

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERÍA QUIMICA, INGENIERIA PETROQUIMICA,
INGENIERIA AMBIENTAL E INGENIERIA DE ALIMENTOS



PROYECTO DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN REACTOR ELECTROQUIMICO A NIVEL
LABORATORIO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL LAVADO DE
QUINUA POR ELECTROCOAGULACION

PARA OPTAR AL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

PRESENTADO POR:

UNIV. CLARA JHAKELYN COMPARA CALLE

TUTOR:

ING. RENÉ ALVAREZ APAZA, PhD

LA PAZ – BOLIVIA

2020



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

A Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mis queridos padres Carlos Compara Quispe y Justina Calle de Compara, por haberme brindado todo su amor, apoyo en los momentos de necesidad y por su confianza, durante todo el periodo universitario, porque todo ello fue muy importante para poder culminar mis estudios y el presente proyecto.

A mis amigos y compañeros de la facultad de ingeniería (UMSA), por el cariño y sobre todo por brindarme sus consejos, ayuda y ánimos para alcanzar esta meta tan importante en mi carrera profesional.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a Dios por haberme guiado y acompañado en todo momento.

Agradecer a mi padre y madre por la confianza, el apoyo moral y económico que siempre me han brindado.

A mi tutor, Ing. Rene Álvarez PhD. por haber confiado en mí desde el inicio, por su tiempo, guía, paciencia y por haber estado siempre con la disposición para aclarar mis dudas.

Al Ingeniero Jaime Rocha y al Ingeniero Mario Blanco por haberme brindado su tiempo y colaboración cuando lo requerí, en temas los cuales contribuyeron a mi proyecto.

Agradezco también al Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ) por haberme dado la oportunidad de trabajar en sus instalaciones.

Finalmente agradecer a todas las personas que directa o indirectamente han aportado con la culminación de este proyecto, entre las que puedo mencionar grandes amistades de Jhannet Mamani Fernández y Gregorio Sarco Plata.

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo principal la evaluación a nivel laboratorio del método de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales del lavado de quinua de la empresa IRUPANA AOF. S.A. y lograr un alto porcentaje de remoción de carga orgánica. Se realizó un diseño factorial 2^2 de los factores: distancia entre electrodos (DE) y tiempo de electrocoagulación (TE) y un diseño 3^2 de los factores: voltaje (V) y tipo de electrodo (TE*), con los cuales se llevaron a cabo 22 ensayos preliminares en un reactor a escala laboratorio, con conexión monopolar en paralelo de electrodos de hierro y/o aluminio que operaba de modo discontinuo (Batch), con un volumen de muestra de 2,9 litros y un área de electrodos sumergida de 100 cm². El cálculo de la remoción de carga orgánica se realizó en función de los sólidos volátiles, las condiciones consideradas óptimas de los ensayos preliminares resultaron ser DE=1.45 cm TE=45 min, V=6 V y TE*=1.

El dimensionamiento del reactor se realizó para un volumen de muestra de 1,1 l con 8 electrodos, con las condiciones consideradas óptimas de los ensayos preliminares, luego se realizó la optimización de los tratamientos mediante un análisis estadístico del modelo de superficie de respuesta del diseño factorial 3^2 , el modelo cubió tuvo un ajuste adecuado con $R^2=0.9937$, además, la optimización logró un aumento en el porcentaje de remoción carga orgánica de los tratamientos 3,4,5 y 6, debido a que la muestra tratada pasa por dos procesos de filtración (filtro de arena y de carbón activado), el valor óptimo resultó ser el tratamiento N°3 con una remoción de carga orgánica de 81,15%, para el cual las condiciones óptimas son DE=1 cm TE=35 min, V=6 V y TE*=1. Del análisis económico del tratamiento se obtuvo que el costo de operación es de 3,75 Bs por litro de muestra tratada, lo que resultaría de 3749,99 Bs/m³ en 35 min de tiempo de residencia.

ABSTRACT

The main objective of this study is the evaluation at the laboratory level of the electrocoagulation method for the treatment of wastewater from the quinoa wash of the company IRUPANA AOF. S.A. and achieve a high percentage of organic load removal.

A 2^2 factorial design of the electrode distance (DE) and electrocoagulation time (TE) factors and a 3^2 design of the voltage (V) and electrode type (TE *) factors, were carried out with which 22 Preliminary tests in a laboratory-scale reactor, with a monopolar parallel connection of iron and/or aluminium electrodes that operated discontinuously (Batch), with a sample volume of 2.9 liters and a submerged electrode area of 100 cm². The operation of the electrocoagulator will be verified with the removal of organic load, which was carried out based on the volatile solids, the conditions considered optimal in the preliminary tests were DE = 1.45 cm TE = 45 min, V = 6 V and TE * = 1.

The sizing of the reactor was carried out for a sample volume of 1.1 l with 8 electrodes, with the conditions considered optimal in the preliminary tests, then the optimization of the treatments was carried out through a statistical analysis of the design response surface model. factorial 3^2 , the cubic model had an adequate adjustment with $R^2 = 0.9937$, in addition, the optimization achieved an increase in the percentage of organic load removal of treatments 3,4,5 and 6, because, the treated sample goes through two processes filtration (sand and activated carbon filter), the optimal value was treatment N ° 3 with an organic load removal of 81.15%, for which the optimal conditions are SD = 1 cm TE = 35 min, V = 6 V and TE * = 1.

From the economic analysis of the treatment, it was obtained that the operating cost is 3.75 Bs per liter of treated sample, which would result in 3749.99 Bs / m³ in 35 min of residence time.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1

INTRODUCCION.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4. JUSTIFICACION.....	3
1.4.1. TÉCNICA.....	3
1.4.2. ECONÓMICA.....	4
1.4.3. SOCIAL.....	4
1.4.4. AMBIENTAL.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. QUINUA.....	7
2.2. PRODUCCIÓN DE QUINUA EN BOLIVIA.....	7
2.3. SAPONINA.....	9
2.4. ELECTROCOAGULACIÓN.....	10
2.5. REACCIONES DE OXIDO-REDUCCIÓN QUE OCURREN ENTRE LOS ELECTRODOS.....	12

2.6.	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ELECTROCOAGULACIÓN	14
2.6.1.	ESPACIAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ELECTRODOS	14
2.6.2.	DENSIDAD DE CORRIENTE CONTINUA	14
2.6.3.	CONDUCTIVIDAD	14
2.6.4.	VOLTAJE	14
2.6.5.	PH DEL AGUA RESIDUAL	14
2.7.	CARACTERISTICAS QUE AFECTAN UN PROCESO ELECTROLÍTICO	15
2.7.1.	CORROSIÓN	15
2.7.2.	PASIVACIÓN	15
2.8.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACION	16
2.9.	LEYES DE FARADAY	17
2.9.1.	PRIMERA LEY	17
2.10.	PARÁMETROS ELÉCTRICOS	17
2.10.1.	DETERMINACIÓN DE FUERZA ELECTROMOTRIZ FEM ESTÁNDAR	17
2.10.2.	DETERMINACIÓN DE DIFERENCIA DE POTENCIAL	18
2.10.3.	DETERMINACIÓN DEL SOBREPOTENCIAL	18
2.10.4.	FEM DE TRABAJO	21

2.11.	TERMODINÁMICA ELECTROQUIMICA	22
2.11.1.	DIAGRAMAS EH – PH.....	22
2.12.	ALGUNOS ANTECEDENTES	32
2.12.1.	TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS POR ELECTROCOAGULACIÓN.....	32
2.12.2.	TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LAVADO DE QUINUA POR MÉTODO CONVENCIONAL.....	33
3.	METODOLOGIA.....	36
3.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS ELECTRODOS	37
3.1.1.	ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X	37
3.1.2.	VOLTAMPEROMETRÍA.....	39
3.2.	CARACTERIZACION DEL EFLUENTE	40
3.2.1.	TOMA DE MUESTRAS	40
3.2.2.	CARACTERIZACIÓN.....	41
3.2.3.	MÉTODOS DE ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DE LA MUESTRA.....	42
3.3.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	43
3.3.1.	VARIABLES INDEPENDIENTES Y VARIABLES DEPENDIENTES	43
3.3.2.	DISEÑO 2 ²	43
3.3.3.	DISEÑO 3 ²	44
3.4.	ENSAYOS PRELIMINARES.....	45

3.4.1.	CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA ELECTROQUÍMICA.....	45
3.4.2.	VOLUMEN DE ESTUDIO	45
3.4.3.	NÚMERO DE ELECTRODOS.....	46
3.4.4.	MATERIAL ANÓDICO Y MATERIAL CATÓDICO	46
3.4.5.	TIPO DE CONEXIÓN	47
3.4.6.	MATERIALES Y EQUIPOS PARA LOS ENSAYOS	
PRELIMINARES	47
3.4.7.	PROCEDIMIENTO.....	48
3.4.8.	FLUJOGRAMA DE OPERACIÓN	49
4.	RESULTADOS Y DISCUSION.....	50
4.1.	RESULTADOS DE CARACTERIZACION DE ELECTRODOS.....	51
4.1.1.	FLUORESCENCIA DE RAYOS X	51
4.1.2.	VOLTAMPEROMETRÍA.....	54
4.2.	RESULTADOS DE CARACTERIZACION DEL EFLUENTE	56
4.3.	ENSAYOS PRELIMINARES.....	58
4.3.1.	DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS – TIEMPO DE	
ELECTROCOAGULACIÓN.....		59
4.3.2.	VOLTAJE Y TIPO DE ELECTRODO	61
4.4.	COMPORTAMIENTO DE TEMPERATURA Y PH	64
4.4.1.	TEMPERATURA.....	64

4.4.2.	POTENCIAL DE HIDROGENO (PH)	65
4.4.3.	DETERMINACIÓN DE FUERZA ELECTROMOTRIZ DE LA CELDA	66
4.4.4.	DETERMINACIÓN DEL FEM DE TRABAJO	67
5.	DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR ELECTROQUÍMICO OPTIMO	69
5.1.	CONDICIONES DE OPERACIÓN OPTIMAS	70
5.2.	DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR	70
5.3.	OPTIMIZACIÓN DE RESULTADOS	71
5.3.1.	DISEÑO CENTRAL COMPUESTO – SUPERFICIES DE RESPUESTA	72
5.3.2.	OPTIMIZACIÓN GRÁFICA	73
5.3.3.	BALANCE DE MASA DEL TRATAMIENTO OPTIMO.....	75
5.3.4.	COMPORTAMIENTO DE TEMPERATURA, PH Y TURBIDEZ.....	77
5.4.	PARÁMETROS ÓPTIMOS PARA EL PROCESO	81
5.5.	ANÁLISIS DE PARÁMETROS DEL TRATAMIENTO OPTIMO.....	82
5.6.	COMPARACION DE RESULTADOS CON OTROS TRATAMIENTOS.	83
6.	ANÁLISIS ECONOMICO DEL TRATAMIENTO	87
6.1.	COSTO DE OPERACIÓN DEL TRATAMIENTO	88
7.	CONCLUSIONES RECOMENDACIONES Y BIBLIOGRAFIA	91

7.1.	CONCLUSIONES.....	92
7.2.	RECOMENDACIONES	93
7.3.	BIBLIOGRAFIA	94
8.	ANEXOS	96
8.1.	ANEXO A. DETERMINACIÓN DE POTENCIAL DE HIDROGENO	97
8.2.	ANEXO B. DETERMINACIÓN DE TURBIDEZ	98
8.3.	ANEXO C. DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD	99
8.4.	ANEXO D. DETERMINACION DE SÓLIDOS TOTALES	100
8.5.	ANEXO E. DETERMINACION DE SOLIDOS VOLATILES	101
8.6.	ANEXO F. DETERMINACIÓN DE CLORUROS	102
8.7.	ANEXO G. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	103
8.8.	ANEXO H. CUANTIFICACION DE SAPONINAS	105
8.9.	ANEXO I. RESULTADOS DE CONCENTRACION DE SAPONINA METODO INDIRECTO DNS	108
8.10.	ANEXO J. DETERMINACION DEL ORDEN DE REACCIÓN EN BASE A LA CINÉTICA DE LA REMOCIÓN DE SOLIDOS DISUELTOS TOTALES	112
8.11.	ANEXO K. RESULTADOS DE INSTITUTO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL	118
8.12.	ANEXO L. REGLAMENTO AMBIENTAL DEL SECTOR INDUSTRIAL MANUFACTURERO (RASIM).....	120

8.13. ANEXO M. VALORES MAXIMOS ADMISIBLES DE PARAMETROS EN CUERPOS DE AGUA (ANEXO 13-A, RASIM)	123
8.14. ANEXO N. LIMITES PERMISIBLES PARA DESCARGAS LIQUIDAS EN MG/L (ANEXO 13-C, RASIM)iii

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Representación esquemática del corte longitudinal del grano de quinua (E: endospermo, Pe: pericarpio, R: radícula, F: funículo, C: cotiledones, T: testa).....	7
<i>Figura 2.</i> Producción nacional de quinua en Bolivia	8
<i>Figura 3.</i> Estructura general de una saponina. Se indica el enlace glucosídico entre la aglicona y un glucósido.	9
<i>Figura 4.</i> Electrodisolución de un metal en un proceso de electrocoagulación.	11
<i>Figura 5.</i> Procesos involucrados en un reactor de electrocoagulación.	12
<i>Figura 6.</i> Ventajas y desventajas de la electrocoagulación.....	16
<i>Figura 7.</i> Diagrama de equilibrio potencial-pH para el sistema aluminio-agua, a 25 [°C].	23
<i>Figura 8.</i> Condiciones teóricas de corrosión, pasivación e inmunidad de aluminio a 25 [°C].	26
<i>Figura 9.</i> Diagrama de equilibrio Potencial-pH para el sistema hierro-agua, a 25 [°C].	27
<i>Figura 10.</i> Condiciones teóricas de corrosión, pasivación e inmunidad de hierro.	31
<i>Figura 11.</i> Diagrama de la metodología a realizar	37
<i>Figura 12.</i> Esquema de fluorescencia de rayos x.....	38
<i>Figura 13.</i> Representación de las etapas del proceso de determinación de carga orgánica.	42
<i>Figura 14.</i> a) Reactor con electrodos monoplares conectados en paralelo, b) Reactor con electrodos monoplares conectados en serie.	47
<i>Figura 15.</i> Flujograma del proceso	49

<i>Figura 16.</i> Porcentaje de remoción de carga orgánica de la muestra inicial después de un proceso de decantación y filtración	57
<i>Figura 17.</i> Dimensiones de reactor optimizado	71
<i>Figura 18.</i> Procedimiento de medición de turbidez.....	98
<i>Figura 19.</i> Procedimiento de lectura de turbidez.....	99
<i>Figura 20.</i> pH metro.....	100

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Entalpias de reacción de sustancias de aluminio a 25 [°C].	23
Tabla 2. Entalpias de reacción de sustancias de hierro.....	28
Tabla 3. Antecedentes principales de tratamiento de aguas contaminadas por electrocoagulación	32
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos del agua después del tratamiento	34
Tabla 5. Porcentaje de remoción del proceso	34
Tabla 6. Resultados de remoción de saponina.....	35
Tabla 7. Variables independientes de las primeras pruebas preliminares	44
Tabla 8. Variables independientes de las pruebas preliminares	44
Tabla 9. Dimensiones del reactor para pruebas preliminares.....	45
Tabla 10. Características fisicoquímicas del efluente	57
Tabla 11. Resultados de comparación de carga orgánica de la muestra de la empresa IRUPANA AOF.S.A. del 2003 y 2020 (Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental)	58
Tabla 12. Dimensiones de los electrodos	59
Tabla 13. Variables para el diseño experimental 1.....	60

Tabla 14. Resultados de los ensayos preliminares del diseño experimental 1	60
Tabla 15. Análisis de Varianza 1	60
Tabla 16. Variables para el diseño experimental 2.....	61
Tabla 17. Resultados de los ensayos preliminares del diseño experimental 2	62
Tabla 18. Análisis de Varianza 2.....	63
Tabla 19. Variación de temperatura de ensayos preliminares del diseño experimental 2	64
Tabla 20. Variación del potencial de hidrogeno de los ensayos preliminares del diseño experimental 2	65
Tabla 21. Determinación de fuerza electromotriz de la celda	66
Tabla 22. Determinación de Fem de trabajo para el tratamiento 3.....	67
Tabla 23. Condiciones consideradas optimas.....	70
Tabla 24. Resultados de las pruebas consideradas óptimas	74
Tabla 25. Tratamiento de electrocoagulación en celda con bomba y 8 electrodos	74
Tabla 26. Variación de temperatura	77
Tabla 27. Variación de potencial de hidrogeno.....	78
Tabla 28. Variación de turbidez para los tratamientos optimizados.....	79
Tabla 29. Parámetros de optimización de resultados	81
Tabla 30. Variables del electrodo	82
Tabla 31. Resultados de los parámetros antes y después del tratamiento 3	82
Tabla 32. Diferencia de resultados entre el tratamiento por electrocoagulación y un tratamiento químico.....	83

Tabla 33. Diferencia de resultados entre el tratamiento por electrocoagulación y un tratamiento biológico.....	84
Tabla 34. Ventajas y desventajas entre el método de electrocoagulación y el método convencional.....	85
Tabla 35. Información para el cálculo de los costos operacionales.....	88
Tabla 36. Condiciones durante el tratamiento optimo.....	88
Tabla 37. Resultado de consumo de energía y electrodo	89
Tabla 38. Cálculo del costo de operación.....	90
Tabla 39. Características fisicoquímicas del efluente	92
Tabla 40. Porcentaje de remoción de carga orgánica para tratamientos optimizados...	93
Tabla 41. Volúmenes de reactivos utilizado para cada dilución de muestra madre....	104
Tabla 42. Reactivos DNS	106
Tabla 43. Reactivos adicionales	107
Tabla 44. Curva de calibración con saponina Merck para cuantificar los azúcares “MÉTODO DNS “	109
Tabla 45. Remplazando absorbancia en la ecuación de la recta.....	110
Tabla 46. Determinación de concentración de saponina para dos diluciones de la muestra madre.....	110
Tabla 47. Resultados de absorbancia para la muestra final sin dilución	110
Tabla 48. Determinación de porcentaje de reducción de saponina	111
Tabla 49. Remoción de TDS en la determinación de cinética de reacción	112
Tabla 50. Cálculo de la orden de reacción.....	113
Tabla 51. Constante de velocidad obtenidas para orden de reacción 1	116

INDICE DE GRAFICAS

Grafica 1. Diagrama de Pourbaix del sistema aluminio-agua a 17°C.	25
Grafica 2. Diagrama de Pourbaix del sistema Hierro-Agua a 17°C.....	30
Grafica 3. Espectro de espectroscopia de fluorescencia de rayos x para muestra de hierro.....	51
Grafica 4. Espectro de espectroscopia de fluorescencia de rayos x para muestra de aluminio.....	52
Grafica 5. Barrido triangular de potencial para ánodo de aluminio.	54
Grafica 6. Voltamperograma para el ánodo de aluminio.....	54
Grafica 7. Barrido triangular de potencial para ánodo de hierro.	55
Grafica 8. Voltamperograma para el ánodo de hierro	56
Grafica 9. Aumento de temperatura para cada tratamiento	64
Grafica 10. Aumento de pH para cada tratamiento	66
Grafica 11. Representación de la curva de calibración saponina MERCK.....	109
Grafica 12. Gráfica de remoción de TDS con respecto al tiempo.....	113
Grafica 13. Grafica para orden de reacción 0.....	114
Grafica 14. Grafica para orden de reacción 1	114
Grafica 15. Grafica para reacción de orden 2.....	115
Grafica 16. Grafica para reacción de orden 3.....	115

INDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1. Lamina de hierro oxidada	15
Fotografía 2. Lamina de aluminio pasivado	16
Fotografía 3. equipo de espectrometría de fluorescencia de rayos X.....	38

Fotografía 4. Potenciostato GAMRY	40
Fotografía 5. a) Tanque de almacenamiento de aguas residuales de lavado de quinua (salida de agua de los lavadores), b) Agua residual con espuma suspendida., c) Toma de muestra en bidón de plástico de 10 litros.	41
Fotografía 6. Celda de electrocoagulación para pruebas preliminares.	46
Fotografía 7. Armado del sistema de tratamiento para pruebas preliminares.	48
Fotografía 8. Análisis de elementos ligeros de la muestra de hierro	52
Fotografía 9. Análisis de elementos ligeros }	53
Fotografía 10. Análisis de elementos ligeros de la muestra de aluminio	53
Fotografía 11. Armado del reactor optimo	71
Fotografía 12. Cambio de turbidez de una muestra inicial después de ser tratada, pasada por los procesos de filtrado con filtro de arena y con carbón activado.	80
Fotografía 13. Reactor optimo.....	82
Fotografía 14. Determinación de la cantidad de azúcares reductores – Método Indirecto DNS.	108

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Porcentaje de remoción de carga orgánica para los 9 tratamientos.....	62
Ilustración 2. Representación de la gráfica de contornos del modelo cubico.....	72
Ilustración 3. Representación 3D de la superficie de respuesta del modelo cubico.	73
Ilustración 4. Representación de la optimización grafica del modelo.....	74
Ilustración 5. Porcentaje de remoción de carga orgánica para la optimización de resultados de los 4 tratamientos.....	75
Ilustración 6. Balance de masa en la celda de electrocoagulación	76

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1. ANTECEDENTES

La exportación de quinua se ha convertido en una de las exportaciones no tradicionales más importantes en el área andina en nuestro país. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, Food and Agriculture Organization) declaró el año 2013 como el Año Internacional de la Quinua, como consecuencia la producción del grano de quinua en Bolivia ha evidenciado una tendencia progresiva de mayor demanda en el mercado orgánico nacional e internacional. Ahora bien, antes del consumo o exportación, el grano de quinua debe cumplir con las normas de calidad y regulaciones impuestos por la Cámara de Exportación y regulados por el Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA) para lo que debe pasar por un proceso de limpieza denominado “beneficiado” o “desaponificado” realizado por plantas industriales que han mecanizado el proceso tradicional. Este proceso, básicamente consiste en retirar la saponina, sustancia responsable del sabor amargo del grano a través de un proceso de descascarillado abrasivo mecánico y lavado a presión, usando grandes volúmenes de agua que no es reciclada, lo que incrementa el permanente uso del recurso hídrico escaso en el altiplano boliviano.

Es en este sentido que se desea reducir este impacto usando tecnologías amigables con el medio ambiente, entre estos se encuentran métodos electroquímicos como la electrocoagulación, este es viable desde el punto de vista que en dicho proceso son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de hierro o aluminio, para luego ser removidas, mientras que otros métodos usan reactivos químicos, lo que los hace más costosos, inestables y en ocasiones más lentas.

El presente trabajo está dirigido a la mitigación de la contaminación provocada por los efluentes provenientes del proceso de lavado de quinua de la empresa de alimentos Irupana, los cuales contiene una elevada carga orgánica y saponinas, a través del tratamiento de estos efluentes se busca la reutilización de los mismos en el proceso de lavado, con el fin de disminuir el consumo de agua y mejorar las características fisicoquímicas del efluente, obteniendo uno menos nocivo para el medioambiente.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Entre los diversos tipos de agresiones al Medio Ambiente, una de las que más ha centrado la atención del mundo investigador en los últimos años es el vertido de efluentes líquidos procedentes de actividades urbanas e industriales al medio que los rodea. Esto ha sido así porque el agua es un recurso bien escaso, Ahora bien, en el proceso de lavado de quinua de la empresa IRUPANA AOF S. A. se requiere de grandes cantidades de agua, los datos técnicos de consumo de agua utilizada por hora son de 21.2 [m³] de agua por día para el lavado de 15 [ton] de quinua que ingresa al lavador, los efluentes generados en este proceso son desechados directamente a los alcantarillados sin tener en cuenta que la saponina que permanece en el agua es altamente tóxica.

Con el objeto de regular las actividades de las industrias que puedan contaminar el medio hídrico existe la normativa regulada por el RASIM, donde indica que toda industria es responsable de la prevención y control de la contaminación que puedan generar sus descargas. La propuesta para confrontar este problema es el tratamiento de este efluente por el método de electrocoagulación a nivel laboratorio, para así conocer el nivel de contaminación que representa y con ello reducir el contenido de carga orgánica del efluente. Este trabajo servirá como incentivo para llevar a cabo el proyecto a mayor escala, de manera que se convierta en

una propuesta para las empresas procesadoras de quinua a realizar el tratamiento de sus aguas residuales por un método rentable y así reducir la contaminación del medioambiente.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y construir un reactor electroquímico a nivel laboratorio para realizar el tratamiento por electrocoagulación del efluente procedente del proceso del lavado de quinua y lograr una alta remoción de carga orgánica

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar y determinar de parámetros fisicoquímicos: conductividad, solidos totales, solidos disueltos, solidos volátiles, potencial de hidrogeno (pH), turbidez y saponina del efluente a estudiar.
- Realizar pruebas preliminares del método de electrocoagulación en un reactor a nivel laboratorio del efluente de lavado de quinua de una empresa beneficiadora para establecer las condiciones de operación optimas.
- Dimensionamiento y construcción de un reactor experimental a nivel laboratorio, formato rectangular.
- Optimizar resultados de las pruebas preliminares para la verificación de una alta remoción de carga orgánica.
- Evaluar los costos de este tratamiento.

1.4. JUSTIFICACION

1.4.1. Técnica

Por referencias bibliográficas de proyectos elaborados por estudiantes de la facultad de ingeniería (UMSA), se demuestra la eficacia del método elegido de electrocoagulación pero en

otro tipo de efluentes, se realizará este tipo de tratamiento a efluentes del lavado de quinua por primera vez, de esta manera, se tendrá resultados actualizados de la contaminación que representa así como la capacidad y eficiencia del método en este tipo de efluente.

1.4.2. Económica

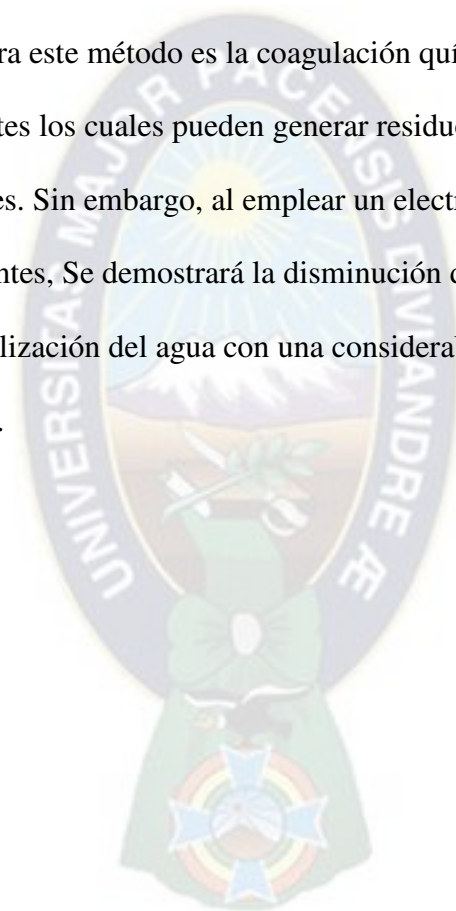
La mayoría de tratamientos convencionales para su puesta en práctica requiere medios importantes equipos y reactivos, que contribuye al incremento de su costo de producción, En este proyecto no es necesario añadir reactivos al agua residual, por lo que se llegará a demostrar que el proyecto es rentable contando con una evaluación económica del costo del tratamiento a nivel laboratorio, este estudio beneficiará a las empresas procesadoras de quinua ya que se considerará una base útil para llevar a cabo el proyecto a mayor escala y así las empresas reduzcan alto consumo de agua al reutilizar el recurso.

1.4.3. Social

En nuestro país según el RASIM (Reglamento Ambiental del Sector Industrial Manufacturero), En el marco de la Ley 1333 de Medio Ambiente, tiene como objeto de regular las actividades de las industrias que puedan contaminar el medio hídrico, estas normas son débiles al momento de articularse pues no se cuenta con el personal capacitado ni con la instrumentación necesaria que pueda controlar la calidad de las descargas de efluentes. Muy aparte de ello, el problema de la disposición de agua preocupa mundialmente, es por eso por lo que son muchas las investigaciones encaminadas al estudio de diferentes tecnologías de tratamientos de aguas, con fines públicos o privados, en algunos casos están limitados por bajos rangos de concentración y tener altos costos de producción, por bibliografía se conoce que el método de electrocoagulación es eficiente y rentable, se deben ejecutar este tipo de proyectos, de manera que se reduzca la contaminación y el consumo excesivo de agua del sector industrial mediante la reutilización de este recurso.

1.4.4. Ambiental

Bolivia es uno de los principales países en la producción y exportación de quinua real, en consecuencia, la generación de aguas residuales del proceso el cual es un problema actual ya que deben ser tratadas previamente a su descarga, debido a su alto contenido de saponinas, pero no lo son, lo que ocasiona la contaminación del medio donde se los desecha. El método de electrocoagulación es una solución amigable con el medioambiente, porque el principal método de comparación para este método es la coagulación química que consiste en usar agentes químicos coagulantes los cuales pueden generar residuos que posteriormente se convierten en contaminantes. Sin embargo, al emplear un electrón como reactivo evita la adición de agentes coagulantes, Se demostrará la disminución de contaminación que genera el efluente y una posible reutilización del agua con una considerable remoción de contenido de carga orgánica del efluente.



The logo of Universitas Major Pacensis Divindres is a circular emblem. It features a sun with rays at the top, a landscape with a river and trees in the middle, and a shield with a cross at the bottom. The text "UNIVERSITAS MAJOR PACENSIS DIVINDRES" is written around the perimeter of the circle.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. QUINUA

La quinua es un cereal con un alto valor proteico, su tamaño varía entre 1,5 a 4 [mm] de diámetro. La planta que la produce recibe el mismo nombre (12), la cual se cultiva una vez al año. Existen varias especies, Bolivia y Perú tienen la más extensa variedad de ellas, cuentan con alrededor de 3000 muestras de ecotipos, entre ellas la Quinua Real. (Villarte, 2015)

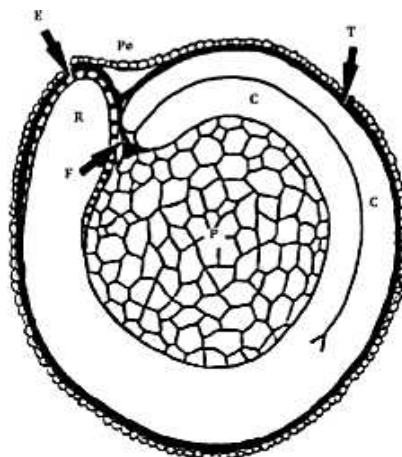


Figura 1. Representación esquemática del corte longitudinal del grano de quinua (E: endospermo, Pe: pericarpio, R: radícula, F: funículo, C: cotiledones, T: testa)

fuelle: <http://www.condesan.org/publicacion7Libro03/cap1.htm>

De las cuatro capas que recubren el grano y componen en conjunto la episperma, la primera capa externa es una membrana rugosa, formada por células sin núcleos, quebradiza, seca y fácilmente desprendible de las otras. Estas rugosidades, que se asemejan a las celdas de un panal albergan una sustancia blanca, opaca y amarga que se asume es la saponina. (Villarte, 2015)

2.2. PRODUCCIÓN DE QUINUA EN BOLIVIA

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) señala que el 47,7% de la producción de quinua en el mundo proviene de Bolivia. (Ibarra, 2013).

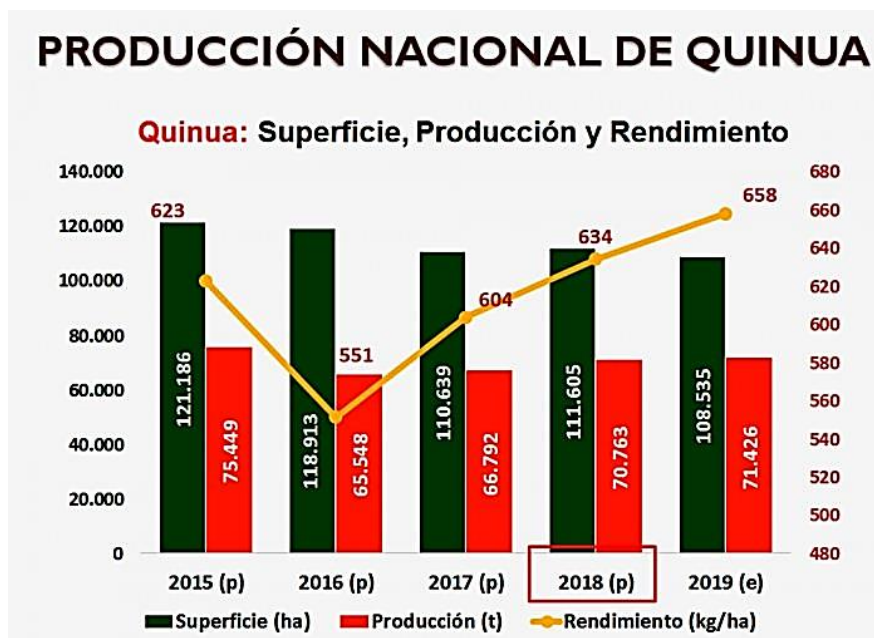


Figura 2. Producción nacional de quinua en Bolivia

fuelle: MDRyT (OAP), INE

La producción de quinua alcanzó 70.000 toneladas (Tn) en la gestión 2018, de acuerdo con el informe presentado por el director del Centro Internacional de Quinua (CIT), Edgar Soliz, lo que representa un incremento de apenas 5 por ciento sobre los volúmenes generados la gestión anterior. (El Diario, 2019)

La producción en 2015 registró 75.449 toneladas, la más alta de los últimos cuatro años, en ese año también la superficie fue mayor, 121.186 [ha], con un rendimiento de 623 [Kg/ha] Para la presente gestión, las autoridades buscan incrementar la producción a 71.426 toneladas, mientras que la superficie bajará a 108.535 [ha], y esperan alcanzar un rendimiento de 658 [Kg/ha] La Paz, Oruro y Potosí concentran la mayor superficie cultivada, así como la producción. (El Diario, 2019)

2.3. SAPONINA

Estos son metabolitos que se han detectado en las flores, los tallos, los frutos y los granos, con mayor prevalencia en la cáscara de la quinua. La literatura reporta la identificación de más de 30 saponinas triterpénicas cuyas diferencias estructurales están asociadas a diferentes propiedades biológicas, tales como actividad hemolítica, citotóxica, antioxidante, surfactante, antiadipogénica, hipocolesterolémica, adyuvante y antiinflamatoria. (Villarte, 2015)

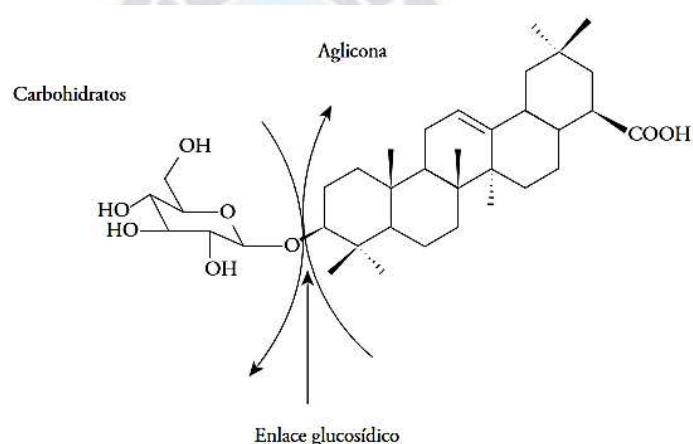


Figura 3. Estructura general de una saponina. Se indica el enlace glucosídico entre la aglicona y un glucósido.

Fuente: Artículo de revisión / <http://dx.doi.org/10.15446/rcciquifa.v45n3.62043>

Las saponinas no resisten cambios bruscos de pH, valores muy ácidos o básicos generan la ruptura de los enlaces O-glucosídicos. Esta característica es útil y empleada en metodologías para su cuantificación. Las saponinas ofrecen también una alta actividad superficial debido a la combinación estructural de un grupo polar (azúcar) y uno no polar (esteroide o triterpeno), propiedad que permite su uso como un detergente natural, agente estabilizante y emulsificador en productos de limpieza y cosméticos. (Villarte, 2015)

2.4. ELECTROCOAGULACIÓN

El proceso electroquímico de desestabilización de una disolución coloidal o de una emulsión es muy similar a un tratamiento químico típico de coagulación (o de ruptura de emulsión), se diferencian en el modo de adición del reactivo: en coagulación convencional el reactivo se añade como sal y en electrocoagulación se genera a partir de un metal. (Navarro, 2008)

Por tanto, se puede definir a la electrocoagulación (o coagulación asistida electroquímicamente) como un proceso electroquímico en el que, a partir de compuestos procedentes de la disolución de un ánodo, se agrupa la materia coloidal existente en un agua residual (o se rompe una emulsión), posibilitando su separación del agua mediante técnicas convencionales de separación sólido-líquido (decantación, flotación). Normalmente, el material anódico empleado consiste en planchas de aluminio o de hierro. Al aplicar una diferencia de potencial a la celda, se consigue la generación de iones en disolución. Como consecuencia, y al igual que en procesos convencionales de coagulación, se obtienen: – hidróxidos insolubles sobre los que quedan retenidos los contaminantes y/o – hidroxocomplejos catiónicos o aniónicos, que desestabilizan las fuerzas de repulsión electrostáticas existentes en la materia coloidal, bien por neutralización de cargas o bien por formación de enlaces intrapartícula. (Navarro, 2008)

Un reactor electroquímico para llevar a cabo un proceso de electrocoagulación, se compone básicamente de un depósito, en el que se sumergen los dos electrodos (el ánodo o electrodo de trabajo, y el cátodo o electrodo inerte), y de una fuente de alimentación a la que se conectan los electrodos. Al establecerse una diferencia de potencial entre los electrodos de la celda, comienzan los procesos de reducción en el cátodo (conversión de los protones del agua en hidrógeno), y los de oxidación en el ánodo (generándose el ion Al^{3+} si el ánodo es de

aluminio, o el Fe^{3+} si el ánodo es de hierro). Estos iones de aluminio o hierro se hidratan rápidamente. A continuación, ocurre una serie de etapas interrelacionadas en las que se forman hidróxidos insolubles del metal, sobre los que quedan retenidos los contaminantes, como hidroxocomplejos cargados, positiva o negativamente, que permiten la coagulación por neutralización de cargas (figura 4). (Navarro, 2008)

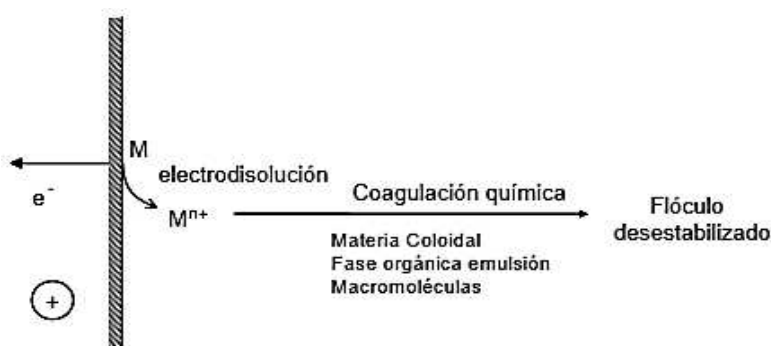


Figura 4. Electrodisolución de un metal en un proceso de electrocoagulación.

Fuente: (Navarro, 2008)

Además de la generación de coagulantes, en la celda electroquímica ocurren otros procesos con una gran importancia en el proceso de coagulación. Así, en las proximidades del ánodo, la generación de oxígeno por oxidación del agua da lugar a la formación de iones H^+ , que dada su carga son atraídos hacia el cátodo. En el cátodo, la reducción del agua para formar hidrógeno da lugar a la formación de iones hidroxilo (OH^-) que, al contrario que los anteriores, son atraídos hacia el ánodo. (Navarro, 2008)

Asimismo, los gases generados en los electrodos pueden adherirse a la superficie de los flóculos disminuyendo la densidad del conjunto, y posibilitando su separación por flotación. A este proceso se le conoce como electro flotación. La electroflotación, al igual que la electrofloculación, es un proceso secundario en cualquier proceso de electrocoagulación (Figura 2.7). Si bien no existen balances económicos exhaustivos, en bibliografía se afirma

que los costes operativos de los procesos de electrocoagulación son más bajos que los correspondientes a los tratamientos físico-químicos convencionales. (Navarro, 2008)

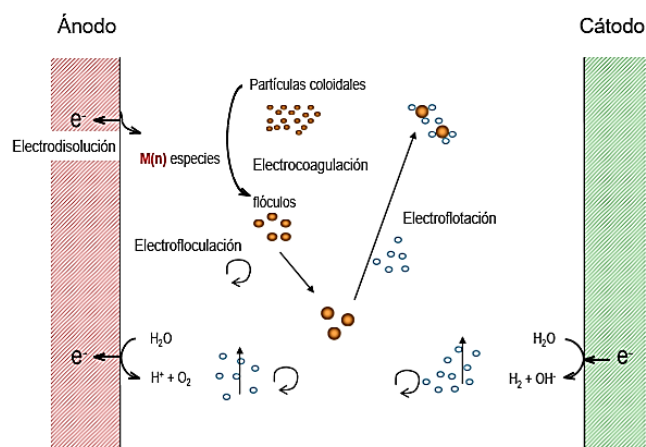


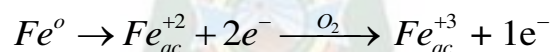
Figura 5. Procesos involucrados en un reactor de electrocoagulación.

Fuente: (Navarro, 2008)

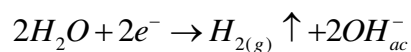
2.5. REACCIONES DE OXIDO-REDUCCIÓN QUE OCURREN ENTRE LOS ELECTRODOS

Todo el proceso que ocurre al interior de la celda electrolítica se presenta en forma general, a través de las siguientes reacciones de oxi-reducción no espontaneas:

Cuando el ánodo de sacrificio es la lámina de hierro (Fe), las reacciones espontaneas son las siguientes:

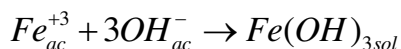
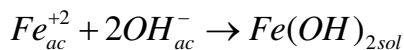


La reacción simultanea producida en el cátodo Al es:



En la ecuación anterior, se observa el desprendimiento de hidrogeno.

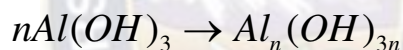
La relación entre el Fe^{2+} y el Fe^{3+} formados electroquímicamente y los OH^- formados en el cátodo produce hidróxido ferroso y férrico, según las reacciones:



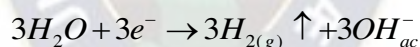
Luego de la formación de los hidróxidos de hierro, los coloides tienden a aglomerarse, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interaccionan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas. (Cazco Sanchez & Jarrin , 2010, pág. 31)

Cuando el ánodo de sacrificio es las láminas de aluminio (Al), las reacciones redox no espontaneas son:

En el ánodo:



En el cátodo:



Los iones Al^{+3} en combinación con los OH^{-} reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $Al(OH)_2^{+}$, $Al_2(OH)_2^{+}$, y otras poliméricas que por procesos de precipitación forman el $Al(OH)_{3(s)}$, como se muestra en la reacción de ánodo. El $Al(OH)_{3(s)}$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes. (Cazco Sanchez & Jarrin , 2010, pág. 33)

2.6. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ELECTROCOAGULACIÓN

2.6.1. Espaciamiento y distribución espacial de los electrodos

La remoción de los contaminantes es mayor a distancias cortas de separación entre electrodos. (Cazco Sanchez & Jarrin , 2010, pág. 33)

2.6.2. Densidad de corriente continua

La densidad de corriente un parámetro importante determina la dosis de coagulante (iones de Al^{3+} o Fe^{2+}) y la generación de burbujas. Es directamente proporcional a la velocidad de reacciones electroquímicas que se llevan en la superficie del electrodo y que influyen sobre el potencial del electrodo. Su determinación depende de la naturaleza del contaminante y de la escala en la cual se realiza el tratamiento. (González, 2014, pág. 26)

2.6.3. Conductividad

Cuando la conductividad del agua a tratar no es elevada, es frecuente la adición de un electrolito soporte para aumentar su valor, consiguiéndose así una disminución en el potencial de la celda y, por tanto, un ahorro energético considerable. Una de las sales más empleadas para este fin es el cloruro sódico. Sin embargo, la adición de un electrolito podría ocasionar un aumento en los costes de tratamiento. (Garcia, 2012)

2.6.4. Voltaje

El voltaje es directamente proporcional al costo energético y puede variar por factores como la conductividad de la solución, la distancia entre los electrodos, el material y la geometría de los mismos. (González, 2014)

2.6.5. pH del agua residual

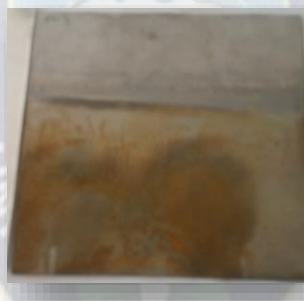
La influencia del pH tiene un efecto considerable en la eficiencia de la electrocoagulación, generalmente el pH del medio cambia durante el proceso, este cambio depende principalmente del material del electrodo y el pH inicial, se encontró que la eficiencia

del aluminio es más alta en condiciones ácidas o alcalinas que en condiciones neutras. (García, 2012)

2.7. CARACTERÍSTICAS QUE AFECTAN UN PROCESO ELECTROLÍTICO

2.7.1. Corrosión

La corrosión depende de las impurezas en un metal o aleación, estas pueden conducir a la precipitación de fases Inter metálicas que poseen diferentes potenciales de oxidación que la matriz del metal. Así se crean regiones anódicas o catódicas muy pequeñas. Con metales más puros se obtiene una resistencia más alta a la corrosión. Sin embargo, la mayor parte de metales y aleaciones empleadas en Ingeniería contienen un cierto nivel de elementos como impurezas, ya que cuesta demasiado eliminarlos. (Rosado, 2019, pág. 2)



Fotografía 1. Lamina de hierro oxidada

Fuente: Elaboración propia

2.7.2. Pasivación

Desde el punto de vista termodinámico, la corrosión es un proceso inevitable, así como existen metales que son oxidables como el hierro, hay otros que permanecen inalterables, caso del cobre o el aluminio. La razón radica en la calidad del óxido que forman, estos metales se combinan con el oxígeno sin incremento de volumen, por lo tanto, se recubren de una capa de óxido adherente, que los protege de mayor corrosión (como una piel los aísla del contacto con el oxígeno). Se dice entonces que el metal está PASIVADO. (Rosado, 2019, pág. 2).



Fotografía 2. Lamina de aluminio pasivado

Fuente: Elaboración propia

2.8. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACION

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales. • Requiere de equipos simples y de fácil operación. • Elimina uso de productos químicos. • Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos. • Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada. • Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes. • Purifica el agua y permite su reciclaje. • El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación. • Reduce la contaminación en los cuerpos de agua. • Puede generar aguas incoloras e inodoras. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario reponer los electrodos de sacrificio. • Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto. • El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

Figura 6. Ventajas y desventajas de la electrocoagulación

Fuente: (Rojas Forero & Tierradentro Polania, 2018)

2.9. LEYES DE FARADAY

2.9.1. Primera ley

La ley de Faraday establece que la masa de metal depositado es proporcional a la cantidad de corriente que circula a través de la celda y al tiempo de operación de la electrólisis.

(Cáceres Arenas, 2007)

Se expresa así

$$m_F = \frac{M * I * t}{n * F} \quad (1)$$

Donde:

mF: masa depositada (g)

M: Peso molecular del metal depositado

n: Valencia del ion metálico en la solución

F: Constante de Faraday (96487 Coulomb/equivalente) (1 coulomb = 1 A x 1 s)

I: Corriente que circula (A)

t: Tiempo de operación de la electrólisis (s)

2.10. PARÁMETROS ELÉCTRICOS

2.10.1. Determinación de fuerza electromotriz fem estándar

La fuerza electromotriz estándar de la celda electroquímica E° o ΔE° , es la versión electroquímica de la “energía libre estándar”, ΔG° , para las reacciones redox. (León Echalar, 2012)

Los diferentes valores de ΔE° de las semiceldas y los valores de ΔG° de las distintas especies no pueden ser medidos con frecuencia en condiciones estándar, porque no se mantiene un proceso de reacción redox en condiciones de equilibrio generalmente. no

obstante, existe una relación matemática entre la fem de una celda y la concentración de las especies químicas en condiciones no estándar. Esta relación matemática se denomina Ecuación de Nernst. (León Echalar, 2012)

Es la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo, pero medido a condiciones estándar de 25°C, 1 atmósfera y 1M (solución), (León Echalar, 2012)

$$E_{eq} = E_{red. \text{ Cátodo}} - E_{red. \text{ Ánodo}} \quad (2)$$

2.10.2. Determinación de diferencia de potencial

Es un puente entre la termodinámica y la electroquímica porque relaciona el gradiente de concentración a él gradiente eléctrico que lo equilibra, es decir, nos dice cuál es el potencial de la celda en condiciones no estándar. (León Echalar, 2012)



$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q \quad (3)$$

$$-nFE = -nFE^\circ + RT \ln Q \quad (4)$$

Dividiendo la ecuación entre $-nF$ obtenemos:

$$E = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{Ox}{Red} \right) \quad (5)$$

Conocida como la ecuación de NERNST. mientras que la determinación de la fem estándar y la diferencia de potencial serán de utilidad para la determinación del sobrepotencial necesario para las pruebas experimentales. (León Echalar, 2012)

2.10.3. Determinación del sobrepotencial

El sobrepotencial o sobrevoltaje es la diferencia entre el potencial teórico de la celda y el potencial medido a una intensidad de corriente determinada. (León Echalar, 2012)

$$\eta = E - E_e = \text{sobrepotencial} \quad (6)$$

Una de las metas de la cinética electroquímica es explicar la secuencia de las reacciones parciales y otra es determinar la velocidad de reacción electroquímica, la cual de acuerdo a la ley de Faraday es proporcional a la densidad de corriente. (León Echalar, 2012)

Una corriente anódica (positiva) y una corriente catódica (negativa) siempre generan un sobrepotencial positivo y negativo respectivamente. El sobrepotencial es causado usualmente por la naturaleza más fuertemente impedida de uno de los pasos consecutivos del proceso electroquímico. (León Echalar, 2012)

Algunos de estos pasos son procesos físicos (difusión, formación de una nueva fase), y otros son reacciones químicas o electroquímicas (transferencia de carga). (León Echalar, 2012)

De acuerdo al proceso más impedido se especifican los siguientes tipos de sobrepotencial:

$$\eta = \eta_k + \eta_{mt} + \eta_{ir} \quad (7)$$

Dónde:

η : sobrepotencial aplicado

η_k : sobrepotencial cinético

η_{mt} : sobrepotencial de concentración

η_{ir} : sobrepotencial causado por la resistencia de la solución o sobrepotencial óhmico

Teniendo en cuenta que el sobrepotencial cinético es igual a:

$$\eta_k = \eta_{tc} + \eta_r + \eta_d \quad (8)$$

Dónde:

η_{tc} : sobrepotencial de transferencia de carga

η_r : sobrepotencial de reacción

η_d : sobrepotencial de difusión

El sobrepotencial causado por la resistencia de la solución es igual a:

$$\eta_{ir} = I \cdot d / A \cdot K \quad (9)$$

Donde:

I: intensidad de corriente

d: distancia interelectrodica

A: área superficial del electrodo

K: constante

2.10.3.1. Sobrepotencial cinético η_k

El sobrepotencial cinético será particularmente alto por la generación de gases en ellos electrodos. Tanto el sobrepotencial cinético, el de reacción y el de difusión se incrementan al aumentar la corriente. (León Echalar, 2012)

2.10.3.2. Sobrepotencial de transferencia de carga η_{tc}

Se observa cuando el proceso más lento de los pasos consecutivos del proceso electrodo es la transferencia de carga, es decir, la reacción electródica. En este caso el sobrepotencial de transferencia se puede considerar como la diferencia de potencial eléctrico que reduce la energía de activación de la transferencia de carga a tal grado que esta transferencia ocurre a la densidad de corriente dada. (León Echalar, 2012)

2.10.3.3. Sobrepotencial de reacción η_r

Ocurre cuando los pasos consecutivos de la reacción electródica, tienen reacciones químicas lentas, cuando la reacción química retardada tiene lugar antes de la reacción electroquímica, con el paso de la corriente los reactivos de la reacción posterior están disponibles a una concentración menor a la correspondiente al estado de equilibrio. Cuando la

reacción química lenta niega el paso a la reacción electroquímica y avanzar hasta su estado de equilibrio. (León Echalar, 2012)

2.10.3.4. Sobrepotencial de difusión η_d

Ocurre cuando la difusión de los reactivos desde el seno de la reacción electródica hacia la superficie del electrodo, o bien, la difusión de los productos de la reacción electródica al seno de la solución, son procesos lentos. (León Echalar, 2012)

2.10.3.5. Sobrepotencial de resistencia de la solución η_{ir}

El sobrepotencial causado por la resistencia de la solución está relacionado con la distancia entre los electrodos, la conductividad específica de la solución ($k=mS/cm$) y la corriente. ($I=mA$). (León Echalar, 2012)

El sobrepotencial de concentración puede ser fácilmente minimizado decreciendo la distancia entre electrodos e incrementando el área de sección transversal de los electrodos y la conductividad específica de la solución. (León Echalar, 2012)

2.10.4. FEM de trabajo

La FEM de trabajo es la diferencia de potencial que se aplica a la celda es igual a la suma de la FEM reversible (Nernst teórico), la resistencia que hay que vencer para que se produzcan las reacciones (polarizaciones), y las sobretensiones (desprendimiento gaseoso en los electrodos, si existiese cloro hay que vencer esa energía necesaria de formación de gases). (Alvarez , 2019)

El fin de conocer la FEM de trabajo es el de minimizar las resistencias para que la coagulación se realice con la mínima FEM de trabajo posible lo que conlleva a generar un menor gasto de energía. En bibliografía menciona que incrementando la temperatura se reduce la resistencia. Pero se debe considerar en no gastar energía para calentar la muestra a tratar. (Alvarez , 2019)

En resumen, la fórmula para dicho cálculo de la fem de trabajo es la siguiente:

$$E_{trabajo} = E_{rev}^{\circ} + \eta_{IR} + \Sigma \eta_{gases} \quad (10)$$

$$\eta_{IR} = \frac{I * d}{A * K} \quad (11)$$

$$\Sigma \eta_{gases} = \eta_{H_2} + \eta_{O_2} + \eta_{Cl_2} \quad (12)$$

2.11. TERMODINÁMICA ELECTROQUIMICA

2.11.1. Diagramas Eh – pH

La forma más conveniente de representar la termodinámica de sistemas acuosos es en forma gráfica en los diagramas de Pourbaix o diagramas potencial - pH. Estos diagramas son ampliamente utilizados por cuanto permiten visualizar posibilidades de reacciones sin tener que recurrir al cálculo termodinámico para los fenómenos que ocurren en medio acuoso.

(Cáceres Arenas, 2007)

Una importante restricción en la aplicación práctica de los diagramas termodinámicos, es que predicen tendencias a que ocurran fenómenos, pero no la velocidad con que estos puedan ocurrir. La cinética extremadamente lenta en algunas reacciones conduce a que algunas fases sólidas existan en condiciones fuera de su rango de estabilidad termodinámica o que fases sólidas no se formen en condiciones termodinámicas favorables y lo hagan otras en su lugar (fases metaestables) (ejemplo: precipitación de hidróxido de hierro). En este caso, es a veces útil utilizar diagramas Eh - pH modificados que consideren las fases metaestables.

(Cáceres Arenas, 2007)

2.11.1.1. Sistema Al-H₂O

Se vio necesaria el estudio y análisis del efecto del parámetro del potencial de hidrógeno de la muestra a tratar con respecto al potencial del ánodo, para así conocer las

reacciones que suscitan y además conocer la estabilidad de las especies reaccionantes en el desarrollo del tratamiento con aluminio como ánodo. La gráfica de Pourbaix ya elaborada a 25°C, encontrada en bibliografía se muestra a continuación:

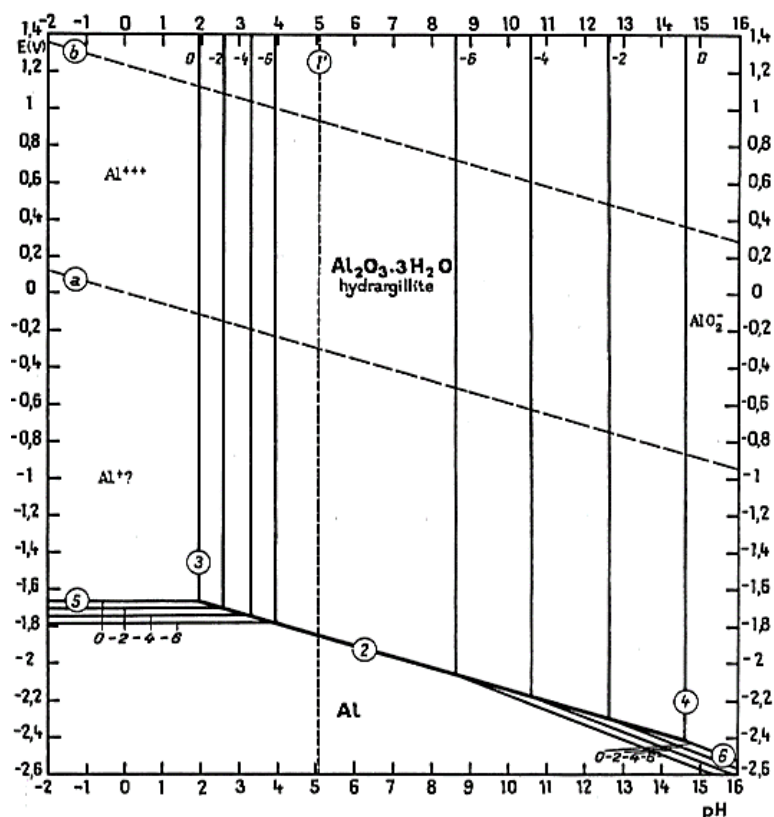


Figura 7. Diagrama de equilibrio potencial-pH para el sistema aluminio-agua, a 25 [°C].

Fuente: (Franklin, 1974)

Para tomar en cuenta el análisis mencionado, se construyó la gráfica de Pourbaix del sistema Al-H₂O a condiciones en las que se ha trabajado es decir a 17 [°C].

Los valores de las entalpías libres estándar de formación de las especies que intervienen en la solución anódica del aluminio se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Entalpías de reacción de sustancias de aluminio a 25 [°C].

ESPECIES	NUMERO DE OXIDACION	ESTADO	ΔG°
H+		Ac	0
H ₂		G	0

O2		G	0
OH		Ac	157,293
H2O	0	L	237,178
Al ³⁺	3	Ac	481,16
AlO ₂ ⁻	3	Ac	839,77
Al ₂ O ₃	3		1608,874
2Al(OH) ₃			2320,45
Al	Metal		0

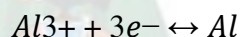
Fuente: Elaboración propia.

Las reacciones en equilibrio para construir el diagrama pH-Potencial para el sistema Aluminio-Agua a la temperatura de 17 [°C] son:

Las reacciones en equilibrio para construir el diagrama pH-Potencial para el sistema Aluminio-Agua a la temperatura de 17 [°C] son:

1. $Al \leftrightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$
2. $Al + 3H_2O \leftrightarrow Al(OH)_3 + 3H^{+} + 3e^{-}$
3. $Al + 2H_2O \leftrightarrow AlO_2^{-} + 4H^{+} + 3e^{-}$
4. $2Al^{3+} + 3H_2O \leftrightarrow Al_2O_3 + 6H^{+}$
5. $Al_2O_3 + H_2O \leftrightarrow 2AlO_2^{-} + 2H^{+}$

Para la primera reacción se tiene que poner la reacción de forma reductiva:

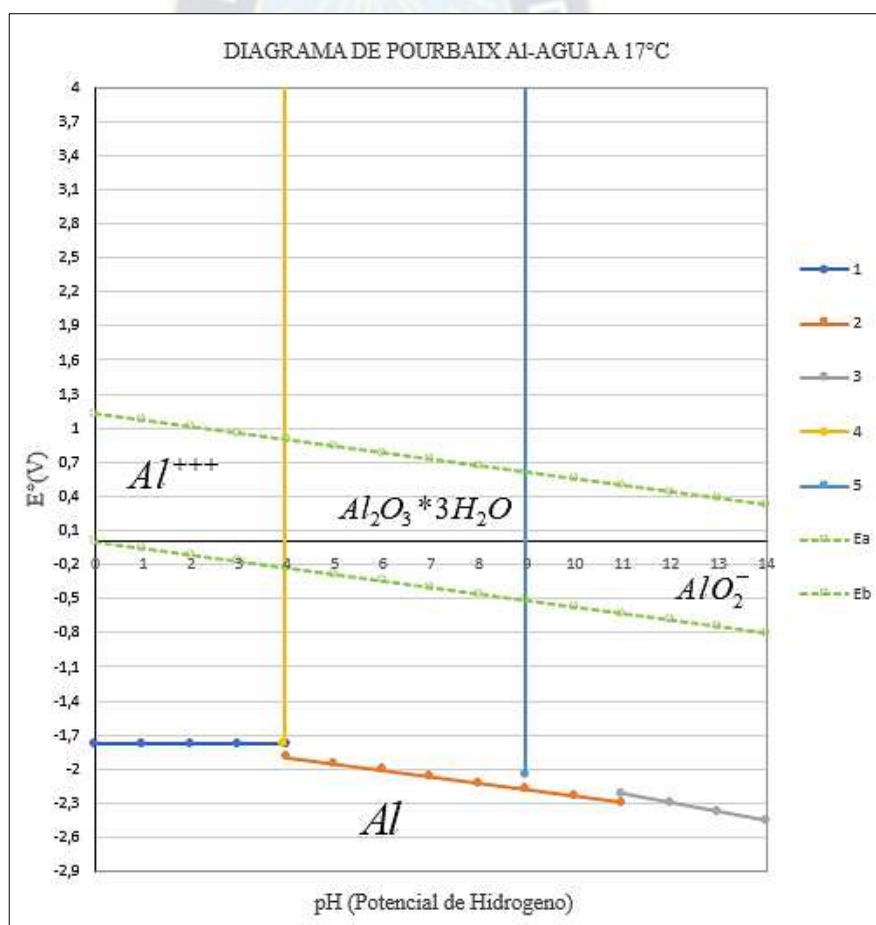


- Primero se calcula la delta G de formación estándar, debido a que se encuentran en solución anódica los signos que se utilizarán serán negativos para los valores de la tabla anterior.
- Con la ecuación de Nerst se halla el valor del potencial, Usando para las especies una concentración de 1×10^{-6} [M], y para las especies sólidas 1 [M], obtenemos el valor de $E = -1.777V$

Siguiendo el mismo procedimiento para las demás reacciones obtenemos las siguientes ecuaciones para cada reacción:

- $Al(OH)_3 + 3H^+ + 3e^- \leftrightarrow Al + 3H_2O$ $E = -1.55009 - 0.05757 \log k$
- $AlO_2^- + 4H^+ + 3e^- \leftrightarrow Al + 2H_2O$ $E = -1.26239 - 0.07677 \log k$
- $2Al^{3+} + 3H_2O \leftrightarrow Al_2O_3 + 6H^+$ $pH = 3.9494$
- $Al_2O_3 + H_2O \leftrightarrow 2AlO_2^- + 2H^+$ $pH = 8.9861$

Usando las fórmulas dadas, se construyó el diagrama de equilibrio de pH potencial para el sistema aluminio-agua a 17 ° C.



Grafica 1. Diagrama de Pourbaix del sistema aluminio-agua a 17°C.

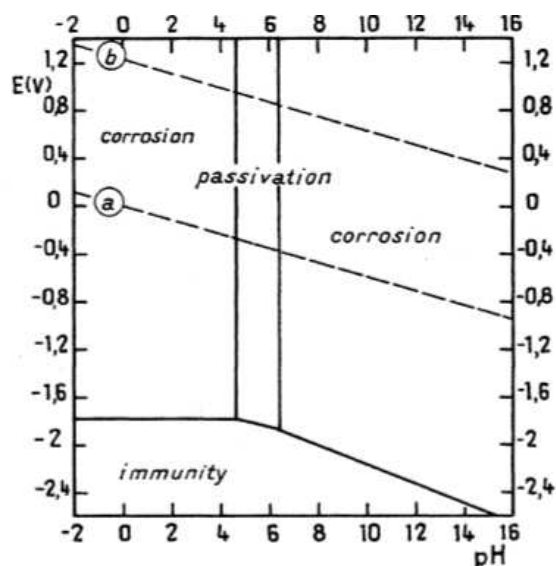


Figura 8. Condiciones teóricas de corrosión, pasivación e inmunidad de aluminio a 25 [°C].

Fuente: (Franklin, 1974)

Las Figura 8, representa las condiciones teóricas de corrosión, inmunidad y pasivación del aluminio a 25 [°C], en ausencia de sustancias con las que el aluminio forme complejos solubles o sales insolubles, la figura se refiere a la pasivación por la formación de una capa de bohemita $Al_2O_3 \cdot H_2O$, que suele ser el caso práctico, especialmente cuando el metal se cubre con una capa de óxido anódico. (Franklin, 1974)

De la gráfica 1 y figura 8, todo su dominio de estabilidad del aluminio se encuentra por debajo del agua. En presencia de soluciones suficientemente ácidas, descompone el agua con la evolución de hidrógeno, disolviéndose como iones Al^{+++} trivalentes; Bajo ciertas condiciones que son poco conocidas en la actualidad, esta disolución se produce con la formación de iones Al^{++} monovalentes. En presencia de soluciones suficientemente alcalinas, el aluminio descompone el agua con la evolución del hidrógeno, disolviéndose como iones aluminato de AlO_2 . (Franklin, 1974)

En la práctica, el comportamiento a la corrosión del aluminio está determinado esencialmente por el comportamiento de la película de óxido con la que casi siempre se cubre

hacia los medios corrosivos a considerar. Los casos de mala resistencia a la corrosión a menudo están relacionados con un cambio en esta película de óxido, especialmente en su grado de hidratación y porosidad. (Franklin, 1974)

2.11.1.2. Sistema FE-H₂O

El mismo caso para el aluminio era necesario conocer las reacciones que suscitan y además conocer la estabilidad de las especies reaccionantes en el desarrollo del tratamiento con hierro como ánodo. La grafica de Pourbaix ya elaborada a 25 [°C], encontrada en bibliografía se muestra a continuación:

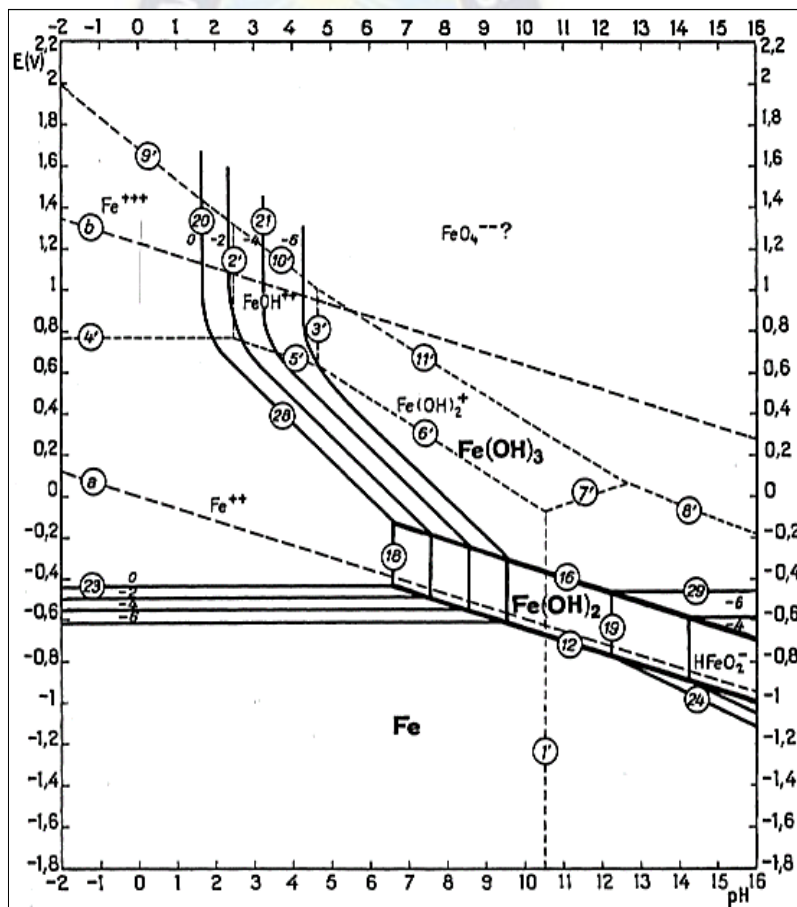
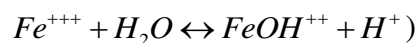


Figura 9. Diagrama de equilibrio Potencial-pH para el sistema hierro-agua, a 25 [°C].

Fuente: (Franklin, 1974)

De la misma forma que con el aluminio, se construyó la gráfica de Pourbaix del sistema Fe-H₂O a condiciones en las que se ha trabajado es decir a 17 [°C], el cual tienen tres tipos de línea:

- Horizontal: reacciones que involucran electrones (ej. $Fe^{++} \leftrightarrow Fe^{+++} + e^{-}$)
- Vertical: reacciones que involucran H⁺ u OH⁻ (Ej.



- Oblicua: reacciones que involucran ambos (Ej.



Los valores de las entalpías libres estándar de formación de las especies que intervienen en la solución anódica del hierro se presentan en la siguiente tabla:

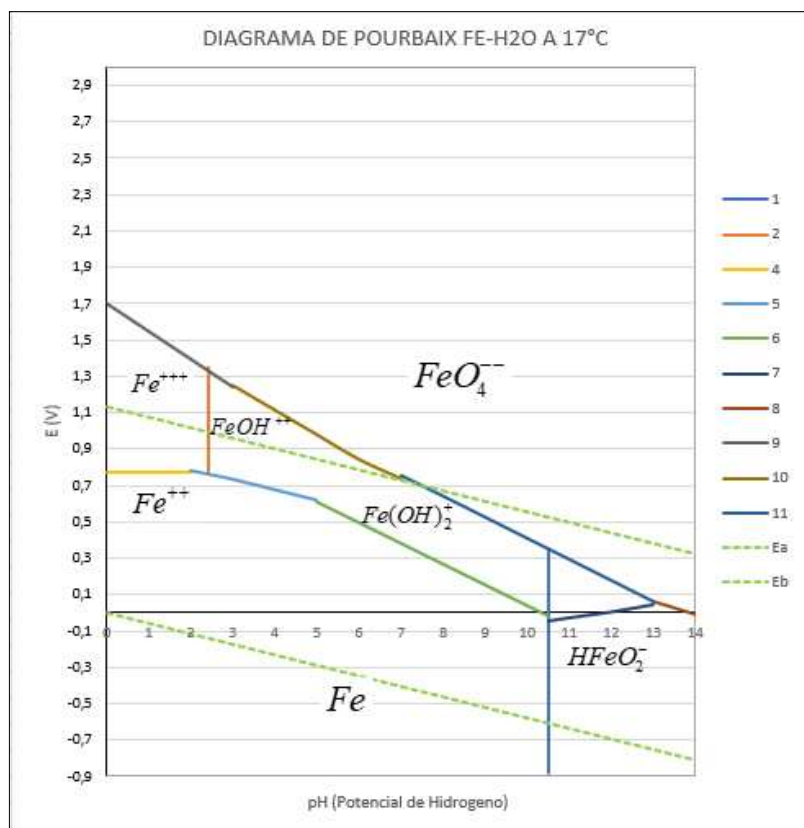
Tabla 2. Entalpías de reacción de sustancias de hierro

ESPECIES	NUMERO DE OXIDACION	ESTADO	ΔG°
H+		Ac	0
H ₂		G	0
O ₂		G	0
OH		Ac	-157,293
H ₂ O	0	L	-237,178
FE	0	S	0
FE+2	2	Ac	-20300
FE+3	3	Ac	-2530
FE ₂ OH ⁺⁺	3	AC	-55910
FE(OH) ₂	2	Ac	-106200
FE(OH) ₃	3	S	
FE ₂ O ₃	3	S	-177100
FE ₂ O	2	S	-58880
FE ₃ O ₄	3,67		-242600
HFEO ₂ ⁻	2	AC	-90627
FE ₂ O ₄ ⁻⁻	6	AC	-111685

Fuente: Elaboración propia

Siguiendo el mismo procedimiento que en el del aluminio obtenemos las ecuaciones para cada reacción en equilibrio para construir el diagrama pH-Potencial para el sistema Hierro-Agua a la temperatura de 17 [°C], las ecuaciones resultaron ser:

- $Fe^{++} + 2H_2O \leftrightarrow HFeO_2^- + 3H^+$ pH= 10.53
- $Fe^{+++} + H_2O \leftrightarrow FeOH^{++} + H^+$ pH= 2.43
- $FeOH^{++} + H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_2^+ + H^+$ pH= 4.69
- $Fe^{++} \leftrightarrow Fe^{+++} + e^-$ E= 0.771 (V)
- $Fe^{++} + H_2O \leftrightarrow FeOH^{++} + H^+ + e^-$ E=-0.914-0.0576pH
- $Fe^{+++} + 2H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_2^+ + 2H^+ + e^-$ E=1.191-0.1551pH
- $HFeO_2^- + H^+ \leftrightarrow Fe(OH)_2^+ + e^-$ E=-0.675+0.0576pH
- $HFeO_2^- + 2H_2O \leftrightarrow FeO_4^{--} + 5H^+ + 4e^-$ E=1.001-0.0719pH
- $Fe^{+++} + 4H_2O \leftrightarrow FeO_4^{--} + 8H^+ + 3e^-$ E=1.7-0.1535pH
- $FeOH^{++} + 3H_2O \leftrightarrow FeO_4^{--} + 7H^+ + 3e^-$ E=1.652-0.1343pH
- $Fe(OH)_2^+ + 2H_2O \leftrightarrow FeO_4^{--} + 6H^+ + 3e^-$ E=1.559-0.1152pH



Grafica 2. Diagrama de Pourbaix del sistema Hierro-Agua a 17°C

Fuente: Elaboración propia

Usando fórmulas del 1 al 11 hemos representado en la gráfica 3. los dominios de predominio relativo de las sustancias disueltas Fe^{2+} , $HFeO_2^{-}$, Fe^{3+} , $FeOH^{2+}$ y $Fe(OH)_2$, por otro lado, considerando sustancias sólidas como Fe . (Franklin, 1974)

El hierro divalente forma los siguientes complejos: complejos de amina, complejos con compuestos hidroxílicos orgánicos y con iones hipofosfito, oxalato y cianuro. El hierro trivalente forma numerosos complejos: carbonatos, cianuros, oxalatos, fosfatos, sulfuros, etc. de hierro divalente; fosfatos y sulfuros (en medios alcalinos). (Franklin, 1974)

El hierro parece ser un metal base, ya que su dominio de estabilidad termodinámica, a 17 ° C y presión atmosférica, no tiene ninguna parte en común con el agua. Inestable en presencia de agua y una gran cantidad de soluciones acuosas no oxidantes, por lo tanto, el hierro se corroe en tales soluciones con la evolución del hidrógeno; esta reacción, que será

muy vigorosa en soluciones ácidas, se volverá progresivamente menos vigorosa a medida que aumente el pH de la solución, y casi cesará a pH alrededor de 10-13, cuando el hierro se cubra con una película de óxido. (Franklin, 1974)

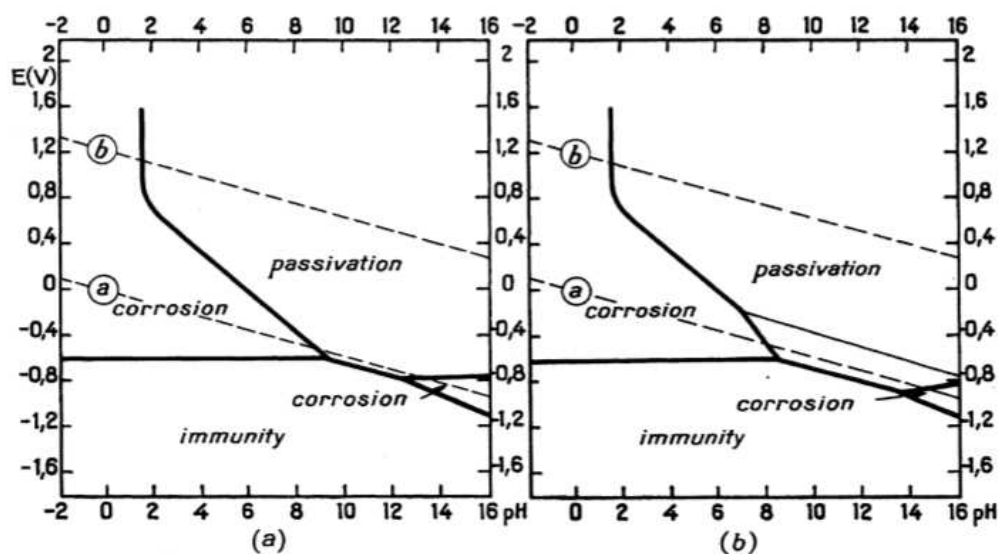


Figura 10. Condiciones teóricas de corrosión, pasivación e inmunidad de hierro.

(a) asumiendo pasivación con película de Fe_2O_3 , b) asumiendo pasivación con película de Fe_2O_3 y Fe_3O_4

Fuente: (Franklin, 1974)

El potencial de electrodo del hierro sumergido en una solución aumenta por la presencia de agentes oxidantes. Por lo tanto, la adición de tales compuestos tendrá el efecto de pasivar el metal más o menos perfectamente o, por otro lado, de aumentar su velocidad de corrosión, dependiendo de si el aumento en el potencial es suficiente o no para llevar el metal al interior. dominio de pasivación, Por lo tanto, la facilidad con la que el hierro es pasivado por agentes oxidantes será mayor cuanto menor sea el rango de potenciales de electrodo a los que es posible la corrosión. Por lo tanto, de la figura 9, la pasivación será relativamente difícil, o incluso imposible, a pH por debajo de aproximadamente 8; será relativamente fácil a pH por encima de aproximadamente 8, y muy fácil a pH entre aproximadamente 10 y 12. (Franklin, 1974)

2.12. ALGUNOS ANTECEDENTES

2.12.1. Tratamiento de aguas contaminadas por electrocoagulación

Debido a la concientización que se ha ido adquiriendo respecto a los efectos dañinos que puede causar tanto al entorno como a los seres humanos, la presencia de elementos contaminantes en los efluentes de agua, desde hace un tiempo se han venido estudiando la electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales. A continuación, en la tabla se presentan los antecedentes principales a este tratamiento.

Tabla 3. Antecedentes principales de tratamiento de aguas contaminadas por electrocoagulación

AUTORES	TIPO DE AGUA RESIDUAL	CONTAMINANTE	RESULTADOS
Lic. Graciela León Echalar Facultad de ingeniería, UMSA (2013) BOLIVIA	Agua residual de la planta LA PAPELERA S.A.	Materia orgánica (DQO, DBO y SST)	<ul style="list-style-type: none"> - Celda de Electrocoagulación Batch 2 ánodos y 2 cátodos. - Al-Fe permitió una remoción de DQO 86.4%, DBO 69.7% y SST de 57.2%. - Tiempo de residencia 20 [min], voltaje 4 [V], distancia entre electrodos 10 [mm].
Lic. José Luis Sarzuri Facultad de ingeniería, UMSA, (2016). BOLIVIA	Agua residual de tanques de cisternas de combustibles	Materia orgánica (DQO, ST, SDT y SST)	<ul style="list-style-type: none"> - Celda de electrocoagulación de 2(l) de capacidad y con 6 electrodos. - Al-Fe permitió una remoción de DQO 65.63%, SST de 70%. - Tiempo de residencia 15 [min], voltaje 9 [V], distancia entre electrodos 15[mm].
Karen Kelly Quispe Quispe, Facultad de	Agua residual en el centro poblado La	Mercurio Hg, DQO	<ul style="list-style-type: none"> - Celda de electrocoagulación con 5 electrodos de

<p>Ingeniería Química, UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO, (2015). PERÚ</p>	<p>Rinconada-Puno</p>		<p>aluminio, 3 ánodos y 2 cátodos.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Al-Al permitió una remoción de mercurio de 97.00% y DQO de 83%. - tiempo de residencia 30 min, densidades de corriente de 6.61 [mA/cm²], distancia entre electrodos 20 [mm].
<p>M.Sc. Edison Gilpavas Escuela de Ingeniería Universidad EAFIT, (2008). MEDELLÍN, COLOMBIA</p>	<p>Aguas residuales procedentes de la industria de curtiembres y floricultivo</p>	<p>Cromo, Color, COT, DBO5 y DQO.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Al-Al permitió una remoción para el Cr+3 del 99.99%, y DQO del 95% - Tiempo de residencia 30 min, voltaje de 13V, distancia entre electrodos 0.5 [cm], agitación de 382.3 [rpm] y dilución de 1: 3.

Fuente: Elaboración propia

2.12.2. Tratamiento de aguas residuales de lavado de quinua por método convencional

“DISEÑO DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS PROVENIENTES DEL LAVADO DE QUINUA PARA LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS “

El presente trabajo elaborado por Martha Ameller, está dirigido a la mitigación de la contaminación provocada por los efluentes provenientes del proceso de lavado de quinua de la empresa de alimentos IRUPANA, los cuales contiene elevada carga orgánica y saponinas, a través del tratamiento de estos efluentes se busca a la reutilización de los mismos en el proceso de lavado, con el fin de disminuir el consumo de agua, el tratamiento consta de las siguientes

operaciones: floculación (dosificación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$), sedimentación, filtración por filtro de arena y filtro de carbón activado.

A continuación, en la tabla se presentan resultados de este tratamiento convencional:

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos del agua después del tratamiento

PARÁMETRO ANALIZADO	METODO	UNID.	ANTES DEL TRAT	DESPUÉS DEL TRAT	LÍMITE PERMISIBLE
DQO	Reflujo abierto	mgO ₂ / l	1352	86	250
TURBIEDAD	Nefelométrico	UNT	720	6.95	Menos q 10
PH	Potenciométrico		6.76	9.92	6.9
DBO	Diluciones	mgO ₂ / l	620	118	80
CALCIO	Volumétrico	mgca+2/l	24.05	63.3	200 clase a
SOLIDOS SUSPENDIDOS	Gravimétrico	mg/ l	1388	667	60

Fuente: Proyecto Martha Ameller (2003)

Límites permisibles de la ley 1333 del medio ambiente, los análisis se realizaron en el laboratorio del instituto de ingeniería sanitaria

Tabla 5. Porcentaje de remoción del proceso

Parámetro	Unidades	Remoción (%)
DQO	mgO ₂ / l	93
Turbiedad	NTU	99
DBO	mgO ₂ / l	81
Sol susp. tot.	mg/l	52

Fuente: Proyecto Martha Ameller (2003)

“DEGRADACIÓN DE SAPONINAS MEDIANTE ENZIMAS PRODUCIDAS POR HONGOS NATIVOS DEL ALTIPLANO”

El presente trabajo elaborado por Olga Lorena Salinas Villarte, tiene como objetivo el de Obtener un “bulk” de enzimas proveniente de un hongo nativo del Altiplano seleccionado del cepario del Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ), para la degradación de las saponinas presentes en los efluentes provenientes del beneficiado de la quinua de la empresa COMRURAL XX1. S.R.L.

Los resultados de remoción de saponina se muestran a continuación:

Tabla 6. Resultados de remoción de saponina

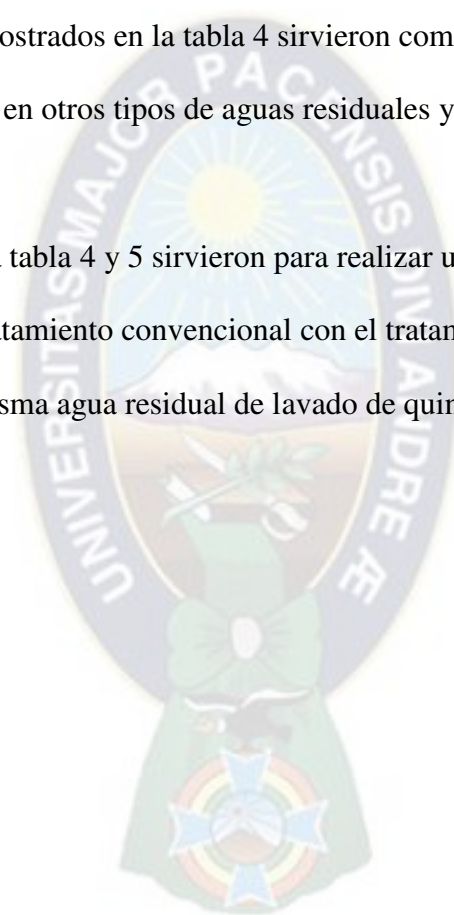
C saponina inicial (mg/ml)	C saponina final (mg/ml)	Porcentaje de reducción de saponina (%)
6,357	2,610	58,948

Fuente: Proyecto Olga Lorena Salinas Villarte

En la Tabla anterior se observa que el porcentaje de reducción de saponinas es del 58,948%, lo que muestra que en una hora de tratamiento se pueden reducir este factor a un porcentaje mayor a 50.

Los antecedentes mostrados en la tabla 4 sirvieron como referencia para conocimiento de la eficiencia del método en otros tipos de aguas residuales y de los parámetros utilizados para su tratamiento.

Los resultados de la tabla 4 y 5 sirvieron para realizar una comparación de los resultados obtenidos del tratamiento convencional con el tratamiento de electrocoagulación, tratándose además de la misma agua residual de lavado de quinua de la empresa IRUPANA.



The background features a large, faded watermark of the seal of the University of the Pacific. The seal is oval-shaped with a blue border containing the Latin text "UNIVERSITAS MAJOR PACENSIS DIVI ANDREAE". Inside the oval, there is a sunburst at the top, a mountain range in the middle, and a green banner at the bottom with a white cross. Below the oval is a green ribbon with a white cross and a blue and red circular emblem.

CAPITULO 3

METODOLOGIA

METODOLOGIA

Los puntos en los que estarán enfocados en este capítulo se muestran en la siguiente figura:



Figura 11. Diagrama de la metodología a realizar

Fuente: Elaboración propia

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS ELECTRODOS

3.1.1. Espectrometría de fluorescencia de rayos x

3.1.1.1. Esquema del equipo

Si podemos identificar la longitud de onda o energía de cada una de estas radiaciones, podemos conocer los elementos que componen la muestra. La técnica que se encarga de esta tarea recibe el nombre de espectrometría de fluorescencia de rayos X; los equipos instrumentales que se utilizan para este fin son los espectrómetros.

En la siguiente figura, se muestra el esquema de un espectrómetro de rayos X de dispersión de longitudes de onda, llamando así porque el espectro de fluorescencia policromático emitido por la muestra al ser excitada por un haz de radiación producido por un tubo de rayos X, es descompuesto en sus componentes monocromáticas en función de sus

longitudes de onda, al difractarse en un monocristal de espaciado conocido. El haz difractado para cada posición angular del monocristal incide sobre un detector, generalmente un detector de gas proporcional de flujo o de centelleo, que convierte los fotones en impulsos eléctricos.

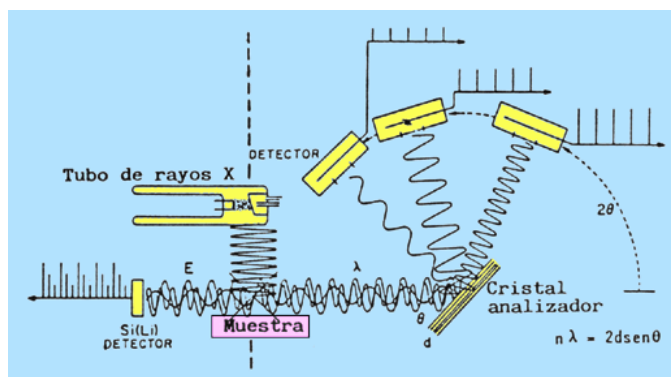


Figura 12. Esquema de fluorescencia de rayos x.

Fuente: <https://www2.uned.es/cristamine/mineral/metodos/xrfs.htm>

De acuerdo con la ley de Bragg: $n\lambda = 2d \sin \theta$, midiendo el valor del ángulo θ al que se difracta cada una de las radiaciones que constituyen el espectro emitido por la muestra, como el espaciado “d” del cristal analizador es conocido, se puede calcular la longitud de onda “ λ ” de cada una. Del análisis de estas longitudes de onda se puede conocer la composición cualitativa de la muestra.



Fotografía 3. equipo de espectrometría de fluorescencia de rayos X.

Fuente: laboratorio de Geología (UMSA).

Para conocer la composición de los electrodos de trabajo hierro y aluminio, se realizó la espectrometría de fluorescencia de rayos X de ambos metales por separado, el único requisito es que la muestra a analizar tenga un tamaño inferior al del porta muestras, estas tenían la forma laminar circular de aproximadamente 8cm de diámetro, lamina de hierro de espesor 1mm y lamina aluminio de espesor 0.6 [mm]. Cabe mencionar que se realizó un solo análisis de estos debido a que este análisis es altamente costoso. Los resultados de este análisis se muestran en el siguiente capítulo.

3.1.2. Voltamperometría

3.1.2.1. Voltametría cíclica

En esta sección se realizó la caracterización de los electrodos de aluminio (ánodo) y de hierro (ánodo), los cuales se emplearon durante el proceso de electrocoagulación. Con el fin de obtener información sobre los procesos de oxidación-reducción que se llevan a cabo en el electrodo durante el proceso de electrocoagulación. La caracterización se realizó en una celda de plástico, utilizando tres electrodos: uno es el electrodo de referencia ENH (electrodo normal de hidrógeno), un contraelectrodo de platino y el electrodo de trabajo de aluminio y de hierro. Los tres electrodos fueron colocados en la celda, el cual contenía 250 [ml] de agua residual de lavado de quinua como solución a estudiar y fueron conectados a un potenciostato GAMRY el cual fue operado con el sistema hardware chemanalist, como se muestra en la figura:



Fotografía 4. Potenciostato GAMRY.

Fuente: laboratorio de Ingeniería Metalúrgica y Materiales (UMSA).

Primero, se obtuvo el potencial de circuito abierto (OCP), que consiste en determinar el potencial mínimo de trabajo y, posteriormente, Al aplicar el barrido triangular de potencial (gráfica 3) y registrar la variación de la intensidad respecto al voltaje aplicado, se obtiene un voltamperograma que será de gran utilidad para el análisis de procesos redox. La utilidad de esta técnica depende de la naturaleza del analito a estudiar. Es necesario que sea un analito con posibilidad de ser oxidado o reducido en el rango de potenciales del barrido aplicado y es deseable que la reacción redox sea reversible. La forma que presentará el voltamperograma dependerá del analito, de su concentración, de la ventana de potenciales escogida y la velocidad de barrido. La forma del voltamperograma será lo que nos dará información acerca del analito y/o del electrodo y según la finalidad del estudio electroquímico nos centraremos en unos parámetros u otros. Las gráficas resultantes se muestran en el siguiente capítulo.

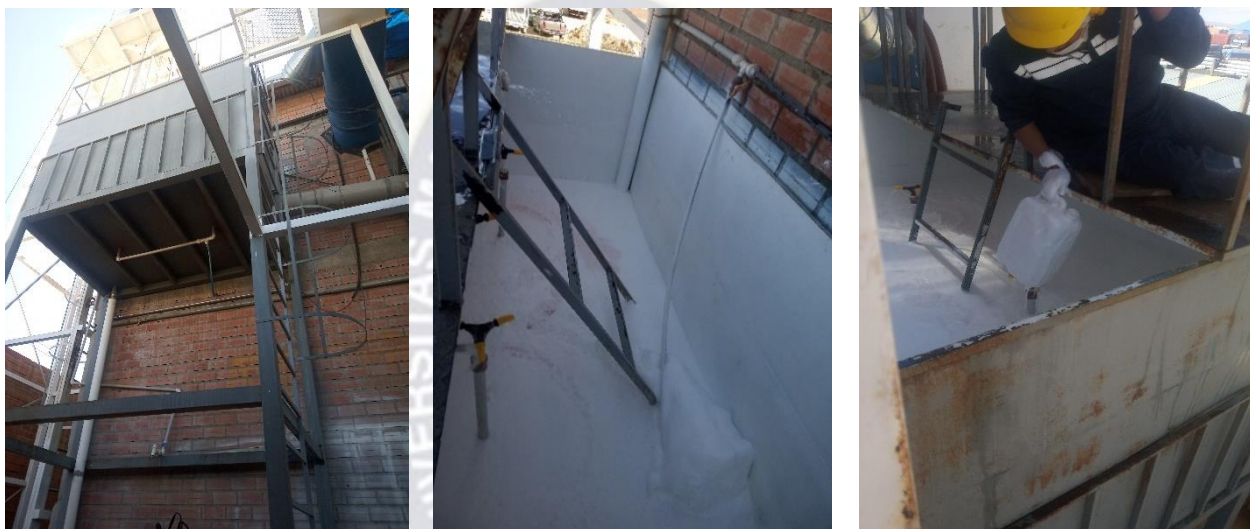
3.2. CARACTERIZACION DEL EFLUENTE

3.2.1. Toma de muestras

Para determinar los puntos a muestrear en un proceso industrial, basta con conocer la dinámica del proceso e identificar los puntos de descarga, en este trabajo el punto de descarga

es la salida de agua de los lavadores de quinua, para posteriormente ser llevado al reactor donde se llevara a cabo el tratamiento, para el cual el punto exacto para la toma de muestra será a la entrada del sistema de tratamiento y a la salida del mismo, con lo cual se determinara, no solo la naturaleza del efluente sino también la eficiencia del sistema.

En las siguientes fotografías se muestra la toma de muestra del lugar donde desemboca las aguas residuales de los lavadores de quinua (IRUPANA AOF.S.A.).



a).

b).

c).

Fotografía 5. a) Tanque de almacenamiento de aguas residuales de lavado de quinua (salida de agua de los lavadores), b) Agua residual con espuma suspendida., c) Toma de muestra en bidón de plástico de 10 litros.

Fuente: Empresa IRUPANA AOF. S.A.

La caracterización es el análisis fisicoquímico que se realiza a la muestra antes y después del tratamiento, como objetivo principal de este proyecto es de interés la determinación de remoción de carga orgánica, esta fue expresada en sólidos volátiles, debido a que genera un menor costo que varios análisis de DQO o DBO.

La determinación de carga orgánica en función a los sólidos volátiles se realizó en los procesos que se muestran a continuación que constan de cuatro etapas:

- Etapa 1. Caracterización de la muestra inicial
- Etapa 2. Caracterización de la muestra inicial decantada
- Etapa 3. Caracterización de la muestra inicial filtrada
- Etapa 4. Caracterización de la muestra después del tratamiento



Figura 13. Representación de las etapas del proceso de determinación de carga orgánica.

Fuente: laboratorio de IIDEPROQ

El objetivo de decantación y filtración de la muestra inicial es el de disminuir sólidos suspendidos y sedimentados encontrados a simple vista en ella, ya que estas partículas podrían presentarse como un obstáculo en el desarrollo del tratamiento.

3.2.3. Métodos de análisis fisicoquímico de la muestra

Todos los parámetros físico- químicos fueron analizados bajo la norma APHA (métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales), parámetros como potencial de hidrógeno, sólidos totales fijos y sólidos totales volátiles, a excepción de turbidez y conductividad que fueron analizados por el manual de análisis de agua HACH, los cloruros que fueron analizados por el método Mohr, la cuantificación de saponina se realizó mediante el método indirecto DNS. El procedimiento de análisis de estos parámetros se muestra en anexos.

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se plantea llegar a una investigación experimental la cual se basa en la determinación de los fenómenos que se presentarán en el desarrollo de la experimentación, hasta que entre ellos se puedan verificar teorías y explicar la variación de estos parámetros con relación entre ellos mismos, Estamos hablando específicamente de analizar, los sobrepotenciales y todas las resistencias que se presenten en el desarrollo de la electrocoagulación, que generen un gasto energético a este, además dar a conocer la cinética de reacción del proceso, así también verificar la producción de iones de Fe^{+3} y Al^{+3} , gases y/o hidróxidos de los mismos, con el fin de obtener la mayor reducción posible de carga orgánica del efluente y demostrar la eficiencia del método.

3.3.1. Variables independientes y variables dependientes

Variables Independientes: son todos aquellos factores que generalmente son manipulados por el investigador, para ver su efecto sobre la variable dependiente. Los factores considerados independientes en este proyecto son: distancia entre electrodos, tipo de electrodos, potencial eléctrico y tiempo de electrocoagulación.

Variables Dependientes: se refiere a aquellos factores que se tratan de explicar y que será el objeto de estudio a lo largo de la investigación. El factor considerado dependiente en este proyecto es: el porcentaje de remoción de la carga orgánica.

3.3.2. Diseño 2^2

El primer diseño de la serie 2^k es el que sólo tiene dos factores, por ejemplo, 1 y 2; cada uno se corre a dos niveles. A este diseño se le llama diseño factorial 2^2 .

En un diseño factorial 2^k es sencillo expresar los resultados del experimento en términos de un modelo de regresión. Puesto que 2^k es tan sólo un diseño factorial, podría

usarse un modelo de los efectos o de las medias, pero el enfoque del modelo de regresión es mucho más natural e intuitivo.

Las primeras variables independientes a analizar son: factor 1 distancia de electrodos y factor 2: tiempo de electrocoagulación. La variable respuesta fue el porcentaje de remoción de carga orgánica.

Tabla 7. Variables independientes de las primeras pruebas preliminares

FACTOR	VARIABLE	NIVEL 1	NIVEL 2
FACTOR 1	Distancia de electrodos (cm)	1,45	3,5
FACTOR 2	Tiempo de electrocoagulación (min)	30	45

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Diseño 3²

El diseño más simple del sistema 3^k es el diseño 3², el cual tiene dos factores, cada uno con tres niveles. Puesto que están presentes 3*2 =9 combinaciones de tratamientos, hay ocho grados de libertad entre estas combinaciones de tratamientos. Los efectos principales de A y B tienen dos grados de libertad cada uno, y la interacción AB tiene cuatro grados de libertad. Si hay n réplicas, habrán n³(3-1) grados de libertad totales y 3³(n -1) grados de libertad del error.

Las variables independientes que se consideraron para el segundo diseño experimental son: factor A: voltaje y factor B: tipo de electrodo. La variable respuesta fue el porcentaje de remoción de carga orgánica.

Tabla 8. Variables independientes de las pruebas preliminares

FACTOR	VARIABLE	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
FACTOR A	VOLTAJE (V)	2	4	6
FACTOR B	TIPO DE ELECTRODO (TE)*	1	2	3

Fuente: Elaboración propia

*Los niveles del tipo de electrodos son una denominación que corresponde a: (1) ambos electrodos de Al, (2) ambos electrodos de Fe y (3) un electrodo de Al y un electrodo de Fe.

3.4. ENSAYOS PRELIMINARES

3.4.1. Construcción de la celda electroquímica

Para la construcción de la celda de electrocoagulación para las pruebas preliminares se consideraron las siguientes características:

- Material de la celda (plástico: envase de una batería de auto).
- Volumen total de la celda.
- Número y distancia de electrodos
- Material de electrodos (aluminio y/o hierro).
- Tipo de conexión

3.4.2. Volumen de estudio

El volumen de la celda ocupada por los electrodos, se conoce como la zona de reacción, donde se dan los procesos de desestabilización de partículas, coagulación y sedimentación.

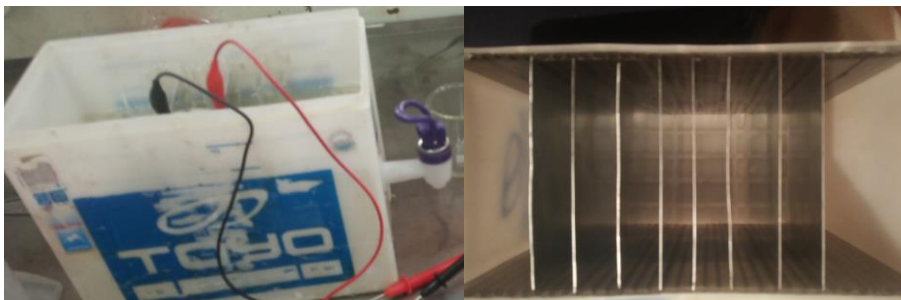
El volumen de efluentes del lavado de quinua (Irupana) del proceso productivo es igual a 21,2 [m³ de agua/día]. Para realizar el experimento se requerirá un cierto volumen dependiendo de las dimensiones de la celda electroquímica, para las pruebas preliminares las dimensiones se muestran a continuación:

Tabla 9. Dimensiones del reactor para pruebas preliminares

EXTERIOR		INTERIOR	
LARGO (cm)	12	LARGO (cm)	11,6
ANCHO (cm)	23	ANCHO (cm)	22,6
ALTO (cm)	18,5	ALTO (cm)	11,5
VOLUMEN (cm³)	5106	VOLUMEN (cm³)	3003,03

Fuente: Elaboración propia

La celda tiene una capacidad de 3003 [cm³], por lo tanto, el volumen a tratar será de 3 litros de muestra.



Fotografía 6. Celda de electrocoagulación para pruebas preliminares.

Fuente: Fotografía del reactor en el laboratorio de IIDEPROQ

3.4.3. Número de electrodos

El número de electrodos se determinará, dependiendo del ancho de celda, distancia de electrodos a cara lateral, distancia máxima entre electrodos y espesor de placa; empleando la siguiente expresión reportado por Arango y Garcés (2007).

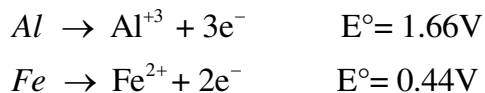
$$\text{Número de electrodos} = \frac{\text{ancho de celda} - 2 * (\text{distancia electrodos a cara lateral})}{\text{distancia entre electrodos} + \text{espesor de electrodos}} \quad (27)$$

3.4.4. Material anódico y material catódico

Las reglas que se aplican para escoger las reacciones anódicas y catódicas luego de haber tenido en cuenta los efectos de polarización electroquímica y sobrevoltaje en los ajustes de potencial serán:

- En el ánodo se escoge la oxidación más probable, o sea, la de potencial más elevado.
- En el cátodo se escoge la reducción más probable, o sea la, de potencial de oxidación más bajo.

Razón por la cual en este proyecto en las pruebas donde se utilizaron ambos materiales de hierro y aluminio como electrodos, se utilizó al aluminio como ánodo, debido a cuenta con un potencial de oxidación de 1.66 [V], y al hierro como cátodo ya que su potencial de oxidación es de 0.44 [V] menor que el de aluminio.



3.4.5. Tipo de conexión

Entre los tipos de conexión para el reactor empleado en las pruebas preliminares se eligió una configuración monopolar en paralelo, es decir, con electrodos rectangulares conectados en paralelo, como se muestra en el lado izquierdo de la figura:

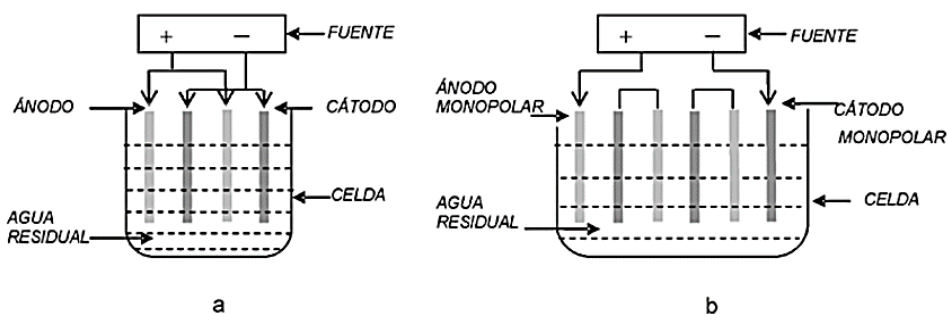


Figura 14. a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo, b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie.

Fuente: Betancourt-Domínguez, UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, 2014

3.4.6. Materiales y equipos para los ensayos preliminares

Los materiales y equipos que se necesitaron para el armado y funcionamiento del reactor electroquímico para las pruebas preliminares fueron los siguientes:

- Fuente de alimentación de 30 [V] - 10 [A].
- Celda electrolítica o reactor
- Electrodo de aluminio y hierro.
- Un cronometro.
- Un multímetro (multitester).
- Cables puente (chicotillos).
- Termómetro
- PH metro
- Vasos de precipitado

- Probeta de 1000ml

Teniendo en cuenta que en el instituto IDEPROQ se cuenta con todos los materiales y equipos planteados a excepción de los electrodos y el reactor.



Fotografía 7. Armado del sistema de tratamiento para pruebas preliminares.

Fuente: Fotografía del sistema en el laboratorio de IDEPROQ

3.4.7. Procedimiento

A continuación, se describe el procedimiento con el cual se desarrolló el diseño de experimentos en el laboratorio, para el cual se empleó un reactor de capacidad de 3.5 [l].

- Primeramente, se realizan la decantación de la muestra inicial para el diseño de experimentos, se trabaja la muestra a temperatura ambiente.
- Tomar 2.9 [l] de la muestra y filtrar en una tela fina para retirar partículas que estén en suspensión o en sedimentación.
- Preparar el montaje (fotografía N°7) para llevar a cabo la electrocoagulación, tener en cuenta posición de ánodo y cátodo, con 100 [cm²] de área sumergida, distancia entre electrodos de 1.45 [cm] o 3.5 [cm], voltaje aplicado de la fuente de alimentación y tiempo de reacción de 30 [min] o 45 [min].
- Terminado el tiempo a controlar, homogeneizar la muestra tratada con movimientos circulares y tomar muestra.

- Realizar la toma de muestra de 100 [ml] y filtrar con la tela fina del inicio.
- Evaluar la eficiencia del proceso determinando los porcentajes de remoción de carga orgánica, basándose solamente en el análisis de sólidos totales y sólidos volátiles de esa muestra tomada.

3.4.8. Flujograma de operación

El flujograma de operación para cada tratamiento es el siguiente mostrado en la figura:



Figura 15. Flujograma del proceso

Fuente: Elaboración propia



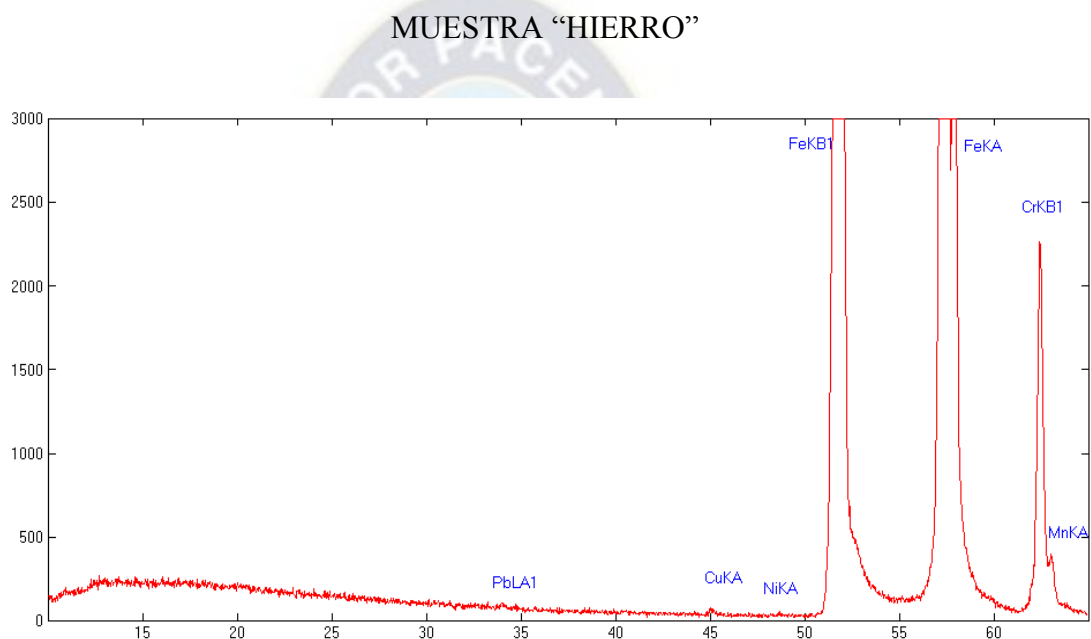
CAPITULO 4
RESULTADOS Y DISCUSION

RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. RESULTADOS DE CARACTERIZACION DE ELECTRODOS

4.1.1. Fluorescencia de rayos x

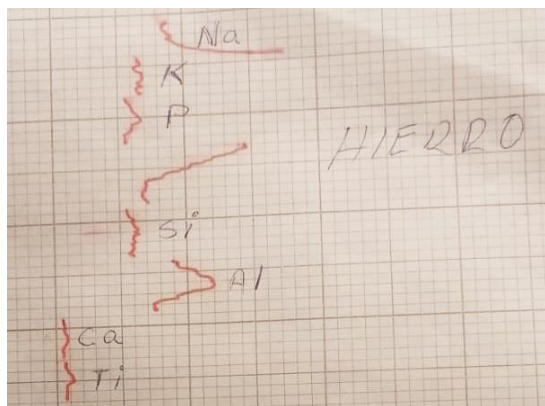
El equipo donde se realizó el análisis cualitativo por fluorescencia de rayos X de los electrodos, muestra en las gráficas que se van formando picos, los cuales representan a los elementos presentes en cada muestra, como se puede observar en las gráficas siguientes:



Grafica 3. Espectro de espectroscopia de fluorescencia de rayos x para muestra de hierro
Intensity Count vs Energy Kev (kiloelectronvoltio)

Fuente: Elaboración propia

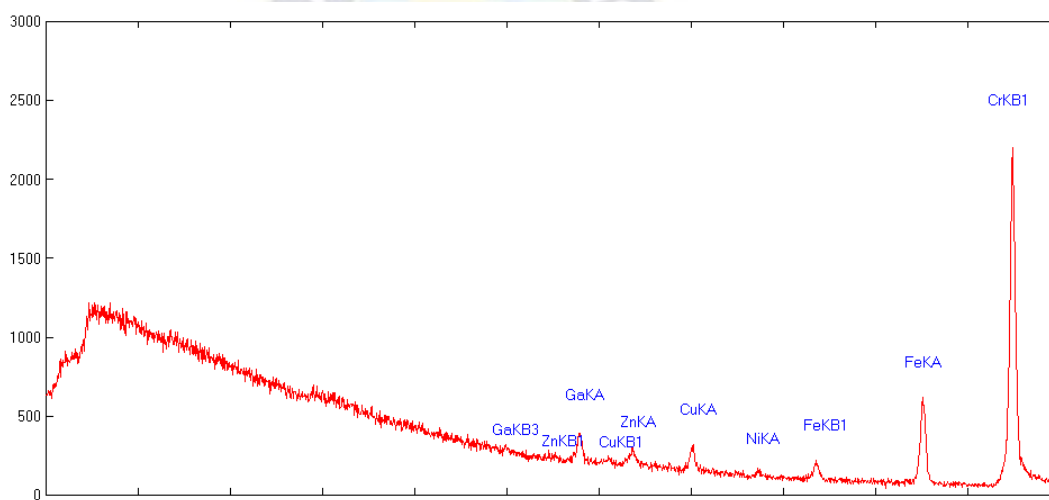
Como se muestra en la gráfica 3, el espectro muestra cualitativamente los materiales presentes en la muestra de hierro, dicha grafica muestra un pico alto del metal hierro, el pico de hierro representaría un 99% de pureza de la muestra, y el restante 1% representaría pequeños picos de manganeso, plomo, cobre, cromo y níquel. Además, se realizó el análisis de elementos ligeros donde se aprecia picos de sodio, fósforo y aluminio, como se muestra en la siguiente fotografía:



Fotografía 8. Análisis de elementos ligeros de la muestra de hierro

Fuente: Elaboración propia

MUESTRA “ALUMINIO”

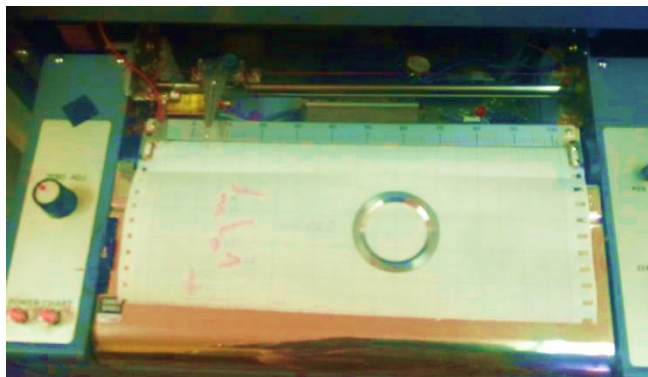


Grafica 4. Espectro de espectroscopia de fluorescencia de rayos x para muestra de aluminio.

Intesity Count vs Energy Kev (kiloelectronvoltio)

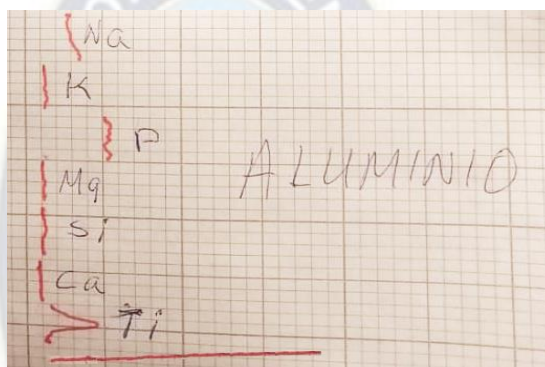
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la gráfica 4, no se puede apreciar el pico de aluminio debido a que se trata de un elemento ligero, por lo que se realizó otro análisis para elementos ligeros, en el cual sí se encuentra el aluminio lógicamente, el cual garantizo un 99% de pureza de la muestra de aluminio y el restante 1% representaría pequeños picos de galio, cobre, zinc, níquel, hierro, titanio y magnesio, como elementos ligeros presenta titanio, como se puede observar en la fotografía 10.



Fotografía 9. Análisis de elementos ligeros }

Fuente: Elaboración propia

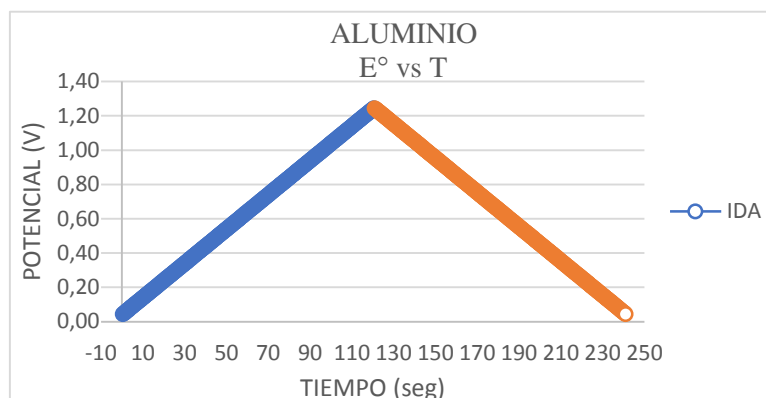


Fotografía 10. Análisis de elementos ligeros de la muestra de aluminio

Fuente: Elaboración propia

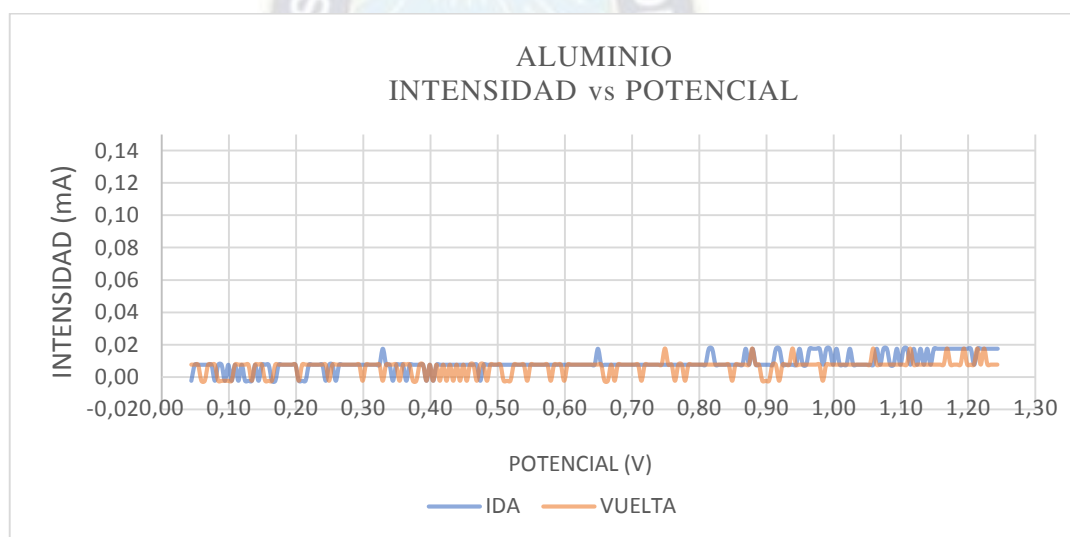
La conclusión de resultados que ambas muestras contienen un 99% de pureza, fue proporcionada, gracias a la alta experiencia del Ingeniero Geólogo Mario Blanco, en la realización del método de espectrometría (fluorescencia de rayos X), quien realizó la obtención de gráficas y análisis de resultados.

4.1.2. Voltamperometría



Grafica 5. Barrido triangular de potencial para ánodo de aluminio.

Fuente: Elaboración propia

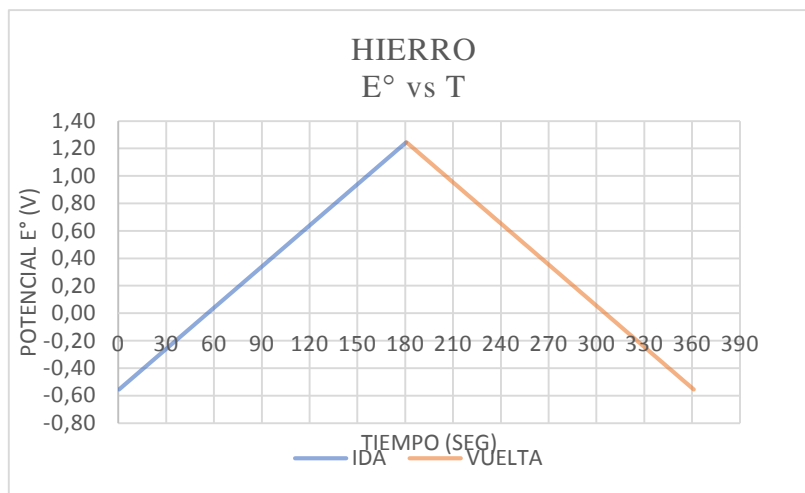


Grafica 6. Voltamperograma para el ánodo de aluminio

Fuente: Elaboración propia

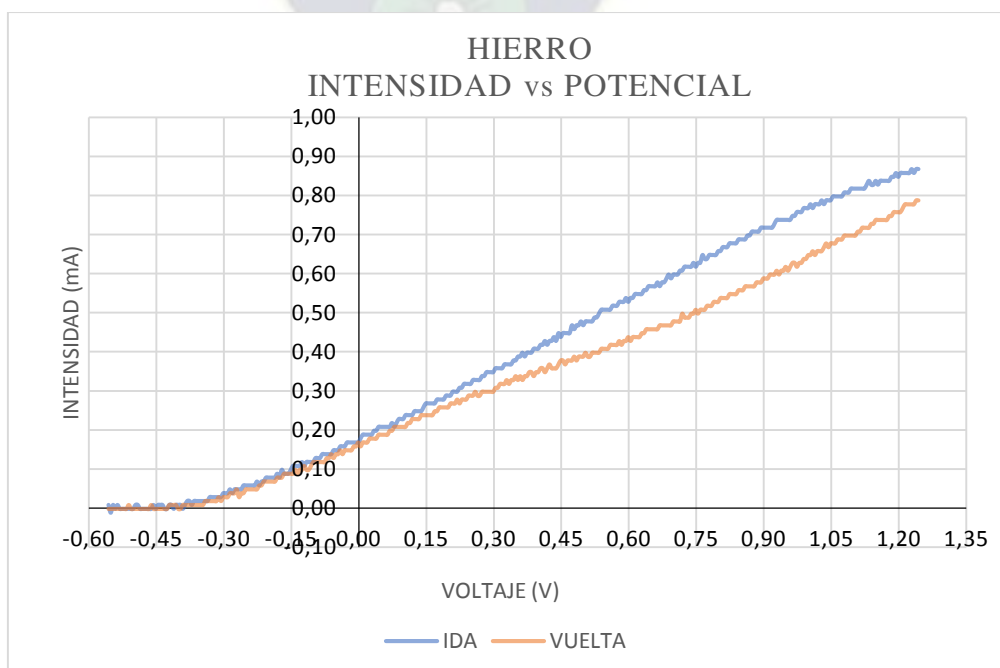
En la gráfica 6 se muestra el voltamperograma cíclico (VC), la curva de la gráfica corresponde a la intensidad de corriente medida como respuesta a la aplicación del sobrepotencial, para el sistema aluminio-electrolito, se puede observar una distribución lineal, lo que comprueba que en la superficie del electrodo no hay reacción química como adsorción y/o desorción de las especies que se tienen presentes en el agua residual (contaminante

coloidal y suspendida), se puede apreciar que se necesita un mayor sobrepotencial. Este aumento de potencial se debe a que el electrodo de aluminio presenta una resistencia a la formación de flóculos de Al^{3+} , debido a la formación de una capa delgada de óxido en el electrodo llamado bohemita ($AlO(OH)$), de acuerdo a la reacción que da origen a la pasivación del mismo.



Grafica 7. Barrido triangular de potencial para ánodo de hierro.

Fuente: Elaboración propia



Grafica 8. Voltamperograma para el ánodo de hierro

Fuente: Elaboración propia

La gráfica 7 muestra el potencial aplicado a un electrodo de hierro. Como se observa se trata de un sobrepotencial catódico que varía linealmente con el tiempo, ambas curvas resumen el concepto de Voltametría, una técnica electroanalítica que se basa en aplicar un sobrepotencial al electrodo y en interpretar la curva de corriente generada. En este caso, la aplicación de un sobrepotencial modifica de tal manera las energías de activación de las reacciones directa e inversa en $OX + e^- \rightarrow RED$, que al final, la reducción (reacción hacia la derecha) predomina sobre la oxidación.

Entonces en este caso cuanto mayor sea el sobrepotencial aplicado, más se favorece la reacción de reducción, lo que explica que el primer tramo de la curva de la derecha es creciente. Sin embargo, en esta grafica nos encontramos un máximo, y a partir de ahí, un descenso de la intensidad de corriente que fluye por el circuito. Lo que ha pasado es que el sobrepotencial sigue favoreciendo la reacción de reducción frente a la oxidación, pero la causa del descenso es otra. Se trata de una nueva fuente de sobrepotencial, si debido a su origen, el sobrepotencial estudiado hasta el momento se denomina sobrepotencial de transferencia, la circunstancia ante la que nos encontramos da vía libre a una nueva versión que denominaremos sobrepotencial de difusión.

4.2. RESULTADOS DE CARACTERIZACION DEL EFLUENTE

Las etapas mencionadas anteriormente de caracterización del efluente antes de realizar el tratamiento se muestran a continuación, donde se analizó el contenido de carga orgánica de la muestra inicial, después de un decantado y después de un filtrado de la muestra.

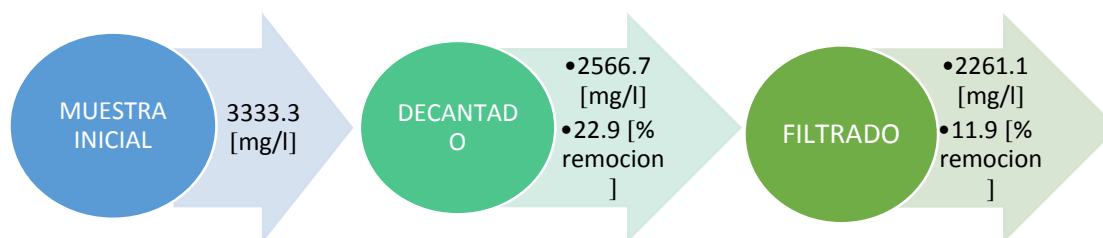


Figura 16. Porcentaje de remoción de carga orgánica de la muestra inicial después de un proceso de decantación y filtración

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la anterior figura, la remoción de carga orgánica después de la decantación de la muestra inicial es del 22.9%, la remoción de carga orgánica después de una filtración es de 11.9% en total se cuenta con una remoción del 34.9% de carga orgánica después de una decantación y filtración de la muestra inicial. Es entonces con esa muestra con la que se trabajara para realizar las pruebas preliminares, con un porcentaje de carga orgánica ya removida.

Entre las características físico-químicos que contienen las aguas residuales de lavado de quinua se encuentran como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 10. Características fisicoquímicas del efluente

PARAMETROS	UNIDAD	VALOR
Conductividad	(mS/cm)	0,51
PH		4,6
Turbidez	NTU	425
solidos totales	(mg/l)	2888.9
solidos volátiles	(mg/l)	2261.1
Cloruro	(mg/l)	162.2
Saponina	(mg/ml)	29.44
DQO	(mgO ₂ /l)	2400
DBO	(mgO ₂ /l)	1097.8

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de todos los parámetros mostrados en la tabla 10, son antes de realizar el tratamiento de electrocoagulación a dicha muestra, es decir, es la muestra que paso primero por un proceso de decantación y filtración.

Los análisis de sólidos suspendidos y de DQO de la muestra inicial es decir antes de cualquier otro tratamiento, se realizó también en el Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental IISA, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 11. Resultados de comparación de carga orgánica de la muestra de la empresa IRUPANA AOF.S.A. del 2003 y 2020 (Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental)

Parámetros	Muestra inicial (proyecto de Martha Ameller, 2003)	Muestra inicial 2020
DQO (mgO ₂ /l)	1352	5600
Sólidos suspendidos (mg/l)	1388	2640

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 11 se puede observar los resultados de análisis de las muestras iniciales tomadas de la misma empresa en 2003 y de 2020, los cuales muestran una gran diferencia, esto debido a que actualmente en la empresa se mejoró el proceso de lavado de la quinua, este lavado se realiza en dos lavadores no solo en uno como aún se realizaba hasta el año 2018, razón por la cual la cantidad de carga orgánica analizada de los efluentes en 2020 es mayor, por lo que ahora representa un mayor reto el de disminuir este valor y que pueda encontrarse en el límite permisible aceptable de carga orgánica.

La comparación de resultados se lo realiza con el proyecto de Martha Ameller, debido que en este se realizó el tratamiento del mismo efluente por un método convencional.

4.3. ENSAYOS PRELIMINARES

Los ensayos se realizaron con el agua residual del proceso de lavado de quinua con una decantación y filtración previa. El diseño de experimentos se realizó por medio del programa estadístico Statgraphics 5.1. Cada una de las variables se estudió en dos niveles de acuerdo

con los intervalos establecidos por la revisión bibliográfica y se analizaron los resultados tomando el porcentaje de remoción de carga orgánica como la variable de respuesta. Las dimensiones de los electrodos a utilizar en estos ensayos preliminares se muestran a continuación:

Tabla 12. Dimensiones de los electrodos

	ANCHO (cm)	LARGO (cm)	ESPESOR (mm)
ALUMINIO	10,9	15	0,6
HIERRO	10.9	15	1

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos preliminares para los factores mostrados en la tabla 13, se realizaron a un potencial constante de 6 [V] y a una intensidad de 1.52 [A], con electrodos de aluminio, en cuanto al número de electrodos se realizó los siguientes cálculos:

Electrodos de aluminio

- Distancia entre electrodos = 1.45 [cm]

Remplazando en la ecuación 27:

$$\text{Número de electrodos} = \frac{22.6\text{cm} - 2.5 * (1.45\text{cm})}{2\text{cm} + 0.6\text{cm}}$$

$$\text{Número de electrodos} = 8$$

- Distancia entre electrodos = 3.5 [cm]

$$\text{Número de electrodos} = \frac{22.6\text{cm} - 2.5 * (3.5\text{cm})}{2\text{cm} + 0.6\text{cm}}$$

$$\text{Número de electrodos} = 6$$

4.3.1. Distancia entre electrodos – tiempo de electrocoagulación

El análisis estadístico de los datos se realizó por medio de Statgraphics 5.1 utilizando herramientas como: la Tabla ANOVA, con el fin de determinar el valor de las variables para

una óptima remoción de carga orgánica. Los resultados obtenidos de porcentajes de remoción de carga orgánica en el diseño de experimentos de los ensayos preliminares se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 13. Variables para el diseño experimental 1

Factor	Variable	Nivel 1	Nivel 2
Factor 1	Distancia de electrodos (cm)	1,45	3,5
Factor 2	Tiempo de electrocoagulación (min)	30	45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Resultados de los ensayos preliminares del diseño experimental 1

N° de tratamiento	DE (cm)	Tiempo (min)	% Remoción
1	3,5	45	50,59
2	3,5	30	42,50
3	1,45	45	68,75
4	1,45	30	39,98

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 14, Se puede apreciar, que el mayor porcentaje de remoción fue del 68,75%, se alcanzó a una distancia entre electrodos de 1.45 [cm] y un tiempo de electrocoagulación de 45 [min].

4.3.1.1. Análisis de varianza

La tabla ANOVA divide la variabilidad en % Remoción de carga orgánica en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos. (Montgomery, 1991). Los P-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que si los P-valores son inferiores a 0.05, estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en % Remoción de carga orgánica para un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 15. Análisis de Varianza 1

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor-P
A: Distancia entre electrodos	250,576	1	250,576	13,25	0,0220
B: Tiempo de electrocoagulación	417,466	1	417,466	22,07	0,0093
AA	7,30084	1	7,30084	0,39	0,5681
AB	106,916	1	106,916	5,65	0,0762
BB	17,6289	1	17,6289	0,93	0,3890
Error total	75,6661	4	18,9165		
Total (corr.)	869,25	9			

Fuente: Elaboración propia

A partir de la tabla, se puede determinar que tanto la distancia entre electrodos, como el tiempo de electrocoagulación son factores significativos en el proceso para la remoción de carga orgánica, debido a que presentan valores P menores a 0.05. Se obtuvo un valor de $R^2 = 80.41\%$, lo cual indica que el modelo explica en un 80.41% la variabilidad en el porcentaje de remoción.

4.3.2. Voltaje y tipo de electrodo

Con el fin de evaluar los diferentes valores de voltaje y tipo de electrodos buscando encontrar las condiciones óptimas de operación que disminuyan la concentración de carga orgánica se realizaron los ensayos preliminares, en los cuales se utilizó el diseño factorial en 3 niveles (Statgraphics 5.1). Las variables evaluadas fueron: voltaje y tipo de electrodos (Fe y Al). Los ensayos se realizaron por duplicado con un tiempo de residencia de 45 [min], una distancia entre los electrodos de 1.45 (previamente optimizados) y con 8 electrodos para cada prueba.

Tabla 16. Variables para el diseño experimental 2

FACTOR	VARIABLE	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
FACTOR A	VOLTAJE (V)	2	4	6
FACTOR B	TIPO DE ELECTRODO (TE)*	1	2	3

Fuente: Elaboración propia

*Los niveles del tipo de electrodos son una denominación que corresponde a: (1) ambos electrodos de Al, (2) un electrodo de Al y un electrodo de Fe y (3) ambos electrodos de Fe.

Los resultados de los porcentajes de remoción de carga orgánica de los 9 tratamientos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 17. Resultados de los ensayos preliminares del diseño experimental 2

N° TRATAMIENTO	VOLTAJE (V)	TE	% REMOCION REPLICA 1	% REMOCION REPLICA 2
1	2	1	30,55	37,14
2	4	1	20,39	27,89
3	6	1	55,11	50,00
4	2	2	43,58	46,36
5	4	2	65,80	60,24
6	6	2	69,67	70,59
7	2	3	10,81	15,67
8	4	3	36,46	38,45
9	6	3	20,08	25,45

Fuente: Elaboración propia

Para cada interacción entre los valores de voltaje y tipo de electrodo, se puede apreciar que el mayor porcentaje de remoción de carga orgánica fue del 70.59%, el cual se alcanzó a unas condiciones de 6 voltios y con electrodos de aluminio (ánodo) y hierro (cátodo).

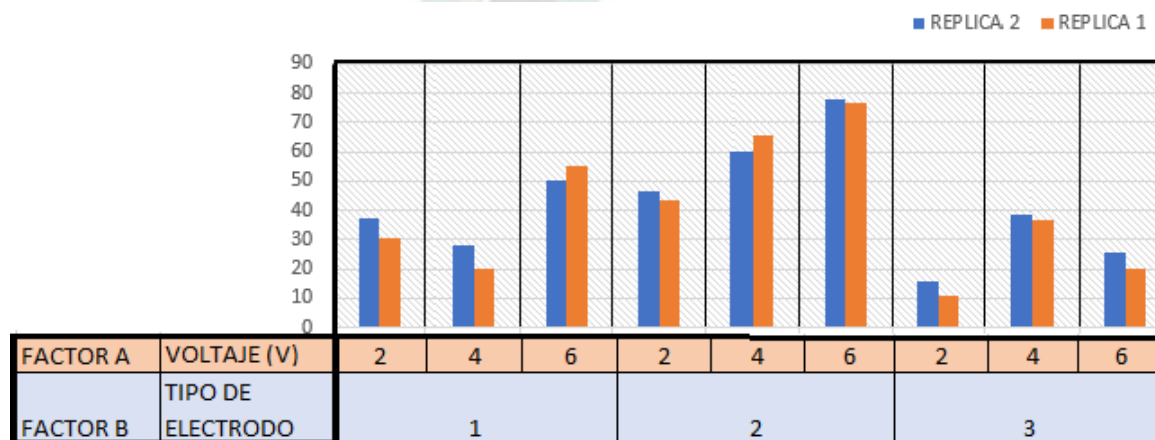


Ilustración 1. Porcentaje de remoción de carga orgánica para los 9 tratamientos.

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.1. Análisis de varianza

Se establece un nivel de confianza del 95%, aceptándose como significativos aquellos factores que tengan un valor-P error menor a 0.05. Ver tabla.

Tabla 18. Análisis de Varianza 2

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P	
Modelo	3560,88	7	508,70	90,05	0,0003	Significante
A-VOLTAJE	293,55	1	293,55	51,96	0,0020	
B-TIPO DE ELECTRODO	55,76	1	55,76	9,87	0,0348	
AB	4,16	1	4,16	0,7367	0,4391	
A ²	20,13	1	20,13	3,56	0,1321	
B ²	2098,51	1	2098,51	371,49	< 0,0001	
A ² B	386,92	1	386,92	68,49	0,0012	
AB ²	59,94	1	59,94	10,61	0,0312	
A ³	0,0000	0				
B ³	0,0000	0				
Residual	22,60	4	5,65			
Falta de ajuste	5,17	1	5,17	0,8902	0,4150	No significante
Puro Error	17,43	3	5,81			
Total corr	3583,48	11				

Fuente: Elaboración propia

El valor del modelo F de 90,05 implica que el modelo es significativo. Solo hay un 0,03% de posibilidades de que un valor F tan grande pueda ocurrir debido al ruido.

Los valores P inferiores a 0,0500 indican que los términos del modelo son significativos. En este caso, A, B, B², A²B, AB² son términos significativos del modelo. Los valores superiores a 0,1000 indican que los términos del modelo no son significativos.

El valor F de falta de ajuste de 0,89 implica que la falta de ajuste no es significativa en relación con el error puro. Hay un 41,50% de posibilidades de que se produzca un valor F de falta de ajuste tan grande debido al ruido. La falta de ajuste que resultó no significativa es buena, ya que queremos que el modelo se ajuste. Se obtuvo un valor de R² = 99,37 %, lo cual

indica que el modelo explica en un 99,37 % la variabilidad en el porcentaje de remoción, para un tiempo de electrocoagulación de 45 [min].

4.4. COMPORTAMIENTO DE TEMPERATURA Y PH

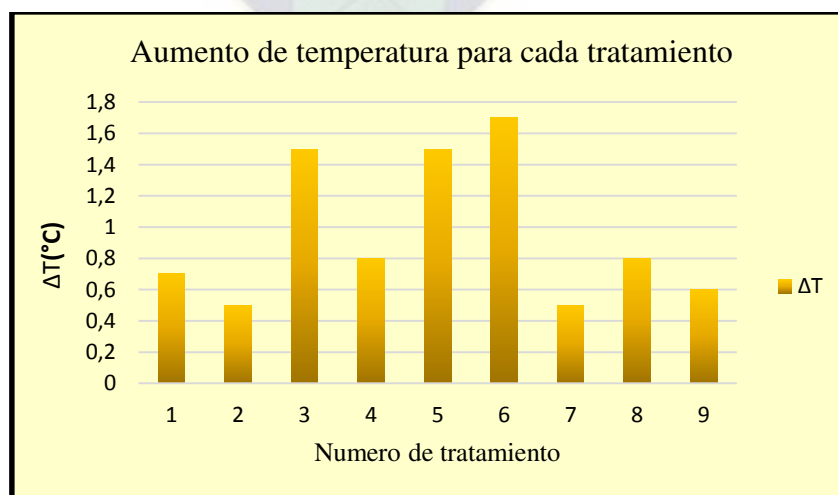
4.4.1. Temperatura

Durante los tratamientos se pudo observar un aumento de la temperatura de la solución, como consecuencia de la liberación de calor de la reacción entre la solución y los electrodos. Además de, la diferencia de potencial aplicada.

Tabla 19. Variación de temperatura de ensayos preliminares del diseño experimental 2

N° tratamiento	Voltaje (V)	TE	T inicial (°C)	T final (°C)	ΔT (°C)
1	2	1	18,0	18,7	0,7
2	4	1	9,8	10,3	0,5
3	6	1	13,6	15,1	1,5
4	2	2	16,7	17,5	0,8
5	4	2	15,9	17,4	1,5
6	6	2	16,3	18,0	1,7
7	2	3	9,6	10,2	0,5
8	4	3	12,9	13,7	0,8
9	6	3	13,9	14,5	0,6

Fuente: Elaboración propia



Grafica 9. Aumento de temperatura para cada tratamiento

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la tabla y el grafico anterior, el tratamiento 6 resulto ser en el que tuvo mayor aumento de temperatura de 1.7°C , se puede deducir que fue porque se aplica un potencial de 6V al tratamiento el cual es el voltaje más alto utilizado en las pruebas preliminares.

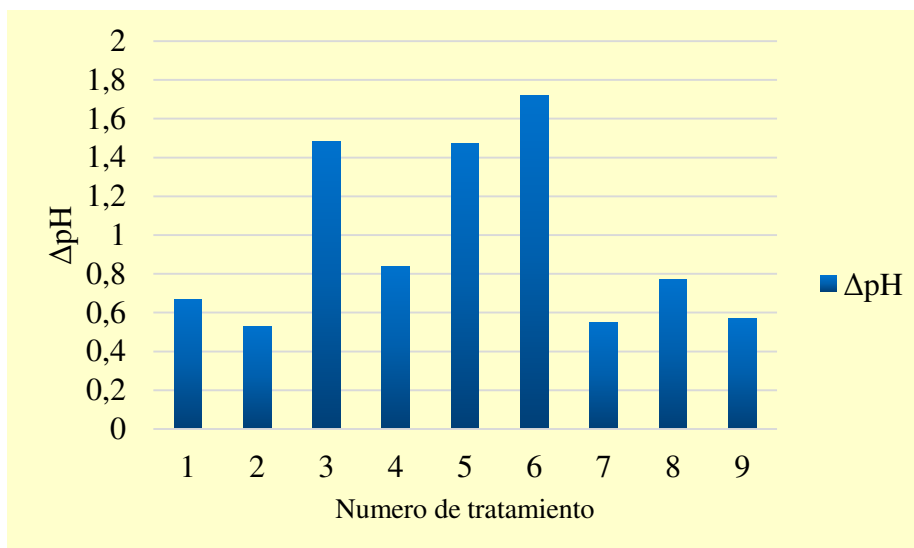
4.4.2. Potencial de hidrogeno (pH)

Durante los tratamientos se observó un incremento del pH de la solución, este fenómeno se da como consecuencia de la disociación de especies solubles de los electrodos (hidróxidos y poli hidróxidos) con la generación de iones OH^- en la superficie del cátodo durante la electrocoagulación tanto, para los electrodos de Fe como de Al. A pH altos, la carga orgánica como los hidróxidos de hierro y aluminio se precipitan (precipitación química), incrementando la remoción de carga orgánica.

Tabla 20. Variación del potencial de hidrogeno de los ensayos preliminares del diseño experimental 2

N° tratamiento	Voltaje (V)	TE	pH inicial	pH final	ΔpH
1	2	1	4,42	5,09	0,67
2	4	1	4,66	5,19	0,53
3	6	1	4,42	5,9	1,48
4	2	2	4,66	5,5	0,84
5	4	2	4,66	6,13	1,47
6	6	2	4,14	5,86	1,72
7	2	3	3,55	4,1	0,55
8	4	3	3,55	4,32	0,77
9	6	3	4,42	4,99	0,57

Fuente: Elaboración propia



Grafica 10. Aumento de pH para cada tratamiento

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la tabla y el grafico anterior, el tratamiento 6 resulto ser en el que tuvo mayor aumento de ph de 1.72.

4.4.3. Determinación de fuerza electromotriz de la celda

Como se mencionó anteriormente es la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo de la celda.

$$E_{eq} = E_{red. \text{ Cátodo}} + E_{(ox. \text{ Ánodo})} \quad (28)$$

El cálculo de los potenciales de reducción del cátodo como del ánodo se realizó en condiciones no estándar es decir a las condiciones reales a las que se trabajaron, y reemplazando en la ecuación de NERNST se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 21. Determinación de fuerza electromotriz de la celda

ARMADO	REACCIONES REDOX		Potencial de red. (V)		Eeq = Ecat - E ánodo(V)
	ANODO	CATODO	ANODO	CATODO	
Al (+)-Al (-) / Al (+)-Fe (-)	AL/AL+3	H+/H2	1,78	-0,23	1,55
Fe (+)-Fe (-)	FE/FE+2	H+/H2	-0,61	-0,23	-0,84

Fuente: Elaboración propia

4.4.4. Determinación del fem de trabajo

Una vez realizado todos los tratamientos preliminares se realizó un estudio de determinación de la cantidad de fem de trabajo teórico necesario para cada tratamiento y se comparó con los potenciales aplicados para conocer si el potencial necesario para que se produzca las reacciones de oxidación como reducción de los electrodos, para vencer las polarizaciones y sobrepotenciales presentes en la celda, fue aplicado correctamente.

Reemplazando datos en la ecuación ya definida:

$$E_{trabajo} = E_{rev}^{\circ} + \eta_{IR} + \sum \eta_{gases} \quad (29)$$

Se llega a tener los resultados mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 22. Determinación de Fem de trabajo para el tratamiento 3


TRAT.	E aplicado (V)	REACCIONES REDOX		Potencial de oxi(ánodo) y red (cátodo) (V)		Fem reversible	η_r (V)	sobrepotenciales de gases			fem trabajo (V)
		ANODO	CATODO	ANODO	CATODO	$E_{eq} = E_{cat} + E_{ánodo}(V)$		η_{O2} (V)	η_{H2} (V)	η_{CL2} (V)	
3	6	AL/AL+3	H+/H2	1,78	-0,23031	1,55	0,0265	0,9977	0,2303	1,396	3,74

Fuente: Elaboración propia

Con los datos mostrados en la tabla anterior se puede concluir que para que se produzca las reacciones redox considerando sobrepotenciales y las polarizaciones, la columna de fem de trabajo nos muestra cuanto es el valor de voltaje necesario para el tratamiento, en el tratamiento donde mejores resultados de remoción ha mostrado el número 3, el voltaje aplicado es de 6 [V], debería ser de 3.74 [V], se excede en 2.26 [V], sin embargo, en la tabla no se está considerando la pasivación del aluminio la cual indica que a bajos potenciales es necesario aplicar un sobrevoltaje, para así llegar a altos resultados de remoción de carga

orgánica, por lo tanto, al análisis que se puede llegar es el siguiente, si aplicamos solo 3.74 [V] el porcentaje de remoción no es más alto a diferencia de cuando se aplica 6 [V].





CAPITULO 5

DIMENSIONAMIENTO Y

CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR

ELECTROQUÍMICO OPTIMO

5.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN OPTIMAS

A continuación, en la tabla 23 se presentan las condiciones óptimas obtenidas a partir del análisis estadístico realizado en las pruebas preliminares.

Tabla 23. Condiciones consideradas optimas

Factor	Óptimo
Distancia entre electrodos (DE)	1,45
Tiempo de electrocoagulación	45
Voltaje (V)	6,0
Tipo de electrodo (TE*)	1 y 2

Fuente: Elaboración propia

5.2. DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR

El diseño del reactor debe ser tal que la densidad de corriente sea uniforme en todos los electrodos y preferiblemente alta, el ánodo y cátodo se coloquen cerca uno del otro y que la celda contenga más de un par de electrodos, de esta manera, la conversión puede ser de casi el 100%.

La celda de electrocoagulación fue dimensionada considerando una distribución volumétrica que contempla tres regiones: una región superior para el depósito de lodos de flotación o lodos menos densos y las espumas, llamada zona de flotación, una región media de reacciones electroquímicas, llamada zona de reacción en donde se encuentran los electrodos y una región inferior, llamada zona de sedimentación donde se depositan los lodos de precipitación o lodos más densos, como se muestra en la siguiente figura:

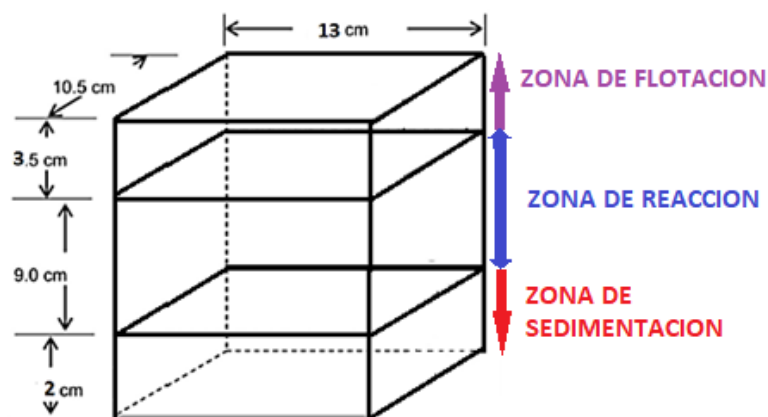


Figura 17. Dimensiones de reactor optimizado

Fuente: Elaboración propia

Con las condiciones mostradas en la tabla 23, se realizó el dimensionamiento y la construcción del reactor electroquímico para óptimas condiciones, de esta manera lograr un resultado optimizado.



Fotografía 11. Armado del reactor optimo

Fuente: Elaboración propia

5.3. OPTIMIZACIÓN DE RESULTADOS

Para la optimización se utilizó el programa Design Expert 12, mediante la metodología de superficie de respuesta (MSR), con el objetivo de encontrar la zona donde se encuentra el valor optimo y que proporcione valores razonables de la variable respuesta.

5.3.1. Diseño Central Compuesto – Superficies de respuesta

El análisis estadístico del modelo de superficie de respuesta, como lo predijo el diseño factorial 3^2 , el modelo cubico tuvo un ajuste adecuado. La medida de la cantidad de reducción en la variabilidad de la respuesta que se obtiene al utilizar las variables de regresión en el modelo arrojado, R^2 , fue de 0.9937 y el estadístico R^2 ajustada de 0.9827.

La grafica de contornos de este modelo se muestra a continuación junto a su representación en 3D, donde el máximo porcentaje de remoción se encuentra en la zona de color rojo, quiere decir que es la zona donde se encuentran el valor óptimo de respuesta.

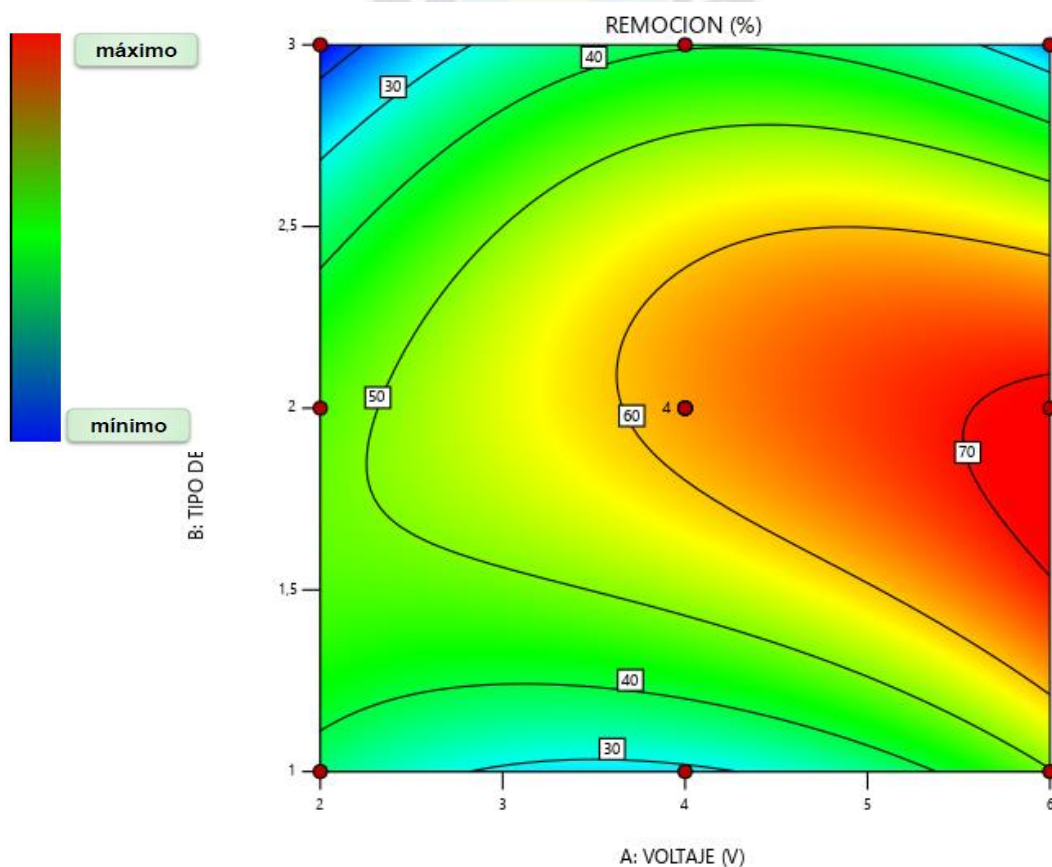


Ilustración 2. Representación de la gráfica de contornos del modelo cubico

Fuente: Elaboración propia

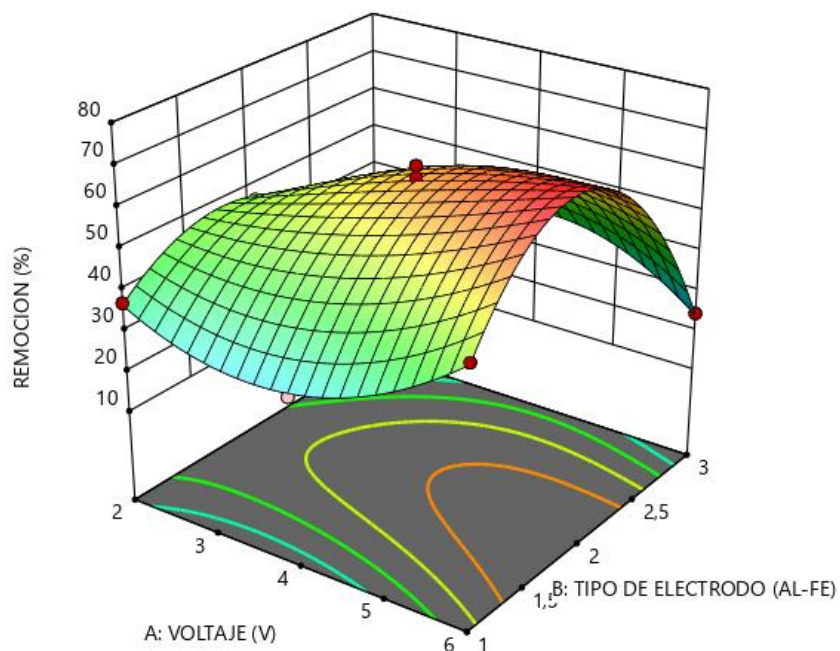


Ilustración 3. Representación 3D de la superficie de respuesta del modelo cubico.

Fuente: Elaboración propia

5.3.2. Optimización Gráfica

La siguiente ilustración muestra la superposición de las gráficas de contorno para la respuesta. En ello se observa el espacio del diseño de la mejor solución (área amarilla).

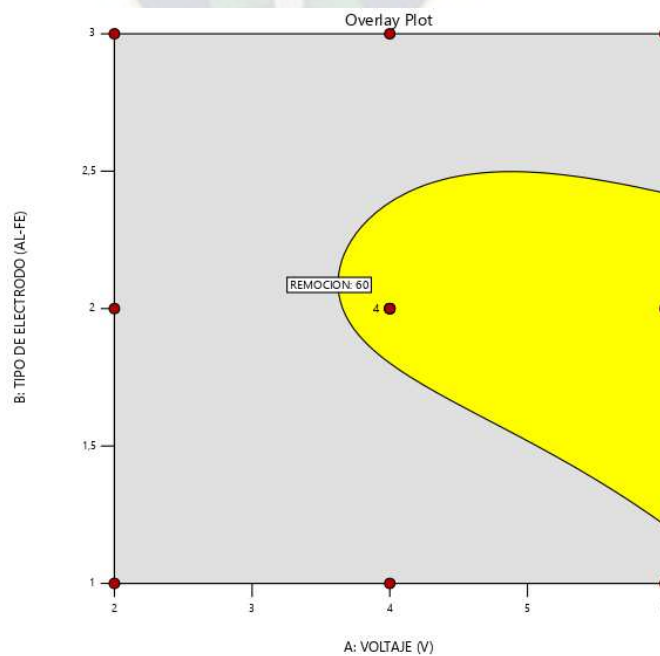


Ilustración 4. Representación de la optimización grafica del modelo.

Fuente: Elaboración propia

Después de analizar las gráficas resultantes mostradas anteriormente se consideró necesario optimizar los 4 tratamientos seleccionados con porcentaje de remoción orgánica mayor al 50% y con tipo de electrodo 1(ánodo y cátodo: aluminio) y 2 (ánodo: aluminio y cátodo: hierro), entre los que se encuentran los tratamientos 3,4,5 y 6 y para la agitación de la muestra se añadirá a la celda una bomba de forma que la muestra este en recirculación todo el tiempo de residencia, las pruebas se realizaran con un volumen de 1,1 [l] de muestra y con 8 electrodos.

Manteniendo iguales los valores iniciales de pH y conductividad de la muestra. A continuación, se presentan los resultados de las pruebas que se consideraron ser optimizadas para encontrar el valor optimo:

Tabla 24. Resultados de las pruebas consideradas óptimas

Nº TRATAMIENTO	VOLTAJE (V)	TIPO DE ELECTRODO	% REMOCIÓN
3	6	1	50,00
4	2	2	46,36
5	4	2	60,24
6	6	2	69,91

Fuente: Elaboración propia

Cada muestra tratada pasara por un proceso de centrifugado, paralelamente pasara por los procesos de filtración por filtro de arena y carbón activado, con el objetivo de demostrar que mediante estos procesos se elimina la mayor cantidad de flóculos formados en el tratamiento, realizando el respectivo cálculo del porcentaje de remoción obtenido después de cada proceso.

Los resultados de la optimización de resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 25. Tratamiento de electrocoagulación en celda con bomba y 8 electrodos

% Remoción de carga orgánica						
N° de trat.	V (V)	TE	I (A)	M. Centrifugada	M. Filtrada "filtro de arena"	M. Filtrada carbon activado
3	6	1	1,33	64,92	73,05	81,15
4	2	2	0,24	56,30	70,45	74,55
5	4	2	0,53	61,06	65,73	71,22
6	6	2	1,25	63,43	71,89	76,10

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la anterior tabla, el mayor porcentaje de remoción se obtuvo en el tratamiento 3, por lo que se considera el óptimo.

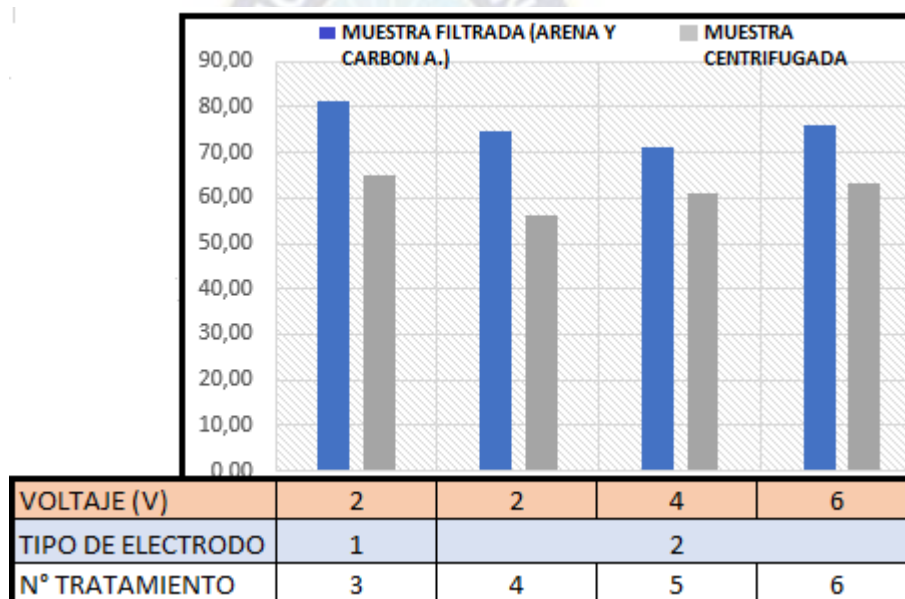


Ilustración 5. Porcentaje de remoción de carga orgánica para la optimización de resultados de los 4 tratamientos.

Fuente: Elaboración propia

5.3.3. Balance de masa del tratamiento óptimo

El balance se realizó para el tratamiento óptimo en un día normal de operación de la celda, el balance de masa se realizó en función al volumen como se muestra a continuación:

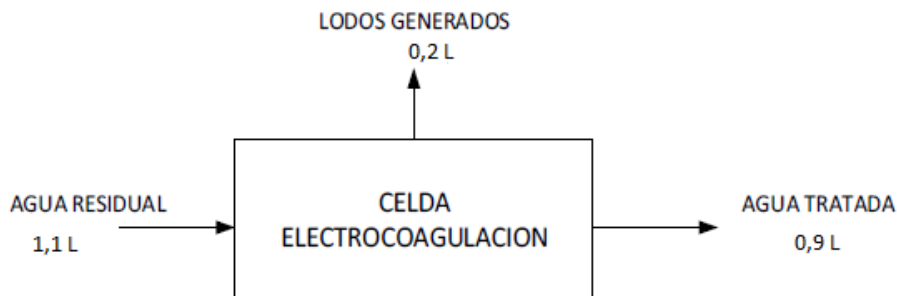


Ilustración 6. Balance de masa en la celda de electrocoagulación

Fuente: Elaboración propia

Por lo que para tratar 1 [m³] de agua residual se tendrá una generación de lodos de:

$$1\text{m}^3 \times \frac{1000\text{l}}{1\text{m}^3} \times \frac{0,2\text{l lodos}}{1,1\text{l}} = 181,1\text{l lodos}$$

5.3.3.1. Balance de masa en los filtros de arena

La cantidad de solidos suspendidos removidos en los filtros de arena es:

$$X = (C_0 - C_f) \times V$$

$$X = \left(1869,4 \frac{\text{mg}}{\text{l}} - 586,7 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) \times 1,1\text{l}$$

$$X = 1410,97 \text{ mg de solidos suspendidos}$$

5.3.3.2. Balance de masa en los filtros de carbón activado

La cantidad de solidos suspendidos removidos en los filtros de arena es:

$$X = (C_0 - C_f) \times V$$

$$X = \left(586,7 \frac{\text{mg}}{\text{l}} - 266,7 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) \times 1,1\text{l}$$

$$X = 352 \text{ mg de solidos suspendidos}$$

5.3.4. Comportamiento de temperatura, pH y turbidez

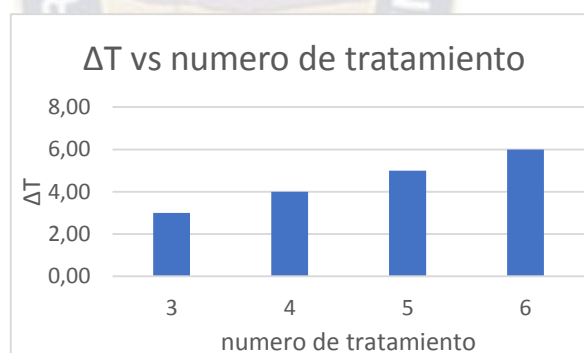
5.3.4.1. Temperatura

Durante la optimización de los 4 experimentos se pudo observar un aumento de la temperatura de la solución como consecuencia de la liberación de calor de la reacción entre la solución y los electrodos. Además de, la diferencia de potencial aplicada y la bomba en funcionamiento.

Tabla 26. Variación de temperatura

N° de tratamiento	Temperatura (°C)		
	Inicial	Final	Δt (°C)
3	17,5	22,50	5,00
4	17	21,50	4,50
5	18	23,00	5,00
6	18,5	26,50	8,00

Fuente: Elaboración propia



Grafica 1. Aumento de temperatura para cada tratamiento

Fuente: Elaboración propia

Como se esperaba el mayor aumento de temperatura se notó en el tratamiento N°6, el cual fue de 8 [°C], debido al voltaje aplicado el cual es el mayor.

5.3.4.2. Potencial de hidrogeno (ph)

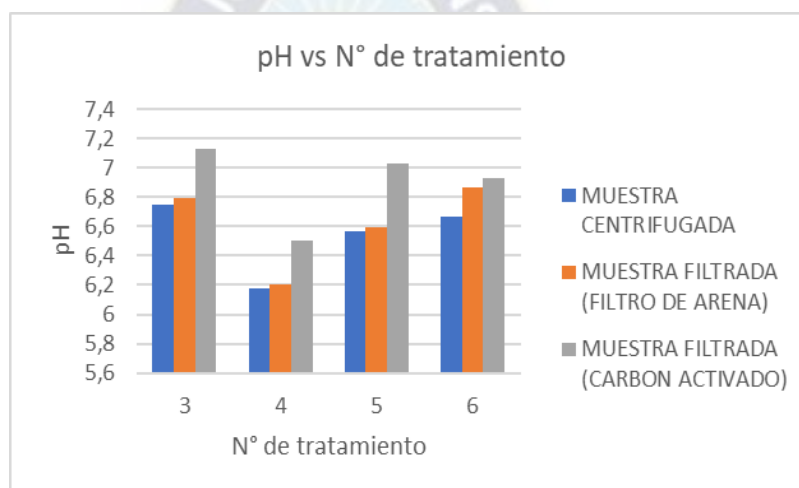
Para todos los 4 experimentos se observó un incremento promedio del pH de la solución después del proceso de electrocoagulación en la celda con bomba. La variación del

ph para una muestra decantada, filtrada (filtro de arena) y absorbida (carbón activado) se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 27. Variación de potencial de hidrogeno

N° de trat.	Potencial de hidrogeno (ph)		
	M. Centrifugada	M. Filtrada (filtro de arena)	M. Adsorbida (carbón activado)
3	6,75	6,79	7,13
4	6,18	6,20	6,89
5	6,57	6,59	7,03
6	6,67	6,87	6,93

Fuente: Elaboración propia



Grafica 2. Aumento de pH para cada tratamiento

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la gráfica anterior se observa que el pH va en aumento cuando las muestras tratadas pasan por el filtro de arena y de carbón activado a diferencia de cuando solo es centrifugada, debido que la separación de flóculos es más efectiva por esos dos procesos, se puede apreciar también que en el tratamiento número 3 se cuenta con un valor de pH mayor respecto los tratamientos 4, 5 y 6, lo que confirma que es el óptimo.

5.3.4.3. Turbidez

La turbidez muestra una disminución visual y numérica considerable para todos los tratamientos realizados, debido a que cuando la solución está muy concentrada o muy

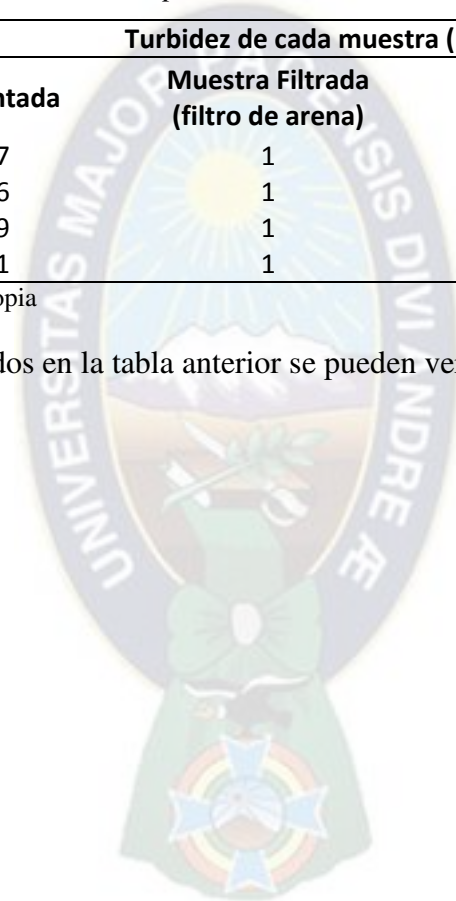
contaminada el aspecto que esta presenta es de un color turbio, como lo presenta la solución inicial un color rosa amarillo turbio con una turbidez de 425 [NTU], pero una vez que esta pasa a ser tratada por electrocoagulación, se generan flóculos que al precipitar y ser retirado, queda una solución más clara al ser filtrada con filtro de arena y carbón activado, como se muestra en la siguiente tabla:

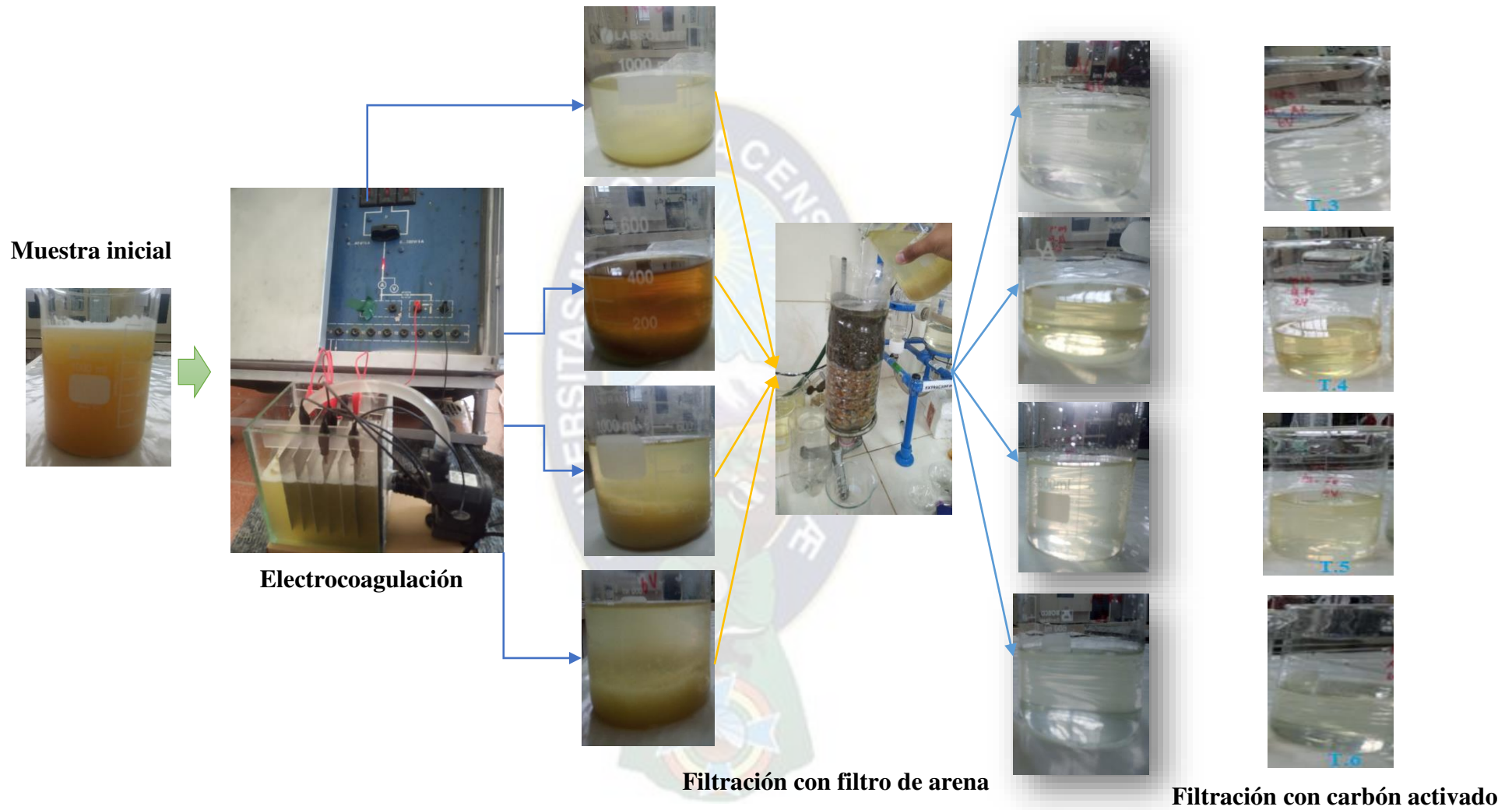
Tabla 28. Variación de turbidez para los tratamientos optimizados

N°	Turbidez de cada muestra (NTU)		
	Decantada	Muestra Filtrada (filtro de arena)	Muestra Filtrada (carbón activado)
3	17	1	1
4	66	1	1
5	39	1	1
6	31	1	1

Fuente: Elaboración propia

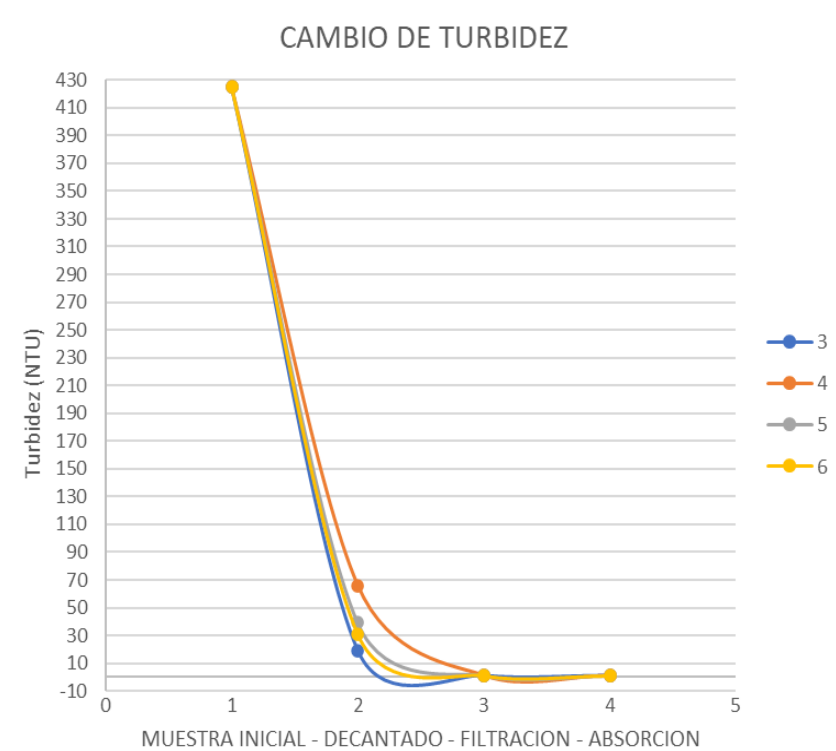
Los valores mostrados en la tabla anterior se pueden verificar mediante las siguientes fotografías:





Fotografía 12. Cambio de turbidez de una muestra inicial después de ser tratada, pasada por los procesos de filtrado con filtro de arena y con carbón activado.

Fuente: Elaboración propia



Grafica 3. Cambio de turbidez

Fuente: Elaboración propia

5.4. PARÁMETROS ÓPTIMOS PARA EL PROCESO

En la tabla N°25, podemos observar que el mayor porcentaje de remoción se logró en el tratamiento N°3, el cual es de 81.15%, donde la muestra tratada paso por un proceso de filtración de arena y posteriormente con carbón activado, además se puede observar las tablas 27 y 28, tanto el incremento de pH y el valor de la turbidez para este tratamiento muestran los mejores resultados, por lo que se considera el tratamiento óptimo.

Se resume en los siguientes parámetros después de una optimización de los resultados:

Tabla 29. Parámetros de optimización de resultados

Factor	Optimo
Distancia entre electrodos	1 [mm]
Tiempo de electrocoagulación	35 [min]
Voltaje	6 [V]

Tipo de electrodo	Aluminio
-------------------	----------

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Variables del electrodo

Material anódico y catódico	Aluminio (material relativamente barato comparados con otros optativos. Buena remoción de contaminantes)
Numero de electrodos:	8 placas
Geometría de electrodos:	Rectangulares
Área geométrica:	10.4 x 10 cm ²
Espesor:	0.6mm
Distancia entre electrodos:	10mm

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente fotografía, se muestra el resultado de la construcción del reactor optimo con los electrodos adecuados a las características mostradas en la tabla 32.



Fotografía 13. Reactor optimo

Fuente: Elaboración propia

5.5. ANALISIS DE PARÁMETROS DEL TRATAMIENTO OPTIMO

La variación de los resultados de los parámetros antes del tratamiento N°3, considerado el óptimo, como después de este tratamiento se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 31. Resultados de los parámetros antes y después del tratamiento 3

Parámetros	Antes del tratamiento	Después del tratamiento	Límite permisible RASIM	% Remoción
Ph	4,63	7.13	6 a 9	
Turbidez (NTU)	425	1	<10	99.80
Sólidos totales (mg/l)	3088.9	415.5	560	86.55
Sólidos volátiles (mg/l)	2461.1	240		90,25
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	1507.8	5,66	60	99,67
Saponina(mg/ml)	29,44	2,84		90.35
DQO (mgO ₂ /l)	2400	240	250	90,00
DBO (mgO ₂ /l)	1097.8	59	80	94,62

Fuente: Elaboración propia

Como se puede notar en la tabla anterior parámetros como pH, turbidez, sólidos suspendidos, DQO, y DBO si se encuentran bajo el límite permisible según el RASIM (Anexo L).

El porcentaje de remoción de la tabla anterior es calculada entre la columna de datos del ingreso al sistema de tratamiento y final del tratamiento, es decir desde que la muestra ingresa al reactor hasta que después del tratamiento pasa por un filtro de arena y de carbón activado.

5.6. COMPARACION DE RESULTADOS CON OTROS TRATAMIENTOS

Como se mostró en marco teórico, se cuenta con antecedentes de otros tratamientos realizados al mismo tipo de efluente del presente proyecto, con la diferencia de que se trata de tratamientos convencionales, en la siguiente tabla se muestran resultados de algunos parámetros antes y después del tratamiento actual en comparación con un tratamiento convencional del efluente:

Tabla 32. Diferencia de resultados entre el tratamiento por electrocoagulación y un tratamiento químico

Tratamiento	Parámetro	Antes del tratamiento	Después del tratamiento	% Remoción
Electrocoagulación	Turbidez (NTU)	425	1	
	DQO (mgO ₂ /l)	5600	240	95,71
	DBO (mgO ₂ /l)	1097,8	59	94,62
	Sólidos suspendidos totales(mg/l)	2640	31	98,83
Químico (dosificación de Ca (OH) ₂)	Turbidez (NTU)	720	6,95	
	DQO (mgO ₂ /l)	1352	86	93,64
	DBO (mgO ₂ /l)	620	118	80,97
	Sólidos suspendidos totales(mg/l)	1388	667	51,95

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior, primeramente, los valores mostrados antes del tratamiento son de la muestra tomada del punto de salida de los lavadores de quinua, y los valores mostrados después del tratamiento son del punto final del tratamiento, ahora bien, analizando los resultados de los porcentajes de remoción alcanzado de los parámetros DQO, DBO y sólidos suspendidos totales, presentan un porcentaje de remoción mayor respecto al tratamiento convencional.

Otro parámetro importante a analizar es el de la saponina, se cuenta con antecedentes de un tratamiento biológico realizado al efluente de lavado de quinua, con la diferencia que este efluente es de la empresa COMRURAL XX1. S.R.L y el del presente proyecto es de la empresa IRUPANA AOF. S.A., pero el método de análisis de este parámetro que se realizó en ambos proyectos es el mismo, los resultados de estos análisis se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 33. Diferencia de resultados entre el tratamiento por electrocoagulación y un tratamiento biológico

Tratamiento	Parámetro: saponina (mg/ml)		% Remoción
	Antes del tratamiento	Después del tratamiento	
Electrocoagulación	29,44	2,84	90.34
Biológico (enzimas producidas por hongos)	6,36	2,61	58,95

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, el porcentaje de remoción de saponina del tratamiento por electrocoagulación es de 90.34% mayor que en el tratamiento biológico de 58,95%, esta diferencia se podría deber a que no se trata del efluente de la misma empresa, notando también que el contenido de saponina antes del tratamiento para este proyecto es mucho mayor que el del tratamiento biológico, debido a que el efluente sin tratar de IRUPANA AOF. S.A., ha demostrado contar con alto contenido de carga orgánica.

Por último, se mencionará algunas ventajas y desventajas del método de electrocoagulación a diferencia de los métodos convencionales se pueden mostrar a continuación:

Tabla 34. Ventajas y desventajas entre el método de electrocoagulación y el método convencional

Factores a diferenciar	Electrocoagulación	Convencional
Equipos	Equipos simples y de fácil operación.	Equipos con la eficiencia al momento de remover componentes disueltos en el agua.
Almacenamiento y requerimiento de químicos	No aplica.	Se requiere almacén de reactivos y sistemas para la preparación de la solución.
Remoción	Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes. El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.	A mayor cantidad de reactivo usado mayor remoción de contaminantes.
Factores que favorezcan la coagulación		El reactivo empleado debe encontrarse entre los mejores coagulantes, según bibliografía son sulfato de aluminio o hierro.
Aspectos físicos	Se logra generar aguas casi incoloras e inodoras.	Respecto el valor de turbidez final del efluente no se considera casi incolora.

Costos	El costo de operación implica el costo de energía eléctrica y en la reposición de electrodos de sacrificio.	El costo siempre es mayor en el uso de reactivos debido a que se debe considerar el costo de almacenamiento y acondicionamiento.
---------------	---	--

Fuente: Elaboración propia





CAPITULO 6
ANALISIS ECONOMICO DEL
TRATAMIENTO

6.1. COSTO DE OPERACIÓN DEL TRATAMIENTO

En esta sección para llevar a cabo el análisis económico del tratamiento realizado, es necesario determinar los costos del mismo a las condiciones de operación que mayor porcentaje de remoción de carga orgánica total presentan, y que para el caso particular de estudio corresponden a el tratamiento 3, con ánodo y cátodo de aluminio, y una distancia entre electrodos de 1 cm.

La información requerida para calcular los costos operacionales se resume en las tablas 39 y 40, donde se muestra la tarifa de energía eléctrica en La Paz (Categoría: General) a partir de diciembre de 2019.

Tabla 35. Información para el cálculo de los costos operacionales

Parámetro	Costo (Bs)
a: Electricidad (Bs/KWh)	0,881
b: Electrodo de aluminio (Bs/Kg)	61,91

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36. Condiciones durante el tratamiento optimo

Parámetro	Valor durante el tratamiento
Voltaje aplicado (V)	6
Intensidad de corriente (A)	1,33
Potencia eléctrica del rectificador (W)	7,98
Tiempo de tratamiento (h)	0,583
Volumen de agua tratada (L)	1,1

Fuente: Elaboración propia

Con base en lo anterior, el costo de operación es determinado usando la relación:

$$\text{Costo de operación} = C_o = a * C_{\text{energía}} + b * C_{\text{electrodo}} \quad (36)$$

Donde “a” es el costo de energía eléctrica y “b” es el costo del electrodo de aluminio al año 2020.

Costos por consumo de energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica para este procedimiento fue a causa de la utilización del rectificador eléctrico. Tal consumo se determinó mediante la ecuación:

$$C_{\text{energía}} = \frac{E * I * t_{EC}}{V} \quad (37)$$

Donde $C_{\text{energía}}$ es el consumo de energía, E es el voltaje aplicado al reactor de electrocoagulación, I es la intensidad de corriente, t_{EC} es el tiempo de electrólisis y V es el volumen de agua a tratar.

Costos por consumo de electrodo

calculó el consumo del electrodo a partir de la siguiente expresión matemática:

$$C_{\text{electrodo}} = \frac{I * t_{EC} * PM_{Al^{3+}}}{Z * F * V} \quad (38)$$

Donde $C_{\text{electrodo}}$ es el consumo del electrodo, I es la intensidad de corriente, t_{EC} es el tiempo de electrólisis, $PM_{Al^{3+}}$ es el peso molecular del aluminio, Z es el número de electrones transferidos, F es la constante de Faraday y V es el volumen de agua a tratar

A partir de la información brindada por la tabla 41 y 42, se determinaron los costos por consumo de energía eléctrica y consumo de electrodo.

Tabla 37. Resultado de consumo de energía y electrodo

Tiempo (min)	Consumo de energía (KW-h/L)	Consumo del electrodo (kg/L)
35	4,23182	6,6E-05

Fuente: Elaboración propia

El consumo del electrodo se calculó con la ecuación 38, el cual es un cálculo teórico, pero el que nos interesa es el experimental por lo que conociendo el peso del electrodo antes y después del tratamiento, y realizando la diferencia entre ambos pesos obtenemos el peso real consumido del electrodo el cual es de 4×10^{-4} [kg/L].


Remplazando datos en la ecuación 36 tenemos:

Tabla 38. Cálculo del costo de operación

Tiempo (min)	Costo de operación (Bs/L)	Costo de operación (Bs/m ³)
35	3,75	3749,99

Fuente: Elaboración propia

El costo de operación incluye el costo del material (principalmente electrodos), costo utilitario (principalmente energía eléctrica), costo de mantenimiento y otros costos fijos. En este estudio económico, el costo de la energía y el costo del electrodo se consideran los principales, por lo que, el mantenimiento y el costo fijo no son tomados en cuenta, entonces realizando según la tabla 44, se concluye que el costo de operación es de 3,75 [Bs/litro de muestra tratada] y de 3749,99 [Bs/metro cubico] de muestra tratada en 35 (min) de tiempo de residencia.



CAPITULO 7
CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES Y
BIBLIOGRAFIA

7.1. CONCLUSIONES

- Los parámetros fisicoquímicos de la muestra inicial resultaron ser:

Tabla 39. Características fisicoquímicas del efluente

PARAMETROS	UNIDAD	VALOR
Conductividad	(mS/cm)	0,51
PH		4,6
Turbidez	NTU	425
solidos totales	(mg/l)	2888.9
solidos volátiles	(mg/l)	2261.1
Saponina	(mg/ml)	29.44
DQO	(mgO ₂ /l)	2400
DBO	(mgO ₂ /l)	1097.8

Fuente: elaboración propia

- Para las pruebas preliminares se realizó la variación de los factores: distancia entre electrodos, tiempo de electrocoagulación, voltaje y tipo de electrodo, debido a que en bibliografía se encontró que se repetían y mostraban buenos resultados de remoción de carga orgánica.
- El dimensionamiento del reactor se realizó para un volumen de muestra de 1,1 [l] y con 8 electrodos, con las condiciones consideradas óptimas de los ensayos preliminares DE=1.45 [cm]. TE=45 [min], V=6 [V] y TE*=1, para la agitación se instaló una bomba de forma que la muestra este en recirculación y cada muestra tratada paso por dos procesos de filtración (filtro de arena y carbón activado)
- Se realizó un análisis estadístico del modelo de superficie de respuesta, como lo predijo el diseño factorial 3², el modelo cubico tuvo un ajuste adecuado debido al valor de R²=0.9937, en la optimización de los 4 tratamientos se mostró el aumento de porcentaje de remoción carga orgánica, cuando la muestra tratada pasa por los dos procesos de filtración, como se muestra en la tabla:

Tabla 40. Porcentaje de remoción de carga orgánica para tratamientos optimizados

N° de prueba	% Remoción de carga orgánica de muestra tratada		
	Centrifugada	Filtro de arena	Carbón activado
3	64,92	73,05	81,15
4	56,30	70,45	74,55
5	61,06	65,73	71,22
6	63,43	71,89	76,10

Fuente: elaboración propia

- El tratamiento óptimo resultó ser el N°3, porque: presenta una remoción de carga orgánica mayor al 80%, los electrodos utilizados son poco afectados y la muestra final presenta 1 [NTU] de turbidez (un color casi transparente).
- El parámetro DQO de la muestra inicial es de 5600 [mgO₂/l], si comparamos con 1352 [mgO₂/l] obtenido en el proyecto de tratamiento convencional, la empresa realizó una mejora en el proceso, debido a que se logra retirar una mayor cantidad de contaminantes, es decir que se desecha agua con un mayor contenido de carga orgánica.
- Realizada la evaluación económica del tratamiento resulto que el costo de operación es de 3,75 [Bs/litro de muestra tratada] y de 3749,99 [Bs/metro cubico] de muestra tratada en 35 (min) de tiempo de residencia. La tarifa de energía eléctrica en La Paz (Categoría: General), utilizada para este cálculo es de 0.881 [Bs/KW-h], a partir de diciembre de 2019.

7.2. RECOMENDACIONES

A continuación, se dan algunas recomendaciones para continuar con dicho estudio:

- Realizar tratamientos modificando factores como: conductividad y densidad de corriente; que afectan la electrocoagulación, de esta manera conocer si estos parámetros resultan ser significativos para el porcentaje de remoción de carga orgánica.

- Acompañar el tratamiento de electrocoagulación con procedimientos de tratamiento secundario diferente al utilizado en este proyecto, para retirar la mayor cantidad de flóculos formados durante el tratamiento, con el fin de verificar si se puede lograr un porcentaje de remoción mayor al obtenido en este proyecto.
- Diseñar una celda de electrocoagulación que en su parte superior cuente con un dispositivo mecánico que permita remover las espumas producidas.
- Finalmente, realizar estudios a los lodos generados durante el proceso de electrocoagulación de como poder aprovechar o por último desechar los mismos ya que representan un 18% aproximadamente de toda la muestra tratada.

7.3. BIBLIOGRAFIA

Alvarez , P. (2019). FEM DE TRABAJO. La Paz, Bolivia. Recuperado el 4 de diciembre de 2019

Cáceres Arenas, G. (2007). *Hidrometalurgia y Electrometalurgia*. Universidad de Atacama, Atacama. Obtenido de <http://www.ivan.cl>

Cazco Sanchez, A. J., & Jarrin , S. A. (2010). *Diseño, construcción y análisis de los parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación*. ESCUELA POLITECNICA NACIONAL, Quito.

El Diario. (31 de enero de 2019). Producción de quinua llegó a 70.000 toneladas. pág. 1.

Franklin, J. A. (1974). *Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*. Houston, Texas: National Association of Corrosion Engineers.

Garcia, E. C. (2012). *Evaluación del proceso de electrocoagulación sobre aguas de lavado con contenido de lactosuero*. UNIVERSIDAD DEL VALLE , Cali.

González, J. R. (2014). *Evaluación de reactores de electrocoagulación para el tratamiento de agua de purga de torres de enfriamiento*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO , Mexico.

- Ibarra, R. A. (28 de mayo de 2013). Oruro. Está en la ruta de la quinua y es el principal exportador con el 87% del total vendido al exterior en 2012. *Crece exportación de quinua 40 veces más que hace 10 años*, pág. 1. Recuperado el 20 de octubre de 2019
- León Echalar, G. (2012). *Diseño y construcción y evaluación de un reactor electroquímico para la reducción de DBO5, DQO Y SST provenientes de aguas residuales de LA PAPELERA S.A.* UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES, La Paz- Bolivia.
- Navarro, F. M. (2008). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS . Ciudad Real: Ediciones de la universidad Castilla-La Mancha.
- Rojas Forero, D. A., & Tierradentro Polania, E. (2018). *Evaluación técnico-financiera del método de electrocoagulación para tratamiento de agua asociada a procesos petroleros*. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA , Bogota.
- Rosado, R. (7 de octubre de 2019). Obtenido de google.com:
<https://www.fceia.unr.edu.ar/materialescivil/Publicaciones/C.pdf>
- Seves, D. L. (2007). *Fisico Quimica Metalurgica*. Santiago.
- Villarte, O. L. (2015). *degradación de saponinas mediante enzimas producidas por hongos nativos del altiplano*. PROYECTO DE GRADO, Universidad Mayor de San Andres, la paz. Recuperado el 5 de Febrero de 2020

CAPITULO 8

ANEXOS

ANEXOS

8.1. ANEXO A. DETERMINACIÓN DE POTENCIAL DE HIDROGENO

La medida del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes utilizadas en el análisis químico del agua. Prácticamente todas las fases del tratamiento del agua para suministro y residual, como la neutralización ácido-base, suavizado, precipitación, coagulación, desinfección y control de la corrosión, dependen del pH. A una temperatura determinada, la intensidad del carácter ácido o básico de una solución viene dada por la actividad del ion hidrógeno o pH.

Procedimiento

Para la medición de pH se necesita un potenciómetro calibrado, establecer el equilibrio entre electrodos y la muestra agitando ésta para asegurar su homogeneidad; la agitación será suave para reducir al mínimo el arrastre de dióxido de carbono. Para muestras tamponadas 0 con gran fuerza iónica, acondiciónense los electrodos después de limpiarlos, introduciéndolos en la muestra durante 1 minuto. séquense y sumérjense en otra porción nueva de la misma muestra, y léase el pH. Con soluciones diluidas, mal tamponadas, equilíbrense los electrodos por inmersión en tres o cuatro porciones sucesivas de la muestra. Tómese una muestra nueva para medir el pH.

Utilizando bien un medidor de pH con buenos electrodos, se puede conseguir una precisión de $\pm 0,02$ unidades de pH y una precisión de $\pm 0,05$ unidades de pH. Sin embargo, en condiciones normales, el límite de precisión es $\pm 0,1$ unidades de pH, especialmente para determinaciones en el agua y soluciones mal tamponadas.

8.2. ANEXO B. DETERMINACIÓN DE TURBIDEZ

La turbidez de un líquido es importante debido a muchas razones, según sea su utilización. La turbidez está causada por sólidos suspendidos, incluyendo limo arcilla, algas, microbios, materia orgánica y otras partículas delgadas insolubles en los medios de muestra. Las partículas hacen que la muestra tome un aspecto indefinido o turbio.

Procedimiento

- Para la medición de turbidez se necesita un turbidímetro (colorímetro) calibrado, y seguir los siguientes pasos:
- llenar una celda de muestra limpia con la solución de blanco hasta la marca de 10ml (usualmente agua destilada).
- Llenar la otra celda de muestra limpia con muestra hasta la marca de 10ml.
- Colocar el blanco en el compartimiento de la celda con la marca de diamante hacia el teclado numérico y tapar la celda con el escudo para la luz,



Figura 18. Procedimiento de medición de turbidez.

Fuente: Manual de análisis de agua HACH, EEUU, 2000.

- Presionar la tecla ZERO. Luego de dos segundos, en la pantalla se leerá: 0.00,
- Agitar y colocar la celda de muestra que contiene la muestra en el compartimiento de la celda y tapar con el escudo para la luz. Al tapar la celda

de muestra, colocar la superficie curva del escudo para la luz lo más cerca posible del teclado numérico para lograr un buen sellado contra la luz dispersa.

- Presionar la tecla READ. Luego de dos segundos el instrumento mostrara los resultados.

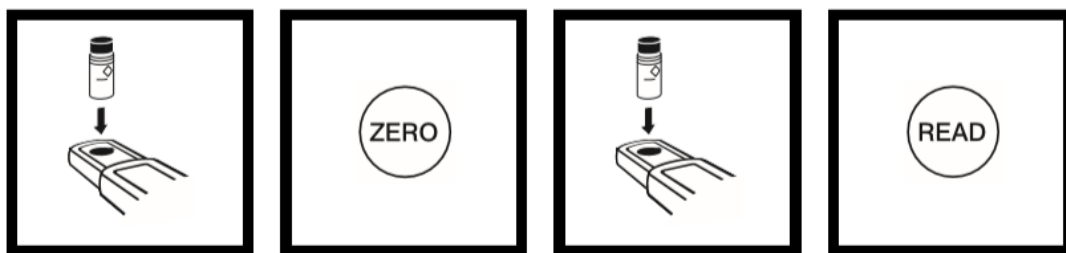


Figura 19. Procedimiento de lectura de turbidez.

Fuente: Manual de análisis de agua HACH, EEUU, 2000.

8.3. ANEXO C. DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD

La conductividad es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones y de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura de la medición. Las soluciones de la mayoría de los ácidos, bases y sales presentan coeficientes de conductividad relativamente adecuados. A la inversa, las moléculas de los compuestos orgánicos que no se disocian en soluciones acuosas tienen una conductividad muy escasa o nula.

Procedimiento

La medición de conductividad se realizó con un conductímetro calibrado, El HI 991300 ha sido diseñados para ofrecerle mediciones de pH, conductividad, sólidos disueltos totales y temperatura, el cual nos da datos de conductividad en unidades de mS/cm.

La muestra a analizar debe vaciarse en un vaso de 200ml, la muestra debe estar homogeneizada para posteriormente sumergir el sensor dentro del vaso y esperar hasta que la lectura del conductímetro se estabilice. Tomar nota de la lectura unas tres veces y sacar un promedio.



Figura 20. pH metro.

Fuente: <https://www.medicaexpo.es/prod/hanna-instruments/product-80622-649719.html>

8.4. ANEXO D. DETERMINACION DE SÓLIDOS TOTALES

Se refiere a la medida de los materiales disueltos y suspendidos presentes en el agua. Su control es fundamental para garantizar la calidad de una muestra de agua. Sólidos totales» es la expresión que se aplica a los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su consecutivo secado en estufa a temperatura definida. Los sólidos totales incluyen los «sólidos totales suspendidos», o porción de sólidos totales retenida por un filtro, y los «sólidos disueltos totales» o porción que atraviesa el filtro.

Una óptima caracterización de la materia orgánica puede llevarse a cabo mediante pruebas como la de sólidos volátiles.

Instrumentación

- Placas de evaporación: Placas de 100 ml de capacidad de porcelana, 90 mm diámetro.
- Horno de mufla para operar a 550 ± 50 °C.

- Desecador.
- Horno de secado, para operaciones a 103-105 °C.
- Balanza de análisis, capaz de pesar hasta 0,1 mg.

Procedimiento

Caliéntese la placa limpia a 103-105 °C durante una hora. Consérvase la placa en el desecador hasta que se necesite. Pesar inmediatamente antes de usar. Elíjase un volumen de muestra que proporcione un residuo entre 2,5 y 200 mg. Transfiérase un volumen medido de muestra bien mezclada a la placa pesada previamente y evapórese hasta que se seque en un baño de vapor o un horno de secado, Secar la muestra evaporada al menos durante una hora en horno a 103-105 °C, enfriar la placa en desecador para equilibrar la temperatura y pesar. Repítase el ciclo de secado, enfriado, desecación y pesado hasta obtener un peso constante.

Calculo

$$mg \text{ de solidos totales/l} = \frac{(A - B) * 1000}{vol. \text{ de muestra, ml}}$$

Donde:

A= peso de residuo seco + placa, mg.

B = peso de la placa, mg

8.5. ANEXO E. DETERMINACION DE SOLIDOS VOLATILES

El residuo obtenido con el método explicado de los sólidos totales se incinera, a peso constante, a una temperatura de 550 ± 50 °C. Los sólidos remanentes representan los sólidos totales fijos, disueltos o en suspensión, mientras que la pérdida de peso por ignición representa los sólidos volátiles. La determinación es útil para el control de las operaciones en plantas de tratamiento de aguas residuales, porque ofrece un cálculo aproximado de la cantidad de

materia orgánica presente en la fracción sólida del agua residual, lodos activados y residuos industriales.

Procedimiento

Incinérese el residuo obtenido con el método explicado de los sólidos totales. Se deberá elevar el horno a esta temperatura antes de introducir la muestra. Por lo general, la incineración sólo precisa de 15 a 20 minutos, pero obtener mejores resultados se colóquese 2 horas. Enfríese la placa o el disco de filtro al aire hasta que se haya disminuido el calor y transfíranse a un desecador para proceder a su enfriamiento final en una atmósfera seca, cuidando de no sobrecargar el desecador. Pénsese la placa o el disco tan pronto como se hayan enfriado para equilibrar la temperatura.

Calculo

$$mg \text{ de solidos volatiles/l} = \frac{(A - B) * 1000}{vol. \text{ de muestra, ml}}$$

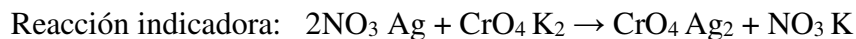
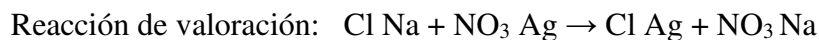
$$mg \text{ de solidos fijos/l} = \frac{(A - B) * 1000}{vol. \text{ de muestra, ml}}$$

8.6. ANEXO F. DETERMINACIÓN DE CLORUROS

El **método argento métrico o volumétrico** es recomendable para agua con concentraciones entre 1,5 y 100 mg/l de cloruros.

Este método es aplicable para la determinación de cloruros en aguas potables o superficiales, siempre que no tengan excesivo color o turbidez. Se basa en el método de Mohr. Sobre una muestra ligeramente alcalina, con pH entre 7 y 10, se añade disolución de $AgNO_3$ valorante, y disolución indicadora K_2CrO_4 . Los Cl^- precipitan con el ion Ag^+ formando un compuesto muy insoluble de color blanco. Cuando todo el producto ha precipitado, se forma el

cromato de plata, de color rojo ladrillo, que es menos insoluble que el anterior y nos señala el fin de la valoración.



Cálculo

Si lo que queremos son los mg/l de cloruros.

$$\text{ppm Cl}^- = \{ [(A*B) * N * 35,45] / v \} * 1000$$

Donde:

A = ml valoración de la muestra

S = ml valoración del blanco

V = normalidad de Ag NO₃

8.7. ANEXO G. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Representa la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en dióxido de carbono y agua.

Materiales y equipos

- Tubos de digestión, gradilla
- Calentador de bloques a 150°C
- Bureta
- Pipetas, micropipetas
- Dosificador de agua destilada (piseta)
- Agitador magnético para mezclar completamente

Reactivos

- **Solución de oxalato de potasio**
- **Reactivo ácido sulfúrico:** añádase sulfato de plata sobre ácido sulfúrico concentrado, en la relación de 5.3 g de sulfato de plata en 500 ml de ácido sulfúrico.
- **Solución de permanganato de potasio para titulación 0.4N:** disuélvase 39 g de sulfato ferroso amónico hexahidratado en agua destilada. Añádanse 20 ml de sulfúrico concentrado. Enfríese y dilúyase hasta 1000 ml.

Procedimiento

Mediante la siguiente tabla se tiene los volúmenes adecuados de reactivos y muestras.

Tabla 41. Volúmenes de reactivos utilizado para cada dilución de muestra madre

Dilución	Muestra (ml)	Solución de AgNO ₃ (ml)	Reactivo Ac. Sulfúrico (ml)	Solución de KMnO ₄ (ml)
1:99	1	0.1	10	10
1.5:98.5	1.5	0.1	10	10
2:98	2	0.1	10	10
5:99	5	0.1	10	10
10:99	10	0.1	10	10

Fuente: Elaboración propia

Colóquese la muestra en los tubos limpios y secos y añádase la solución de digestión.

Viértase con cuidado el reactivo sulfúrico en el tubo. Apriétese bien el tapón de los tubos e inviértase varias veces.

Colóquese los tubos en el digestor de bloques a 150°C durante dos horas. Enfríense a temperatura ambiente, quítense los tapones y añádanse dos gotas con ferroina. Agítase rápidamente en un agitador magnético mientras se titula con sal de Mohr 0.1 N.

Estandarización del valorante (blanco): añádanse los reactivos de acuerdo con la tabla a un tubo de digestión que contenga el volumen correcto de agua destilada que sustituye a la

muestra. Enfríese a la temperatura ambiente, añádanse dos gotas de ferroina y titúlese con la solución valorante.

La demanda química de oxígeno (DQO) se calcula mediante la ecuación:

$$\text{DQO (mg O}_2\text{/L)} = \frac{(A-B)*N*F*8000}{V}$$

$$N = \frac{V_{\text{dicromato}}(\text{ml}) * 0.1}{V_{\text{sal-titulacion}}(\text{ml})}$$

Donde:

A: ml de valorante gastados para el blanco

B: ml de valorante gastados para la muestra

N: factor de dilución de la muestra

V: volumen de la muestra (ml)

8.8. ANEXO H. CUANTIFICACION DE SAPONINAS

Existen varias técnicas para la cuantificación de saponinas, por ejemplo: el método espectrofotométrico, o la cuantificación por cromatografía de líquidos de alta presión, en el último caso una de las limitantes es contar con los estándares. A continuación, se muestra el método colorimétrico para la cuantificación de saponinas Método Indirecto DNS.

Método Indirecto DNS – Cuantificación De Azúcares Reductores

Esta técnica analítica desarrollada por Miller en 1959, sirve para cuantificar los azúcares reductores removidos después del tratamiento. El objetivo de este método es determinar indirectamente la cantidad de saponinas mediante la cuantificación de azúcares.

Para la determinación de azúcares reductores se aplicó el método de colorimetría DNS (Ácido

3,5 dinitrosalicílico) usando el espectrofotómetro de luz UV-visible a una longitud de onda de 540 [nm]. Y utilizando la curva de calibración obtenida a partir de una solución de saponina Merck del proyecto de grado de Olga Lorena Salinas Villarte “Degradación de saponinas mediante enzimas producidas por hongos nativos del altiplano”. Se tendrá el contenido de contenido de saponina en mg/ml de muestra.

Materiales y equipos

- Espectrofotómetro de luz UV 1800
- Refrigerador
- Balanza analítica
- pH metro
- Agitador Vortex
- Micropipeta de 0.5(ml)
- Tubos de ensayo 10(ml)
- Vasos de precipitado (600ml)
- Probeta 100(ml)
- Piseta 500(ml)
- Cubetas espectrofotométricas
- Espátulas

Reactivos

REACTIVO DNS: Primeramente, disolver:

Tabla 42. Reactivos DNS

Compuesto	Formula	Cantidad
3.5 Acido dinitrosalicílico (DNS)	$C_7H_4N_2O_7$	0.412 (g)

Hidróxido de sodio	NaOH	0,769 (g)
Agua destilada	H ₂ O (d)	55 (ml)

Fuente: Olga Lorena Salinas Villarte, (2015)

Una vez disuelto lo anterior agregar:

Tabla 43. Reactivos adicionales

Compuesto	Formula	Cantidad
Tartrato de sodio y potasio	KNaC ₄ H ₄ O ₆ ·4H ₂ O	11.89 (g)
Fenol (derretido a 50°C)	C ₆ H ₅ OH	0,295 (ml)
Metabisulfito de sodio	Na ₂ S ₂ O ₅ , Na-O-(S=O)-O-(S=O)-O-Na	0,322 (g)

Fuente: Olga Lorena Salinas Villarte, (2015)

Se debe titular una muestra de 3 [ml] de Reactivo DNS con HCl 0.1 [N] y fenolftaleína como indicador hasta llegar al punto final. El volumen gastado debe ser aproximadamente 5 – 6 [ml] de ácido. Añadir NaOH si se requiere (2 [g] = 1 [ml] 0.1 [N] HCl) (35).

Procedimiento

En una serie de tubos de ensayo se prepararon las soluciones para cuantificar los azúcares reductores mediante el uso del reactivo DNS. En el siguiente diagrama se detalla el procedimiento utilizado.

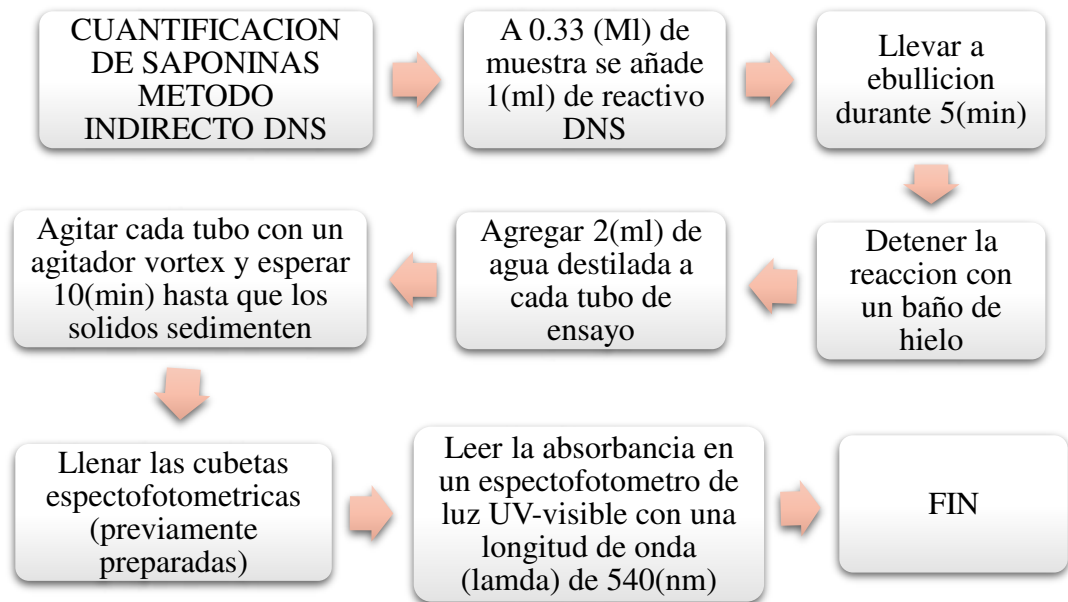
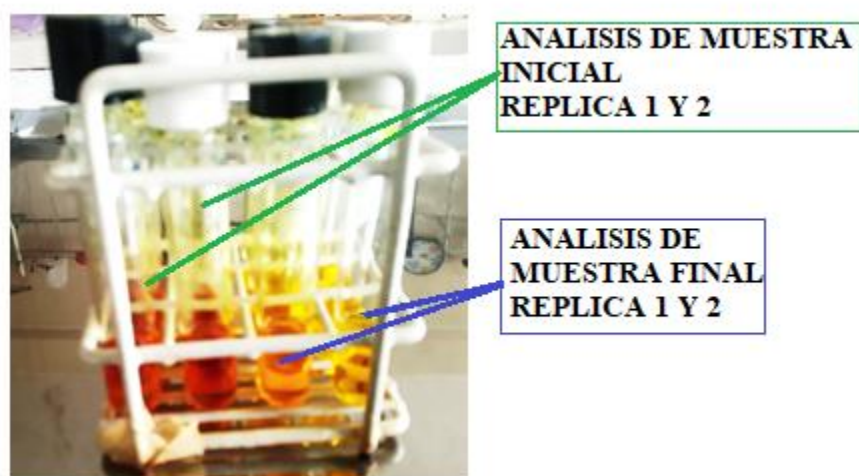


Diagrama 8: Determinación de azúcares reductores totales – Método Indirecto DNS

Fuente: Olga Lorena Salinas Villarte, (2015)

8.9. ANEXO I. RESULTADOS DE CONCENTRACION DE SAPONINA METODO INDIRECTO DNS

Con el dato de la diferencia de absorbancia entre el blanco y las muestras, además de la curva de calibración, se puede conocer el contenido de saponinas.



Fotografía 14. Determinación de la cantidad de azúcares reductores – Método Indirecto DNS.

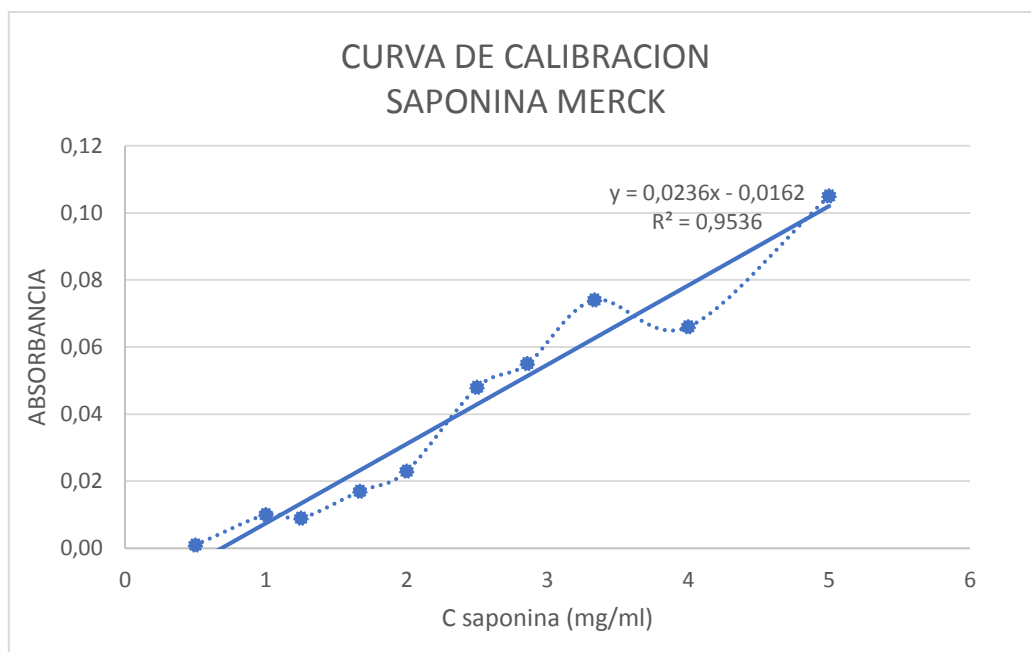
Fuente: Elaboración propia

Con el dato de la diferencia de absorbancia entre el blanco y las muestras, además de la curva de calibración, se puede conocer el contenido de saponinas.

Tabla 44. Curva de calibración con saponina Merck para cuantificar los azúcares “MÉTODO DNS “

C saponina (mg/ml)	Absorbancia
5,000	0,105
4,000	0,066
3,333	0,074
2,857	0,055
2,500	0,048
2,000	0,023
1,667	0,017
1,250	0,009
1,000	0,010
0,500	0,001

Fuente: Olga Lorena Salinas Villarte, (2015)



Grafica 11. Representación de la curva de calibración saponina MERCK

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. Remplazando absorbancia en la ecuación de la recta

Muestra	y	x (mg/ml)	x (mg/L)
Inicial	0,6790	29,4435	29443,50
Tratada	0,0509	2,8442	2844,16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 46. Determinación de concentración de saponina para dos diluciones de la muestra madre

DILUCION	ABSORBANCIA	FACTOR DE DILUCION	C saponina (mg/ml)
3:10	0,2023	3,33	29,2599
1:10	0,0683	10	29,6271
Promedio			29,4435

Fuente: Elaboración propia

Tabla 47. Resultados de absorbancia para la muestra final sin dilución

Muestra	Absorbancia
1	0,0521
2	0,0530
3	0,0533
4	0,0503
5	0,0496
6	0,0491
7	0,0495
8	0,0501
9	0,0513
PROMEDIO	0,0509

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en la ecuación de la recta: $y = 0.0236x - 0.0162$

Por último, se realizó el cálculo de porcentaje de remoción de saponina como se muestra a continuación.

Tabla 48. Determinación de porcentaje de reducción de saponina

C saponina inicial (mg/l)	C saponina final (mg/l)	Porcentaje de reducción de saponina (%)
29443,50	2844.161	90.34

Fuente: Elaboración propia

8.10. ANEXO J. DETERMINACION DEL ORDEN DE REACCIÓN EN BASE A LA CINÉTICA DE LA REMOCIÓN DE SOLIDOS DISUELTOS TOTALES

Una vez determinado el arreglo y voltaje con mayor eficiencia, se realizó el proceso de electrocoagulación monitoreando el cambio en la disminución de la concentración de carga orgánica con respecto al tiempo, se procedió a realizar la experimentación durante la cual se tomó una muestra de 30 ml por intervalos de tiempo de 5 min,

Se realizó la cuantificación de TDS con un potenciómetro marca HANNA Instruments.

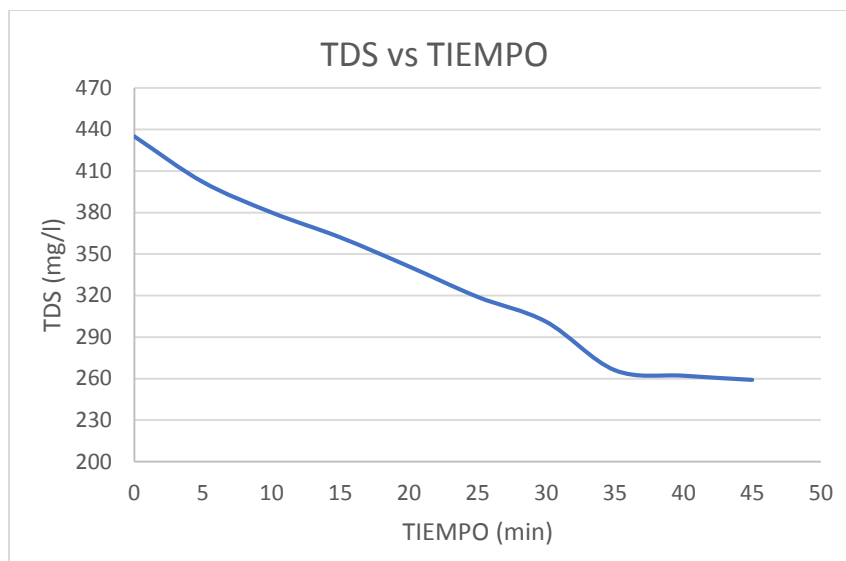
Los resultados obtenidos se presentan en la tabla:

Tabla 49. Remoción de TDS en la determinación de cinética de reacción

T (min)	tds (ppt o g/l)	TDS (mg/l)
0	0,435	435
5	0,402	402
10	0,380	380
15	0,362	362
20	0,341	341
25	0,319	319
30	0,301	301
35	0,266	266
40	0,262	262
45	0,259	259

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo una disminución significativa, pero es necesario determinar el tiempo óptimo, es decir, el tiempo necesario para lograr la máxima disminución de contaminantes en el mínimo tiempo. Para esto, es necesario graficar los valores de TDS con respecto al tiempo (grafica 13) dónde, se puede observar que posterior al minuto 35 solo se logró disminuir entre 3 - 4 unidades por cada intervalo de tiempo. Por esta razón se determina como tiempo óptimo 35 min logrando, hasta este intervalo de tiempo una reducción de TDS del 38.85%.



Grafica 12. Gráfica de remoción de TDS con respecto al tiempo

Fuente: Elaboración propia

A partir de esos datos se determinará la cinética de la reacción empleando el método integral, seguidamente se hallará el orden de la reacción, mediante las siguientes ecuaciones:

Para una reacción de orden cero: $C_{Ao} - C_A = kt$ (32)

Para una reacción de orden 1: $\ln\left(\frac{C_{Ao}}{C_A}\right) = kt$ (33)

Para una orden de reacción 2: $\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{Ao}} = kt$ (34)

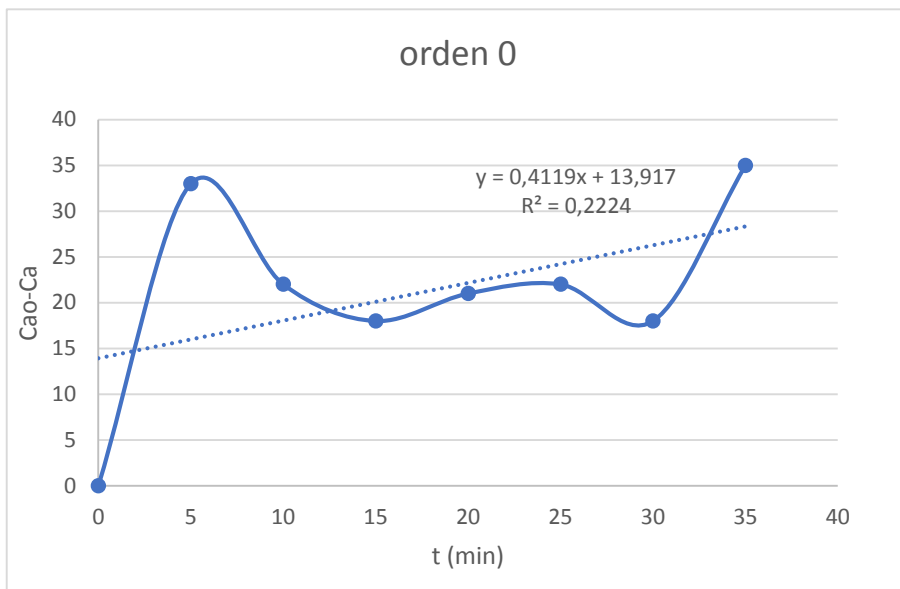
Una vez aplicadas las ecuaciones integradas, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 50. Cálculo de la orden de reacción

T (min)	tds (ppt o g/l)	TDS (mg/l)	Cao-Ca	ln (Cao/Ca)	1/Ca-1/Cao
0	0,435	435	0	0,000	0,00
5	0,410	410	15	0,036	8,61E-05
10	0,380	380	30	0,112	2,79E-04
15	0,362	362	18	0,160	4,09E-04
20	0,341	341	21	0,220	5,80E-04
25	0,319	319	22	0,287	7,82E-04
30	0,301	301	18	0,345	9,69E-04
35	0,266	266	35	0,469	1,41E-03

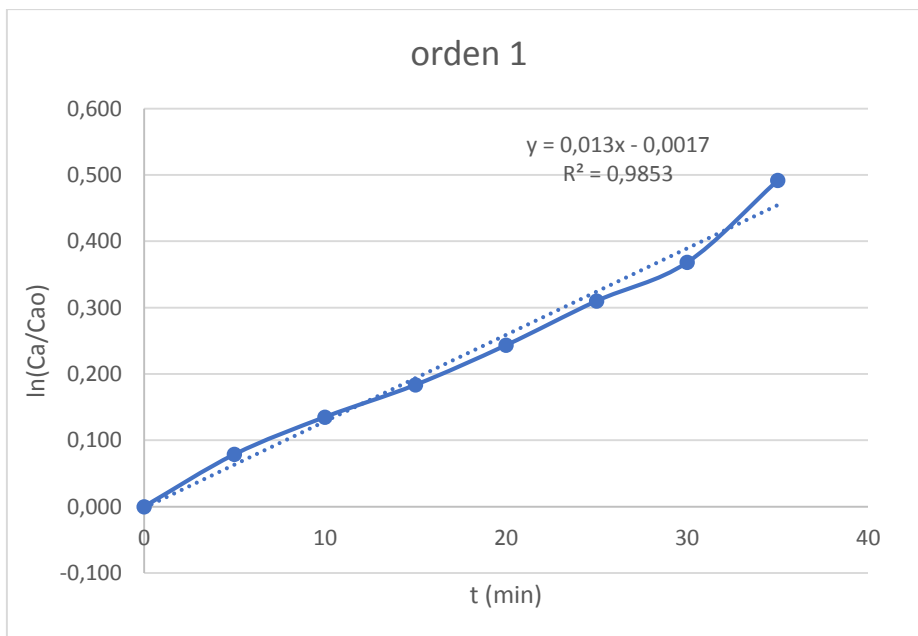
Fuente: Elaboración propia

Se graficaron los resultados obtenidos (orden vs t) para definir cuál es el orden de reacción a partir del coeficiente de correlación R².



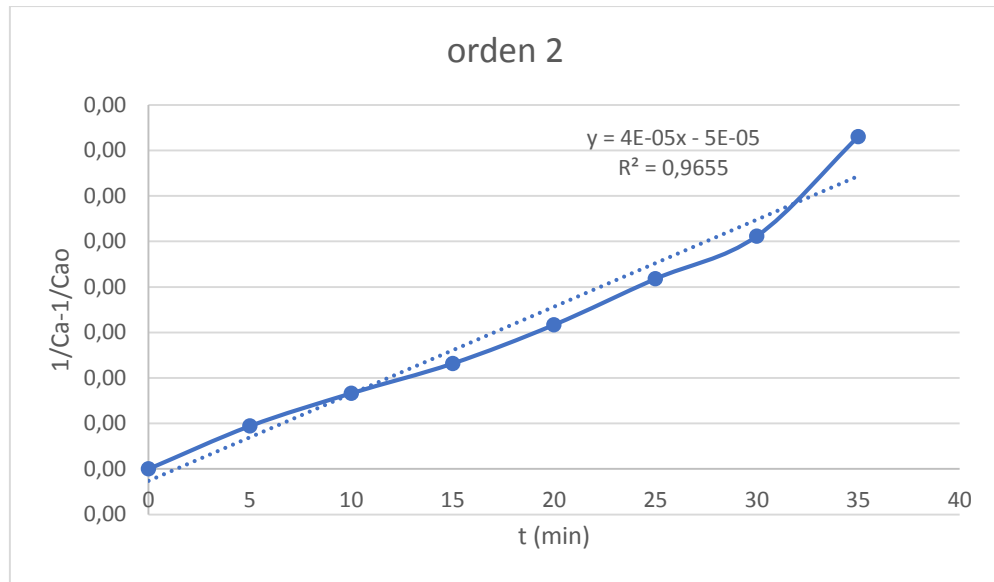
Grafica 13. Grafica para orden de reacción 0

Fuente: Elaboración propia



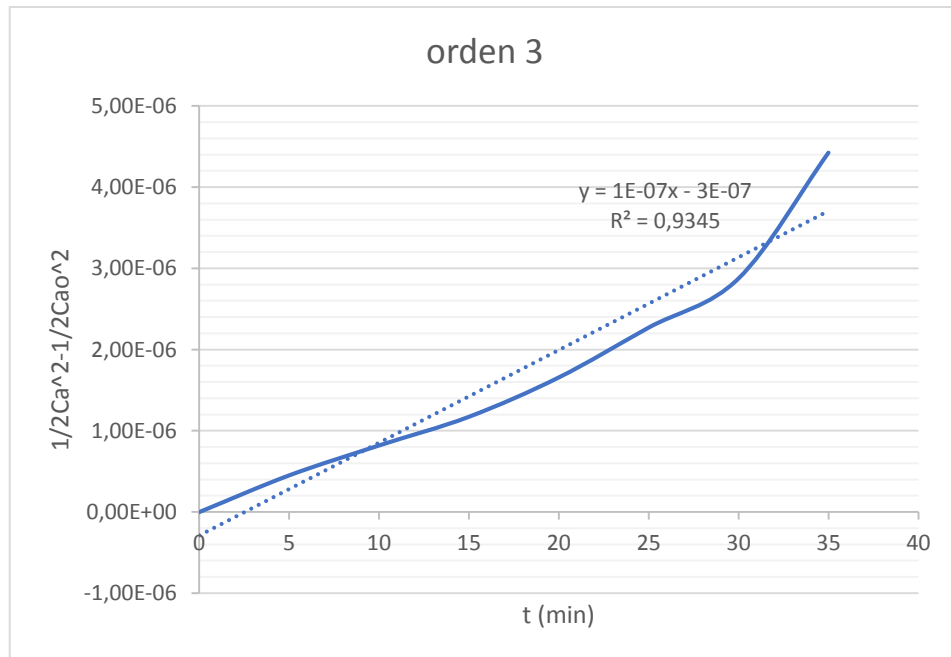
Grafica 14. Grafica para orden de reacción 1

Fuente: Elaboración propia



Grafica 15. Grafica para reacción de orden 2

Fuente: Elaboración propia



Grafica 16. Grafica para reacción de orden 3

Fuente: Elaboración propia

Realizando la comparación entre los valores de los coeficientes de correlación “R2”, se determina que se trata de una reacción de orden 1.

$$Rn=0 = 0.2224$$

$$Rn=1 = 0.9853$$

$$Rn=2 = 0.9655$$

$$Rn=3 = 0.9345$$

Considerando lo anterior y la ecuación de la recta, se determina la constante de velocidad de reacción a partir de lo siguiente:

$$\text{Dado que: } y = b - kx \text{ y } k = -m \quad \therefore \quad y = b + mx$$

$$\text{Retomando la ecuación obtenida } y = 0,013x - 0.0017$$

$$\text{Por lo tanto: } k = 0.013 \text{ min}^{-1}$$

Para verificar que el valor obtenido analíticamente es correcto, se realiza una comparación considerando los datos obtenidos experimentalmente y en la ecuación 34 para orden 1, despejando k:

$$k = \frac{C_{AO} - C_A}{t} \quad (35)$$

Por lo tanto, aplicando la ecuación anterior, se obtiene lo siguiente:

Tabla 51. Constante de velocidad obtenidas para orden de reacción 1

T (min)	TDS (mg/l)	Ln (Cao/Ca)	k (min-1)
0	435	0,000	0,0000
5	410	0,036	0,0158
10	380	0,112	0,0135
15	362	0,160	0,0122
20	341	0,220	0,0122
25	319	0,287	0,0124
30	301	0,345	0,0123
35	266	0,469	0,0141
		PROMEDIO	0,0132

Fuente: Elaboración propia

Al realizar un promedio de “k”, se obtiene: 0.0132 min^{-1} . Realizando una comparación con el valor obtenido gráficamente (0.013 min^{-1}) se observa una diferencia entre ellos. Por lo anterior, es necesario calcular el porcentaje de error entre estos dos valores:

$$\%Error = \frac{0.0132 \text{ min}^{-1} - 0.013 \text{ min}^{-1}}{0.0132 \text{ min}^{-1}} * 100 = 1,515\%$$

Por lo que se define que el porcentaje de error es de 1,515% el cuál no es un valor muy significativo con lo que se comprueba que el dato obtenido experimental es correcto.

Con base en los resultados obtenidos, la cinética planteada para una reacción de primer orden se ajusta a los datos experimentales de los sólidos disueltos totales durante el proceso, con una correlación de 0,9853; por lo que la reacción corresponde a una de tipo elemental.

8.11. ANEXO K. RESULTADOS DE INSTITUTO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil



LABORATORIO

IIS-FORM-004
Código IIS N°: 0031/2020

RESULTADO DE ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE AGUA RESIDUAL

Institución solicitante: Empresa Irupana Andean Organic Food S.A.
Dirección: Av. Arica Nro. 550, Zona Senkata, Ciudad de El Alto

N° de muestra: 1

DATOS DE MUESTREO

Responsable: Clara Jhakelyn Compara Calle
Fecha: 2020/02/04 Hora: 13:00
Punto: Salida del lavado de quinua
Lugar: Empresa Irupana Andean Organic Food S.A.
Fuente: Agua residual industrial
Localidad: Ciudad de El Alto
Provincia: Murillo Departamento: La Paz
Temperatura: ---
Observaciones: ---

DATOS DE RECEPCIÓN

Fecha: 2020/02/05 Hora: 18:49
Volumen de muestra: 2 Litros
Tipo de recipiente(s): Botella de plástico
Estado de la muestra: Refrigerada (Si/No): Si
Preservada (Si/No): No
Temperatura: 8,9 °C
Fecha de análisis: Del 2020/02/05 al 2020/02/14
Recibido por: Ing. Gregorio Carvajal Sumi

ANÁLISIS FÍSICO

N°	PARÁMETRO ANALIZADO	MÉTODO	UNIDADES	RESULTADO
1	SÓLIDOS TOTALES	SM 2540 B	mg/l	4.670,00
2	SÓLIDOS TOTALES FIJOS	SM 2540 E	mg/l	588,00
3	SÓLIDOS TOTALES VOLÁTILES	SM 2540 E	mg/l	4.082,00
4	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	SM 2540 D	mg/l	2.640,00

ANÁLISIS QUÍMICO

5	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	SM 5220 B	mg O ₂ /l	5.600,00
---	----------------------------	-----------	----------------------	----------

OBSERVACIONES: ---

La Paz, 14 de febrero de 2020


RESPONSABLE


VºBº DIRECTOR
Ing. Gregorio Carvajal Sumi


RESPONSABLE TÉCNICO

LABORATORIO

IIS-FORM-004
Código IIS N°: 0037/2020

RESULTADO DE ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE AGUA RESIDUAL

Institución solicitante: Empresa Irupana Andean Organic Food S.A.
Dirección: Av. Arica Nro. 550, Zona Senkata, Ciudad de El Alto

N° de muestra: 1

DATOS DE MUESTREO

Responsable: Clara Jhakelyn Compara Calle
Fecha: 2020/02/06 Hora: 16:00
Punto: Salida del sistema de tratamiento
Lugar: Laboratorio IDEPROQ, Campus Universitario Cota Cota
Fuente: Agua residual Industrial tratada
Localidad: Ciudad de La Paz
Provincia: Murillo Departamento: La Paz
Temperatura: ---
Observaciones: ---

DATOS DE RECEPCIÓN

Fecha: 2020/02/06 Hora: 18:50
Volumen de muestra: 2 Litros
Tipo de recipiente(s): Botella de plástico
Estado de la muestra: Refrigerada (Si/No): Si
Preservada (Si/No): No
Temperatura: 8,1 °C
Fecha de análisis: Del 2020/02/06 al 2020/02/14
Recibido por: Ing. Gregorio Carvajal Sumi

ANÁLISIS FÍSICO

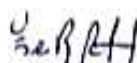
Nº	PARÁMETRO ANALIZADO	MÉTODO	UNIDADES	RESULTADO
1	SÓLIDOS TOTALES	SM 2540 B	mg/l	1.446,00
2	SÓLIDOS TOTALES FIJOS	SM 2540 E	mg/l	254,00
3	SÓLIDOS TOTALES VOLÁTILES	SM 2540 E	mg/l	1.192,00
4	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	SM 2540 D	mg/l	31,00

ANÁLISIS QUÍMICO

5	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	SM 5220 B	mg O ₂ /l	960,00
---	----------------------------	-----------	----------------------	--------

OBSERVACIONES: ---

La Paz, 14 de febrero de 2020



8.12. ANEXO L. REGLAMENTO AMBIENTAL DEL SECTOR INDUSTRIAL

MANUFACTURERO (RASIM)

CAPÍTULO III CONTAMINACIÓN HÍDRICA

ARTÍCULO 71°. (Fuentes). - Con el objeto de regular las actividades de las industrias que puedan contaminar el medio hídrico, se consideran de prioritaria atención y control las siguientes fuentes:

- a) Procesos que generen residuos líquidos;
- b) Procesos térmicos que utilicen agua;
- c) Vertido o derrame de líquidos;
- d) Operaciones de limpieza de materias primas, equipos y ambientes.

ARTÍCULO 72°. (Esfuerzos). - La industria es responsable de la prevención y control de la contaminación que puedan generar sus descargas, debiendo realizar esfuerzos en:

- a) La segregación de sus diferentes descargas líquidas en origen, con el objeto de reciclar y reutilizar las mismas;
- b) La optimización de sus operaciones y procesos además del adecuado mantenimiento de sus equipos;
- c) La captura, conducción y tratamiento de derrames;
- d) La recirculación de las sustancias utilizadas hasta su agotamiento;
- e) Uso eficiente del agua en los procesos térmicos;
- f) La incorporación de sistemas correctivos de la contaminación, después de agotarse las medidas de producción más limpia.

Los esfuerzos de la industria deberán reflejarse en los Planes de Manejo Ambiental, Informes Ambientales Anuales, renovación del formulario RAI. Los esfuerzos de la industria se evalúan a través del Sistema de Evaluación y Revelación de Información (SERI).

ARTÍCULO 73°. (Control priorizado). - La industria priorizará en el control de sus descargas, los siguientes parámetros: Potencial de hidrógeno (pH), Demanda bioquímica

de oxígeno (DBO5), Demanda química de oxígeno (DQO), Sólidos suspendidos totales (SST), Aceites y Grasas, Metales pesados y Conductividad.

El control de estos parámetros se reflejará en los Planes de Manejo Ambiental, Informes Ambientales Anuales y renovación del formulario RAI.

ARTÍCULO 74°. (Límites permisibles). - La industria debe cumplir con los límites permisibles para descargas en cuerpos de agua a través del parámetro de mezcla establecido en el Anexo K; lo que no implica que deberá auto monitorear todos los parámetros contemplados en este Anexo.

ARTÍCULO 75°. (Automonitoreo). - La industria debe realizar automonitoreo de todos los parámetros que puedan ser generados por sus actividades como descargas. Las industrias contempladas en el Anexo L, deberán realizar en sus descargas, automonitoreo de los parámetros especificados, de acuerdo a métodos estándar disponibles mientras se establezca la Norma Boliviana, debiendo mantener un registro de fuentes y descargas para la inspección de las autoridades. La automonitoreo deberá efectuarse por lo menos una vez al año para cada punto de descarga.

Para la automonitoreo se utilizarán laboratorios acreditados en Bolivia. Mientras éstos no existan a nivel departamental, se utilizarán laboratorios legalmente establecidos.

ARTÍCULO 76°. (Disposición de descargas). - Las industrias tienen las siguientes posibilidades para disponer sus descargas:

- a) Conectarse a un sistema de alcantarillado autorizado para descargas industriales, de acuerdo a contrato de descarga entre la industria y la Entidad Prestadora de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario (EPSA);
- b) Transportar a una planta de tratamiento o a un punto de descarga de alcantarillado industrial autorizado, de acuerdo a contrato de descarga entre la industria y EPSA;
- c) Descargar a un cuerpo de agua superficial en un volumen menor o igual a un quinto (1/5) del caudal promedio del río o arroyo en época de estiaje, cuando se cumple con lo establecido en el Anexo 13-A, previa autorización de la IADP. Si, existieran descargas instantáneas mayores a un quinto (1/5), pero menores a un tercio (1/3) del caudal, la IADP podrá en forma excepcional autorizar las mismas previo estudio justificado.
- d) Transferir a terceros cuando se cumplan con los límites permisibles establecidos en el Anexo 13-A. Para fines de reciclaje referirse al Anexo 15;
- e) Recargar o inyectar a un acuífero, solamente cuando no exista sistema de alcantarillado o cuerpo de agua superficial, previa autorización excepcional de la IADP, con base en un estudio justificado y cumplimiento de los límites permisibles establecidos para cuerpos receptores de Clase A del Anexo K.

Para optar a las opciones de los incisos c), d) y e), las industrias deberán contar con la caracterización de sus efluentes a través de un automonitoreo y mantener un registro disponible para las inspecciones de la autoridad.

ARTÍCULO 77°. (Prohibiciones). - Se prohíben las siguientes descargas a los sistemas de alcantarillado y cuerpos de agua:

- a) Sustancias radiactivas, compuestos orgánicos halogenados, aceites y lubricantes minerales e hidrocarburos;
- b) Sedimentos, lodos, sólidos o semisólidos, provenientes de los procesos de producción, sistemas de tratamiento de aguas residuales o equipos de descontaminación ambiental.

Estas sustancias deberán ser colocadas en recipientes sólidos cerrados y para efectos de su gestión se aplicará lo dispuesto en el Capítulo IV del presente Título.

ARTÍCULO 78°. (Dilución). - Está prohibida la dilución de los efluentes para lograr las concentraciones de los límites permisibles del Anexo K del presente Reglamento.

8.13. ANEXO M. VALORES MAXIMOS ADMISIBLES DE PARAMETROS EN CUERPOS DE AGUA (ANEXO 13-A,

RASIM)

Nº	Parámetros	Unidad	Cancerigenos	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
1	pH		NO	6.0 a 8.5	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0
2	Temperatura	°C		(+/-) 3 °C de c. receptor	(+/-) 3 °C de c. receptor	(+/-) 3 °C de c. receptor	(+/-) 3 °C de c. receptor
3	Sólidos disueltos totales	mg/l		1000	1000	1500	1500
4	Aceites y grasas	mg/l	NO	Ausente	Ausente	0.3	1.00
5	DBO5	mg/l	NO	< 2	< 5	< 20	< 30
6	DQO	mg/l	NO	< 5	< 10	< 40	< 60
7	NMP Colifecales NMP	N/100ml	NO	< 50 y <5 en 80% muestras	< 1000 y <200 en 80% muestras	< 5000 y <1000 en 80% muestras	< 50000 y <5000 en 80% muestras
8	Parásitos	N/l		< 1	< 1	< 1	< 1
9	Color mg Pt/l	mg/l	NO	< 10	< 50	< 100	< 200
10	Oxígeno disuelto	mg/l	NO	>80% sat	> 70% sat	> 60 % sat	> 50% sat
11	Turbidez	NTU	NO	< 10	< 50	< 100 <2000***	< 200 – 10,000***
12	Sólidos sedimentables	mg/l-ml/l	NO	< 10 mg/l	30 mg/l – 0.1 ml/l	< 50 mg/l – <1 ml/l	100 mg/l – <1 ml/l
13	Aluminio	mg/l		0.2 c. Al	0.5 c. Al	1.0 c. Al	1.0 c. Al
14	Amoniaco	mg/l	NO	0.05c. NH ₃	1.0 c. NH ₃	2.0 c. NH ₃	4.0 c. NH ₃
15	Antimonio	mg/l	NO	0.01 c. Sb	0.01 c. Sb	0.01 c. Sb	0.01 c. Sb
16	Arsénico total	mg/l	SI	0.05 c. As	0.05 c. As	0.05 c. As	0.1 c. As
17	Benceno	ug/l	SI	2 c. Benceno	6.0 c. Benceno	10,0 c. Benceno	10.0 c. Benceno
18	Bario	mg/l	NO	1 - 0.05 c. Ba	1.0 c. Ba	2.0 c. Ba	5.0 c. Ba
19	Berilio	mg/l	SI	0.001 c. Be	0.001 c. Be	0.001 c. Be	0.001 c. Be
20	Boro	mg/l		1.0 c. B	1.0 c. B	1.0 c. B	1.0 c. B
21	Calcio	mg/l	NO	200	300	300	400
22	Cadmio	mg/l	NO	0.005	0.005	0.005	0.005
23	Cianuros	mg/l	NO	0.02	0.1	0.2	0.2
24	Cloruros	mg/l	NO	250 c. Cl	300 c. Cl	400 c. Cl	500 c. Cl
25	Cobre	mg/l	NO	0.05 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu
26	Cobalto	mg/l		0,1 c. Co	0.2 c. Co	0.2 c. Co	0.2 c. Co
27	Cromo Hexavalente	mg/l	SI	0.05 c. Cr total	0.05 c. Cr +6	0.05 c. Cr +6	0.05 c. Cr +6

N°	Parámetros	Unidad	Cancerigenos	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
28	Cromo Trivalente	mg/l	NO		0.6 c. Cr+3	0.5 c. Cr+3	1.1 c. Cr+3
29	1,2 Dicloroetano	mg/l	SI	10	10	10	10
30	1,1 Dicloroetano	mg/l	SI	0.3	0.3	0.3	0.3
31	Estaño	mg/l	NO	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn
32	Fenoles	mg/l	NO	1.0 c. C ₆ H ₅ OH	1.0 c. C ₆ H ₅ OH	5.0 c. C ₆ H ₅ OH	10.0 c. C ₆ H ₅ OH
33	Hierro Soluble	mg/l	NO	0.3 c. Fe	0.3 c. Fe	1.0 c. Fe	1.0 c. Fe
34	Fluoruros	mg/l	NO	0.6–1.7 c. F	0.6–1.7 c. F	0.6–1.7 c. F	0.6–1.7 c. F
35	Fosfato total	mg/l	NO	0.4 c. Ortofosfato	0.5 c. Ortofosfato	1.0 c. Ortofosfato	1.0 c. Ortofosfato
36	Magnesio	mg/l	NO	100 c. Mg	100 c. Mg	150 c. Mg	150 c. Mg
37	Manganeso	mg/l	NO	0.5 c. Mn	1.0 c. Mn	1.0 c. Mn	1.0c. Mn
38	Mercurio	mg/l	NO	0.001 Hg	0.001 Hg	0.001 Hg	0.001 Hg
39	Litio	mg/l		2.5 c. Li	2.5 c. Li	2.5 c. Li	5.0 c. Li
40	Níquel	mg/l	SI	0.05 c. Ni	0.05 c. Ni	0.5 c. Ni	0.5 c. Ni
41	Nitrato	mg/l	NO	20 c. NO ₃	30 c. NO ₃	50 c. NO ₃	50 c. NO ₃
42	Nitrito	mg/l	NO	<1.0 c. N	1.0 c. N	1.0 c. N	1.0 c. N
43	Nitrógeno Total	mg/l	NO	5 c. N	12 c. N	12 c. N	12 c. N
44	Plomo	mg/l	NO	0.05 c. Pb	0.05 c. Pb	0.05 c. Pb	0.1 c. Pb
45	Plata	mg/l	NO	0.05 c. Ag	0.05 c. Ag	0.05 c. Ag	0.05 c. Ag
46	Pentaclorofenol	mg/l	SI	5	10	10	10
47	Selenio	mg/l	NO	0.01 c. Se	0.01 c. Se	0.01 c. Se	0.05 c. Se
48	Sodio	mg/l	NO	200	200	200	200
49	Sólidos Flotantes			Ausentes	Ausentes	Ausente	<Retenido malla 1 mm ²
50	Sulfatos	mg/l	NO	300 c. SO ₄	400 c. SO ₄	400 c. SO ₄	400 c. SO ₄
51	Sulfuros	mg/l	NO	0.1	0.1	0.5	1.0
52	S.A.A.M.(Detergentes)	mg/l		0.5	0.5	0.5	0.5
53	Tetracloroetano	ug/l	NO	10	10	10	10
54	Tricloroetano	ug/l	SI	30	30	30	30
55	Tetracloruro de Carbono	ug/l	SI	3	3	3	3
56	2,4,6 Triclorofenol	ug/l	SI	10	10	10	10
57	Uranio Total	mg/l		0.02 c. U	0.02 c. U	0.02 c. U	0.02 c. U
58	Vanadio	mg/l	NO	0.1 c. V	0.1 c. V	0.1 c. V	0.1 c. V
59	Zinc	mg/l	NO	0.2 c. Zn	0.2 c. Zn	0.2 c. Zn	0.2 c. Zn

La mezcla de agua producto de una descarga y del cuerpo de agua debe regirse por la ecuación:
$$P_{xf} = \frac{P_{xi}Q_i + P_{xc}Q_c}{Q_i + Q_c}$$

Para cualquier parámetro de calidad, el valor total de la mezcla debe ser siempre menor que el establecido para la clase de cuerpo que corresponda.

Donde: P_{af}: Parámetro de mezcla; P_{xi}: Parámetro de la descarga; P_{xc}: Parámetro del cuerpo de agua en un punto sin impacto;
Q_i: Caudal de la descarga; Q_c: Caudal del cuerpo de agua.

8.14. ANEXO N. LIMITES PERMISIBLES PARA DESCARGAS LIQUIDAS EN mg/l

(ANEXO 13-C, RASIM)

NORMA - PARÁMETROS	Diaria	Mensual
Cobre	1.0	0.5
Zinc	3.0	1.5
Plomo	0.6	0.3
Cadmio	0.3	0.15
Arsénico	1.0	0.5
Cromo+3	1.0	0.5
Cromo + 6	0.1	0.05
Mercurio	0.002	0.001
Hierro	1.0	0.5
Antimonio	1.0	
Estaño	2.0	1.0
Cianuro Libre	0.2	0.1
pH	6 a 9	6 a 9
Temperatura (*)	+/- 5°C	+/- 5 °C
Compuestos Fenólicos	1.0	0.5
Sólidos disueltos totales		500.0
Sólidos suspendidos totales	60.0	
Colifecales (NMP/100ml)	1000.0	
Aceites y grasas	10.0	
DB05	80.0	
DQ0	250.0	
Amonio como Nitrógeno	4.0	2.0
Sulfuros	2.0	1.0
Nitratos como Nitrógeno		10
Endrín		0.0002
Lindano		0.004
Metoxicloro		0.1
Toxafeno		0.005
Trihalometanos totales		0.1
Plata		0.1
Selenio		0.01

(*) Rango de variabilidad con relación a la temperatura media del cuerpo receptor

Diaria: Hace referencia a la toma de muestra por un periodo de 24 horas en un día para realizar la medición del parámetro en la descarga líquida

Mensual: Es el promedio mensual para 30 días de la medición diaria.



**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-253-D/2020
La Paz, 17 de Septiembre del 2020**

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **16 de Septiembre del 2020** vía online, por **CLARA JHAKELYN COMPARA CALLE** con **C.I. N.º 7069832 LP.**, con número de trámite **DA-103-DIG/2020**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN REACTOR ELECTROQUIMICO A NIVEL LABORATORIO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL LAVADO DE QUINUA POR ELECTROCOAGULACION"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N.º 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N.º 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N.º 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N.º 1322, Decreto Reglamentario N.º 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N.º 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N.º 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N.º 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*.

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N.º 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico"*

de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial

Que, el Decreto Supremo, N.º 4218 del 14 de Abril de 2020, regula el teletrabajo como una modalidad especial de prestación de servicios caracterizada por la utilización de Tecnologías de la Información y Comunicación - TIC, en los sectores públicos y privados, estableciendo a través de su Artículo 12 que *"con el objeto de implementar y, promover el teletrabajo, las entidades públicas, deben desarrollar e implementar una estrategia de digitalización para la atención de trámites y servicios en línea en el marco del Plan de Implementación del Gobierno Electrónico ..."*.

Que, mediante Resolución Administrativa N.º 14/2020 del 22 de Abril de 2020, el Director General Ejecutivo del SENAPI, Resuelve: *"... Aprobar el Reglamento para trámites On-Line de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos del Servicio Nacional de Propiedad Intelectual ..."*.

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ..."*, por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

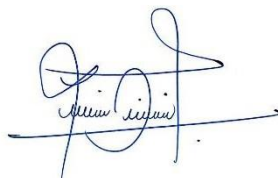
POR TANTO

La Directora de Derecho de Autor y Derechos Conexos, sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN REACTOR ELECTROQUIMICO A NIVEL LABORATORIO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL LAVADO DE QUINUA POR ELECTROCOAGULACION"**, a favor de la autora y titular: **CLARA JHAKELYN COMPARA CALLE con C.I. N.º 7069832 LP.**, bajo el seudónimo **CLARA**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.



Abog. Gabriela Arancibia Peredo
DIRECTORA DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Correo electrónico : jhakelyn28@gmail.com

Teléfono: 2817139

Celular: 69717620

