text{ de anodos}) \quad (30)$$

$$A_t = (2 \times 49.6 \text{ cm}^2)(3) = 297.6 \text{ cm}^2 \quad (31)$$

En la ecuación (31), se observa que el área efectiva total de reacción de los ánodos de aluminio fue de 297.6 cm<sup>2</sup>.

## Discusión

En la elección del material de los electrodos se tomó en consideración lo mencionado por Ingelsson *et al.* (2020), afirman que del material de las placas o electrodos, surgirán reacciones de oxidación y reducción, siendo los más utilizados el hierro y el aluminio.

Para Yu *et al.* (2019), el uso de las placas de hierro, presenta deficiencias debido a la generación de un color amarillo en el medio acuoso que ocasiona un incremento en el nivel de turbidez. Según lo descrito en nuestros ensayos se eligió como material de electrodos al aluminio.

En relación a la distancia de separación de los electrodos Porto (2014) indico, que distancias de separación menores a 1.5 cm ocasionan bajos porcentajes de remoción a causa del choque entre flóculos en la superficie de los electrodos.

Por otro lado, Melo y Sacristan (2018) señalaron que una distancia de separación mayor a 2 cm, consume mayor voltaje y a su vez energía eléctrica. Por lo mencionado, se empleó una distancia de separación entre electrodos de 2 cm para el siguiente sistema de electrocoagulación.



*Figura 17.* Sistema de electrocoagulación antes del tratamiento

En la figura 17 se muestra la celda con válvula verde para tratar las muestras del PMS1, en la cual se colocaron en forma paralela 5 electrodos de aluminio; 3 como ánodos y 2 como cátodos, los ánodos se unieron a los conectores de polo positivo y los cátodos se fijaron a los conectores de polo negativo, por el extremo contrario de los conectores se fijaron en la fuente de energía.

Para lo cual, se consideró importante aprender a configurar el amperaje en la fuente de energía para verificar la conexión correcta; el mismo montaje se realizó en la celda de válvula amarilla para tratar las muestras del PMS2.

## 4.2. Resultados y discusión del segundo objetivo: Determinar las características físico-químicas del Río Chacapalca antes y después del tratamiento

### 4.2.1. Caracterización de las aguas del Río Chacapalca antes del tratamiento (segundo objetivo)

Se colectaron muestras en el PMS1 que se encontró a 1 Km de la confluencia del Río Azufrini con el Río Pataqueña; también se tomaron muestras en el PMS2 que se ubicó a 0.93 Km aguas abajo del PMS1 y a 0.5 Km al norte del cerro Villacolio.

Los resultados de las muestras colectadas se encuentran en el informe del Laboratorio Analítico del Sur acreditado por INACAL (Anexo 5) y a su vez se presentan en la tabla 12, en el cual se incluye los estándares de calidad ambiental del agua en la categoría 3: (D1) riego de vegetales y (D2) bebida de animales (MINAM, 2017).

Tabla 12

*Caracterización de las muestras de agua antes del tratamiento*

Análisis	Antes del tratamiento		ECA - Categoría 3	
			Parámetros para riego de vegetales	Parámetros para bebida de animales
Parámetros	PMS1	PMS2	D1	D2
pH	3.8	3.91	6.5 - 8.5	6.5 - 8.4
CE, uS/cm	685	649	2500	5000
Turbidez (NTU)	234	196	No incluye	No incluye
Dureza, mg/L	97.1	100.5	No incluye	No incluye
Cloruros, mg/L	9	10.4	500	No incluye
Nitratos, mg/L	3.56	3.02	100	100
Sulfatos, mg/L	206.1	198.5	1000	1000
Manganeso, mg/L	0.98	0.95	0.2	0.2

En la siguiente figura 18, se detalla los valores de pH de 3.8 en el PMS1 y de 3.91 en el PMS2, en ambas muestras se presenta pH de carácter ácido.

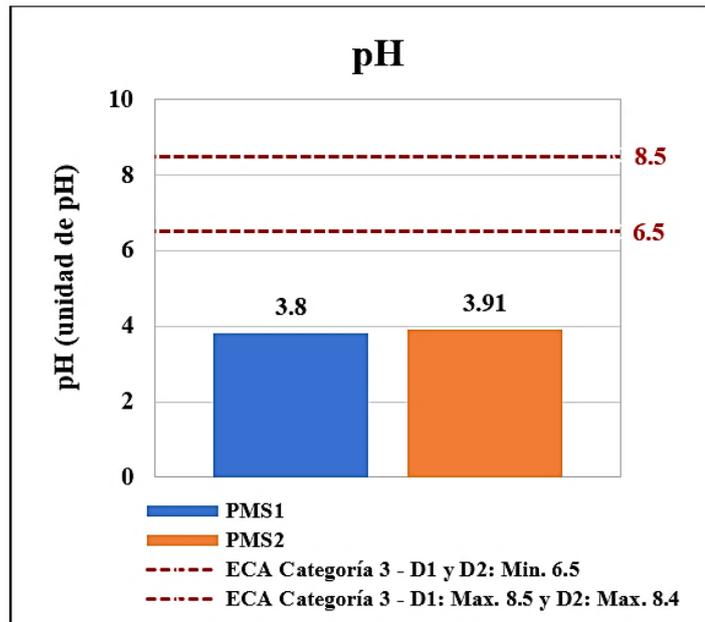


Figura 18. pH de las muestras del PMS1 y PMS2 antes del tratamiento

### Discusión

Para Kobya *et al.* (2016), cuando la muestra problema tiene pH ácido, lo adecuado es el uso de electrodos de aluminio y si la muestra problema presenta pH alcalino o neutro, se debe emplear electrodos de hierro. En la presente investigación se consideró el uso de electrodos de aluminio.

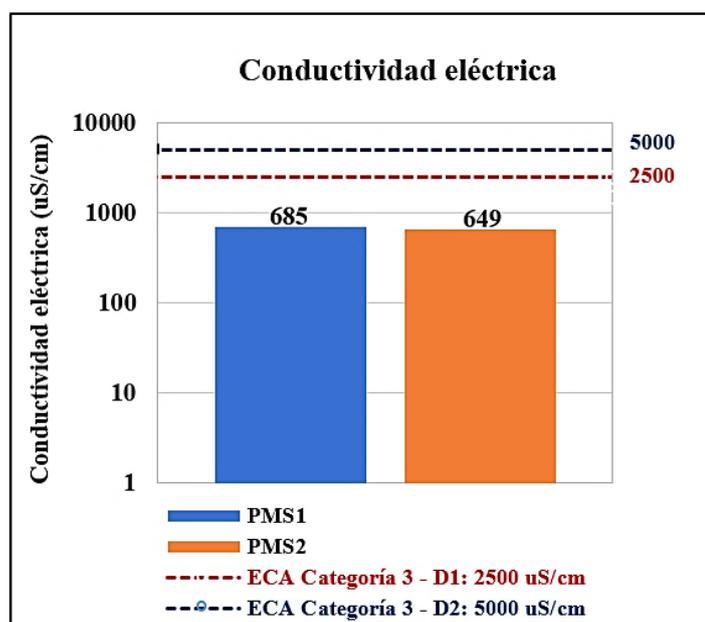


Figura 19. Conductividad eléctrica de las muestras del PMS1 y PMS2 antes del tratamiento

En la anterior figura 19 se presenta la conductividad eléctrica que mide la cantidad de iones disueltos en las muestras del PMS1 de 685 uS/cm y del PMS2 de 649 uS/cm, ambos valores están por debajo de los estándares de calidad ambiental para agua en la categoría 3: (D1) 2500 uS/cm y (D2) 5000 uS/cm (MINAM, 2017).

### Discusión

Cuando la conductividad no es muy elevada, Ebba *et al.* (2022) recomiendan el uso del electrolito cloruro de sodio (NaCl), para aumentar la conductividad eléctrica y a su vez elevar la densidad de corriente, cuya función es la disolución de los cationes aluminio  $Al^{+3}$  para la formación del coagulante in situ hidróxido de aluminio  $Al(OH)_3$ . Por lo descrito, se consideró necesario añadir el electrolito NaCl para el tratamiento de las muestras de agua de la presente investigación.

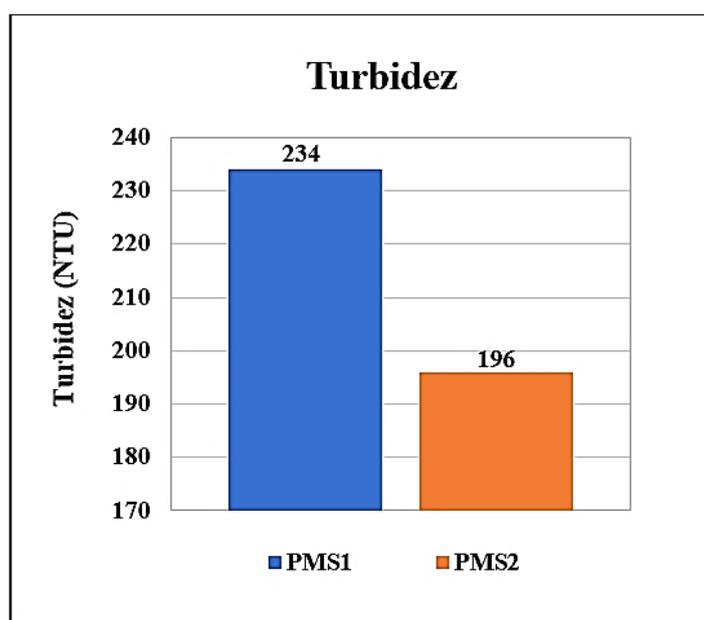


Figura 20. Turbidez de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento

En la figura 20 se presenta valores altos de turbiedad de 234 NTU y 196 NTU de las muestras del PMS1 y del PMS2 respectivamente, debido a la presencia de partículas suspendidas que causaron la pérdida de su transparencia.

### Discusión

Según Barboza (2011), estas partículas suspendidas provienen de algas, arcillas, partículas orgánicas y sustancias solubles en el agua. Este parámetro no está incluido

en la categoría 3 de los estándares de la calidad del agua; sin embargo, se consideró importante realizar el análisis de turbiedad en el presente estudio, para comprobar si la calidad del agua mejora después del tratamiento por electrocoagulación.

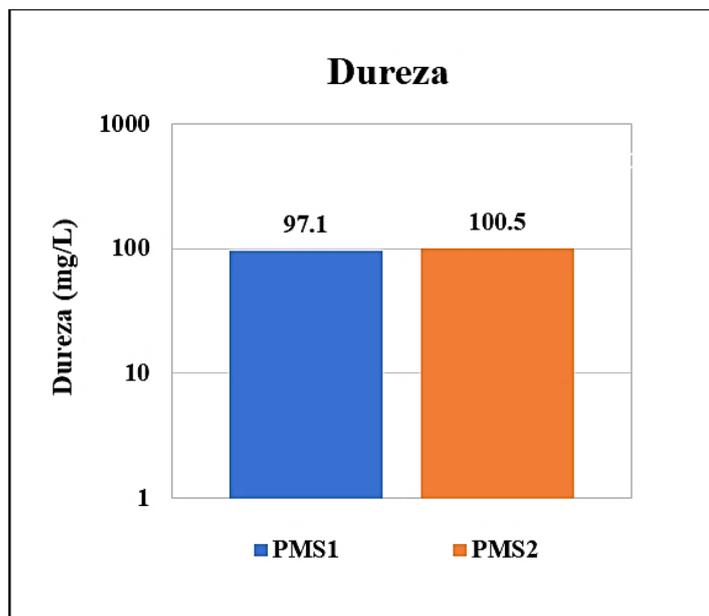


Figura 21. Dureza de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento

En la figura 21 se detalla la concentración de dureza en la muestra del PMS1 de 97.1 mg/L y en la muestra del PMS2 de 100.5 mg/L, cuyos resultados indican la presencia de iones calcio y magnesio en ambas muestras.

### Discusión

Miranda (2012), señala que la dureza mide el contenido total de cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , el cual se cuantifica como  $\text{CaCO}_3$  y se clasifica en aguas blandas de 0 a 75 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ; aguas moderadamente duras de 75 a 150 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ; aguas duras de 150 a 300 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  y aguas muy duras más de 300 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ .

Según lo descrito y de acuerdo a la figura 21, los valores de dureza se encuentran dentro del rango de 75 a 150 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , por lo que se considera en ambas muestras de agua, como moderadamente duras.

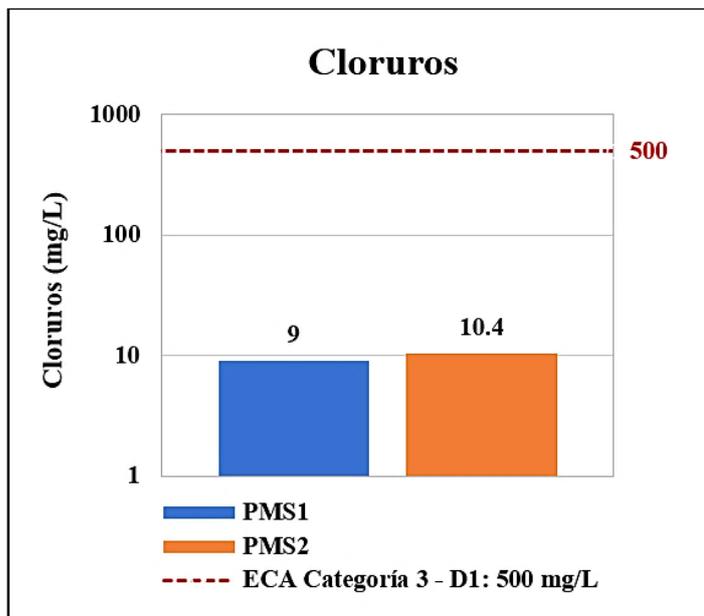


Figura 22. Cloruros de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento

La figura 22, presenta los niveles de cloruros de 9 mg/L y 10.4 mg/L en el PMS1 y PMS2 respectivamente, ambos valores están por debajo de los estándares de calidad ambiental del agua en la categoría 3 - (D1) riego de vegetales de 500 mg/L.

### Discusión

En relación al bajo contenido de cloruros, Kamel *et al.* (2022) recomiendan añadir la sal cloruro de sodio (NaCl), a la muestra problema para incrementar los iones cloruros debido a que estos en presencia de corriente eléctrica, producen el ácido hipocloroso que actúa como agente desinfectante del agua.

Por lo descrito, en la presente investigación se reafirma que es necesario la adición del NaCl con una dosis adecuada.

A continuación, se muestra el contenido de nitratos de las muestras problema.

En la siguiente figura 23 se aprecia la concentración de nitratos de las muestras colectadas en el PMS1 de 3.56 mg/L y en el PMS2 de 3.02 mg/L, los cuales se encuentran por debajo de los estándares de calidad ambiental para agua en la Categoría 3 - (D1) riego de vegetales y (D2) bebida de animales de 100 mg/L (MINAM, 2017).

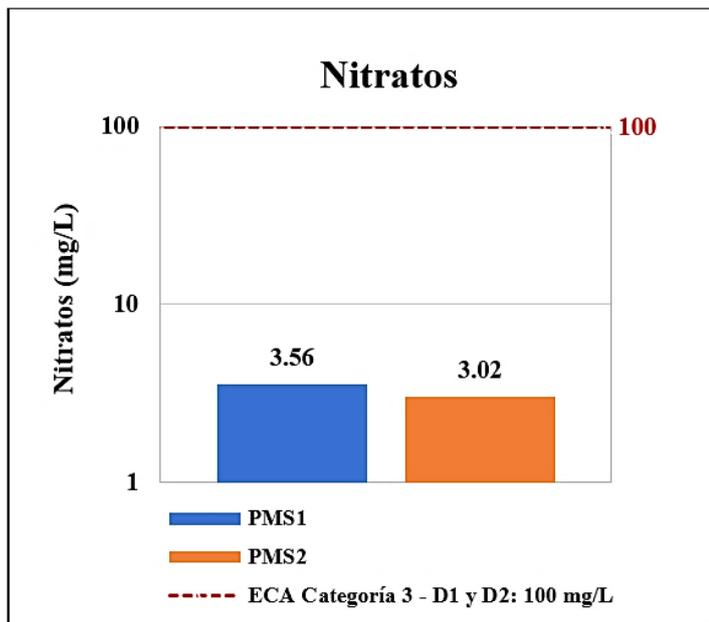


Figura 23. Nitratos de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento

### Discusión

Según Melo y Sacristan (2018), los iones nitrato se encuentran presentes en los fertilizantes elaborados a base de nitrógeno, se infiltran en los suelos por las diferentes actividades agrarias. En nuestros ensayos, los niveles de nitratos son bajos debido a la escasa actividad agrícola realizada por parte de los comuneros de la zona.

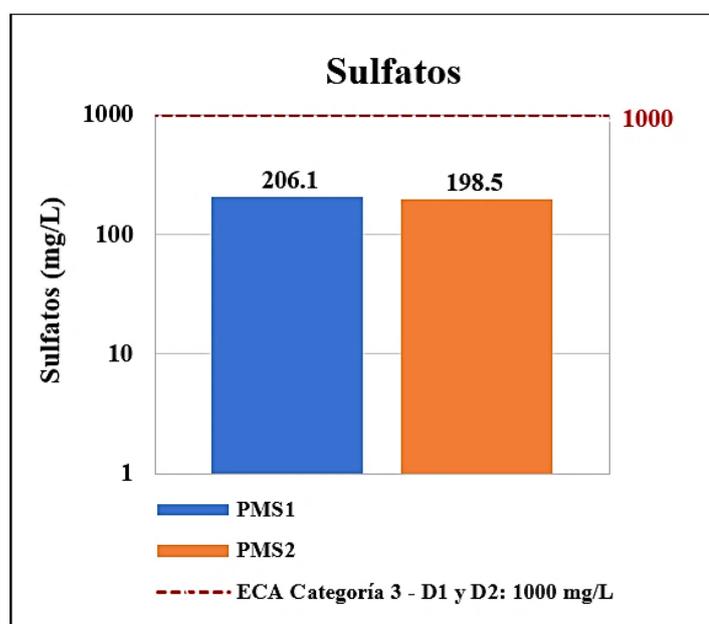


Figura 24. Sulfatos de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento

La figura 24 de la anterior página presenta valores de sulfatos en las muestras del PMS1 y PMS2 de 206.1 mg/L y 198.5 mg/L respectivamente. Se observa que ambos valores son significativos, aunque están por debajo de los ECA para agua en la Categoría 3: (D1) y (D2) de 1000 mg/L (MINAM, 2017).

### Discusión

Para Xu *et al.* (2017), el contenido de sulfatos pueden ocasionar la precipitación de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y formar una capa de aislamiento en la superficie de los electrodos que causaría una disminución en la eficiencia del tratamiento. Por lo tanto, en nuestros ensayos se consideró importante reducir la concentración de sulfatos.

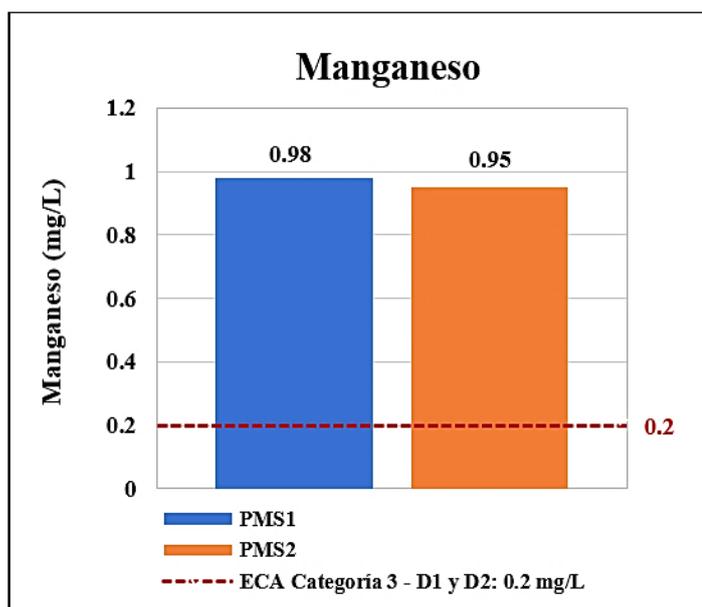


Figura 25. Manganeso de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento

En la figura 25 se detallan las concentraciones de manganeso de las muestras en el PMS1 y en el PMS2 de 0.98 mg/L y 0.95 mg/L respectivamente, ambos valores exceden los ECA para agua en la categoría 3: (D1) riego de vegetales y (D2) bebida de animales de 0.2 mg/L (MINAM, 2017); se comprueba la presencia de manganeso en las aguas del Río Chacapalca; así como también lo reporto la ANA (2020), en el Monitoreo de la Calidad Superficial en la Unidad Hidrográfica de Pucara encontrando un nivel alto de manganeso de 0.92 mg/L en el Río Chacapalca. Según lo mencionado, se tomó la decisión de aplicar la electrocoagulación para la remoción de manganeso.

#### 4.2.2. Caracterización de las aguas del Río Chacapalca después del tratamiento (segundo objetivo)



Figura 26. Sistema de electrocoagulación después del tratamiento

En la figura 26 se observa en la celda de válvula verde la muestra tratada del PMS1 y en la celda de válvula amarilla la muestra tratada del PMS2, después del tratamiento se observó que los contaminantes fueron adsorbidos por el coagulante  $\text{Al}(\text{OH})_3$  los cuales, en forma de flóculos fueron llevados a la zona de flotación por medio de los gases desprendidos;  $\text{O}_2$  de los ánodos e  $\text{H}_2$  de los cátodos y los flóculos más pesados descendieron a la zona de sedimentación en forma de precipitados.



Figura 27. Muestra contaminada y tratada

En la anterior figura 27 se muestra en el lado izquierdo la muestra contaminada y en el lado derecho la muestra tratada, después del tratamiento, se mantuvo en reposo por 30 minutos y se filtró con papel filtro Whatman N° 42, al igual que las demás muestras tratadas para su envasado y envió Laboratorio Analítico del Sur para su análisis.

Los resultados de la caracterización de las muestras del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento por electrocoagulación, se encuentran registrados en el informe emitido por el Laboratorio Analítico del Sur acreditado por INACAL (Anexo 5 y 6) y también se muestran en la tabla 13. En el tratamiento de ambas muestras, se aplicaron las mismas condiciones de trabajo: volumen de muestra a tratar de 1 L, Volumen de electrolito NaCl de 25 mL, densidad de corriente de 7.2 mA/cm<sup>2</sup> y tiempo de 35 minutos.

Tabla 13

*Caracterización de las muestras de agua después del tratamiento*

Análisis	Muestras antes y después del tratamiento				ECA - Categoría 3	
					Parámetros para riego de vegetales	Parámetros para bebida de animales
Parámetros	PMS1 Antes	PMS1 Después	PMS2 Antes	PMS2 Después	D1	D2
pH	3.8	7.61	3.91	6.99	6.5 - 8.5	6.5 - 8.4
CE, uS/cm	685	412	649	329	2500	5000
Turbidez (NTU)	234	0.6	196	0.5	No incluye	No incluye
Dureza, mg/L	97.1	34.8	100.5	21.4	No incluye	No incluye
Cloruros, mg/L	9	67.2	10.4	55.7	500	No incluye
Nitratos, mg/L	3.56	8.81	3.02	6.72	100	100
Sulfatos, mg/L	206.1	39.9	198.5	26.47	1000	1000
Manganeso, mg/L	0.98	0.08	0.95	0.07	0.2	0.2

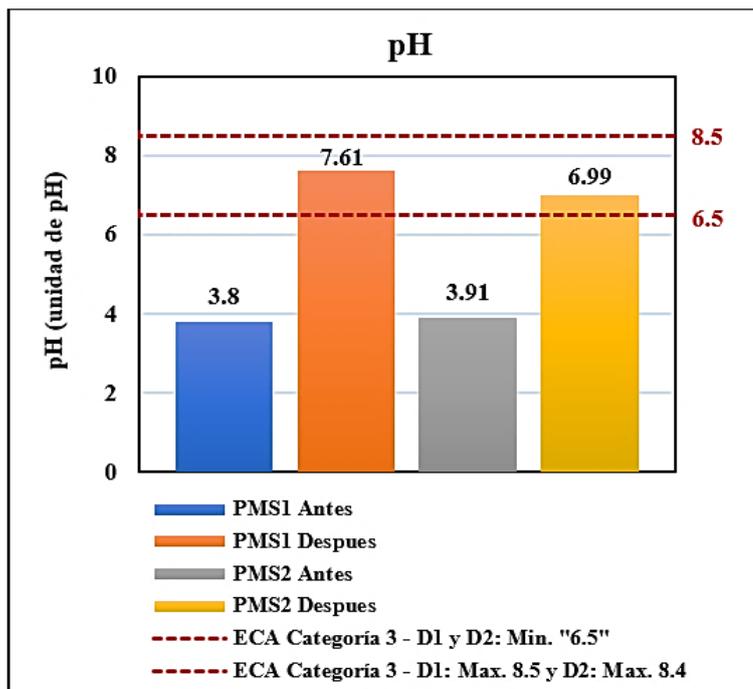


Figura 28. pH del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento

En la figura 28 se observa un incremento del pH en la muestra de agua del PMS1 y en la muestra del PMS2 ambos valores finales de pH, se encuentran dentro del rango establecido de 6.5 a 8.5 de la categoría 3: (D1) riego de vegetales y (D2) bebida de animales (MINAM, 2017).

### Discusión

En el estudio realizado por Casquino (2018), antes del tratamiento las aguas del Río Rímac presentaron un pH de 9.02 y después del tratamiento por electrocoagulación en la remoción de manganeso se disminuyó a 8.3 el pH.

Arturi *et al.* (2019), describe la técnica de electrocoagulación como un regulador del pH; en muestras alcalinas se disminuye el pH y en muestras acidas se incrementa el pH.

En la presente investigación, después del tratamiento por electrocoagulación a las muestras de agua del PMS1 y del PMS2 del Río Chacapalca, se elevaron los niveles de pH según la figura 28 y se comprueba lo mencionado por Arturi *et al.* (2019).

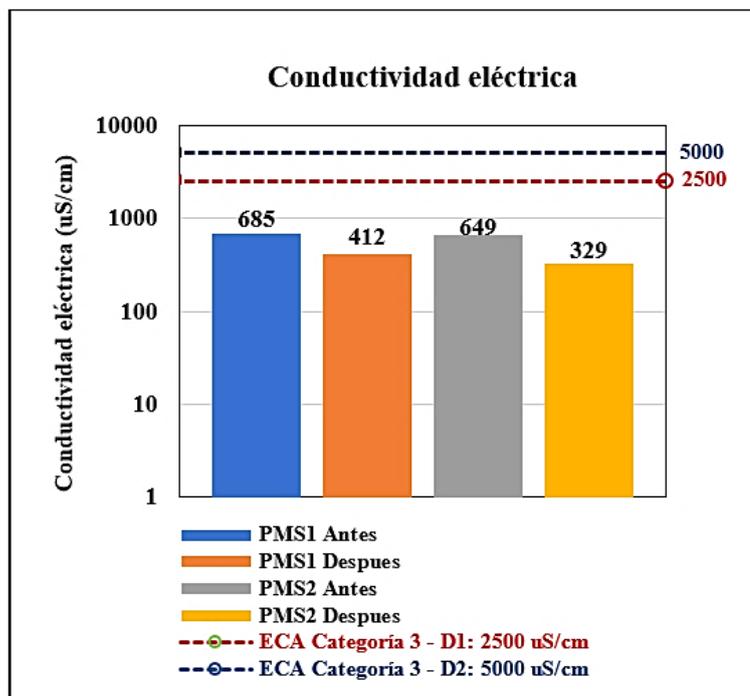


Figura 29. Conductividad eléctrica del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento

En la figura 29 se presenta la disminución de la conductividad de 685 a 412 uS/cm en la muestra del PMS1 y de 649 a 329 uS/cm en la muestra del PMS2, ambos resultados están por debajo de los estándares de calidad ambiental del agua en la categoría 3: (D1) riego de vegetales 2500 uS/cm y (D2) bebida de animales 5000 uS/cm (MINAM, 2017).

### Discusión

Para Poma y Quispe (2016), la conductividad eléctrica mide el contenido total de iones disueltos en el agua.

En la investigación realizada por Barboza (2011), se disminuyó la conductividad eléctrica de 649 uS/cm a 628 uS/cm, aplicando una densidad de corriente de 12.5 mA/cm<sup>2</sup>. En nuestros ensayos, antes del tratamiento se añadió a las muestras 25 mL de NaCl, que permitió elevar la densidad de corriente a 7.2 mA/cm<sup>2</sup> y facilitó la generación del coagulante hidróxido de aluminio, el cual cumplió con la adsorción de los iones disueltos en el agua y se evidenció con los valores finales de la conductividad eléctrica de las muestras tratadas de la figura 29.

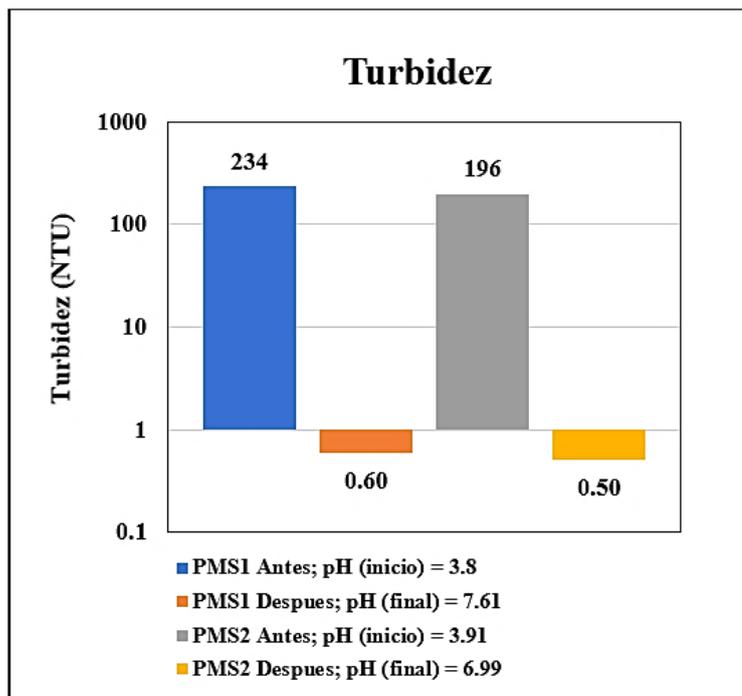


Figura 30. Turbidez del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento

En la figura 30 se detalla la disminución de la turbidez en la muestra de agua del PMS1 de 234 a 0.60 NTU cuando el pH se incrementó de 3.8 a 7.61 y en la muestra del PMS2 la turbidez se disminuyó de 196 a 0.50 NTU cuando se elevó de 3.91 a 6.99 el pH.

### Discusión

En el estudio realizado por Arturi *et al.* (2019), se logró la máxima disminución de turbidez de 460 a 27 NTU; cuando el pH ácido se incrementó a valores entre 6 y 8 aplicando la electrocoagulación.

El comportamiento descrito coincide con nuestros ensayos, después del tratamiento se incrementaron los niveles de pH a valores mayores a 6 en ambas muestras tratadas del PMS1 y PMS2 y a su vez se disminuyeron la cantidad de partículas suspendidas, las cuales se miden con el parámetro turbidez, lo cual indica que existe una relación inversa entre el pH y la turbidez.

A continuación, se muestra el contenido de dureza en las muestras tratadas.

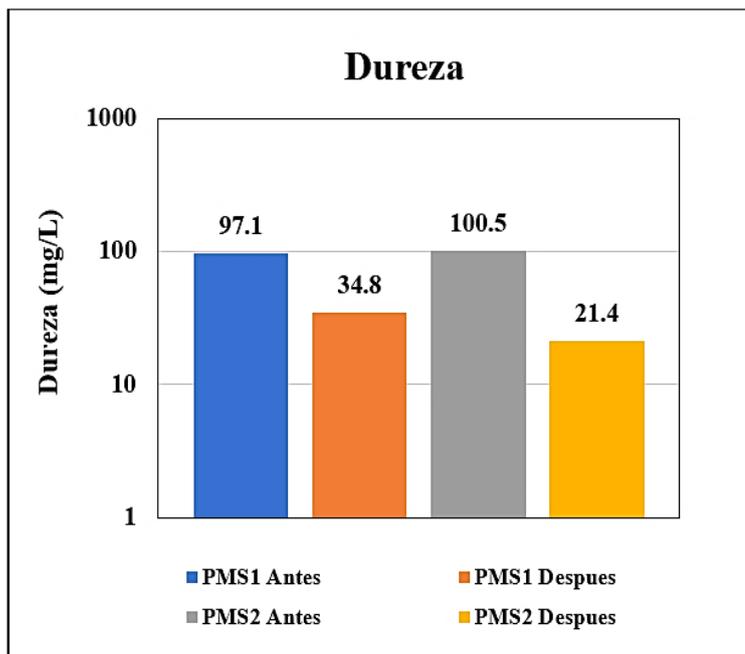
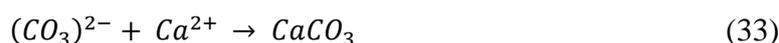
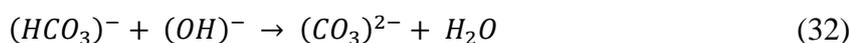


Figura 31. Dureza del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento

En la figura 31 se aprecia la disminución considerable de la dureza en la muestra del PMS1 de 97.1 a 34.8 mg/L y en la muestra del PMS2 de 100.5 a 21.4 mg/L.

### Discusión

Según Pantoja (2012), la disminución de la dureza es debido a que los iones cloruro presentes en el medio acuoso, evitaron que los iones bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) conduzcan a la precipitación de los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ; como lo describe Barboza (2011) en las siguientes reacciones químicas:



De esa manera, se disminuyó el contenido de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) que mide la dureza del agua. Según Miranda (2012), se clasifica como aguas blandas dentro del rango de 0 a 75 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ . En nuestros ensayos la dureza de las muestras tratadas del PMS1 y PMS2, se clasifican como aguas blandas.

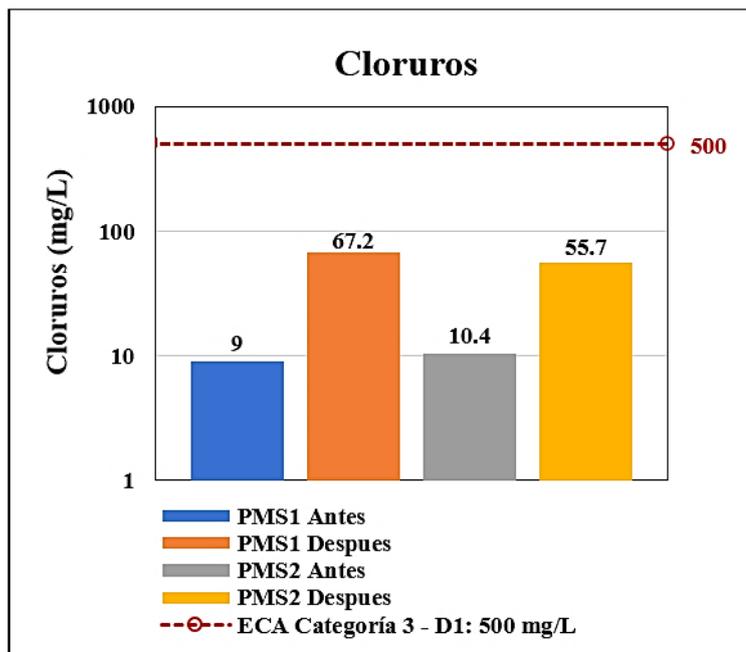
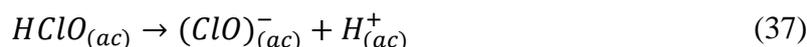
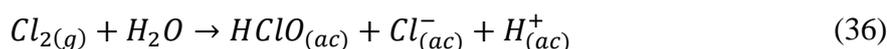


Figura 32. Cloruros del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento

En la figura 32 se observa el incremento de los niveles de cloruros en ambas muestras PMS1 y PMS2; sin embargo, no exceden al límite de 500 mg/L de la categoría 3 - (D1), establecido por los ECA para agua (MINAM, 2017).

### Discusión

Para Kamel *et al.* (2022), los iones cloruro  $Cl^-$  en presencia de corriente eléctrica producen el ácido hipocloroso (HClO), que actúa como agente desinfectante del agua y se representa con las siguientes reacciones químicas.



En nuestros ensayos, el incremento de cloruros se debió a la adición de 25 mL de NaCl en las muestras a tratar del PMS1 y del PMS2, lo cual permitió la generación del ácido hipocloroso (HClO), que actuó como agente desinfectante eliminando los iones contaminantes en las muestras de agua del PMS1 y del PMS2.

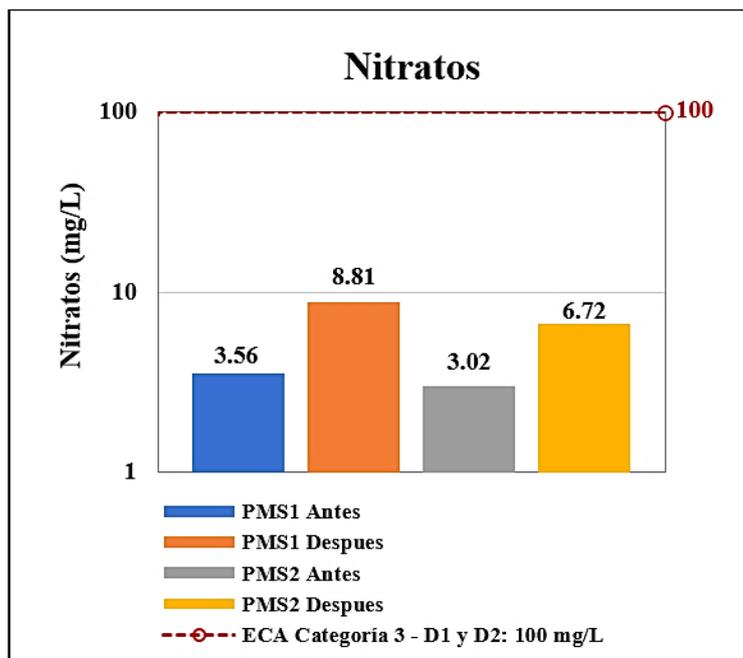
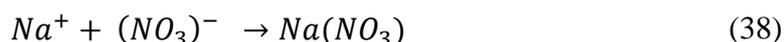


Figura 33. Nitratos del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento

En la figura 33 se detalla el incremento de los niveles de nitratos en la muestra del PMS1 de 3.56 a 8.81 mg/L y en el PMS2 de 3.02 a 6.72 mg/L; sin embargo no excedieron los ECA para agua en la categoría 3: (D1) riego de vegetales y (D2) bebida de animales de 100 mg/L.

### Discusión

En el estudio realizado por Abdel *et al.* (2020), indica que el contenido de iones sodio  $Na^+$  en el medio acuoso ocasiona la precipitación de los iones nitrato  $(NO_3)^-$  formando nitrato de sodio  $Na(NO_3)$  como se muestra en la ecuación (38).



En nuestros ensayos, se añadieron a las muestras problema el cloruro de sodio ( $NaCl$ ) 25 mL, si bien es cierto el contenido de iones cloruro favoreció al tratamiento; el contenido de iones sodio en el medio acuoso generó la precipitación de los iones  $(NO_3)^-$  por lo que hubo un leve incremento en los iones  $(NO_3)^-$ .

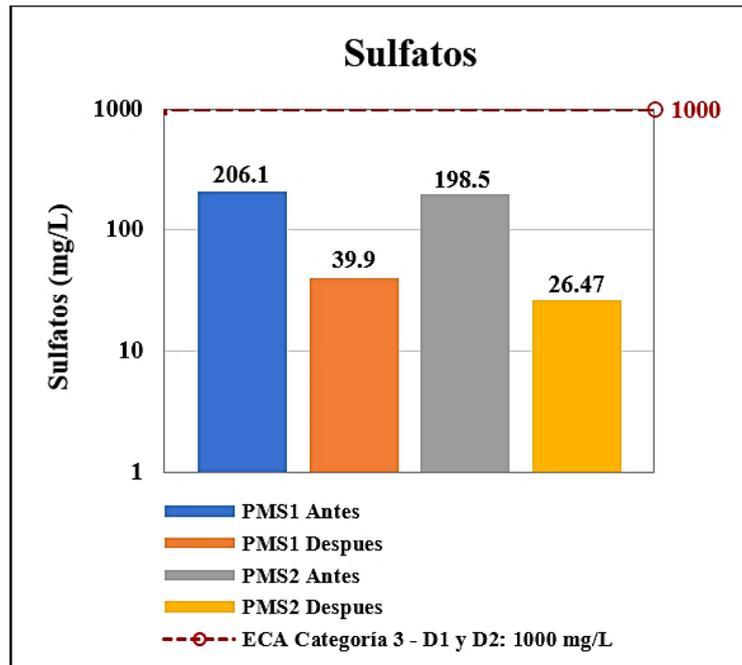


Figura 34. Sulfatos del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento

En la figura 34 se reporta que el contenido de sulfatos se disminuyó de manera considerable en ambas muestra tratadas del PMS1 y PMS2. En relación a este parametro Huayta (2017), describió un comportamiento similar de reducción de sulfatos de 2098 a 27.33 mg/L empleando NaCl como electrolito.

### Discusión

Xu *et al.* (2017), señalan que la presencia de los iones cloruro, impide que los iones sulfato se unan con los iones calcio y se forme una capa de aislamiento en los ánodos que disminuiría la eficiencia del tratamiento; los iones cloruro  $Cl^-$  son los que se unen a los iones calcio  $Ca^{2+}$  formando el cloruro de calcio  $CaCl_2$ , como se muestra en la ecuación (39):



Lo descrito coincide con nuestros ensayos debido a que los iones sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) al encontrarse libre en el medio acuoso, fueron removidos por el coagulante hidróxido de aluminio  $Al(OH)_3$  y se evidenció con los resultados de la figura 34.

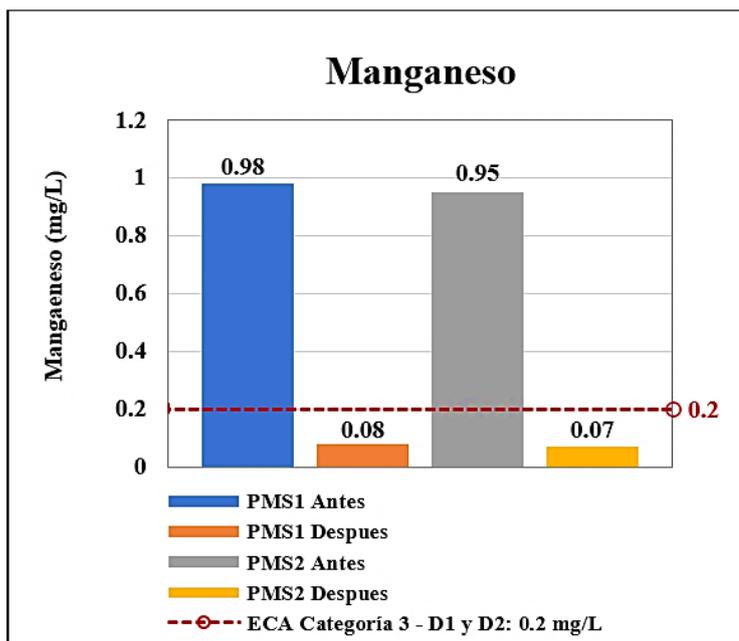


Figura 35. Manganeso del PMS1 y PMS2 antes y después del tratamiento

En la figura 35 se aprecia que el contenido de manganeso experimento una disminución en la muestra del PMS1 de 0.98 a 0.08 mg/L y en la muestra del PMS2 de 0.95 a 0.07 mg/L, las concentraciones finales de manganeso en ambas muestras tratadas se encuentran por debajo de los estandares de calidad del agua en la categoria 3: (D1) riego de vegetales y (D2) bebida de animales de 0.2 mg/L (MINAM, 2017).

### Discusión

Según los resultados obtenidos en la caracterización de las muestras de agua del PMS1 y PMS2, se observo que despues del tratamiento los parametros que disminuyeron sus niveles fueron: conductividad electrica, turbidez, dureza, sulfatos y manganeso.

Así como también, se elevo el pH ácido a pH entre 6 a 8, se incrementaron los cloruros y los nitratos; sin embargo, no sobrepasaron los ECA del agua, lo cual indica que la adición del electrolito de NaCl favorecio al proceso de electrocoagulación y aunque se elevo ligeramante los niveles de cloruros y nitratos.

Se determino mejorar la técnica de electrocoagulación, disminuyendo el volumen del electrolito de NaCl de 25 mL a 20 mL, para realizar los ensayos del siguiente apartado que da cumplimiento al tercer objetivo.

### 4.3. Resultados y discusión del tercer objetivo: Evaluar la densidad de corriente y el tiempo para la determinación del porcentaje de remoción de Mn

En el cumplimiento del tercer objetivo, se realizó la evaluación en un diseño central compuesto de Box Wilson (rotable), para la determinación del porcentaje de remoción de manganeso (Mn).

#### 4.3.1. Evaluación en el diseño central compuesto (tercer objetivo)

Se realizaron tratamientos a las muestras del PMS1 y PMS2 por electrocoagulación, en el cual se variaron la densidad de corriente y el tiempo, de acuerdo al orden de las tablas 14 y 15; se aplicaron en cada ensayo las mismas condiciones de trabajo: volumen de muestra 1L y volumen de NaCl de 20 mL.

Las concentraciones iniciales de manganeso de las muestras sin tratar del PMS1 y PMS2 se encuentran en el (Anexo 5); las concentraciones finales de manganeso de las muestras tratadas del PMS1 y PMS2, se obtuvieron con el método descrito en el (Anexo 1) y el último experimento se llevó al Laboratorio Analítico del Sur para el análisis de manganeso por ICP - OES, método acreditado por INACAL (Anexo 7).

Para calcular el porcentaje de remoción de manganeso ( $\%R_{Mn}$ ) se empleó la ecuación (25) del capítulo III.

Tabla 14

*Densidad de corriente y tiempo de las muestras del PMS1*

N°	D (mA/cm <sup>2</sup> )	T (min)	C <sub>i</sub> (mg/L)	C <sub>f</sub> (mg/L)	PMS1 $\%R_{Mn}$
1	4.13	20	0.98	0.202	79.39
2	8.26	20	0.98	0.157	83.98
3	4.13	40	0.98	0.175	82.14
4	8.26	40	0.98	0.120	87.76
5	<b>3.28</b>	30	0.98	0.200	79.59
6	<b>9.11</b>	30	0.98	0.130	86.73
7	6.2	<b>15.86</b>	0.98	0.185	81.12
8	6.2	<b>44.14</b>	0.98	0.139	85.82
9	6.2	30	0.98	0.051	94.80
10	6.2	30	0.98	0.048	95.10

Tabla 15

*Densidad de corriente y tiempo de las muestras del PMS2*

N°	D (mA/cm <sup>2</sup> )	T (min)	C <sub>i</sub> (mg/L)	C <sub>f</sub> (mg/L)	PMS2 %R <sub>Mn</sub>
1	4.13	20	0.95	0.186	80.42
2	8.26	20	0.95	0.146	84.63
3	4.13	40	0.95	0.158	83.37
4	8.26	40	0.95	0.130	86.32
5	<b>3.28</b>	30	0.95	0.181	80.95
6	<b>9.11</b>	30	0.95	0.133	86.00
7	6.2	<b>15.86</b>	0.95	0.168	82.32
8	6.2	<b>44.14</b>	0.95	0.137	85.58
9	6.2	30	0.95	0.039	95.89
10	6.2	30	0.95	0.037	96.11

Se puede observar en el (Experimento N° 1) de ambas tablas 14 y 15, que aplicando la densidad de corriente de 4.13 mA/cm<sup>2</sup> en combinación con el tiempo de 20 minutos, se obtienen las más altas concentraciones finales de manganeso de 0.202 mg/L y 0.186 mg/L y los más bajos porcentajes de remoción de manganeso de 79.39 % y 80.42 % en las muestras tratadas del PMS1 y PMS2 respectivamente.

Al realizar el incremento de la densidad de corriente a 6.2 mA/cm<sup>2</sup> y el tiempo a 30 minutos del (Experimento N° 10) de ambas tablas 14 y 15, los resultados mejoraron se obtuvieron las más bajas concentraciones finales de manganeso 0.048 mg/L y 0.037 mg/L, los cuales permitieron conseguir los más altos porcentajes de remoción de manganeso de 95.10 % en el PMS1 y 96.11 % en el PMS2.

Sin embargo, al continuar elevando la densidad de corriente a 8.26 mA/cm<sup>2</sup> y el tiempo a 40 minutos como se muestra en el (Experimento N° 4) de ambas tablas 14 y 15, los resultados no mejoraron; por el contrario, las concentraciones finales de manganeso presentaron valores más altos de 0.120 mg/L y 0.130 mg/L que generaron la disminución de los porcentajes de remoción de manganeso en 87.76 % y 86.32 % en las muestras del PMS1 y PMS2 respectivamente.

## Discusión

Para Arboleda y Herrera (2015), después de haber alcanzado una densidad de corriente adecuada, un aumento en la corriente no mejora la eficiencia del tratamiento, debido a que la energía eléctrica se convierte en energía calorífica, ocasionando un calentamiento en el medio acuoso.

Según Prieto *et al.* (2012), a medida que transcurre el tiempo, aumenta la eliminación de contaminantes hasta alcanzar su máximo rendimiento, un aumento adicional en el tiempo no incrementa la eficiencia del proceso de electrocoagulación, debido al consumo de electrodos.

En el estudio realizado por Porto (2014), se evaluó la variación de la densidad de corriente en un rango de 3.5 a 7.0 mA/cm<sup>2</sup> y el tiempo de 10 a 20 minutos encontrando valores óptimos de 5.3 mA/cm<sup>2</sup> y tiempo de 17.18 minutos como resultado se disminuyó la concentración de arsénico a 0.0075 mg/L y se obtuvo un porcentaje de remoción de arsénico de 92.57% de los efluentes mineros de la Mina Ananea.

Por su parte Quispe (2015), estudio la densidad de corriente en un rango de 3.31 a 6.61 mA/cm<sup>2</sup> y el tiempo de 15 a 30 minutos, se obtuvieron valores óptimos de 6.61 mA/cm<sup>2</sup> y 30 minutos que disminuyeron la concentración de mercurio en la muestra (M-1) a 0.018 mg/L y en la muestra (M-2) a 0.026 mg/L obteniendo remociones de mercurio del 97.00 % y 94.93 % respectivamente de las aguas acidas de la Mina La Rinconada.

Según lo descrito y de acuerdo a la evaluación realizada en nuestros ensayos, se cumple que al elevar la densidad de corriente y el tiempo, se consigue disminuir la concentración final de manganeso y a su vez elevar el porcentaje de remoción, hasta emplear la densidad de corriente óptima de 6.2 mA/cm<sup>2</sup> y el tiempo óptimo de 30 minutos, a valores superiores de los mencionados, los resultados no mejoraron por el contrario la concentración final de manganeso se incrementó y se disminuyó el porcentaje de remoción de manganeso.

El comportamiento descrito coincide con lo mencionado por Arboleda y Herrera (2015) y lo indicado por Prieto *et al.* (2012) y los valores óptimos de densidad de corriente y tiempo encontrados en el presente estudio, son comparables con los valores obtenidos por Porto (2014) y Quispe (2015).

### 4.3.2. Análisis estadístico para la prueba de hipótesis y valores óptimos (tercer objetivo)

En el análisis estadístico de la prueba de hipótesis y de los valores óptimos, se empleó el programa estadístico STATGRAPHICS Centurión XVIII.

#### 4.3.2.1. Prueba de hipótesis (tercer objetivo)

La prueba de hipótesis se desarrolló para comprobar estadísticamente, si la evaluación de la densidad de corriente y tiempo en el diseño central compuesto de Box Wilson determina adecuadamente el porcentaje de remoción de manganeso probándose las siguientes hipótesis:

H<sub>0</sub>: La evaluación de la densidad de corriente y tiempo en el diseño central compuesto de Box Wilson no determina adecuadamente el porcentaje de remoción de manganeso.

H<sub>1</sub>: La evaluación de la densidad de corriente y tiempo en el diseño central compuesto de Box Wilson determina adecuadamente el porcentaje de remoción de manganeso.

Para lo cual, se consideró los porcentajes de remoción de las tablas 16 y 17.

Tabla 16

*Diseño central compuesto de los ensayos del PMS1*

N°	D (mA/cm <sup>2</sup> )	T (min)	PMS1 %R <sub>1</sub>
1	4.13	20	79.39
2	8.26	20	83.98
3	4.13	40	82.14
4	8.26	40	87.76
5	<b>3.28</b>	30	79.59
6	<b>9.11</b>	30	86.73
7	6.2	<b>15.86</b>	81.12
8	6.2	<b>44.14</b>	85.82
9	6.2	30	94.80
10	6.2	30	95.10

Tabla 17

*Diseño central compuesto de los ensayos del PMS2*

N°	D (mA/cm <sup>2</sup> )	T (min)	PMS2 %R <sub>2</sub>
1	4.13	20	80.42
2	8.26	20	84.63
3	4.13	40	83.37
4	8.26	40	86.32
5	<b>3.28</b>	30	80.95
6	<b>9.11</b>	30	86.00
7	6.2	<b>15.86</b>	82.32
8	6.2	<b>44.14</b>	85.58
9	6.2	30	95.89
10	6.2	30	96.11

#### A. Modelo de segundo orden de los ensayos del PMS1

Con los datos de la tabla 16, se colocaron en el programa estadístico STATGRAPHICS Centurión XVIII y se obtuvieron los coeficientes del modelo de segundo orden de la densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>) representado por “D” y tiempo (min) por “T”; de sus cuadraturas respectivas “DD” y “TT”; así como de su interacción “DT” y se detalla en la tabla 18.

Tabla 18

*Coefficientes del modelo de 2do orden de los ensayos del PMS1*

Coefficiente	Estimado
constante	-19.993
D: Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	17.982
T: Tiempo (min)	3.531
DD	-1.382
DT	0.012
TT	-0.057

$$\%R_1 = -19.993 + 17.982D + 3.531T - 1.382 + 0.012DT - 0.057T^2 \quad (40)$$

La ecuación (40) muestra el modelo ajustado que representa al porcentaje de remoción de manganeso de las muestras del PMS1 y se encuentra en función de sus variables naturales de densidad de corriente (D) y tiempo (T).

Seguidamente se observa en la tabla 19, el análisis de varianza para la validación del modelo de segundo orden de la ecuación (40).

Tabla 19

*Análisis de varianza de la remoción de manganeso del PMS1*

Fuente	Suma de cuadrados	G.l.	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P < 0.05
D: Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	51.549	1	51.549	4268.99	0.000
T: Tiempo (min)	21.704	1	21.704	1797.35	0.000
DD	158.828	1	158.828	13153.16	0.000
DT	0.265	1	0.265	21.96	0.009
TT	150.585	1	150.585	12470.51	0.000
Error total	0.048	4	0.012		
Total (corr.)	290.213	9			
<b>Datos de ANOVA</b>					
R-cuadrada			99.983 %		
R-cuadrada (ajustada por g.l.)			99.963 %		

## Discusión

Se aprecia en la tabla 19, los valores de ANOVA y su significado según AlJaberi *et al.* (2020), para el estadístico R-cuadrada que indica que el modelo matemático de segundo orden se ajusta al proceso de remoción de manganeso con un 99.983 % de los ensayos realizados con las muestras del PMS1; el estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes resulto un 99.963 % de aceptación de las variables de estudio densidad de corriente y tiempo; con respecto al error total del cuadrado medio resulto un valor de 0.012 cuyo valor es menor a 1, indicando que el trabajo está bien desarrollado. A su vez, se presentan 5 efectos que tienen una probabilidad (valor-P) menor que 0.05 revelando que las variables como la densidad de corriente (D), tiempo (T), sus cuadraturas (DD), (TT) y su interacción (DT) tienen influencia sobre el porcentaje de remoción de manganeso con un 95 % de confianza.

## B. Modelo de segundo orden de los ensayos del PMS2

Con los datos de la tabla 17, se obtuvieron los coeficientes del modelo de segundo orden de la densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>) y tiempo (min), de sus cuadraturas respectivas y de su interacción como se aprecia en la tabla 20.

Tabla 20

*Coefficientes del modelo de 2do orden para los ensayos del PMS2*

Coefficiente	Estimado
constante	-26.379
D: Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	19.539
T: Tiempo (min)	3.829
DD	-1.470
DT	-0.015
TT	-0.060

$$\%R_2 = -26.379 + 19.53 + 3.829T - 1.470D^2 - 0.015DT - 0.060T^2 \quad (41)$$

En la ecuación (41) se muestra el modelo ajustado que representa el porcentaje de remoción de manganeso de las muestras del PMS2. En la tabla 21 se presenta el análisis de varianza (ANOVA) para la validación del modelo de la ecuación (41).

Tabla 21

*Análisis de varianza de la remoción de manganeso del PMS2*

Fuente	Suma de cuadrados	G.l.	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P < 0.05
D: Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	25.568	1	25.568	3954.76	0.000
T: Tiempo (min)	10.696	1	10.696	1654.46	0.000
DD	179.68	1	179.68	27792.65	0.000
DT	0.397	1	0.397	61.39	0.001
TT	166.325	1	166.325	25726.85	0.000
Error total	0.026	4	0.006		
Total (corr.)	279.025	9			
<b>Datos de ANOVA</b>					
R-cuadrada			99.991 %		
R-cuadrada (ajustada por g.l.)			99.979 %		

## Discusión

De la anterior página se observa en la tabla 21, que el estadístico R-cuadrada muestra que el modelo matemático de segundo orden se ajusta al proceso de remoción de manganeso con 99.991 % de las muestras de agua del PMS2; el estadístico R-cuadrada ajustada, se encarga de comparar modelos con diferente número de variables independientes obteniendo un 99.979 % de aceptación de las variables empleadas de densidad de corriente y tiempo en los ensayos realizados con las muestras del PMS2; se observa también que el error total del cuadrado medio es 0.006 siendo menor a 1, lo cual significa que el trabajo se desarrolló adecuadamente según AlJaberi *et al.* (2020).

Los resultados de la probabilidad (valor-P), señalan que 5 efectos son menores que 0.05 indicando que las variables densidad de corriente (D), tiempo (T), sus cuadraturas respectivas (DD), (TT) y su interacción (DT) tienen influencia significativa sobre el porcentaje de remoción de manganeso de las muestras del PMS2 con un 95 % de confianza.

### C. Comprobación de la prueba de hipótesis

Por lo tanto, según los resultados obtenidos se toma la siguiente decisión.

**Decisión:** Se rechaza la hipótesis nula  $H_0$  y se acepta la hipótesis alterna  $H_1$ .

Se comprueba estadísticamente que la evaluación de la densidad de corriente y tiempo en el diseño central compuesto de Box Wilson, determina adecuadamente el porcentaje de remoción de manganeso con un 95 % de confianza.

#### 4.3.2.2. Valores óptimos (tercer objetivo)

Los valores óptimos se obtuvieron de la evaluación de la de la gráfica de contorno y de superficie respuesta, las cuales se graficaron con el programa estadístico STATGRAPHICS Centurión XVIII:

### A. Gráfica de contorno y de superficie respuesta del PMS1

En las figuras 36 y 37 se representa la gráfica de contorno y de superficie respuesta obtenidas de la ecuación (40).

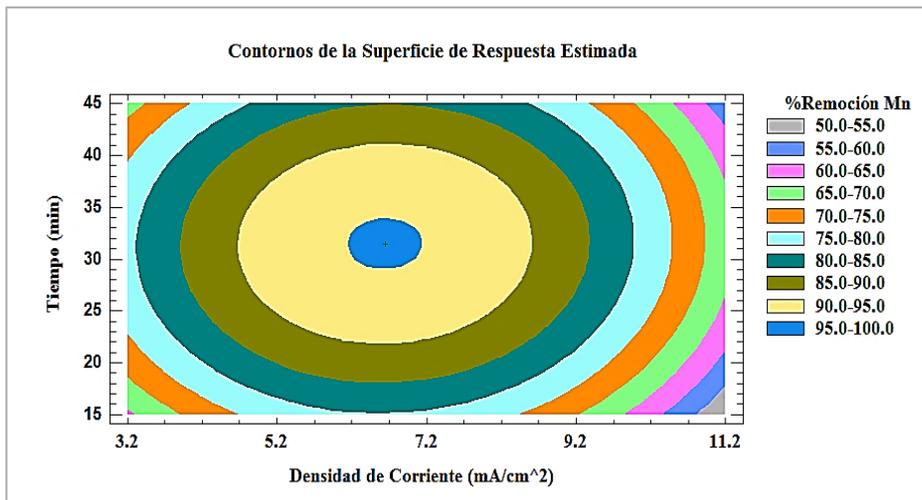


Figura 36. Gráfica de contorno %Remoción de Mn del PMS1

En la figura 36 se observa la gráfica de contorno de los ensayos realizados con las muestras del PMS1, que señala al máximo porcentaje de remoción de manganeso entre el intervalo de 95 % y 100 %, cuando la densidad de corriente se encuentra entre el rango de 5.9 a 7.4 mA/cm<sup>2</sup> y el tiempo entre 28 a 35 minutos.

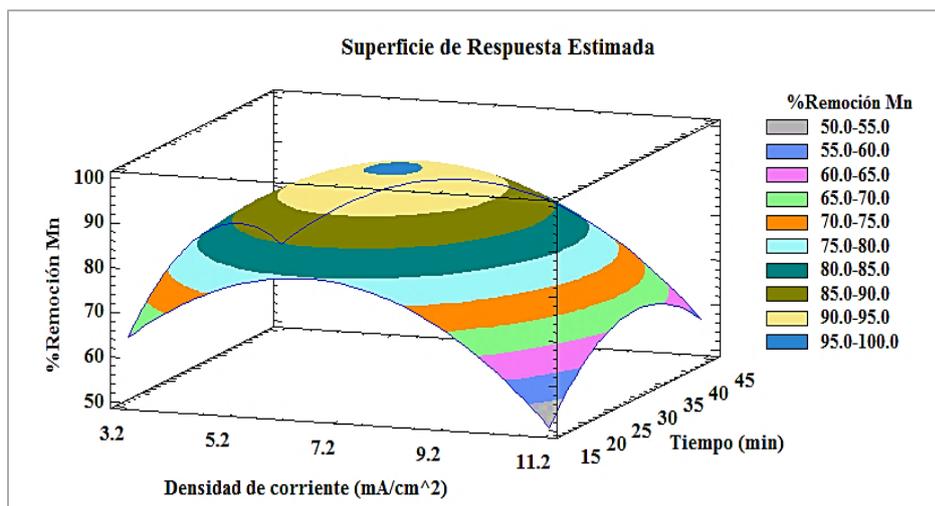


Figura 37. Gráfica de superficie respuesta %Remoción de Mn del PMS1

En la figura 37 se muestran la gráfica de superficie respuesta, la cual indica que incrementando la densidad de corriente hasta 6.65 mA/cm<sup>2</sup> y el tiempo hasta 31.49 minutos se consigue el máximo porcentaje de remoción de manganeso de 95.35 %.

## B. Gráfica de contorno y de superficie respuesta del PMS2

En las figuras 38 y 39 se representa la gráfica de contorno y de superficie respuesta obtenidas de la ecuación (41).

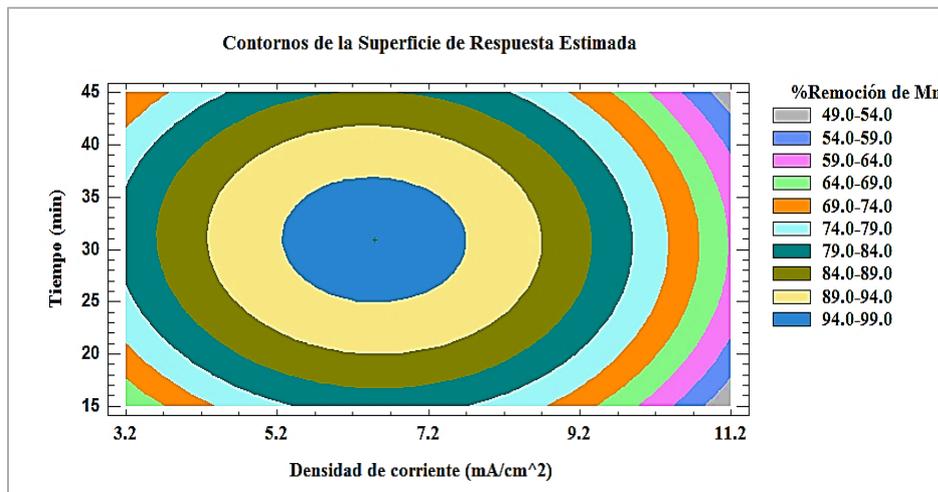


Figura 38. Gráfica de contorno %Remoción de Mn del PMS2

En la figura 38 se muestra la gráfica de contorno de los ensayos realizados con las muestras del PMS2, que indica que el porcentaje de remoción de manganeso es máximo entre el intervalo de 94 % y 99 %, cuando la densidad de corriente se encuentra entre el rango de 5.7 a 7.2 mA/cm<sup>2</sup> y tiempo de 25 a 35 minutos.

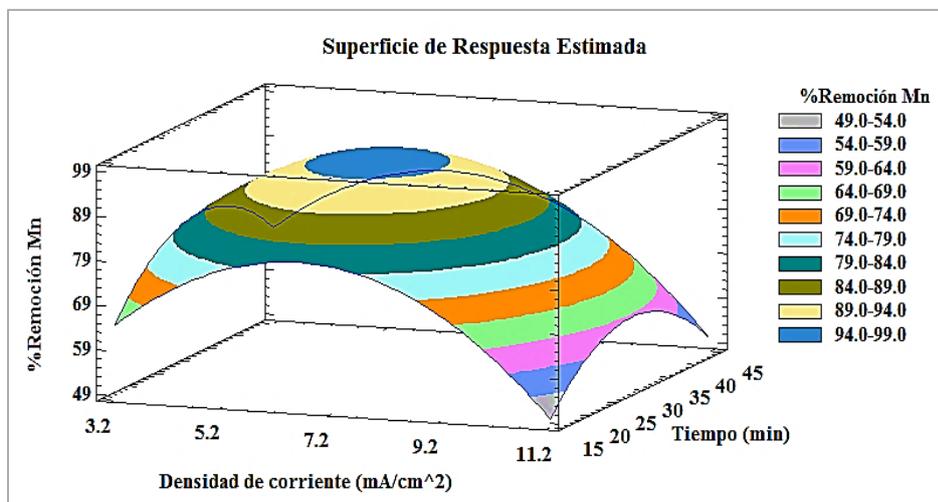


Figura 39. Gráfica de superficie respuesta %Remoción de Mn del PMS2

En la figura 39 se observa la gráfica de superficie de respuesta de los ensayos del

PMS2, la cual indica que se logra el máximo porcentaje de remoción de manganeso de 96.18 % cuando se aumenta la densidad de corriente hasta 6.48 mA/cm<sup>2</sup> y el tiempo hasta 30.92 min, a valores superiores, se disminuye el porcentaje de remoción, revelando que la densidad de corriente y el tiempo tienen efecto de curvatura con pendiente positiva sobre el porcentaje de remoción de manganeso.

### Discusión

Das y Nandi (2021), recomendaron no emplear densidades de corriente superiores a 6.85 mA/cm<sup>2</sup>, debido a que liberan un exceso de iones aluminio (Al<sup>+3</sup>) en el medio acuoso y se convierten en contaminantes secundarios en el agua tratada.

Para Melo y Sacristan (2018), es importante encontrar el tiempo de operación óptimo, debido a que permite alcanzar la condición adecuada, para mejorar la eficiencia de eliminación del contaminante.

### C. Comparación de los valores óptimos

A continuación, se muestra los valores óptimos conseguidos estadísticamente y los obtenidos mediante ensayos de laboratorio.

Tabla 22

*Comparación de valores óptimos obtenidos*

<b>Valores óptimos obtenidos con el programa estadístico STATGRAPHICS Centurión XVIII</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>%Remoción (Mn)</b>
PMS1	6.65	31.49	95.35
PMS2	6.48	30.92	96.18

<b>Valores óptimos obtenidos mediante ensayos de laboratorio (Experimento N° 10) de las tablas 16 y 17</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>%Remoción (Mn)</b>
PMS1	6.2	30	95.10
PMS2	6.2	30	96.11

En la tabla 22 de la anterior página, se muestra los valores óptimos de densidad de corriente y tiempo con sus respectivos porcentajes de remoción de manganeso, conseguidos con el programa estadístico STATGRAPHICS Centurión XVIII; los cuales son similares a los obtenidos mediante ensayos de laboratorio, por lo que se validan los valores óptimos de densidad de corriente de  $6.2 \text{ mA/cm}^2$  y tiempo de 30 minutos y sus porcentajes de remoción de manganeso de 95.10 % en el PMS1 y 96.11 % en el PMS2 datos encontrados en el (Experimento N° 10) de las tablas 16 y 17; considerando que en el tratamiento por electrocoagulación, se requiere emplear una densidad de corriente no muy elevada y un tiempo no muy prolongado para obtener porcentajes significativos de remoción.

#### 4.3.3. Mejores porcentajes de remoción de Mn (tercer objetivo)

A continuación, se muestra en la tabla 23, los datos del (Experimento N° 10), el cual fue elegido por obtener los más altos porcentajes de remoción de manganeso.

Tabla 23

*Datos del mejor experimento obtenido con las muestras del PMS1 y PMS2*

Muestras del Río Chacapalca	Antes del tratamiento $C_i$ (mg/L)	Después del tratamiento $C_f$ (mg/L)	Remoción de Mn (%)	pH final	C.E. (uS/cm) Final
Experimento N° 10 del PMS1	0.98	0.048	95.10	6.82	221
Experimento N° 10 del PMS2	0.95	0.037	96.11	8.15	242

En la tabla 23 se detalla los valores finales de pH de 6.82 en el PMS1 y de 8.15 en el PMS2, los cuales se ubican dentro del rango establecido de 6.5 a 8.5 de la categoría 3: (D1) riego de vegetales y (D2) bebida de animales de los ECA; así mismo se observa las mediciones finales de la conductividad eléctrica de 221 uS/cm en el PMS1 y de 242 uS/cm en el PMS2, los cuales se encuentran por debajo del nivel permitido de la categoría 3: (D1) riego de vegetales de 2500 uS/cm y (D2) bebida de animales de 5000 uS/cm de los ECA para agua.

A sí mismo, en la tabla 23 y en el (Anexo 5), se encuentran las concentraciones iniciales de manganeso ( $C_i$ ) de 0.98 mg/L en el PMS1 y de 0.95 mg/L en el PMS2; en

el (Anexo 7), se ubican las concentraciones finales de manganeso ( $C_f$ ) de 0.048 mg/L en el PMS1 y de 0.037 mg/L en el PMS2, ambos resultados se encuentran por debajo de los ECA del agua en la categoría 3: (D1) riego de vegetales y (D2) bebida de animales de 0.2 mg/L según decreto supremo N° 004 - 2017 - MINAM como se presenta en la siguiente figura 40.

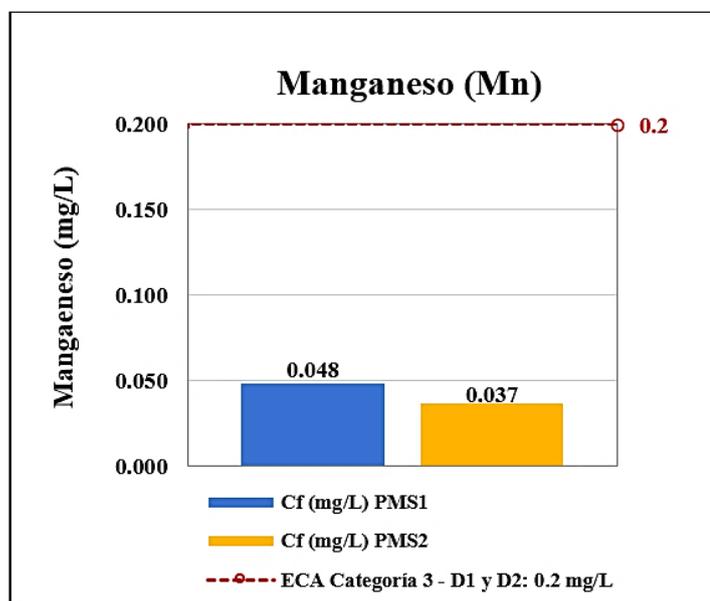


Figura 40. Concentración final de Mn del PMS1 y PMS2

Seguidamente se muestra los porcentajes de remoción de manganeso.

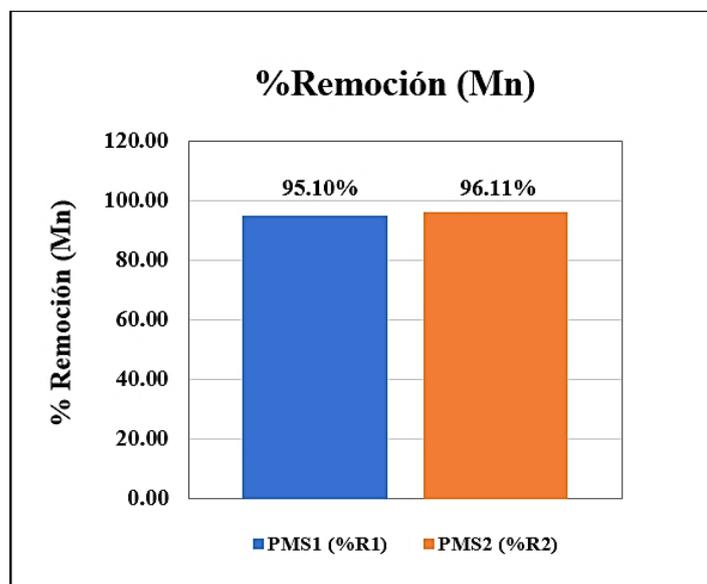


Figura 41. Porcentajes de remoción de Mn del PMS1 y PMS2

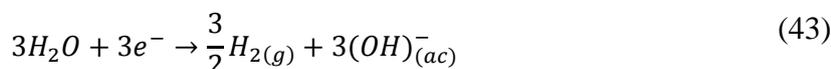
En la figura 41 de la anterior página, se aprecia altos porcentajes de remoción de manganeso de 95.10 % y 96.11 % de las muestras tratadas del PMS1 y del PMS2 respectivamente, debido a que se empleó una densidad de corriente de 6.2 mA/cm<sup>2</sup> y un tiempo de 30 minutos y se añadió 20 mL del electrolito de cloruro de sodio (NaCl).

### Discusión

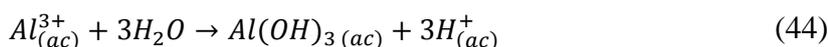
Para Othmani *et al.* (2022), cuando se emplean electrodos de aluminio, en el ánodo se genera la reacción de oxidación y se desprenden los cationes Al<sup>3+</sup> como se muestra:



En el cátodo se presenta la reacción de reducción para el agua, en el cual se libera los iones hidroxilo (OH)<sup>-</sup> que ocasiona el incremento del pH del medio acuoso y a su vez se libera el gas (H<sub>2</sub>):



En el medio acuoso se forma in situ el coagulante hidróxido de aluminio:



En nuestros ensayos se obtuvo un área efectiva en los ánodos de aluminio de 297.6 cm<sup>2</sup> que permitió el desprendimiento de los cationes (Al<sup>3+</sup>) y estos a su vez se unieron a los iones hidroxilo (OH)<sup>-</sup> liberados por los cátodos formándose el coagulante hidróxido de aluminio Al(OH)<sub>3</sub> como lo indican Akter *et al.* (2022); a su vez se presentó la desestabilización de los iones manganeso (Mn<sup>2+</sup>) que fueron adsorbidos por el coagulante Al(OH)<sub>3</sub> en forma de flóculos y se trasladaron a la zona de flotación con ayuda de los gases (H<sub>2</sub>) y (O<sub>2</sub>) liberados en el medio acuoso descritos por Tegladza *et al.* (2021) y los flóculos más pesados se trasladaron a la zona de sedimentación en forma de especies precipitadas de manganeso, la cual se presentó con la siguiente reacción química planteada por Casquino (2018):



En el presente estudio al culminar el tratamiento se mantuvo en reposo por un tiempo de 30 minutos, para que sedimenten los lodos precipitados de  $Mn(OH)_2$ , los cuales se separaron por filtración, al retirar dichos lodos de carácter alcalino del medio acuoso se reguló el pH de las muestras tratadas del PMS1 y del PMS2, los cuales tomaron valores entre el intervalo de 6 a 8 coincidiendo con lo mencionado por Arturi *et al.* (2019).

En el estudio realizado por Casquino (2018), se removió el manganeso de las aguas del Río Rímac con electrodos de aluminio en la celda electrolítica, se observó que después del tratamiento se consiguieron valores finales de pH de 8.3 y conductividad eléctrica de 220.87 uS/cm y se alcanzó un porcentaje de remoción de 96.01 %.

En la investigación realizada por Das y Nandi (2021), se obtuvieron mejores resultados con electrodos de aluminio en ánodos y cátodos; se empleó NaCl como electrolito, después del tratamiento se disminuyó la conductividad eléctrica a 498 uS/cm y a su vez se incrementó el pH hasta 7.52; obteniendo porcentaje de remoción de manganeso de 97.99 % en 40 minutos y con una densidad de corriente de 6.85 mA/cm<sup>2</sup>.

Por otro lado Ramírez (2013), empleó electrodos de cobre en ánodos y cátodos con una distancia de electrodos de 1 cm, se obtuvo porcentaje de remoción de manganeso de 24.27 % en aguas de pozo con una corriente de 26.82 amperios y en 15 minutos.

En la investigación realizada por Nariyan *et al.* (2017), se emplearon ánodos de hierro y cátodos de acero inoxidable, se obtuvo remoción del 23.4 % de manganeso de aguas de mina aplicando una densidad de corriente de 70 mA/cm<sup>2</sup> y tiempo de 60 minutos.

De acuerdo a los estudios mencionados, se observó que se obtienen menores porcentajes de remoción de manganeso con el uso de electrodos de cobre investigado por Ramírez (2013) y con el uso de ánodos de hierro estudiado por Nariyan *et al.* (2017). Sin embargo, se obtienen mejores porcentajes de remoción de manganeso con el uso de electrodos de aluminio en ánodos y cátodos según los estudios realizados por Casquino (2018); Das y Nandi (2021), coincidiendo con nuestra investigación, debido a la afinidad que tiene el coagulante hidróxido de aluminio para adsorber los iones manganeso del medio acuoso.

## CONCLUSIONES

- Para la remoción de manganeso de las muestras de agua colectadas de dos puntos de muestro PMS1 y PMS2 del Río Chacapalca, se construyeron dos celdas de electrocoagulación, la primera celda para tratar las muestras del PMS1 y la segunda celda para tratar las muestras del PMS2 y se emplearon en cada celda 5 electrodos de aluminio, de los cuales 3 electrodos fueron los ánodos de sacrificio y se obtuvo un área efectiva de reacción de  $297.6 \text{ cm}^2$  que desprendió los iones aluminio para la formación in situ del coagulante hidróxido de aluminio, el cual trabajo como un eficiente material adsorbente de los iones manganeso.
- Se realizo la caracterización de las muestras de agua del PMS1 y PMS2 del Río Chacapalca antes y después del tratamiento, con un análisis físico-químico, en el cual se observó en ambas muestras, que después del tratamiento por electrocoagulación se incrementó el pH entre 6 a 8; a su vez se elevaron ligeramente los cloruros y nitratos, los cuales no sobrepasaron los ECA del agua. Por otro lado, la conductividad eléctrica, turbidez, dureza, sulfatos y manganeso disminuyeron sus niveles en ambas muestras de agua hasta por debajo de los ECA del agua en la categoría 3 y se comprobó que la técnica de electrocoagulación, logro la remoción de los parámetros mencionados incluido el manganeso.
- La evaluación de la densidad de corriente y tiempo se realizó en ambas muestras de agua del PMS1 y del PMS2, en un diseño central compuesto de Box Wilson que permitió obtener los valores óptimos de  $6.2 \text{ mA/cm}^2$  y 30 minutos, para emplearlos en volumen de muestra de 1 L y con la adición de 20 mL de electrolito NaCl, el cual facilito la disolución de los iones aluminio en el medio acuoso; estos parámetros contribuyeron en disminuir las concentraciones de manganeso en el PMS1 a  $0.048 \text{ mg/L}$  y en el PMS2 a  $0.037 \text{ mg/L}$ , valores que se encuentran por debajo de los ECA del agua en la categoría 3: (D1) riego de vegetales y (D2) bebida de animales de  $0.2 \text{ mg/L}$ , según Decreto Supremo N° 004 – 2017 – MINAM y a su vez se alcanzó los máximos porcentajes de remoción de manganeso de 95.10 % y 96.11 % en el PMS1 y PMS2 respectivamente con un 95 % de confiabilidad.



## RECOMENDACIONES

- Estudiar la remoción de metales pesados de aguas residuales, empleando una celda electrolítica con conexión fotovoltaica, con electrodos de aluminio en ánodos y cátodos distribuidos en serie.
- Realizar un análisis microbiológico de las aguas contaminadas antes y después del tratamiento por electrocoagulación y realizar estudios más específicos sobre las consecuencias del manganeso en la salud, según los estándares de calidad ambiental del agua.
- Evaluar el efecto de las variables como la distancia entre electrodos, pH y dosis de electrolito de cloruro de potasio, en la remoción de metales pesados de aguas residuales industriales por el método de la electrocoagulación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdel-Aziz, M. H., El-Ashtouky, E. S. Z., Sh. Zoromba, M., Bassyouni, M., & Sedahmed, G. H. (2020). Removal of nitrates from water by electrocoagulation using a cell with horizontally oriented Al serpentine tube anode. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 82, 105–112. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2019.10.001>
- Aguilar A., E. A. (2015). *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua* [Universidad Mayor de San Marcos]. [https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/4303/Aguilar\\_ae.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/4303/Aguilar_ae.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Akter, S., Suhan, M. B. K., & Islam, M. S. (2022). Recent advances and perspective of electrocoagulation in the treatment of wastewater: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, 100643. <https://doi.org/10.1016/J.ENMM.2022.100643>
- AlJaberi, F. Y., Ahmed, S. A., & Makki, H. F. (2020). Electrocoagulation treatment of high saline oily wastewater: evaluation and optimization. *Heliyon*, 6(6), e03988. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2020.E03988>
- AlTowyan, L., AlSagabi, S., AlAjyan, T., AlSulami, K., & Goumri-Said, S. (2022). The removal of manganese ions from industrial wastewater using local Saudi and commercial bentonite clays. *Groundwater for Sustainable Development*, 19, 100821. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2022.100821>
- ANA. (2016). *Resolución Jefatural N° 010 - 2016 - ANA. Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*. [http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j.\\_010-2016-ana\\_0.pdf](http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j._010-2016-ana_0.pdf)
- ANA. (2020). *Informe Técnico N° 120 – 2020 – ANA – AAA. TIT – AT/RWAA. Resultados del Monitoreo de Calidad de Agua Superficial en la Unidad Hirográfica Pucará (Octubre del 2020)*.
- APHA. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (APHA

- (ed); 21rd., Vol. 21).  
<https://www.standardmethods.org/doi/book/10.2105/SMWW.2882>
- Arango R., A., & Garcés G., L. F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, 43(147), 56–67. <https://www.redalyc.org/pdf/215/21514706.pdf>
- Arboleda C., J. M., & Herrera L., P. J. (2015). *Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente Cr(6+) con electrodos de aluminio-aluminio y de hierro-aluminio en condiciones de laboratorio*. Universidad Santo Tomas.
- Arturi, T. S., Seijas, C. J., & Bianchi, G. L. (2019). A comparative study on the treatment of gelatin production plant wastewater using electrocoagulation and chemical coagulation. *Heliyon*, 5(5), e01738. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2019.E01738>
- Barboza P., G. I. (2011). *Reducción de la Carga Contaminante de las Aguas Residuales de la Planta de Tratamiento de Totorá-Ayacucho empleando la Técnica de Electrocoagulación* [Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/338>
- Casquino B., J. M. (2018). *Remoción de Manganeso en aguas del Río Rímac-San Mateo por el proceso de electrocoagulación tipo Batch para uso de regadío, 2018* [Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/34675>
- Castañeda H., D. M., & Choton C., E. A. (2018). *Estudio de la densidad de corriente y tiempo de residencia en el proceso de electrocoagulación y su influencia en la reducción Fe<sup>2+</sup> de solución de drenaje ácido de mina* [Universidad Nacional del Trujillo]. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/11230>
- Das, D., & Nandi, B. K. (2021). Treatment of iron ore beneficiation plant process water by electrocoagulation. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(1), 102902. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2020.11.008>
- Ebba, M., Asaithambi, P., & Alemayehu, E. (2022). Development of electrocoagulation process for wastewater treatment: optimization by response surface methodology.

- Heliyon*, 8(5), e09383. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E09383>
- Garcia-Segura, S., Eiband, M. M. S. G., de Melo, J. V., & Martínez-Huitle, C. A. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 801, 267–299. <https://doi.org/10.1016/J.JELECHEM.2017.07.047>
- Hernandez, E. (2019). Manganese. *Revista Ciencia y Cultura*, 1–5. <https://www.revistac2.com/manganeso/MANGANESO>
- Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación*. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2. Hernandez, Fernandez y Baptista-Metodología Investigacion Cientifica 6ta ed.pdf>
- Huayta G., L. S. (2017). *Propuesta de Tratamiento Electroquímico en Aguas de Filtración de Relave, proveniente de Southern Copper Corporation en la Región Moquegua, para su Uso Agrícola* [Universidad Nacional San Agustín]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3010>
- Humpire C., F. (2017). *Efecto del pH y tiempo en la depuración de lactosuero residual por electrocoagulación* [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/3908>
- INFOAGRO. (2008). *Manual de Instrucciones*. [https://infoagro.com/instrumentos\\_medida/instrucciones/instrucciones\\_fotometro\\_multiparametrico\\_analisis\\_aguas\\_hi83200.pdf](https://infoagro.com/instrumentos_medida/instrucciones/instrucciones_fotometro_multiparametrico_analisis_aguas_hi83200.pdf)
- Ingelsson, M., Yasri, N., & Roberts, E. P. L. (2020). Electrode passivation, faradaic efficiency, and performance enhancement strategies in electrocoagulation—a review. *Water Research*, 187, 116433. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2020.116433>
- Kambuyi, T. N., Bejjany, B., Lekhlif, B., Mellouk, H., Digua, K., & Dani, A. (2021). Design of a continuous-flow single-channel reactor using optimal experimental data from batch reactor for turbidity removal by electrocoagulation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104651. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2020.104651>

- Kamel, M., El-Ashtoukhy, E. S. Z., Abdel-Aziz, M. H., Zahran, R. R., Sedahmed, G. H., & El Gheriany, I. (2022). Effect of additives and electrode roughness on the production of hypochlorite sanitizer by the electrolysis of NaCl solution in a batch recycle reactor. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 176, 108959. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2022.108959>
- Kobyas, M., Gengec, E., & Demirbas, E. (2016). Operating parameters and costs assessments of a real dyehouse wastewater effluent treated by a continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 101, 87–100. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2015.11.012>
- Kwakye, G. F., Paoliello, M. M. B., Mukhopadhyay, S., Bowman, A. B., & Aschner, M. (2015). Manganese-induced parkinsonism and Parkinson's disease: Shared and distinguishable features. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(7), 7519–7540. <https://doi.org/10.3390/ijerph120707519>
- La República. (2018). *Ríos de Puno son contaminados por Mina Arasi | Sociedad - La República*. <https://larepublica.pe/sociedad/1179979-rios-de-puno-son-contaminados-por-mina-arasi/>
- Lazic, Z. (2004). *Design of Experiments in Chemical Engineering* (Wiley-Vch (ed.)). United States of America.
- Lazo C., L. R. (2012). *Remoción del Manganeso para mejorar la calidad de las aguas de consumo humano en la Laguna Azulcocha* [Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/1084>
- Lopez R., G. A. (2017). *Recuperación de manganeso presente en las aguas residuales provenientes de la Mina Geza Minerales Asis, por coagulación y floculación* [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/5062>
- Mamelkina, M. A., Cotillas, S., Lacasa, E., Sáez, C., Tuunila, R., Sillanpää, M., Häkkinen, A., & Rodrigo, M. A. (2017). Removal of sulfate from mining waters by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 182, 87–93. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2017.03.044>
- Mayta H., R. (2012). *Efecto del Proceso de Electrocoagulación en las Aguas Residuales*

*de Curtiembre de la Facultad de Ingeniería Química* [Universidad Nacional del Altiplano].

[http://biblioteca.unap.edu.pe/opac\\_css/index.php?lvl=notice\\_display&id=65221](http://biblioteca.unap.edu.pe/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=65221)

Melo H., A. P., & Sacristan Y., L. J. (2018). *Evaluación de la remoción de Nitratos por electrocoagulación* [Fundación Universidad de América].  
<http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7211/1/6131007-2018-2-IQ.pdf>

MINAM. (2017). *Decreto Supremo N° 004 – 2017 – MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. Normas legales*. Diario Oficial El Peruano. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>

Miranda Z., N. (2012). *Tecnología de aguas tratamiento y control de calidad* (2da Edic.). Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano.

Montgomery, D. (2020). *Design and analysis of experiments* (10ma ed.). John Wiley & Sons.  
<https://drive.google.com/file/d/1Jgv1JU8p0nQmRR2FAemPsZAMBgt1BvIM/view>

Mousazadeh, M., Naghdali, Z., Al-Qodah, Z., Alizadeh, S. M., Karamati Niaragh, E., Malekmohammadi, S., Nidheesh, P. V., Roberts, E. P. L., Sillanpää, M., & Mahdi Emamjomeh, M. (2021). A systematic diagnosis of state of the art in the use of electrocoagulation as a sustainable technology for pollutant treatment: An updated review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101353.  
<https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101353>

Nariyan, E., Sillanpää, M., & Wolkersdorfer, C. (2017). Electrocoagulation treatment of mine water from the deepest working European metal mine – Performance, isotherm and kinetic studies. *Separation and Purification Technology*, 177, 363–373.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.12.042>

OEFA. (2016). *Informe N° 100 – 2016 – OEFA/ DE – SDLB – CEAL. Informe de Evaluación Ambiental en la Cuenca Pucará durante el año 2016*.  
[http://visorsig.oefa.gob.pe/datos\\_de/PM0203/PM020302/01/IF/IF\\_0100-2016-OEFA-DE-SDLB-CEAI.pdf](http://visorsig.oefa.gob.pe/datos_de/PM0203/PM020302/01/IF/IF_0100-2016-OEFA-DE-SDLB-CEAI.pdf)

- Othmani, A., Kadier, A., Singh, R., Igwegbe, C. A., Bouzid, M., Aquatar, M. O., Khanday, W. A., Bote, M. E., Damiri, F., Gökkuş, Ö., & Sher, F. (2022). A comprehensive review on green perspectives of electrocoagulation integrated with advanced processes for effective pollutants removal from water environment. *Environmental Research*, 215, 114294. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.114294>
- Pantoja P., E. T. (2012). *Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón* [Universidad del Valle]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/4148/CB-0460950.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Poma, J., & Quispe, P. (2016). *Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación* [Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3757>
- Porto H., H. (2014). *Evaluación de la remoción de arsénico por electrocoagulación de aguas mineras* [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/4488>
- Prieto G., F., Callejas H., J., Reyes C., V. E., & Mormolejo S., Y. (2012). Electrocoagulación: Una alternativa para depuración de lactosuero residual. *Revista AIDIS*, 5(3), 51–77. <https://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/34727>
- Quispe Q., K. K. (2015). *Electrocoagulación en la remoción de Mercurio de las aguas residuales en el Centro Poblado la Rinconada-Puno* [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/2529>
- Rakhtshah, J., Shirkhanloo, H., & Dehghani Mobarake, M. (2022). Simultaneously speciation and determination of manganese (II) and (VII) ions in water, food, and vegetable samples based on immobilization of N-acetylcysteine on multi-walled carbon nanotubes. *Food Chemistry*, 389, 133124. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.133124>
- Ramírez O., A. A. (2013). Análisis de la eficiencia de la remoción de Hierro y Manganeseo por medio de un proceso de electrocoagulación utilizando un prototipo de celda

- electroquímica tipo batch y de su factilidad financiera. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 8(1), 41–47. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v8i1.1485>
- Restrepo Mejía, A. P., Arango Ruíz, Á., & Garcés Giraldo, L. F. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción+Limpia*, 1(2), 58–77. [http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/514/1/pl\\_v1n2\\_58-77\\_electrocoagulacion.pdf](http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/514/1/pl_v1n2_58-77_electrocoagulacion.pdf)
- Röllin, H. B., & Nogueira, C. M. C. A. (2019). Manganese: Environmental Pollution and Health Effects. *Encyclopedia of Environmental Health*, 229–242. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11530-1>
- Salman, R. H. (2019). Removal of Manganese Ions (Mn<sup>2+</sup>) from a Simulated Wastewater by Electrocoagulation/ Electroflotation Technologies with Stainless Steel Mesh Electrodes: Process Optimization Based on Taguchi Approach. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 20(1), 39–48. <https://doi.org/10.31699/IJCPE.2019.1.6>
- Sediqi, S., Bazargan, A., & Mirbagheri, S. A. (2021). Consuming the least amount of energy and resources in landfill leachate electrocoagulation. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101454. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101454>
- Shafaei, A., Rezayee, M., Arami, M., & Nikazar, M. (2010). Removal of Mn<sup>2+</sup> ions from synthetic wastewater by electrocoagulation process. *Desalination*, 260(1–3), 23–28. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2010.05.006>
- Tegladza, I. D., Xu, Q., Xu, K., Lv, G., & Lu, J. (2021). Electrocoagulation processes: A general review about role of electro-generated flocs in pollutant removal. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 169–189. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2020.08.048>
- Xu, L., Huang, Q., Xu, X., Cao, G., He, C., Wang, Y., & Yang, M. (2017). Simultaneous removal of Zn<sup>2+</sup> and Mn<sup>2+</sup> ions from synthetic and real smelting wastewater using electrocoagulation process: Influence of pulse current parameters and anions. *Separation and Purification Technology*, 188, 316–328. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2017.07.036>



Yu, M., Jia, J., Liu, X., Cui, J., Xi, B., He, X., & Mao, X. (2019). p-Arsanilic acid degradation and arsenic immobilization by a disilicate-assisted iron/aluminum electrolysis process. *Chemical Engineering Journal*, 368, 428–437.  
<https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2019.02.159>

## ANEXOS

### **Anexo 1.** Determinación de la concentración final de manganeso

#### **A. Análisis de Manganeso Rango Bajo – Método Fotométrico**

Para la determinación de manganeso, rango bajo en aguas residuales se realizó por el método fotométrico, siguiendo el procedimiento descrito por APHA (2005) y citado por INFOAGRO (2008).

##### **A.1. Instrumental**

- 10 cubetas de vidrio de 10 mL
- Soporte para cubetas
- 2 pipetas de 10 mL

##### **A.2. Equipo**

- Fotómetro HI 83200

##### **A.2.1. Especificaciones**

- Rango: 0.00 a 300 ug/L
- Resolución: 1 ug/L
- Precisión:  $\pm 2$  mg/L  $\pm 3\%$  de lectura
- Desviación:  $\pm 1$  ug/L

##### **A.2.2. Descripción del Método**

Lampara de tungsteno con filtro de interferencias de banda estrecha, con longitud de onda de 575 nm. Adaptación del método PAN; la reacción entre el manganeso y los reactivos causa una coloración naranja en la muestra. Seguidamente se muestra en la tabla 24, los insumos químicos que se emplearon para el análisis de (Mn) rango bajo.

Tabla 24

*Insumos químicos de manganeso rango bajo*

Código	Descripción	Cantidad por muestra
HI 93709A-0	Acido ascórbico	1 paquete
HI 93709B-0	Sol. Cianuro alcalino	0.2 mL
HI 93709C-0	Indicador PAN 0.1%	1 mL

### A.3. Procedimiento de medición

Se siguió el procedimiento descrito por APHA (2005) y citado por INFOAGRO (2008):

- a) Escoja el método Manganeso LR (rango bajo), llene la cubeta con 10 mL de agua bidestilada hasta la marca de la cubeta, llene una segunda cubeta con 10 mL de muestra hasta la marca de la cubeta.
- b) Añádase un paquete de Acido ascórbico (HI 93709A-0) a cada envase y coloque sus respectivas tapas, agítese suavemente hasta que se disuelva por completo.
- c) Adiciónese 0.2 mL de cianuro alcalino (HI 93709B-0) a cada envase, recubra con las tapas y agítese despacio y añádase 1 mL de HI 93709C-0 del indicador PAN a cada envase, coloque las tapas y agítese despacio.
- d) Inserte el envase con el agua bidestilada, el cual se considera como blanco en la celda de medición y coloque la tapa.
- e) Pulse la tecla TIMER y la pantalla mostrara la cuenta atrás previa a la medición o como alternativa espere 2 minutos y a continuación pulse la tecla ZERO. La pantalla del fotómetro mostrara 0.00 cuando el instrumento este a cero se encuentra listo para la medición.
- f) Introduzca la segunda cubeta con la muestra tratada en el fotómetro. Presione la tecla READ para iniciar la lectura. El instrumento muestra los resultados en ug/L por lo que se convierte a mg/L (INFOAGRO, 2008).

## Anexo 2. Cantidad de aluminio generado en el proceso de electrocoagulación

Ingelsson *et al.* (2020), mencionan que la cantidad de aluminio disuelto en la solución se determina con la ley de Faraday conformada por: “ $m$  que es la cantidad de aluminio disuelto ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ),  $I$  es la densidad de corriente ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ),  $t$  es el tiempo (s),  $M$  es el peso molecular del aluminio ( $M = 27 \text{ g/mol}$ ),  $Z$  es el número de electrones implicados en la reacción de oxidación/reducción ( $Z = 3$ ) y  $F$  es la constante de Faraday ( $96500 \text{ C/mol}$ )” (p. 4), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$m = \frac{ItM}{ZF} \quad (46)$$

Tabla 25

*Cantidad de aluminio disuelto en las muestras del PMS1 y del PMS2*

N°	Densidad de corriente		Tiempo		Cantidad de aluminio disuelto	
	(mA/cm <sup>2</sup> )	(A/cm <sup>2</sup> )	t (min)	t (s)	g/cm <sup>2</sup>	mg/cm <sup>2</sup>
1	4.13	0.00413	20	1200	0.00046	0.462
2	8.26	0.00826	20	1200	0.00092	0.924
3	4.13	0.00413	40	2400	0.00092	0.924
4	8.26	0.00826	40	2400	0.00185	1.849
5	<b>3.28</b>	<b>0.00328</b>	30	1800	0.00055	0.550
6	<b>9.11</b>	<b>0.00911</b>	30	1800	0.00153	1.530
7	6.20	0.00620	<b>15.86</b>	<b>951.6</b>	0.00055	0.550
8	6.20	0.00620	<b>44.14</b>	<b>2648.4</b>	0.00153	1.530
9	6.20	0.00620	30	1800	0.00104	1.040
10	6.20	0.00620	30	1800	0.00104	1.040

### **Anexo 3.** Amperaje y voltaje aplicados en el tratamiento de las muestras PMS1 y PMS2

Valores obtenidos de la fuente de energía que se empleó en las celdas de electrocoagulación, el cual mostro lecturas de amperaje (A) y voltaje (V).

Tabla 26

*Amperaje y voltaje de las muestras del PMS1*

N°	Amperaje (A)	Voltaje (V)
1	1.23	7.10
2	2.46	12.20
3	1.23	6.40
4	2.46	11.60
5	0.97	5.80
6	2.71	12.70
7	1.84	8.90
8	1.84	7.80
9	1.84	8.60
10	1.84	8.50

Tabla 27

*Amperaje y voltaje de las muestras del PMS2*

N°	Amperaje (A)	Voltaje (V)
1	1.23	6.70
2	2.46	11.90
3	1.23	6.10
4	2.46	11.30
5	0.97	5.50
6	2.71	12.30
7	1.84	8.50
8	1.84	7.40
9	1.84	8.30
10	1.84	8.20

#### Anexo 4. Consumo de energía en el tratamiento de las muestras del PMS1 y PMS2

Arboleda y Herrera (2015), reportan que el consumo de energía se determina mediante: “ $V$  es el voltaje (V),  $I$  es la corriente aplicada (A),  $t$  es el tiempo de electrolisis (h) y  $v$  es el volumen de agua residual tratada en ( $m^3$ ) y  $E_C$  es la energía consumida ( $kWh/m^3$ )”. (p. 88), empleando la siguiente ecuación:

$$E_C = \frac{V \times I \times t}{v \times 1000} \quad (47)$$

Tabla 28

*Consumo de energía en el tratamiento de las muestras del PMS1*

N°	Corriente (A)	Diferencia de potencial (V)	Tiempo (h)	Volumen ( $m^3$ )	$E_C$ ( $kWh/m^3$ )	$E_C$ ( $kWh/L$ )
1	1.23	7.10	0.33	0.001	2.9	0.0029
2	2.46	12.20	0.33	0.001	10.0	0.0100
3	1.23	6.40	0.67	0.001	5.2	0.0052
4	2.46	11.60	0.67	0.001	19.0	0.0190
5	0.97	5.80	0.50	0.001	2.8	0.0028
6	2.71	12.70	0.50	0.001	17.2	0.0172
7	1.84	8.90	0.26	0.001	4.3	0.0043
8	1.84	7.80	0.74	0.001	10.6	0.0106
9	1.84	8.60	0.50	0.001	7.9	0.0079
10	1.84	8.50	0.50	0.001	7.8	0.0078

Tabla 29

*Consumo de energía en el tratamiento de las muestras del PMS2*

N°	Corriente (A)	Diferencia de potencial (V)	Tiempo (h)	Volumen ( $m^3$ )	$E_C$ ( $KWh/m^3$ )	$E_C$ ( $KWh/L$ )
1	1.23	6.70	0.33	0.001	2.7	0.0027
2	2.46	11.90	0.33	0.001	9.8	0.0098
3	1.23	6.10	0.67	0.001	5.0	0.0050
4	2.46	11.30	0.67	0.001	18.5	0.0185
5	0.97	5.50	0.50	0.001	2.7	0.0027
6	2.71	12.30	0.50	0.001	16.7	0.0167
7	1.84	8.50	0.26	0.001	4.1	0.0041
8	1.84	7.40	0.74	0.001	10.0	0.0100
9	1.84	8.30	0.50	0.001	7.7	0.0077
10	1.84	8.20	0.50	0.001	7.6	0.0076

## Anexo 5. Informe de las muestras PMS1 y PMS2 antes del tratamiento

### A. Caracterización de la muestra del PMS1 antes del tratamiento



**Laboratorios Analíticos del Sur**

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N°LE - 050

#### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00508

Fecha de emisión: 8/12/2021

Página 1 de 3

Clave generada : 6213E958

Señores : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSSENIA

Dirección : AV. TIQUILLACA 349 PUNO - PUNO

Atención : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSSENIA

Proyecto : EVALUACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN LA REMOCIÓN DE MANGANESO DE LAS AGUAS DEL RÍO CHACAPALCA, OCUVIRI - PUNO.

#### PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSSENIA

Fecha de recepción : 29/11/2021

Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 353-21

Fecha de ensayo : 29/11/2021

Plan de muestreo : Muestreado por el cliente

Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente

Nro de muestras : 1

Cod. Interno L.A.S.	(c) Nombre de muestra	(c) Matriz de la muestra	(c) Zona, Urb, AAHH/Dist/Prov/Depart.	(c) Punto de muestreo y/o coordenadas	(c) Fecha de inicio de muestreo	(c) Hora de inicio de muestreo
AG21000970	AGUA DE RIO SIN TRATAMIENTO (PMS1)	Agua Natural - Superficial - Agua de Rio	RÍO CHACAPALCA A 1 Km DE LA CONFLUENCIA DEL RÍO AZUFRINI CON EL RÍO PATAGUENA / OCUVIRI / LAMPA / PUNO	ESTE:299889 / NORTE:8312555	28/11/2021	14.08

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Condiciones de recepción de la muestra
Cooler refrigerado
Observación
-

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
**Omar A. Juárez Soto**  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"a<Valor numérico">=Límite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)





## Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00508

Fecha de emisión: 6/12/2021

Página 2 de 3

Clave generada : 6213E95t

#### RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	*3093	*807	*811	*823	*837	808		830	848	
		NO3-	CE	T	Turbidez	Cl-	Mn	pH	T	Dureza Total CaCO3	SO4=
		mg/L	mS/cm	°C	NTU	mg/L	mg/L	Unidad de pH	°C	mg/L	mg/L
AG21000970	AGUA DE RIO SIN TRATAMIENTO (PMS1)	3,56	0,685	17,9	234	9,00	0,98	3,80	18,3	97,1	206,1

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Omar A. Juárez Soto  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

\*\*<Valor numérico">=Limite de detección del método, \*\*<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



\*Los valores de la conductividad eléctrica (C.E.) se convirtieron a uS/cm para comparar con los ECA del agua de la categoría 3, cuyas unidades están en uS/cm.



Laboratorios Analíticos del Sur

## Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N°LE - 050

### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00508

Fecha de emisión: 6/12/2021

Página 3 de 3

Clave generada : 6213E958

#### MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS

Código	Título	Rango de método analítico
*3093	Método de ensayo para nitrato en agua SMEWW.22 nd Ed. Item 4500-NO3 Part.C Second-Derivative Ultraviolet Spectrophotometric Method	[0.5 - 1000] mg/L
*607	ASTM D 1125 - 95 Método de ensayo estándar para la conductividad eléctrica y resistividad del agua	[ - 50] mS/cm
*811	Método de ensayo para la determinación de Turbidez en agua	[ <sup>a</sup> 1.2 - 10000] NTU
*823	Ion cloruro en agua: SMEWW. 22rd Ed. Item 4500-Cl-. Part. C. Mercuric Nitrate Method	[ <sup>a</sup> 0.82 - 1000] mg/L
*837	ASTM D 858 - 02 Método de ensayo estándar para manganeso en agua por absorción atómica	[ <sup>a</sup> 0.052 - 250] mg/L
808	pH en aguas. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ Part.B 23rd Ed. Electrometric Method. (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO)	[ - 14] Unidad de pH
830	Dureza Total (CaCO3) en agua. SMEWW - APHA - AWWA - WEF Part 2340 B, 23rd Ed. Hardness. Hardness by Calculation (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO)	[ <sup>a</sup> 0.2 - 24973] mg/L
848	Ensayo de Sulfatos en agua. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-SO4( <sup>2-</sup> ) Part. E, 23rd Ed. Sulfate. Turbidimetric Method (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO).	[10 - 4000] mg/L

<sup>a</sup> : Límite detección

<sup>b</sup> : Límite de cuantificación

----- Fin del informe -----

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Omar A. Juárez Soto  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\* ) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"<sup>a</sup>=Valor numérico=Límite de detección del método, "<sup>b</sup>=Valor Numérico=Límite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>.

Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.

Validar el informe  
vía web



## B. Caracterización de la muestra del PMS2 antes del tratamiento



**Laboratorios Analíticos del Sur**

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00509

Fecha de emisión: 6/12/2021

Página 1 de 3

Clave generada : 1514D9CE

Señores : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSSENIA  
Dirección : AV. TIQUILLACA 349 PUNO - PUNO  
Atención : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSSENIA  
Proyecto : EVALUACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN LA REMOCIÓN DE MANGANESO DE LAS AGUAS DEL RÍO CHACAPALCA, OCUVIRI - PUNO.

#### PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSSENIA  
Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 353-21  
Plan de muestreo : Muestreado por el cliente  
Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente  
Fecha de recepción : 29/11/2021  
Fecha de ensayo : 29/11/2021  
Nro de muestras : 1

Cod. Interno L.A.S.	(c) Nombre de muestra	(c) Matriz de la muestra	(c) Zona, Urb, AAHH/Dist/Prov/Depart.	(c) Punto de muestreo y/o coordenadas	(c) Fecha de inicio de muestreo	(c) Hora de inicio de muestreo
AG21000671	AGUA DE RIO SIN TRATAMIENTO (PMS2)	Agua Natural - Superficial - Agua de Río	RÍO CHACAPALCA A 0.5 Km AL NORTE DEL CERRO VILLACOLIO / OCUVIRI / LAMPA / PUNO	ESTE:299797 / NORTE:8313478	28/11/2021	15:14

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

<b>Condiciones de recepción de la muestra</b>
Cooler refrigerado
<b>Observación</b>
-

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
**Omar A. Juárez Soto**  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"<Valor numérico">=Límite de detección del método, "<Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú (054)443294 - (054)





## Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00509

Fecha de emisión: 6/12/2021

Página 2 de 3

Clave generada : 1514D9CE

#### RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	*3093	*807		*811	*823	*837	908		830	*848
		NO <sub>3</sub> -	C E	T	Turbidez	Cl-	Mn	pH	T	Dureza Total CaCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> =
		mg/L	mS/cm	°C	NTU	mg/L	mg/L	Unidad de pH	°C	mg/L	mg/L
AG21000971	AGUA DE RIO SIN TRATAMIENTO (PMS2)	3,02	0,649	17,5	196	10,4	0,95	3,91	18,6	100,5	198,5

  
Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Omar A. Juárez Soto  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(") Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"><Valor numérico"=Límite de detección del método, "><Valor Numérico"=Límite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



\*Los valores de la conductividad eléctrica (C.E.), se convirtieron a uS/cm en el capítulo IV para comparar con los ECA del agua de la categoría 3, cuyas unidades están en uS/cm.



## Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N° LE - 050

### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00509

Fecha de emisión: 6/12/2021

Página 3 de 3

Clave generada : 1514D9CE

#### MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS

Código	Título	Rango de método analítico
*3093	Método de ensayo para nitrato en agua SMEWW.22 nd Ed. Iten 4500-NO3 Part.C Second-Derivative Ultraviolet Spectrophotometric Method	[0.5 - 1000] mg/L
*807	ASTM D 1125 - 95 Método de ensayo estándar para la conductividad eléctrica y resistividad del agua	[ - 50] mS/cm
*811	Método de ensayo para la determinación de Turbidez en agua	[* 1.2 - 10000] NTU
*823	Ion cloruro en agua. SMEWW. 22rd Ed. Item 4500-Cl-. Part. C. Mercuric Nitrate Method	[* 0.82 - 1000] mg/L
*837	ASTM D 658 - 02 Método de ensayo estándar para manganeso en agua por absorción atómica	[* 0.052 - 250] mg/L
808	pH en aguas. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ Part.B 23rd Ed. Electrometric Method. (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO)	[ - 14] Unidad de pH
830	Dureza Total (CaCO3) en agua. SMEWW - APHA - AWWA - WEF Part 2340 B, 23rd Ed. Hardness. Hardness by Calculation (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO)	[* 0.2 - 24973] mg/L
848	Ensayo de Sulfatos en agua. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-SO4(*-) Part. E, 23rd Ed. Sulfate. Turbidimetric Method (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO).	[10 - 4000] mg/L

a : Límite detección

b : Límite de cuantificación

----- Fin del informe -----

  
Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Omar A. Juárez Soto  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\* ) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"a<Valor numérico">=Límite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.

Validar el informe  
vía web



## Anexo 6. Informe de las muestras PMS1 y PMS2 después del tratamiento

### A. Caracterización de la muestra del PMS1 después del tratamiento



Laboratorios Analíticos del Sur

## Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N° LE - 050

### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00533

Fecha de emisión: 28/12/2021

Página 1 de 3

Clave generada : DEEC6313

Señores : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSSENIA  
Dirección : AV. TIQUILLACA 349 PUNO - PUNO  
Atención : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSSENIA  
Proyecto : EVALUACION DE LA ELECTROCOAGULACION EN LA REMOCION DE MANGANESO DE LAS AGUAS DEL RIO CHACAPALCA , OCUVIRI - PUNO

#### PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSSENIA  
Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 374-21  
Plan de muestreo : Muestreado por el cliente  
Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente  
Fecha de recepción : 20/12/2021  
Fecha de ensayo : 20/12/2021  
Nro de muestras : 1

Cod. Interno L.A.S.	(c) Nombre de muestra	(c) Matriz de la muestra	(c) Zona, Urb, AAHH/Dis/Prov/Depart.	(c) Punto de muestreo y/o coordenadas	(c) Fecha de inicio de muestreo	(c) Hora de inicio de muestreo
AG21001031	MUESTRA TRATADA DE RIO CHACAPALCA (PMS1)	Agua de Proceso - Agua Purificada	CIUDAD UNIVERSITARIA UNAP / PUNO / PUNO / PUNO	ESTE:391321.30 NORTE:8250389.31	19/12/2021	13:32

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

#### Condiciones de recepción de la muestra

Cooler refrigerado

#### Observación

-

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Omar A. Juárez Soto  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\* ) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"<Valor numérico">=Límite de detección del método, "<Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)



Verificar el informe  
vía WhatsApp



Laboratorios Analíticos del Sur

## Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N° LE - 050

### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00533

Fecha de emisión: 28/12/2021

Página 2 de 3

Clave generada : DEEC631

#### RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	*3030	*3093	*807	*811	*823	*837	830	848		
		pH	T	NO3-	C E	T	Turbidez	Cl-	Mn	Dureza Total CaCO3	SO4=
		Unidad de pH	°C	mg/L	mS/cm	°C	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
AG21001031	MUESTRA TRATADA DE RIO CHACAPALCA (PMS1)	7,61	20,3	8,81	0,412	20,2	0,60	67,2	0,08	34,8	39,9

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
 Omar A. Juárez Soto  
 Gerente de Operaciones  
 M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\* Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"a<Valor numérico">=Límite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>.

Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



\*Los valores de la conductividad eléctrica (C.E.) se convirtieron a uS/cm en el capítulo IV para comparar con los ECA del agua de la categoría 3, cuyas unidades están en uS/cm.



Laboratorios Analíticos del Sur

## Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N° LE - 050

### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00533

Fecha de emisión: 28/12/2021

Página 3 de 3

Clave generada : DEEC6313

#### MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS

Código	Título	Rango de método analítico
*3030	Determinación de pH en aguas SMEWW. 23rd Ed. 4500-H pH Part B. Electrometric Method.	[ - 14] Unidad de pH
*3093	Método de ensayo para nitrato en agua SMEWW. 22 nd Ed. Item 4500-NO3. Part C Second-Derivative Ultraviolet Spectrophotometric Method	[0.5 - 1000] mg/L
*807	ASTM D 1125 - 95 Método de ensayo estándar para la conductividad eléctrica y resistividad del agua	[ - 50] mS/cm
*811	Método de ensayo para la determinación de Turbidez en agua	[* 1.2 - 10000] NTU
*823	Ion cloruro en agua. SMEWW. 22rd Ed. Item 4500-Cl-. Part. C. Mercuric Nitrate Method	[* 0.82 - 1000] mg/L
*837	ASTM D 858 - 02 Método de ensayo estándar para manganeso en agua por absorción atómica	[* 0.052 - 250] mg/L
830	Dureza Total (CaCO <sub>3</sub> ) en agua. SMEWW - APHA - AWWA - WEF Part 2340 B, 23rd Ed. Hardness. Hardness by Calculation (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO)	[* 0.2 - 24973] mg/L
848	Ensayo de Sulfatos en agua. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-SO <sub>4</sub> ( <sup>2-</sup> ) Part. E, 23rd Ed. Sulfate. Turbidimetric Method (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO).	[10 - 4000] mg/L

\* : Límite detección

b : Límite de cuantificación

Fin del informe

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Omar A. Juárez Soto  
Gerente de Operaciones  
Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\* ) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"a<Valor numérico">=Límite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.

Validar el informe  
Vía web



## B. Caracterización de la muestra del PMS2 después del tratamiento



**Laboratorios Analíticos del Sur**

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N° LE - 050

### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00534

Fecha de emisión: 28/12/2021

Página 1 de 3

Clave generada : 4088F6B0

Señores : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSSENIA  
Dirección : AV. TIQUILLACA 349 PUNO - PUNO  
Atención : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSSENIA  
Proyecto : EVALUACION DE LA ELECTROCOAGULACION EN LA REMOCION DE MANGANESO DE LAS AGUAS DEL RIO CHACAPALCA , OCUVIRI - PUNO

#### PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSSENIA Fecha de recepción : 20/12/2021  
Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 374-21 Fecha de ensayo : 20/12/2021  
Plan de muestreo : Muestreado por el cliente  
Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente Nro de muestras : 1

Cod. Interno L.A.S.	(c) Nombre de muestra	(c) Matriz de la muestra	(c) Zona, Urb, AAHH/Distú/Prov/Depart.	(c) Punto de muestreo y/o coordenadas	(c) Fecha de inicio de muestreo	(c) Hora de inicio de muestreo
AG21001032	MUESTRA TRATADA DE RIO CHACAPALCA (PMS2)	Agua de Proceso - Agua Purificada	CIUDAD UNIVERSITARIA UNAP / PUNO / PUNO / PUNO	ESTE:391321.30 NORTE:8250389.31	19/12/2021	14:19

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Condiciones de recepción de la muestra
Cooler refrigerado
Observación
-

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Omar A. Juárez Soto  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\* ) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"\*a<Valor numérico">=Límite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)



Validar el informe  
vía web



## Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00534

Fecha de emisión: 28/12/2021

Página 2 de 3

Clave generada : 4088F6B0

#### RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	*3030	*3093	*807	*811	*823	*837	830	848		
		pH	T	NO3-	CE	T	Turbidez	Cl-	Mn	Dureza Total CaCO3	SO4=
		Unidad de pH	°C	mg/L	mS/cm	°C	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
AG21001032	MUESTRA TRATADA DE RIO CHACAPALCA (PMS2)	6,99	20	6,72	0,329	19,9	<0,50	55,7	0,07	21,4	26,47

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Omar A. Juárez Soto  
Gerente de Operaciones  
M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"\*<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú. (054)443294 - (054)444582.



\*Los valores de la conductividad eléctrica (C.E.), se convirtieron a uS/cm en el capítulo IV para comparar con los ECA del agua de la categoría 3, cuyas unidades están en uS/cm.



Laboratorios Analíticos del Sur

**Laboratorios Analíticos del Sur**

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N°LE - 050

**INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00534**

Fecha de emisión: 28/12/2021

Página 3 de 3

Clave generada : 4088F6B0

**MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS**

Código	Título	Rango de método analítico
*3030	Determinación de pH en aguas SMEWW. 23rd Ed. 4500-H pH Part. B. Electrometric Method.	[ - 14] Unidad de pH
*3093	Método de ensayo para nitrato en agua SMEWW. 22 nd Ed. Item 4500-N03. Part. C Second-Derivative Ultraviolet Spectrophotometric Method	[0.5 - 1000] mg/L
*807	ASTM D 1125 - 95 Método de ensayo estándar para la conductividad eléctrica y resistividad del agua	[ - 50] mS/cm
*811	Método de ensayo para la determinación de Turbidez en agua	[* 1.2 - 10000] NTU
*823	Ion cloruro en agua. SMEWW. 22rd Ed. Item 4500-Cl-. Part. C. Mercuric Nitrate Method	[* 0.82 - 1000] mg/L
*837	ASTM D 858 - 02 Método de ensayo estándar para manganeso en agua por absorción atómica	[* 0.052 - 250] mg/L
830	Dureza Total (CaCO3) en agua. SMEWW - APHA - AWWA - WEF Part 2340 B, 23rd Ed. Hardness. Hardness by Calculation (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO)	[* 0.2 - 24973] mg/L
848	Ensayo de Sulfatos en agua. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-SO4(*) Part. E, 23rd Ed. Sulfate. Turbidimetric Method (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO).	[10 - 4000] mg/L

\* : Límite de detección

b : Límite de cuantificación

----- Fin del informe -----

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
**Omar A. Juárez Soto**  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\* ) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"\*<Valor numérico">=Límite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.

Validar el informe  
vía web



## Anexo 7. Informe de las muestras tratadas del PMS1 y PMS2 con los valores óptimos del diseño experimental



**Laboratorios Analíticos del Sur**

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-22-00007

Fecha de emisión: 18/01/2022

Página 1 de 3

Clave generada : C58F2CBF

Señores : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSENIA  
Dirección : AV. TIQUILLACA 349 PUNO - PUNO  
Atención : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSENIA  
Proyecto : EVALUACION DE LA ELECTROCOAGULACION EN LA REMOCION DE MANGANESO DE LAS AGUAS DEL RIO CHACAPALCA, OCUVIRI - PUNO.

#### PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : VELASQUEZ ZUÑIGA YESSENIA  
Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 010-22  
Plan de muestreo : Muestreado por el cliente  
Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente  
Fecha de recepción : 11/01/2022  
Fecha de ensayo : 11/01/2022  
Nro de muestras : 2

Cod. Interno L.A.S.	(c) Nombre de muestra	(c) Matriz de la muestra	(c) Zona, Urb, AAHH/Dist/Prov/Depart.	(c) Punto de muestreo y/o coordenadas	(c) Fecha de inicio de muestreo	(c) Hora de inicio de muestreo
AG22000019	MUESTRA TRATADA DE RIO CHACAPALCA (PMS1) - VALOR OPTIMO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	Agua de Proceso - Agua Purificada	CIUDAD UNIVERSITARIA UNAP / PUNO / PUNO / PUNO	ESTE.391321.30 NORTE:8250389.31	10/01/2022	17:44
AG22000020	MUESTRA TRATADA DE RIO CHACAPALCA (PMS2) - VALOR OPTIMO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	Agua de Proceso - Agua Purificada	CIUDAD UNIVERSITARIA UNAP / PUNO / PUNO / PUNO	ESTE.391321.30 NORTE:8250389.31	10/01/2022	18:04

Condiciones de recepción de la muestra  
Cooler refrigerado

Observación  
-

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Omar A. Juárez Soto  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\* ) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"<Valor numérico">=Límite de detección del método, "<Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)





Laboratorios Analíticos del Sur

## Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N° LE - 050

### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-22-00007

Fecha de emisión: 18/01/2022

Página 2 de 3

Clave generada : C58F2CBf

#### RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	807		802	808	
		CE	T	Mn	pH	T
		mS/cm	°C	mg/L	Unidad de pH	°C
AG22000019	MUESTRA TRATADA DE RIO CHACAPALCA (PMS1) - VALOR OPTIMO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	0,221	20,4	0,04832	6,82	20,7
AG22000020	MUESTRA TRATADA DE RIO CHACAPALCA (PMS2) - VALOR OPTIMO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	0,242	20,7	0,03692	8,15	20,9

  
Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Omar A. Juárez Soto  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdesur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



\*Los resultados obtenidos se consiguieron aplicando los valores óptimos de densidad de corriente de  $6.2 \text{ mA/cm}^2$  y tiempo de 30 minutos para el tratamiento de las muestras de agua del PMS1 y PMS2 por electrocoagulación.



## Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE  
ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N°LE - 050

### INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-22-00007

Fecha de emisión: 18/01/2022

Página 3 de 3

Clave generada : C58F2CBF

#### MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS

Código	Título	Rango de método analítico
*807	ASTM D 1125 - 95 Método de ensayo estándar para la conductividad eléctrica y resistividad del agua	[ - 50] mS/cm
802	EPA 200.7 Determinación de metales y elementos traza en agua y aguas residuales por ICP-OES, Revisión 4.4. Metales Totales (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO)	[ - 2.5] mg/L
808	pH en aguas. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ Part.B 23rd Ed. Electrometric Method. (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO)	[ - 14] Unidad de pH

a : Límite detección

b : Límite de cuantificación

Fin del informe

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
**Omar A. Juárez Soto**  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(\* ) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"<Valor numérico">=Límite de detección del método, ">Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

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. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.

Validar el informe  
vía web



## Anexo 8. Constancia de desarrollo de pruebas experimentales en el Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental



Universidad Nacional del Altiplano  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



# CONSTANCIA

**EL QUE SUSCRIBE, JEFE DEL LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO.**

### HACE CONSTAR:

Que la **Ing. YESSENIA VELASQUEZ ZUÑIGA**, egresada de la Maestría de Tecnologías de Protección Ambiental de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Altiplano, ha desarrollado las pruebas experimentales de su Trabajo de Tesis de investigación titulado: **“EVALUACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN LA REMOCIÓN DE MANGANESO DE LAS AGUAS DEL RÍO CHACAPALCA, OCUVIRI-PUNO”**, en las instalaciones del Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la Facultad de Ingeniería de Minas, a partir del 04 de octubre del 2021 al 25 de enero del 2022 tiempo en el cual realizo sus pruebas experimentales satisfactoriamente.

Por lo cual se expide la presente constancia a solicitud de la interesada para los fines que estime por conveniente.

Puno, 28 de enero del 2022.

M.Sc. Fide...  
JEFE DE LABORATORIO DE MONITOREO  
Y EVALUACION AMBIENTAL DE LA FIM UNA

## Anexo 9. Normas Legales de los Estándares de la Calidad Ambiental del Agua

10

NORMAS LEGALES

Miércoles 7 de junio de 2017 /  El Peruano

### Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias

DECRETO SUPREMO  
N° 004-2017-MINAM

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

CONSIDERANDO:

Que, el numeral 22 del artículo 2 de la Constitución Política del Perú establece que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida;

Que, de acuerdo a lo establecido en el artículo 3 de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, en adelante la Ley, el Estado, a través de sus entidades y órganos correspondientes, diseña y aplica, entre otros, las normas que sean necesarias para garantizar el efectivo ejercicio de los derechos y el cumplimiento de las obligaciones y responsabilidades contenidas en la Ley;

Que, el numeral 31.1 del artículo 31 de la Ley, define al Estándar de Calidad Ambiental (ECA) como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente; asimismo, el numeral 31.2 del artículo 31 de la Ley establece que el ECA es obligatorio en el diseño de las normas legales y las políticas públicas, así como un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental;

Que, de acuerdo con lo establecido en el numeral 33.1 del artículo 33 de la Ley, la Autoridad Ambiental Nacional dirige el proceso de elaboración y revisión de ECA y Límites Máximos Permisibles (LMP) y, en coordinación con los sectores correspondientes, elabora o encarga las propuestas de ECA y LMP, los que serán remitidos a la Presidencia del Consejo de Ministros para su aprobación mediante Decreto Supremo;

Que, en virtud a lo dispuesto por el numeral 33.4 del artículo 33 de la Ley, en el proceso de revisión de los parámetros de contaminación ambiental, con la finalidad de determinar nuevos niveles de calidad, se aplica el principio de gradualidad, permitiendo ajustes progresivos a dichos niveles para las actividades en curso;

Que, de conformidad con lo establecido en el literal d) del artículo 7 del Decreto Legislativo N° 1013, Ley de Creación, Organización, y Funciones del Ministerio del Ambiente, este ministerio tiene como función específica elaborar los ECA y LMP, los cuales deberán contar con la opinión del sector correspondiente y ser aprobados mediante Decreto Supremo;

Que, mediante Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM se aprueban los ECA para Agua y, a través del Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM, se aprueban las disposiciones para su aplicación;

Que, asimismo, mediante Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM se modifican los ECA para Agua y se establecen disposiciones complementarias para su aplicación;

Que, mediante Resolución Ministerial N° 331-2016-MINAM se crea el Grupo de Trabajo encargado de establecer medidas para optimizar la calidad ambiental, estableciendo como una de sus funciones específicas, el analizar y proponer medidas para mejorar la calidad ambiental en el país;

Que, en mérito del análisis técnico realizado se ha identificado la necesidad de modificar, precisar y unificar la normatividad vigente que regula los ECA para agua;

Que, mediante Resolución Ministerial N° 072-2017-MINAM, se dispuso la prepublicación del proyecto normativo, en cumplimiento del Reglamento sobre Transparencia, Acceso a la Información Pública Ambiental y Participación y Consulta Ciudadana en Asuntos Ambientales, aprobado por Decreto Supremo N° 002-2009-MINAM, y el artículo 14 del Reglamento que establece disposiciones relativas a la publicidad,

publicación de Proyectos Normativos y difusión de Normas Legales de Carácter General, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2009-JUS; en virtud de la cual se recibieron aportes y comentarios al mismo;

De conformidad con lo dispuesto en el numeral 8 del artículo 118 de la Constitución Política del Perú, así como el numeral 3 del artículo 11 de la Ley N° 29158, Ley Orgánica del Poder Ejecutivo;

DECRETA:

#### Artículo 1.- Objeto de la norma

La presente norma tiene por objeto compilar las disposiciones aprobadas mediante el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, el Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM y el Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, que aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, quedando sujetos a lo establecido en el presente Decreto Supremo y el Anexo que forma parte integrante del mismo. Esta compilación normativa modifica y elimina algunos valores, parámetros, categorías y subcategorías de los ECA, y mantiene otros, que fueron aprobados por los referidos decretos supremos.

#### Artículo 2.- Aprobación de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua

Apruébase los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, que como Anexo forman parte integrante del presente Decreto Supremo.

#### Artículo 3.- Categorías de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua

Para la aplicación de los ECA para Agua se debe considerar las siguientes precisiones sobre sus categorías:

##### 3.1 Categoría 1: Poblacional y recreacional

##### a) Subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable

Entiéndase como aquellas aguas que, previo tratamiento, son destinadas para el abastecimiento de agua para consumo humano:

##### - A1. Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección

Entiéndase como aquellas aguas que, por sus características de calidad, reúnen las condiciones para ser destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano con simple desinfección, de conformidad con la normativa vigente.

##### - A2. Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional

Entiéndase como aquellas aguas destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano, sometidas a un tratamiento convencional, mediante dos o más de los siguientes procesos: Coagulación, floculación, decantación, sedimentación, y/o filtración o procesos equivalentes; incluyendo su desinfección, de conformidad con la normativa vigente.

##### - A3. Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado

Entiéndase como aquellas aguas destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano, sometidas a un tratamiento convencional que incluye procesos físicos y químicos avanzados como precloración, micro filtración, ultra filtración, nanofiltración, carbón activado, ósmosis inversa o procesos equivalentes establecidos por el sector competente.

##### b) Subcategoría B: Aguas superficiales destinadas para recreación

Entiéndase como aquellas aguas destinadas al uso recreativo que se ubican en zonas marino costeras o continentales. La amplitud de las zonas marino costeras es variable y comprende la franja del mar entre el límite de la tierra hasta los 500 m de la línea paralela de baja marea. La amplitud de las zonas continentales es definida por la autoridad competente:



**- B1. Contacto primario**

Entiéndase como aquellas aguas destinadas al uso recreativo de contacto primario por la Autoridad de Salud, para el desarrollo de actividades como la natación, el esquí acuático, el buceo libre, el surf, el canotaje, la navegación en tabla a vela, la moto acuática, la pesca submarina o similares.

**- B2. Contacto secundario**

Entiéndase como aquellas aguas destinadas al uso recreativo de contacto secundario por la Autoridad de Salud, para el desarrollo de deportes acuáticos con botes, lanchas o similares.

**3.2 Categoría 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino costeras y continentales**

**a) Subcategoría C1: Extracción y cultivo de moluscos, equinodermos y tunicados en aguas marino costeras**

Entiéndase como aquellas aguas cuyo uso está destinado a la extracción o cultivo de moluscos (Ej.: ostras, almejas, choras, navajas, machas, conchas de abanico, palabritas, mejillones, caracol, lapa, entre otros), equinodermos (Ej.: erizos y estrella de mar) y tunicados.

**b) Subcategoría C2: Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas en aguas marino costeras**

Entiéndase como aquellas aguas destinadas a la extracción o cultivo de otras especies hidrobiológicas para el consumo humano directo e indirecto. Esta subcategoría comprende a los peces y las algas comestibles.

**c) Subcategoría C3: Actividades marino portuarias, industriales o de saneamiento en aguas marino costeras**

Entiéndase como aquellas aguas aledañas a las infraestructuras marino portuarias, actividades industriales o servicios de saneamiento como los emisarios submarinos.

**d) Subcategoría C4: Extracción y cultivo de especies hidrobiológicas en lagos o lagunas**

Entiéndase como aquellas aguas cuyo uso está destinado a la extracción o cultivo de especies hidrobiológicas para consumo humano.

**3.3 Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales**

**a) Subcategoría D1: Riego de vegetales**

Entiéndase como aquellas aguas utilizadas para el riego de los cultivos vegetales, las cuales, dependiendo de factores como el tipo de riego empleado en los cultivos, la clase de consumo utilizado (crudo o cocido) y los posibles procesos industriales o de transformación a los que puedan ser sometidos los productos agrícolas:

**- Agua para riego no restringido**

Entiéndase como aquellas aguas cuya calidad permite su utilización en el riego de: cultivos alimenticios que se consumen crudos (Ej.: hortalizas, plantas frutales de tallo bajo o similares); cultivos de árboles o arbustos frutales con sistema de riego por aspersión, donde el fruto o partes comestibles entran en contacto directo con el agua de riego, aun cuando estos sean de tallo alto; parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales; o cualquier otro tipo de cultivo.

**- Agua para riego restringido**

Entiéndase como aquellas aguas cuya calidad permite su utilización en el riego de: cultivos alimenticios que se consumen cocidos (Ej.: habas); cultivos de tallo alto en los que el agua de riego no entra en contacto con el fruto (Ej.: árboles frutales); cultivos a ser procesados, envasados y/o industrializados (Ej.: trigo, arroz, avena y quinua); cultivos industriales no comestibles (Ej.: algodón), y; cultivos forestales, forrajes, pastos o similares (Ej.: maíz forrajero y alfalfa).

**b) Subcategoría D2: Bebida de animales**

Entiéndase como aquellas aguas utilizadas para bebida de animales mayores como ganado vacuno,

equino o camélido, y para animales menores como ganado porcino, ovino, caprino, cuyes, aves y conejos.

**3.4 Categoría 4: Conservación del ambiente acuático**

Entiéndase como aquellos cuerpos naturales de agua superficiales que forman parte de ecosistemas frágiles, áreas naturales protegidas y/o zonas de amortiguamiento, cuyas características requieren ser protegidas.

**a) Subcategoría E1: Lagunas y lagos**

Entiéndase como aquellos cuerpos naturales de agua lénticos, que no presentan corriente continua, incluyendo humedales.

**b) Subcategoría E2: Ríos**

Entiéndase como aquellos cuerpos naturales de agua lóticos, que se mueven continuamente en una misma dirección:

**- Ríos de la costa y sierra**

Entiéndase como aquellos ríos y sus afluentes, comprendidos en la vertiente hidrográfica del Pacífico y del Titicaca, y en la parte alta de la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, por encima de los 600 msnm.

**- Ríos de la selva**

Entiéndase como aquellos ríos y sus afluentes, comprendidos en la parte baja de la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, por debajo de los 600 msnm, incluyendo las zonas meándricas.

**c) Subcategoría E3: Ecosistemas costeros y marinos**

**- Estuarios**

Entiéndase como aquellas zonas donde el agua de mar ingresa en valles o cauces de ríos hasta el límite superior del nivel de marea. Esta clasificación incluye marismas y manglares.

**- Marinos**

Entiéndase como aquellas zonas del mar comprendidas desde la línea paralela de baja marea hasta el límite marítimo nacional.

Precisese que no se encuentran comprendidas dentro de las categorías señaladas, las aguas marinas con fines de potabilización, las aguas subterráneas, las aguas de origen minero - medicinal, aguas geotermiales, aguas atmosféricas y las aguas residuales tratadas para reuso.

**Artículo 4.- Asignación de categorías a los cuerpos naturales de agua**

4.1 La Autoridad Nacional del Agua es la entidad encargada de asignar a cada cuerpo natural de agua las categorías establecidas en el presente Decreto Supremo atendiendo a sus condiciones naturales o niveles de fondo, de acuerdo al marco normativo vigente.

4.2 En caso se identifique dos o más posibles categorías para una zona determinada de un cuerpo natural de agua, la Autoridad Nacional del Agua define la categoría aplicable, priorizando el uso poblacional.

**Artículo 5.- Los Estándares de Calidad Ambiental para Agua como referente obligatorio**

5.1 Los parámetros de los ECA para Agua que se aplican como referente obligatorio en el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental, se determinan considerando las siguientes variables, según corresponda:

a) Los parámetros asociados a los contaminantes que caracterizan al efluente del proyecto o la actividad productiva, extractiva o de servicios.

b) Las condiciones naturales que caracterizan el estado de la calidad ambiental de las aguas superficiales que no han sido alteradas por causas antrópicas.

c) Los niveles de fondo de los cuerpos naturales de agua; que proporcionan información acerca de las concentraciones de sustancias o agentes físicos,

químicos o biológicos presentes en el agua y que puedan ser de origen natural o antrópico.

d) El efecto de otras descargas en la zona, tomando en consideración los impactos ambientales acumulativos y sinérgicos que se presenten aguas arriba y aguas abajo de la descarga del efluente, y que influyan en el estado actual de la calidad ambiental de los cuerpos naturales de agua donde se realiza la actividad.

e) Otras características particulares de la actividad o el entorno que pueden influir en la calidad ambiental de los cuerpos naturales de agua.

5.2 La aplicación de los ECA para Agua como referente obligatorio está referida a los parámetros que se identificarán considerando las variables del numeral anterior, según corresponda, sin incluir necesariamente todos los parámetros establecidos para la categoría o subcategoría correspondiente.

#### **Artículo 6.- Consideraciones de excepción para la aplicación de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua**

En aquellos cuerpos naturales de agua que por sus condiciones naturales o, por la influencia de fenómenos naturales, presenten parámetros en concentraciones superiores a la categoría de ECA para Agua asignada, se exceptúa la aplicación de los mismos para efectos del monitoreo de la calidad ambiental, en tanto se mantenga uno o más de los siguientes supuestos:

a) Características geológicas de los suelos y subsuelos que influyen en la calidad ambiental de determinados cuerpos naturales de aguas superficiales. Para estos casos, se demostrará esta condición natural con estudios técnicos científicos que sustenten la influencia natural de una zona en particular sobre la calidad ambiental de los cuerpos naturales de agua, aprobados por la Autoridad Nacional del Agua.

b) Ocurrencia de fenómenos naturales extremos, que determina condiciones por exceso (inundaciones) o por carencia (sequías) de sustancias o elementos que componen el cuerpo natural de agua, las cuales deben ser reportadas con el respectivo sustento técnico.

c) Desbalance de nutrientes debido a causas naturales, que a su vez genera eutrofización o el crecimiento excesivo de organismos acuáticos, en algunos casos potencialmente tóxicos (mareas rojas). Para tal efecto, se debe demostrar el origen natural del desbalance de nutrientes, mediante estudios técnicos científicos aprobados por la autoridad competente.

d) Otras condiciones debidamente comprobadas mediante estudios o informes técnicos científicos actualizados y aprobados por la autoridad competente.

#### **Artículo 7.- Verificación de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua fuera de la zona de mezcla**

7.1 En cuerpos naturales de agua donde se vierten aguas tratadas, la Autoridad Nacional del Agua verifica el cumplimiento de los ECA para Agua fuera de la zona de mezcla, entendida esta zona como aquella que contiene el volumen de agua en el cuerpo receptor donde se logra la dilución del vertimiento por procesos hidrodinámicos y dispersión, sin considerar otros factores como el decaimiento bacteriano, sedimentación, asimilación en materia orgánica y precipitación química.

7.2 Durante la evaluación de los instrumentos de gestión ambiental, las autoridades competentes consideran y/o verifican el cumplimiento de los ECA para Agua fuera de la zona de mezcla, en aquellos parámetros asociados prioritariamente a los contaminantes que caracterizan al efluente del proyecto o actividad.

7.3 La metodología y aspectos técnicos para la determinación de las zonas de mezcla serán establecidos por la Autoridad Nacional del Agua, en coordinación con el Ministerio del Ambiente y la autoridad competente.

#### **Artículo 8.- Sistematización de la información**

8.1 Las autoridades competentes de los tres niveles de gobierno, que realicen acciones de vigilancia, monitoreo, control, supervisión y/o fiscalización ambiental remitirán

al Ministerio del Ambiente la información generada en el desarrollo de estas actividades con relación a la calidad ambiental de los cuerpos naturales de agua, a fin de que sirva como insumo para la elaboración del Informe Nacional del Estado del Ambiente y para el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA).

8.2 La autoridad competente debe remitir al Ministerio del Ambiente la relación de aquellos cuerpos naturales de agua exceptuados de la aplicación del ECA para Agua, referidos en los literales a) y c) del artículo 6 del presente Decreto Supremo, adjuntando el sustento técnico correspondiente.

8.3 El Ministerio del Ambiente establece los procedimientos, plazos y los formatos para la remisión de la información.

#### **Artículo 9.- Refrendo**

El presente Decreto Supremo es refrendado por la Ministra del Ambiente, el Ministro de Agricultura y Riego, el Ministro de Energía y Minas, la Ministra de Salud, el Ministro de la Producción y el Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

#### **DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS FINALES**

##### **Primera.- Aplicación de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua en los instrumentos de gestión ambiental aprobados**

La aplicación de los ECA para Agua en los instrumentos de gestión ambiental aprobados, que sean de carácter preventivo, se realiza en la actualización o modificación de los mismos, en el marco de la normativa vigente del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (SEIA). En el caso de instrumentos correctivos, la aplicación de los ECA para Agua se realiza conforme a la normativa ambiental sectorial.

##### **Segunda.- Del Monitoreo de la Calidad Ambiental del Agua**

Las acciones de vigilancia y monitoreo de la calidad del agua debe realizarse de acuerdo al Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales aprobado por la Autoridad Nacional del Agua.

##### **Tercera.- Métodos de ensayo o técnicas analíticas**

El Ministerio del Ambiente, en un plazo no mayor a seis (6) meses contado desde la vigencia de la presente norma, establece los métodos de ensayo o técnicas analíticas aplicables a la medición de los ECA para Agua aprobados por la presente norma, en coordinación con el Instituto Nacional de Calidad (INACAL) y las autoridades competentes.

#### **DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS TRANSITORIAS**

##### **Primera.- Instrumento de gestión ambiental y/o plan integral en trámite ante la Autoridad Competente**

Los titulares que antes de la fecha de entrada en vigencia de la norma, hayan iniciado un procedimiento administrativo para la aprobación del instrumento de gestión ambiental y/o plan integral ante la autoridad competente, tomarán en consideración los ECA para Agua vigentes a la fecha de inicio del procedimiento.

Luego de aprobado el instrumento de gestión ambiental por la autoridad competente, los titulares deberán considerar lo establecido en la Primera Disposición Complementaria Final, a efectos de aplicar los ECA para Agua aprobados mediante el presente Decreto Supremo.

##### **Segunda.- De la autorización de vertimiento de aguas residuales tratadas**

Para la autorización de vertimiento de aguas residuales tratadas, la Autoridad Nacional del Agua, tomará en cuenta los ECA para Agua considerados en la aprobación del instrumento de gestión ambiental correspondiente.

##### **Tercera.- De la aplicación de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua en cuerpos naturales de agua no categorizados**

En tanto la Autoridad Nacional del Agua no haya asignado una categoría a un determinado cuerpo natural de agua, se debe aplicar la categoría del

recurso hídrico al que este tributa, previo análisis de dicha Autoridad.

**DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA  
DEROGATORIA**

**Única.- Derogación de normas referidas a  
Estándares de Calidad Ambiental para Agua**

Derógase el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, el Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM y el Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM.

Dado en la Casa de Gobierno, en Lima, a los seis días del mes de junio del año dos mil diecisiete.

PEDRO PABLO KUCZYNSKI GODARD  
Presidente de la República

JOSÉ MANUEL HERNÁNDEZ CALDERÓN  
Ministro de Agricultura y Riego

ELSA GALARZA CONTRERAS  
Ministra del Ambiente

GONZALO TAMAYO FLORES  
Ministro de Energía y Minas

PEDRO OLAECHEA ÁLVAREZ-CALDERÓN  
Ministro de la Producción

PATRICIA J. GARCÍA FUNEGRA  
Ministra de Salud

EDMER TRUJILLO MORI  
Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento

**ANEXO**

**Categoría 1: Poblacional y Recreacional**

**Subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable**

Parámetros	Unidad de medida	A1	A2	A3
		Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado
<b>FÍSICOS- QUÍMICOS</b>				
Aceites y Grasas	mg/L	0,5	1,7	1,7
Cianuro Total	mg/L	0,07	**	**
Cianuro Libre	mg/L	**	0,2	0,2
Cloruros	mg/L	250	250	250
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	15	100 (a)	**
Conductividad	( $\mu$ S/cm)	1 500	1 600	**
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	3	5	10
Dureza	mg/L	500	**	**
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	10	20	30
Fenoles	mg/L	0,003	**	**
Fluoruros	mg/L	1,5	**	**
Fósforo Total	mg/L	0,1	0,15	0,15
Materiales Flotantes de Origen Antropogénico		Ausencia de material flotante de origen antrópico	Ausencia de material flotante de origen antrópico	Ausencia de material flotante de origen antrópico
Nitratos (NO <sub>3</sub> ) (c)	mg/L	50	50	50
Nitritos (NO <sub>2</sub> ) (d)	mg/L	3	3	**
Amoniaco- N	mg/L	1,5	1,5	**
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 6	≥ 5	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5	5,5 – 9,0	5,5 - 9,0
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	1 000	1 000	1 500
Sulfatos	mg/L	250	500	**
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	**
Turbiedad	UNT	5	100	**
<b>INORGÁNICOS</b>				
Aluminio	mg/L	0,9	5	5
Antimonio	mg/L	0,02	0,02	**
Arsénico	mg/L	0,01	0,01	0,15
Bario	mg/L	0,7	1	**
Berilio	mg/L	0,012	0,04	0,1
Boro	mg/L	2,4	2,4	2,4
Cadmio	mg/L	0,003	0,005	0,01
Cobre	mg/L	2	2	2
Cromo Total	mg/L	0,05	0,05	0,05
Hierro	mg/L	0,3	1	5
Manganeso	mg/L	0,4	0,4	0,5
Mercurio	mg/L	0,001	0,002	0,002
Molibdeno	mg/L	0,07	**	**

14

NORMAS LEGALES

Miércoles 7 de junio de 2017 / El Peruano

Parámetros	Unidad de medida	A1	A2	A3
		Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado
Níquel	mg/L	0,07	**	**
Plomo	mg/L	0,01	0,05	0,05
Selenio	mg/L	0,04	0,04	0,05
Uranio	mg/L	0,02	0,02	0,02
Zinc	mg/L	3	5	5
<b>ORGÁNICOS</b>				
Hidrocarburos Totales de Petróleo (C <sub>8</sub> - C <sub>40</sub> )	mg/L	0,01	0,2	1,0
Trihalometanos	( e )	1,0	1,0	1,0
Bromoformo	mg/L	0,1	**	**
Cloroformo	mg/L	0,3	**	**
Dibromoclorometano	mg/L	0,1	**	**
Bromodichlorometano	mg/L	0,06	**	**
<b>I. COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES</b>				
1,1,1-Tricloroetano	mg/L	0,2	0,2	**
1,1-Dicloroetano	mg/L	0,03	**	**
1,2 Dicloroetano	mg/L	0,03	0,03	**
1,2 Diclorobenceno	mg/L	1	**	**
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,0006	0,0006	**
Tetracloroetano	mg/L	0,04	**	**
Tetracloruro de carbono	mg/L	0,004	0,004	**
Tricloroetano	mg/L	0,07	0,07	**
<b>BTEX</b>				
Benceno	mg/L	0,01	0,01	**
Etilbenceno	mg/L	0,3	0,3	**
Tolueno	mg/L	0,7	0,7	**
Xilenos	mg/L	0,5	0,5	**
<b>Hidrocarburos Aromáticos</b>				
Benzo(a)pireno	mg/L	0,0007	0,0007	**
Pentaclorofenol (PCP)	mg/L	0,009	0,009	**
<b>Organofosforados</b>				
Malatión	mg/L	0,19	0,0001	**
<b>Organoclorados</b>				
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	0,00003	**
Clordano	mg/L	0,0002	0,0002	**
Dicloro Difencil Tricloroetano (DDT)	mg/L	0,001	0,001	**
Endrin	mg/L	0,0006	0,0006	**
Heptacloro + Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00003	0,00003	**
Lindano	mg/L	0,002	0,002	**
<b>Carbamato</b>				
Aldicarb	mg/L	0,01	0,01	**
<b>II. CIANOTOXINAS</b>				
Microcistina-LR	mg/L	0,001	0,001	**
<b>III. BIFENILOS POLICLORADOS</b>				
Bifenilos Policlorados (PCB)	mg/L	0,0005	0,0005	**
<b>MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICOS</b>				
Coliformes Totales	NMP/100 ml	50	**	**
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	20	2 000	20 000
Formas Parasitarias	N° Organismo/L	0	**	**
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	0	**	**
<i>Vibrio cholerae</i>	Presencia/100 ml	Ausencia	Ausencia	Ausencia
Organismos de vida libre (algas, protozoarios, copépodos, rotíferos, nemátodos, en todos sus estadios evolutivos) (f)	N° Organismo/L	0	<5x10 <sup>6</sup>	<5x10 <sup>6</sup>

(a) 100 (para aguas claras). Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural).

(b) Después de la filtración simple.

(c) En caso las técnicas analíticas determinen la concentración en unidades de Nitratos-N (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N), multiplicar el resultado por el factor 4.43 para expresarlo en las unidades de Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

(d) En el caso las técnicas analíticas determinen la concentración en unidades de Nitritos-N ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ), multiplicar el resultado por el factor 3.28 para expresarlo en unidades de Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ).

(e) Para el cálculo de los Trihalometanos, se obtiene a partir de la suma de los cocientes de la concentración de cada uno de los parámetros (Bromoformo, Cloroformo, Dibromoclorometano y Bromodichlorometano), con respecto a sus estándares de calidad ambiental; que no deberán exceder el valor de 1 de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\frac{C_{\text{Cloroformo}}}{E_{\text{CA Cloroformo}}} + \frac{C_{\text{Dibromoclorometano}}}{E_{\text{CA Dibromoclorometano}}} + \frac{C_{\text{Bromodichlorometano}}}{E_{\text{CA Bromodichlorometano}}} + \frac{C_{\text{Bromoformo}}}{E_{\text{CA Bromoformo}}} \leq 1$$

Dónde:

C= concentración en mg/L y

ECA= Estándar de Calidad Ambiental en mg/L (Se mantiene las concentraciones del Bromoformo, cloroformo, Dibromoclorometano y Bromodichlorometano).

(f) Aquellos organismos microscópicos que se presentan en forma unicelular, en colonias, en filamentos o pluricelulares.

Δ 3: significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

**Nota 1:**

- El símbolo \*\* dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.
- Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

**Subcategoría B: Aguas superficiales destinadas para recreación**

Parámetros	Unidad de medida	B1	B2
		Contacto primario	Contacto secundario
<b>FÍSICOS- QUÍMICOS</b>			
Aceites y Grasas	mg/L	Ausencia de película visible	**
Cianuro Libre	mg/L	0,022	0,022
Cianuro Wad	mg/L	0,08	**
Color	Color verdadero Escala Pt/Co	Sin cambio normal	Sin cambio normal
Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $\text{DBO}_5$ )	mg/L	5	10
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	30	50
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,5	Ausencia de espuma persistente
Materiales Flotantes de Origen Antropogénico		Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante
Nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )	mg/L	10	**
Nitritos ( $\text{NO}_2\text{-N}$ )	mg/L	1	**
Olor	Factor de dilución a 25° C	Aceptable	**
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 5	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,0 a 9,0	**
Sulfuros	mg/L	0,05	**
Turbiedad	UNT	100	**
<b>INORGÁNICOS</b>			
Aluminio	mg/L	0,2	**
Antimonio	mg/L	0,006	**
Arsénico	mg/L	0,01	**
Bario	mg/L	0,7	**

Parámetros	Unidad de medida	B1	B2
		Contacto primario	Contacto secundario
Berilio	mg/L	0,04	**
Boro	mg/L	0,5	**
Cadmio	mg/L	0,01	**
Cobre	mg/L	2	**
Cromo Total	mg/L	0,05	**
Cromo VI	mg/L	0,05	**
Hierro	mg/L	0,3	**
Manganeso	mg/L	0,1	**
Mercurio	mg/L	0,001	**
Niquel	mg/L	0,02	**
Plata	mg/L	0,01	0,05
Plomo	mg/L	0,01	**
Selenio	mg/L	0,01	**
Uranio	mg/L	0,02	0,02
Vanadio	mg/L	0,1	0,1
Zinc	mg/L	3	**
<b>MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICO</b>			
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	200	1 000
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	Ausencia	Ausencia
Formas Parasitarias	N° Organismo/L	0	**
<i>Giardia duodenalis</i>	N° Organismo/L	Ausencia	Ausencia
Enterococos intestinales	NMP/100 ml	200	**
<i>Salmonella spp</i>	Presencia/100 ml	0	0
<i>Vibrio cholerae</i>	Presencia/100 ml	Ausencia	Ausencia

**Nota 2:**

- UNT: Unidad Nefelométrica de Turbiedad.
- NMP/100 ml: Número más probable en 100 ml.
- El símbolo \*\* dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.
- Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

Categoría 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino costeras y continentales

Parámetros	Unidad de medida	C1	C2	C3	C4
		Extracción y cultivo de moluscos, equinodermos y tunicados en aguas marino costeras	Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas en aguas marino costeras	Actividades marino portuarias, industriales o de saneamiento en aguas marino costeras	Extracción y cultivo de especies hidrobiológicas en lagos o lagunas
<b>FÍSICOS- QUÍMICOS</b>					
Aceites y Grasas	mg/L	1,0	1,0	2,0	1,0
Cianuro Wad	mg/L	0,004	0,004	**	0,0052
Color (después de filtración simple) (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	100 (a)	100 (a)	**	100 (a)
Materiales Flotantes de Origen Antropogénico		Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	**	10	10	10
Fósforo Total	mg/L	0,062	0,062	**	0,025
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (c)	mg/L	16	16	**	13
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4	≥ 3	≥ 2,5	≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	7 – 8,5	6,8 – 8,5	6,8 – 8,5	6,0-9,0
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	80	60	70	**
Sulfuros	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	Δ 3	Δ 3
<b>INORGÁNICOS</b>					
Amoniaco Total (NH <sub>3</sub> )	mg/L	**	**	**	(1)
Antimonio	mg/L	0,64	0,64	0,64	**
Arsénico	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,1
Boro	mg/L	5	5	**	0,75
Cadmio	mg/L	0,01	0,01	**	0,01
Cobre	mg/L	0,0031	0,05	0,05	0,2
Cromo VI	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,10
Mercurio	mg/L	0,00094	0,0001	0,0018	0,00077
Níquel	mg/L	0,0082	0,1	0,074	0,052
Plomo	mg/L	0,0081	0,0081	0,03	0,0025
Selenio	mg/L	0,071	0,071	**	0,005
Talio	mg/L	**	**	**	0,0008
Zinc	mg/L	0,081	0,081	0,12	1,0
<b>ORGÁNICO</b>					
Hidrocarburos Totales de Petróleo (fracción aromática)	mg/L	0,007	0,007	0,01	**
<b>Bifenilos Policlorados</b>					
Bifenilos Policlorados (PCB)	mg/L	0,00003	0,00003	0,00003	0,000014
<b>ORGANOLÉPTICO</b>					
Hidrocarburos de Petróleo	mg/L	No visible	No visible	No visible	**
<b>MICROBIOLÓGICO</b>					
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	≤ 14 (área aprobada) (d)	≤ 30	1 000	200
	NMP/100 ml	≤ 88 (área restringida) (d)			

(a) 100 (para aguas claras). Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural).

(b) Después de la filtración simple.

(c) En caso las técnicas analíticas determinen la concentración en unidades de Nitratos-N (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N), multiplicar el resultado por el factor 4.43 para expresarlo en las unidades de Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

(d) **Área Aprobada:** Áreas de donde se extraen o cultivan moluscos bivalvos seguros para el comercio directo y consumo, libres de contaminación fecal humana o animal, de organismos patógenos o cualquier sustancia deletérea o venenosa y potencialmente peligrosa.

**Área Restringida:** Áreas acuáticas impactadas por un grado de contaminación donde se extraen moluscos bivalvos seguros para consumo humano, luego de ser depurados.

Δ 3: significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

**Nota 3:**

- El símbolo \*\* dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.
- Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

(1) Aplicar la Tabla N° 1 sobre el estándar de calidad de concentración de Amoniaco Total en función del pH y temperatura para la protección de la vida acuática en agua dulce (mg/L de NH<sub>3</sub>).

**Tabla N° 1: Estándar de calidad de Amoniaco Total en función de pH y temperatura para la protección de la vida acuática en agua dulce (mg/L de NH<sub>3</sub>)**

Temperatura (°C)	pH							
	6	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	10,0
0	231	73,0	23,1	7,32	2,33	0,749	0,250	0,042
5	153	48,3	15,3	4,84	1,54	0,502	0,172	0,034
10	102	32,4	10,3	3,26	1,04	0,343	0,121	0,029
15	69,7	22,0	6,98	2,22	0,715	0,239	0,089	0,026
20	48,0	15,2	4,82	1,54	0,499	0,171	0,067	0,024
25	33,5	10,6	3,37	1,08	0,354	0,125	0,053	0,022
30	23,7	7,50	2,39	0,767	0,256	0,094	0,043	0,021

**Nota:**

(\*)El estándar de calidad de Amoniaco total en función de pH y temperatura para la protección de la vida acuática en agua dulce, presentan una tabla de valores para rangos de pH de 6 a 10 y Temperatura de 0 a 30°C. Para comparar la temperatura y pH de las muestras de agua superficial, se deben tomar la temperatura y pH próximo superior al valor obtenido en campo, ya que la condición más extrema se da a mayor temperatura y pH. En tal sentido, no es necesario establecer rangos.

(\*\*)En caso las técnicas analíticas determinen la concentración en unidades de Amoniaco-N (NH<sub>3</sub>-N), multiplicar el resultado por el factor 1,22 para expresarlo en las unidades de Amoniaco (NH<sub>3</sub>).

**Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales**

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
<b>FÍSICOS- QUÍMICOS</b>				
Aceites y Grasas	mg/L	5		10
Bicarbonatos	mg/L	518		**
Cianuro Wad	mg/L	0,1		0,1
Cloruros	mg/L	500		**
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	100 (a)		100 (a)
Conductividad	(µS/cm)	2 500		5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>2</sub> )	mg/L	15		15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40		40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,2		0,5
Fenoles	mg/L	0,002		0,01
Fluoruros	mg/L	1		**
Nitratos (NO <sub>3</sub> -N) + Nitritos (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L	100		100
Nitritos (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L	10		10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4		≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5		6,5 – 8,4
Sulfatos	mg/L	1 000		1 000
Temperatura	°C	Δ 3		Δ 3
<b>INORGÁNICOS</b>				
Aluminio	mg/L	5		5

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
Arsénico	mg/L	0,1		0,2
Bario	mg/L	0,7		**
Berilio	mg/L	0,1		0,1
Boro	mg/L	1		5
Cadmio	mg/L	0,01		0,05
Cobre	mg/L	0,2		0,5
Cobalto	mg/L	0,05		1
Cromo Total	mg/L	0,1		1
Hierro	mg/L	5		**
Litio	mg/L	2,5		2,5
Magnesio	mg/L	**		250
Manganeso	mg/L	0,2		0,2
Mercurio	mg/L	0,001		0,01
Niquel	mg/L	0,2		1
Plomo	mg/L	0,05		0,05
Selenio	mg/L	0,02		0,05
Zinc	mg/L	2		24

**ORGÁNICO**

**Bifenilos Policlorados**

Bifenilos Policlorados (PCB)	µg/L	0,04	0,045
------------------------------	------	------	-------

**PLAGUICIDAS**

Paratión	µg/L	35	35
----------	------	----	----

**Organoclorados**

Aldrin	µg/L	0,004	0,7
Clordano	µg/L	0,006	7
Dicloro Difencil Tricloroetano (DDT)	µg/L	0,001	30
Dieldrin	µg/L	0,5	0,5
Endosulfán	µg/L	0,01	0,01
Endrin	µg/L	0,004	0,2
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L	0,01	0,03
Lindano	µg/L	4	4

**Carbamato**

Aldicarb	µg/L	1	11
----------	------	---	----

**MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICO**

Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1 000	2 000	1 000
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	1 000	**	**
Huevos de Helminthos	Huevo/L	1	1	**

(a): Para aguas claras. Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural).

(b): Después de filtración simple.

(c): Para el riego de parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales, sólo aplican los parámetros microbiológicos y parasitológicos del tipo de riego no restringido.

Δ 3: significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

**Nota 4:**

- El símbolo \*\* dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.

- Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

### Anexo 10. Evidencias fotográficas



Figura 42. Muestras de agua en el PMS1 (izquierdo) y en el PMS2 (derecho)



Figura 43. Electrodo de aluminio distribuidos en paralelo



Figura 44. Ajuste de amperaje antes del tratamiento



Figura 45. Muestras durante el tratamiento

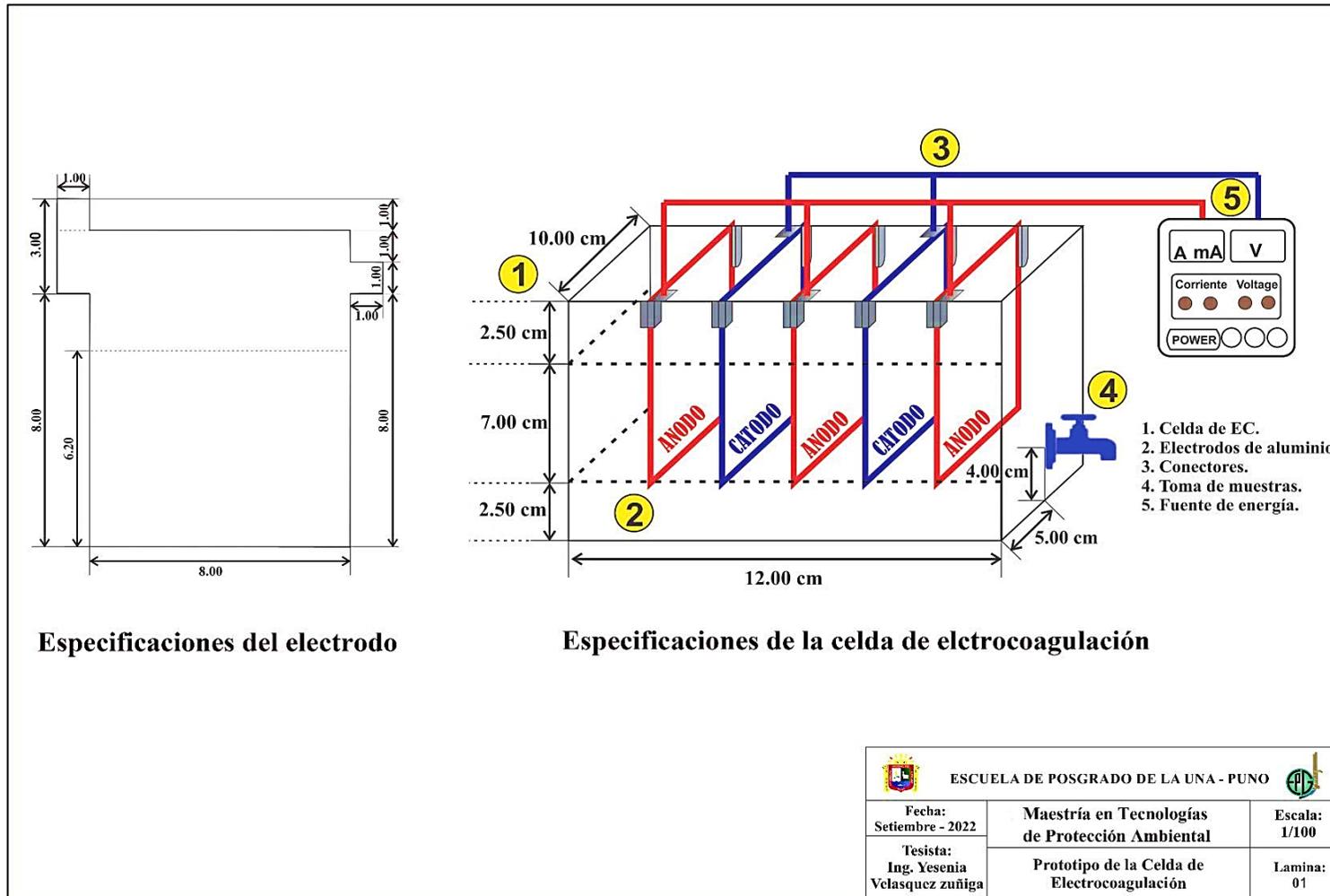


Figura 46. Muestras después del tratamiento (izquierdo) y filtración (derecho)

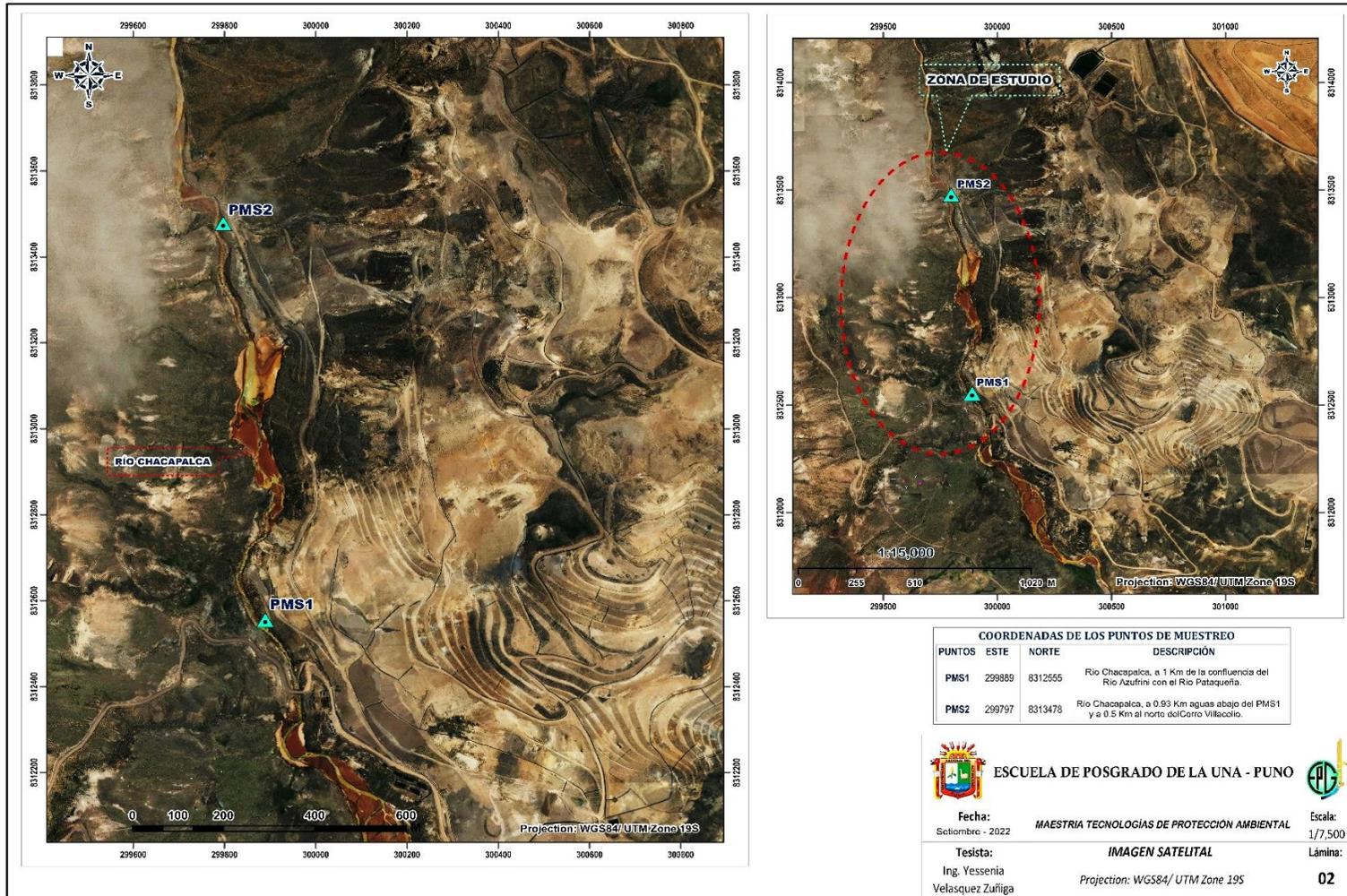


Figura 47. Fotómetro en el análisis de Mn (izquierdo) y multiparámetro para análisis de pH y C.E (derecho)

Anexo 11. Prototipo de la celda de electrocoagulación



Anexo 12. Plano de ubicación de las muestras colectadas en el PMS1 y en el PMS2 del Río Chacapalca





## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo **YESSENIA VELASQUEZ ZÚÑIGA**,  
identificado con DNI 42342131 en mi condición de egresado de:

( ) Escuela Profesional, ( ) Programa de Segunda Especialidad, (X) Programa de Maestría o  
**Doctorado**

**MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL,**

informo que he elaborado el/la (X) Tesis o ( ) Trabajo de Investigación denominada:

**“EVALUACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN LA REMOCIÓN DE MANGANESO  
DE LAS AGUAS DEL RÍO CHACAPALCA, OCUVIRI – PUNO”**

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso.

Puno, 07 de setiembre del 2023

YESSENIA VELASQUEZ ZÚÑIGA  
DNI. 42342131



Huella



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo **YESSENIA VELASQUEZ ZÚÑIGA**,  
identificado con DNI 42342131 en mi condición de egresado de:

( ) Escuela Profesional, ( ) Programa de Segunda Especialidad, (X) Programa de Maestría o  
Doctorado

**MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL,**

informo que he elaborado el/la (X) Tesis o ( ) Trabajo de Investigación denominada:

**“EVALUACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN LA REMOCIÓN DE MANGANESO  
DE LAS AGUAS DEL RÍO CHACAPALCA, OCUVIRI – PUNO”**

para la obtención de (X) Grado, ( ) Título Profesional o ( ) Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia: Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno, 07 de setiembre del 2023



YESSENIA VELASQUEZ ZÚÑIGA  
DNI. 42342131



Huella