

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERIA QUÍMICA**



**“REMOCIÓN DE LA TURBIEDAD MEDIANTE EL PROCESO
ACOPLADO DE ELECTROCOAGULACIÓN Y OXIDACIÓN AVANZADA
EN AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA CURTIEMBRE”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

AUTORES

**PAUL ALCO CER MENESES
ÁNGEL BRITALDO CABRERA SALAZAR**

ASESOR

Dr. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Callao, 2022

PERÚ

Document Information

| | |
|-------------------|---|
| Analyzed document | Tesis Posgrado con formato CORREGIDO.pdf (D106968778) |
| Submitted | 5/29/2021 3:44:00 AM |
| Submitted by | |
| Submitter email | fiq.posgrado@unac.edu.pe |
| Similarity | 11% |
| Analysis address | fiq.posgrado.unac@analysis.arkund.com |

Sources included in the report

| | | | |
|-----------|---|---|----|
| SA | <p>Universidad Nacional del Callao / TESIS FINAL DICIEMBRE.pdf Document TESIS FINAL DICIEMBRE.pdf (D52121595) Submitted by: izizlaul@gmail.com Receiver: maria.toledo.palomino.unac@analysis.arkund.com</p> |  | 2 |
| SA | <p>Universidad Nacional del Callao / DE LA CRUZ GARCIA.pdf Document DE LA CRUZ GARCIA.pdf (D48254304) Submitted by: juanpecaba@hotmail.com Receiver: maria.toledo.palomino.unac@analysis.arkund.com</p> |  | 1 |
| SA | <p>TESIS DOCTORAL FINAL TERMINADA.pdf Document TESIS DOCTORAL FINAL TERMINADA.pdf (D35877783)</p> |  | 4 |
| W | <p>URL: https://core.ac.uk/download/pdf/323351947.pdf Fetched: 11/10/2020 9:12:05 PM</p> |  | 4 |
| SA | <p>Tratamiento de efluentes de la industria cárnica mediante electrocoagulación empl eando electrodos de aluminio y hierro.pdf Document Tratamiento de efluentes de la industria cárnica mediante electrocoagulación empl eando electrodos de aluminio y hierro.pdf (D64551619)</p> |  | 10 |
| W | <p>URL: https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/984/251%20Tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20industriales.pdf?sequence=1 Fetched: 10/26/2019 5:53:08 PM</p> |  | 10 |
| SA | <p>UNU_AMBIENTAL_2020_T_ZUELY-VILLACORTA_DANTE-RIOS_V2.pdf Document UNU_AMBIENTAL_2020_T_ZUELY-VILLACORTA_DANTE-RIOS_V2.pdf (D62584079)</p> |  | 2 |
| SA | <p>9385 florencio_pk.pdf Document 9385 florencio_pk.pdf (D35753905)</p> |  | 3 |
| W | <p>URL: http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3773/Paitan%20De%20La%20Cruz%20-%20Palomino%20Barrientos.pdf?sequence=1&isAllowed=y Fetched: 12/12/2020 5:36:44 AM</p> |  | 2 |
| W | <p>URL: http://www.repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/107/1/339855.pdf Fetched: 5/18/2021 12:45:49 AM</p> |  | 6 |
| | <p>Universidad Nacional del Callao / INFORME FINAL DE TESIS-ELECTROCOGULACION OCT-2019.pdf</p> | | |

INFORMACIÓN BÁSICA:

FACULTAD : FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN : UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

TÍTULO : “REMOCIÓN DE LA TURBIEDAD MEDIANTE EL PROCESO ACOPLADO DE ELECTROCOAGULACIÓN Y OXIDACIÓN AVANZADA EN AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA CURTIEMBRE”

AUTOR / CÓDIGO / DNI : Paul Alcocer Meneses / ORCID : 0000-0002-0125-4104 / DNI: 42170243
Angel Britaldo Cabrera Salazar / ORCID : 0000-0002-4342-6955 / DNI: 07194618

ASESOR / CÓDIGO ORCID / DNI : Juan Taumaturgo Medina Collana / ORCID: 0000-0002-3625-8308 / DNI: 06213328

LUGAR DE EJECUCIÓN : La parte experimental se realizó en la misma curtiembre ubicada en el Distrito de Ate Vitarte.

UNIDAD DE ANÁLISIS : Muestras provenientes de la curtiembre de la zona ribera.

TIPO / ENFOQUE / DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN:
Aplicada / cuantitativo / Experimental

TEMA OCDE : 2.04.02 Ingeniería y tecnología

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS conformado por los siguientes
Profesores Ordinarios:

| | |
|-------------------------------------|------------|
| Mg. PABLO BELIZARIO DÍAZ BRAVO | PRESIDENTE |
| Mg. LEONARDO FELIX MACHACA GONZALES | SECRETARIO |
| Mg. CESAR GUTIÉRREZ CUBA | MIEMBRO |
| Mg. FABIO MANUEL RANGEL MORALES | MIEMBRO |
| Dr. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA | ASESOR |

N° LIBRO : 01

N° ACTAS : 010

N° FOLIO : 012

FECHA DE SUSTENTACIÓN : Agosto 26 de 2022

ACTA : 010-2022-UPG-FIQ

DEDICATORIA

Quiero comenzar dando gracias a mis padres Salvador Alcocer e Irma Meneses, por apoyarme en todos y cada uno de los pasos, por invertir su tiempo y energía en mí y empujarme a dar lo mejor de mí en todo lo que hago. A mi brillante, hermosa, paciente y amorosa esposa, la Mg. M. V. Cuba Tello, recuerdo que cuando empezamos a salir juntos, a menudo hablabas de los sueños, esperanzas y aspiraciones. Te estoy muy agradecido por todo lo que me has dado: ediciones, espacio, paciencia, amor y una fe inquebrantable en mí. A mi aventurera, decidida y hermosa niña Fernanda A. Alcocer Cuba, eres la manifestación de mi fe. Si alguna vez lees esto, debes saber que tu papá luchó para salir de tanta negatividad para convertirse en la persona que soy hoy. Al Dr. Juan Taumaturgo Medina Collana, gracias por ser nuestro asesor y guía durante los últimos tres años y del mismo modo a los docentes de la maestría, por brindarnos oportunidades para prosperar como profesional.

PAUL ALCOCER MENESES

DEDICATORIA

Agradezco a Dios, por brindarnos un nuevo amanecer de cada día, a Santiago mi padre, que en su memoria imploro y evoco una plegaria al cielo, a Amelia mi madre, mujer invaluable, luchadora, tenaz constante, gracias a su esfuerzo y a su inconmensurable amor; me formaron profesionalmente, a Margarita, mi esposa mi compañera, por su amor, cariño y ternura, por soportarme 37 años de su vida a su lado, y por haberme regalado tres preciosas joyas, mis hijos Maritza Ysabel, Ángel Eduardo y Luis Fernando, razón y motivo de mi existencia y superación permanente, a mis hermanas y hermanos por su constante invaluable apoyo, a esta prestigiosa alma mater y sus dignos y excelentes maestros.

ANGEL BRITALDO CABRERA SALAZAR

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| TABLAS DE CONTENIDO | 4 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 5 |
| RESUMEN | 7 |
| RESUMO | 8 |
| INTRODUCCIÓN | 9 |
| I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 11 |
| 1.1. Descripción de la realidad problemática | 11 |
| 1.2. Formulación del problema | 13 |
| 1.2.1. Problema general | 13 |
| 1.2.2. Problemas específicos | 13 |
| 1.3. Objetivos | 13 |
| 1.3.1. Objetivo general | 13 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 13 |
| 1.4. Limitantes de la investigación | 14 |
| II. MARCO TEÓRICO | 15 |
| 2.1. Antecedentes: (internacional y nacional) | 15 |
| 2.1.1. Antecedentes internacionales | 15 |
| 2.1.2. Antecedentes nacionales | 17 |
| 2.2. Bases teóricas | 18 |
| 2.2.1. Proceso de transformación del cuero | 18 |
| 2.2.2. Caracterización ambiental en curtiembre | 20 |
| 2.2.3. Insumos químicos en curtiembre | 21 |
| 2.2.4. Consumo de agua en curtiembre | 22 |
| 2.2.5. Aguas residuales de la zona ribera | 23 |
| 2.2.6. Tratamiento de efluentes en curtiembres | 23 |
| 2.2.7. Turbiedad | 26 |
| 2.2.8. Ozono en aguas residuales industriales | 27 |
| 2.2.9. Mecanismos de coagulación Química | 28 |
| 2.2.10. Coagulación sobre diversos contaminantes | 30 |
| 2.2.11. Propiedades físico-químicas de aluminio (III) | 32 |
| 2.2.12. Fundamentación de la electrocoagulación | 33 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.2.13. | Mecanismos y reacciones electroquímicas-químicas | 35 |
| 2.2.14. | Efectos de la corriente eléctrica en la celda | 38 |
| 2.2.15. | Parámetros influyentes en la electrocoagulación | 39 |
| 2.2.16. | Indicadores del proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada | 40 |
| 2.3. | Conceptual | 42 |
| 2.4. | Definición de términos básicos | 47 |
| III. | HIPÓTESIS Y VARIABLES | 49 |
| 3.1 | Hipótesis | 49 |
| 3.1.1. | Hipótesis General | 49 |
| 3.1.2. | Hipótesis Específicos | 49 |
| 3.2 | Definición conceptual de variables | 49 |
| 3.2.1. | Operacionalización de las variables | 50 |
| IV. | DISEÑO METODOLÓGICO | 52 |
| 4.1. | Tipo y Diseño de Investigación | 52 |
| 4.1.1. | Tipo de investigación | 52 |
| 4.1.2. | Diseño de investigación | 52 |
| 4.2. | Método de investigación | 56 |
| 4.3. | Población y muestra | 57 |
| 4.4. | Lugar de estudio y periodo desarrollado | 58 |
| 4.5. | Técnicas e instrumentos para la recolección de la información | 58 |
| 4.5.1. | Técnicas | 58 |
| 4.5.2. | Instrumentos | 63 |
| 4.6. | Análisis y procesamiento de datos | 64 |
| V. | RESULTADOS | 65 |
| 5.1. | Resultados descriptivos | 65 |
| 5.2. | Resultados inferenciales | 68 |
| 5.3. | Otro tipo de resultados de acuerdo a la naturaleza del problema y la hipótesis | 68 |
| 5.3.1. | Resultados de ensayos preliminares con la muestra sintética | 68 |
| 5.3.2. | Resultados de la caracterización del agua residual de | |

| | |
|--|----|
| curtiembre | 70 |
| 5.3.3. Resultados del experimento central | 72 |
| VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 80 |
| 6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados | 80 |
| 6.2. Contrastación de resultados con otros estudios similares | 82 |
| 6.3. Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes | 85 |
| VII. CONCLUSIÓN | 87 |
| VIII. RECOMENDACIONES | 88 |
| IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 89 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-----------------|---|----|
| Tabla 1 | Composición de los efluentes generados en la zona ribera | 23 |
| Tabla 2 | Tiempo medio de formación de especies químicas..... | 36 |
| Tabla 3 | Operacionalización de variables | 61 |
| Tabla 4 | Factores operacionales con sus niveles | 64 |
| Tabla 5 | Matriz de metodología Taguchi L27 (3X5) | 65 |
| Tabla 6 | Métodos de caracterización del efluente | 72 |
| Tabla 7 | Parámetros variables y constantes durante el experimento | 74 |
| Tabla 8 | Relación de reactivos y materiales usados en la investigación | 76 |
| Tabla 9 | Respuesta de relación señal y ruido | 78 |
| Tabla 10 | Coeficiente de regresión | 79 |
| Tabla 11 | Análisis de varianza (ANOVA) | 71 |
| Tabla 12 | Resultados de pruebas preliminares en muestra sintética | 72 |
| Tabla 13 | Resultados sobre los electrodos | 73 |
| Tabla 14 | Resultados de caracterización de las aguas residuales ribera | 74 |
| Tabla 15 | Resultados obtenidos a pH 4..... | 79 |
| Tabla 16 | Respuesta obtenidos a pH 7.5..... | 87 |
| Tabla 17 | Resultados obtenidos a pH 10.8 | 88 |
| Tabla 18 | Resultados de caracterización de la muestra tratada..... | 93 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------------|---|----|
| Figura 1 | Diagrama general de transformación de la piel a cuero..... | 19 |
| Figura 2 | Esquema de las diferentes operaciones en la zona ribera | 20 |
| Figura 3 | Diagrama de los diferentes contaminantes generados..... | 21 |
| Figura 4 | Consumo agua, insumos químicos y generación de Agua residual...21 | |
| Figura 5 | Consumo de productos químicos en curtiembre..... | 22 |
| Figura 6 | Consumo de agua con la tecnología fulón | 23 |
| Figura 7 | Tratamiento para eliminar el sulfuro zona ribera | 24 |
| Figura 8 | Tratamiento por neutralización | 25 |
| Figura 9 | Esquema de tratamiento previos en efluentes de tenería..... | 26 |
| Figura 10 | Diámetro de sedimentos y su relación de absorbancias..... | 27 |
| Figura 11 | Vías de reacción del ozono con los contaminantes | 28 |
| Figura 12 | Modelo de la doble capa | 29 |
| Figura 13 | Formas de coagulación mediante desestabilización..... | 30 |
| Figura 14 | Formas de desestabilizar los contaminantes por coagulantes..... | 31 |
| Figura 15 | Formación de diferentes especies a pH de Al y Fe | 33 |
| Figura 16 | Disolución electroquímica/química de aluminio | 37 |
| Figura 17 | Relación entre factores para la generación de coagulante | 39 |
| Figura 18 | Mecanismo de reducción de los coloides en agua | 43 |
| Figura 19 | Reacciones principales en celda de electrocoagulación..... | 45 |
| Figura 20 | Diferentes POAs para generar *OH radicales | 46 |
| Figura 21 | Flujo de salida de contaminantes en curtiembres..... | 47 |
| Figura 22 | Diseño de investigación..... | 53 |
| Figura 23 | Secuencia de la etapa de investigación..... | 55 |
| Figura 24 | Módulo acoplado de electrocoagulación/ozono..... | 56 |
| Figura 25 | Características de los electrodos | 57 |
| Figura 26 | Recolección de muestras de la zona ribera..... | 59 |
| Figura 27 | Toma de muestras sobre muestra modelo | 61 |
| Figura 28 | Toma de muestras sobre muestra real | 63 |
| Figura 29 | Efectos principales relación señal y ruido..... | 65 |
| Figura 30 | Superficie de respuesta | 69 |
| Figura 31 | Comportamiento de muestra sintética EC/O ₃ | 72 |

| | | |
|------------------|--|----|
| Figura 32 | Cambio de pH de la solución en proceso EC/O ₃ | 76 |
| Figura 33 | Cambio de turbiedad durante durante el proceso | 77 |
| Figura 34 | Cambio de pH inicial durante EC/O ₃ para los 27 experiementos | 78 |
| Figura 35 | Cambio de turbiedad para ozono, electrocoagulación y EC/O ₃ | 79 |

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es determinar la remoción de la turbiedad mediante el proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada en aguas residuales procedentes de una curtiembre.

Este proceso utiliza una fuente de corriente continua entre electrodos de placas circulares de aluminio perforados de geometría circular sumergidos en el efluente, lo que provoca la disolución del aluminio. Para el presente estudio se ha construido un equipo de electrocoagulación acoplado a un generador de ozono a nivel laboratorio; donde se estudió la influencia de cinco factores o parámetros fisicoquímicos, siendo estos: a. Flujo de entrada al reactor, b. flujo de ozono, c. pH, d. turbiedad y, e. voltaje, los cuales cada uno se llevaron a tres niveles con respecto a la reducción de la turbidez, para ello se utilizó la metodología experimental Taguchi.

Los resultados mostraron una reducción Superior al: 99.0% de turbiedad, alcanzando un agua residual con 2.8 NTU, trabajados a las condiciones de: Un flujo de alimentación de: 360Lt/h, flujo de ozono: 2400mg/h, pH a 7.5, concentración del efluente a 1130 NTU, y un voltaje de: 10V; asimismo se aumentó el grado de biodegradabilidad de la carga orgánica de: 0.467 a 0.553 Estos valores obtenidos demuestran que la Electrocoagulación acoplado a un generador de ozono, nos permite reducir la turbiedad y otros parámetros; siendo por lo tanto, que podría utilizarse como una alternativa viable para mejorar la alta contaminación y condiciones de las aguas residuales provenientes de la zona ribera de las curtiembres, y con ello mejorar la calidad de vida de la población, coadyuvando a mantener de una manera eficiente y adecuada, al mejoramiento de nuestros ecosistemas, y por ende de nuestro medio ambiente, con la ayuda de una oportuna y conveniente Gestión Ambiental.

Palabras claves: Electrocoagulación, efluente curtiembre, ozonización, eliminación de turbiedad, Taguchi.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é determinar a remoção de turbidez através do processo acoplado de eletrocoagulação e oxidação avançada em águas residuárias de um curtume.

Este processo utiliza uma fonte de corrente contínua entre eletrodos perfurados de placas circulares de alumínio de geometria circular imersos no efluente, o que provoca a dissolução do alumínio. Para o presente estudo foi construído em nível laboratorial um equipamento de eletrocoagulação acoplado a um gerador de ozônio; onde foi estudada a influência de cinco fatores ou parâmetros físico-químicos, sendo eles: a. Fluxo de entrada para o reator, b. fluxo de ozônio, c. pH, d. turbidez e, e. tensão, cada uma levada a três níveis no que diz respeito à redução da turbidez, para isso foi utilizada a metodologia experimental de Taguchi.

Os resultados mostraram uma redução superior a: 99,0% da turbidez, atingindo uma água residual com 2,8 NTU, trabalhada nas condições de: Vazão de alimentação de: 360Lt/h, vazão de ozônio: 2400mg/h, pH em 7,5, concentração do efluente em 1130 NTU, e tensão de: 10V; Da mesma forma, o grau de biodegradabilidade da carga orgânica foi aumentado de: 0,467 para 0,553

Estes valores obtidos demonstram que a Eletrocoagulação acoplada a um gerador de ozônio permite reduzir a turbidez e outros parâmetros; Portanto, poderia ser utilizado como uma alternativa viável para melhorar a alta contaminação e as condições dos efluentes provenientes da zona ribeirinha dos curtumes, e com isso melhorar a qualidade de vida da população, ajudando a manter de forma eficiente e adequado, à melhoria dos nossos ecossistemas e, portanto, do nosso ambiente, com a ajuda de uma Gestão Ambiental atempada e conveniente.

Palavras chave: Eletrocoagulação, efluente de curtume, ozonização, eliminação de turbidez, Taguchi.

INTRODUCCIÓN

La industria de la curtiembre por ser una actividad practicada desde la antigüedad juega un rol muy importante en el sector económico produciendo cuero de alta calidad, para ello utiliza la piel en bruto obtenida del sector ganadero como material principal para su transformación. La creciente demanda de la población obliga a muchas de las industrias a acelerar sus actividades productivas, entre ellas las curtiembres en el Perú que tiene bastante actividad; sin embargo, estas industrias son consideradas muy contaminantes, porque los efluentes generados se caracterizan por tener altos valores de DBO, DQO, pH, conductividad, etc. Estos efluentes contienen altas concentraciones de sustancias orgánicas e inorgánicas que causan una contaminación significativa y que una parte proviene de las pieles (las pieles crudas pierden un 30% de materia orgánica durante su transformación en cuero acabado) y la otra parte de los productos químicos utilizados, resultando una mezcla compleja de proteínas, lípidos, azufre, sulfato, cloro, tintes, tensioactivos, productos químicos, taninos naturales y sintéticos en alta concentraciones (Sawalha et al., 2020)

Generalmente estos efluente son vertidos al alcantarillado, aguas superficiales o otros medios receptores sin ningun tratamiento previo, generando un grave problema medioambiental. La toxicidad generada por los contaminantes ocasionan actividades mutagénicas aumentando el riesgo por cáncer a las poblaciones vulnerables, del mismo modo la exposición al cromo VI genera un alto riesgo de carcinomas (Quijano et al., 2015). Por otro lado al ser vertidas al suelo y su filtración hacia las aguas subterráneas alteran en la calidad de uso (Sanjay et al., 2020)

En el mercado hay diversas tecnologías para reducir la carga contaminante generado en el efluente de la curtiembre, entre ello los métodos tradicionales donde utilizan métodos físicos, químicos y biológicos; sin embargo, no son eficientes para el tratamiento adecuado hacia ciertos contaminantes. Recientemente, los procesos electroquímicos se están utilizando ampliamente para tratar efluentes ofreciendo muchas ventajas debido a la capacidad de eliminar compuestos que no son eliminados por otros métodos tradicionales.

La electrocoagulación acoplada con otros oxidantes como tecnología emergente

está llamando la atención por los resultados muy eficientes. Los mecanismos utilizados para eliminar los contaminantes mediante este tratamiento corresponden a los procesos químicos, físicos y electroquímicos ocurridos simultáneamente. Al aplicar la electrocoagulación (EC) se genera el coagulante electrolíticamente proveniente del sacrificio del electrodo de ánodo debido a la corriente aplicada, al mismo tiempo, se forma hidrógeno en el cátodo, lo que permite la eliminación de contaminantes por precipitación y flotación (Yasri et al., 2020)

En este trabajo el objetivo fue evaluar los parámetros operacionales más adecuados del proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada sobre la remoción de la turbiedad, para ello se hicieron una serie de experimentos a nivel laboratorio del tipo batch, utilizando como agente oxidante al ozono y la electrocoagulación aplicados sobre el efluente generado en la zona ribera de la curtiembre.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

La industria de la curtiembre es considerada como una de las más influyentes e importantes desde la antigüedad, debido a que el cuero como materia prima posee propiedades únicas para la producción de la ropa, calzado y otros accesorios; sin embargo, esta industria genera una alta contaminación ambiental siendo la mayor preocupación pública como amenaza potencial para los ecosistemas de salud y de seguridad humana (Sanjay et al. , 2020)

Como lo hace notar Sawalha et al. (2020) en términos de volumen aproximadamente entre 30 a 35 m³ de efluente se genera por una tonelada de piel procesada; no obstante estas cantidades tienen relación directa a la materia prima, procesos de producción y artículo final. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación (FAO), anualmente la producción de cuero asciende a 6 millones de toneladas de peso salado, por otro lado como afirma Kanagaraj et al. (2006) por una tonelada de piel salada fresca sólo se obtiene 200 Kg de cuero, el resto constituye residuos sólidos de curtido (250 Kg), residuos no curtidos (350 Kg) y lo faltante corresponde a los residuos mezclados con el agua (200 Kg)

Desde el punto de vista de Prat-i-Morera (2002) y Rosales et al. (2018) los diversos contaminantes son generados a partir de la materia prima (proteínas, grasas, sangre, pelos, carne, etc.) y químicos (sulfuros, cal, amonio, tensoactivos, cromo, productos ácidos y alcalinos, aceites, etc.). En las primeras etapas de fabricación, se utilizan altos volúmenes de agua a diferencia de las otras etapas, especialmente para la limpieza, todo ello hace que los efluentes líquidos salientes de esta etapa contengan una mezcla muy compleja de contaminantes orgánicos e inorgánicos, dando lugar a concentraciones elevadas en turbidez, sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, sulfuro y nitrógeno amoniacal (Mosquera-Corral et al., 2007 y Gutterres et al., 2015)

Estos efluentes en diversos estudios publicados han demostrado ser muy tóxicas al ser vertidas al río ocasionando efectos negativos a la vida acuática por el aumento de la concentración de DQO, DBO₅ y disminuyendo la concentración

de oxígeno. Como afirma Raisman & Gonzales (2007) la presencia de sulfuro en medio ácido genera el gas sulfhídrico que es altamente tóxico, de igual forma el amonio que es tóxico para los peces y los lodos sedimentables que al llegar forman mantos olorosos. Del mismo modo al ser descargados a la red alcantarillado forman incrustaciones de carbonato de calcio. Otro de los efectos demostrados no sólo en animales si no en humanos, mediante el contacto con Cr^{6+} es la aparición de células cancerígenas a causa de la oxidación de Cr^{3+} (Quijano et al., 2015)

Este problema de contaminación se está generando por un modelo que se está utilizando (modelo de uso lineal de agua), con bajo criterio de descarga y para dar solución se debe cambiar por el modelo de uso circular del agua, con cero descargas y para poder cumplir con este patrón se deben desarrollar tecnologías seguras y eficientes. En la actualidad se utilizan diversas tecnologías para reducir los contaminantes presentes en efluentes de tenería, una de ellas mediante la precipitación química con CaO y Ca(OH)_2 que elimina varios contaminantes (Reyes et al., 2020), el empleo de las membranas para mejorar la calidad de las aguas residuales (Mohammed & Sahu, 2019), la bioremediación, entre otros. Como opción, en los últimos años la electrocoagulación está tomando mucho interés para el tratamiento de diversos efluentes con alta carga orgánica (Apaza et al., 2020). La electrocoagulación al someterse a los principios electroquímicos y químicos desestabilizan y reducen a los contaminantes mediante la generación insitu de agentes coagulantes (Nidheesh et al., 2020 y Holt et al., 2004); sin embargo la complejidad de los contaminantes y las actuales regulaciones vigentes ambientales cada vez más exigentes obligan a usar procesos acoplados e híbridos para mejorar la eficiencia, una de ellas es la utilización del ozono acoplado a la electrocoagulación con la finalidad de mejorar la reducción de DQO y DBO_5 (Barzegar et al., 2019 y Das et al., 2021)

La atención de la investigación esta centrado al desarrollo de una tecnología emergente como la electrocoagulación acoplado a la oxidación avanzada (ozono), donde se utilizó electrodos circulares de aluminio tanto para ánodo y

cátodo, como efecto sobre la reducción de la turbiedad en efluentes de una curtiembre proveniente de la zona ribera con alta carga orgánica.

1.2 Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es la remoción de la turbiedad mediante el proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada en aguas residuales procedentes de una curtiembre?

1.2.2. Problemas específicos

- 1) ¿Cuáles serán las características físico-químicas de las aguas residuales procedentes de la curtiembre de la zona ribera?
- 2) ¿Cuáles serán los valores más adecuados del potencial aplicado, pH, Flujo de alimentación, ¿flujo de ozono y turbiedad inicial al proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada para alcanzar un alto porcentaje de remoción de la turbiedad?
- 3) ¿Cuál será el porcentaje de remoción de la turbiedad a las condiciones de operación adecuadas del proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada?
- 4) ¿Cuáles serán las características fisicoquímicas del agua residual después del tratamiento?

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la remoción de la turbiedad mediante el proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada en aguas residuales procedentes de una curtiembre.

1.3.2. Objetivos específicos

- 1) Determinar las características fisicoquímicas de las aguas residuales procedentes de la curtiembre de la zona ribera.
- 2) Determinar los valores más adecuados del potencial aplicado, pH, Flujo de alimentación, flujo de ozono y concentración de alimentación al proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada para alcanzar un alto porcentaje de remoción de la turbiedad.
- 3) Determinar el porcentaje de remoción de la turbiedad a las condiciones de

operación adecuadas del proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada.

- 4) Determinar las características físicas químicas del agua residual después del tratamiento.

1.4 Limitantes de la investigación

Teórico.- No se ha encontrado limitaciones teóricas, debido a que se utilizó métodos correspondientes para optimizar la reducción de la turbiedad mediante la evaluación de los parámetros operacionales utilizando el diseño experimental Taguchi para un adecuado tratamiento.

Temporal.- La limitación con respecto al tiempo fue sobre la conservación de la muestra, se tuvo que realizar por día un promedio de 5 experimentos, de esa manera no alargar más el tiempo de conservación de la muestra y tratar de culminar lo más antes posible la parte experimental.

Espacial.- Hubo una limitación en cuanto a la obtención de la muestra, para superar se tuvo que coordinar con el dueño de la curtiembre y explicarle que eran para fines de trabajo de investigación a nivel posgrado y del mismo modo solicitar un espacio adecuado para desarrollar la parte experimental.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes: (internacional y nacional)

2.1.1. Antecedentes internacionales

Villalobos et al. (2020), *Tratamiento de electrocoagulación de aguas residuales de curtiembres industriales empleando un reactor de electrodo de cilindro giratorio*, en su trabajo experimental sobre tratamiento de aguas residuales de una curtiembre cuyo propósito fue determinar la eficiencia de electrocoagulación sobre la remoción de DQO, turbidez, cromo total y sólidos suspendidos totales, para ello se montó un reactor de electrocoagulación de forma cilíndrica con 6 electrodos de aluminio seguida de dos módulos de sedimentación. Como resultado a las condiciones adecuadas de densidad de corriente 6 mA/cm^2 y velocidad de giro 100 rpm, lograron remover el 70% de DQO y > a 90% de los demás parámetros estudiados, de igual forma estimaron el consumo de energía y el costo del material llegando a $1,8 \text{ KWh/m}^3$ y $0,7 \text{ \$/m}^3$. Concluyendo que los resultados obtenidos de este trabajo demuestran que un diseño adecuado de un reactor electroquímico permite obtener resultados interesantes al ser aplicado en estudios de ampliación de efluentes reales.

Deveci et al. (2019), *Mejora de la tratabilidad de las aguas residuales de tenerías mediante el proceso integrado de electrocoagulación y hongos mediante el uso de RSM en una perspectiva económica*, en su ensayo experimental empleando la electrocoagulación acoplado a tratamiento biológico cuyo objetivo fue mejorar la calidad de las aguas residuales de la curtiembre mediante la reducción de la concentración de Cr^{6+} y DQO. Utilizando la metodología de superficie de respuesta (RSM) para el tratamiento con electrocoagulación a condiciones de pH 8, tiempo 60 minutos y 0,81 amperios, llegaron a reducir en 63,8% de DQO y 90% de Cr^{6+} , mientras para la remoción biológica a las condiciones de pH 5, 36 horas de reacción y una tasa de inocuo del 2% se logró buena eficiencia, por lo tanto la remoción total alcanzada en el sistema acoplado fue de 96% de DQO y 97% del Cr^{6+} . Concluyendo que el sistema Electroquímico/Biológico podría aplicarse como una alternativa eficaz para tratar efluentes industriales de curtiembres.

Ziati et al. (2018), *Reducción de la turbidez y el contenido de cromo de las aguas residuales de las curtiderías mediante el proceso de electrocoagulación*, en su estudio experimental mediante un proceso de electrocoagulación cuyo objetivo fue eliminar cromo y turbiedad de las aguas residuales de una curtiembre, donde utilizaron electrodos de aluminio, operados en forma de batch, para lograr alcanzar el máximo rendimiento buscaron las mejores condiciones de operación del potencial aplicado, tiempo de operación, pH, superficie activa del electrodo y distancia entre electrodos. Los resultados que llegaron a obtener bajo los parámetros operacionales de 15 voltios, 45 cm² de área activa, 1 cm de distancia, 6,1 de pH y tiempo de 90 minutos, redujeron en 99% la turbiedad y 93% la concentración de cromo. Concluyendo que el proceso de electrocoagulación tiene el potencial de ser utilizado para la eliminación rentable de contaminantes de aguas residuales.

Moradi y Moussavi (2019), *Tratamiento mejorado de las aguas residuales de tenerías mediante el proceso de electrocoagulación combinado con fotorreactor UVC / VUV: Evaluación paramétrica y mecanicista*, mediante su investigación realizada en la utilización de electrocoagulación acoplada a un fotorreactor (UVC/VUV) en cuyo objetivo principal fue reducir la concentración de DQO, cromo total y sulfuro en aguas residuales de una curtiembre empleando electrodos de aluminio. Como resultado, estudiaron primero a una muestra sintética para buscar las mejores condiciones, llegando a reducir casi al 100% cromo VI y sulfuro a niveles de pH ≤ 7 en 30 minutos, en cambio para una muestra real a las mismas condiciones de pH en una hora de tratamiento lograron obtener una reducción de DQO en 99,52%, cromo total en 100% y sulfuro en 98,27%. Por lo tanto se puede concluir que acoplando dos técnicas se obtiene un tratamiento eficiente y se ve como un método prometedor para el tratamiento de verdaderas aguas residuales industriales de tenerías.

Sivagami et al. (2018), *Procesos avanzados de oxidación para el tratamiento de aguas residuales de tenería*, en sus investigaciones a nivel laboratorio y planta piloto sobre la utilización de diversas técnicas de oxidación avanzada en muestras reales de curtiderías cuyo objetivo fue estudiar la eficiencia de cada uno de los métodos sobre la reducción de contaminantes en términos de DQO y

carbono orgánico total, para ello estudiaron los métodos de fentón y ozono. Para optimizar la técnica de fentón evaluaron los factores: dosis del ion Fe^{2+} , peróxido de hidrógeno y la influencia del pH, del cual obtuvieron la dosis requerida de Fe^{+2} en 150 mg/L – 300 mg/L, H_2O_2 en 600 mg/L y pH = 4. En cambio, para el ozono evaluaron la cantidad de ozono y el pH. Como resultado lograron llegar para un mejor tratamiento con ozono en tres pasos (coagulación + aireación + ozono) con una reducción del 80% – 90% de DQO. Concluyendo que este método de hibridación tiene ventajas sobresalientes y se ve como un método prometedor para el tratamiento de aguas residuales de tenerías.

Murugananthan et al. (2004), *Eliminación de iones sulfuro, sulfato y sulfito por electrocoagulación*, estudiaron los efluentes provenientes de una tenería con el objetivo de remover las diferentes especies de azufre provenientes de la zona ribera mediante la electrocoagulación. Para conocer la influencia de los parámetros operacionales sobre la remoción de sulfito y sulfato, evaluaron los parámetros influyentes como tipo de electrodo (hierro, aluminio y titanio), pH, densidad de corriente y concentración inicial. Como resultado para la eliminación efectiva de los sólidos suspendidos, sulfuros, sulfatos y sulfitos utilizaron los electrodos de aluminio y hierro menos el de titanio, del mismo modo aumentaron la flotabilidad de los sólidos suspendidos mediante la electrocoagulación. Concluyendo que la electrocoagulación es una alternativa eficiente para reducir los compuestos a base de sulfuro sobre aguas residuales de una curtiembre.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Mayta y Mayta (2017), *Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación*, realizaron estudios utilizando la técnica electroquímica con el objetivo de remover la concentración de cromo III y DQO en efluentes de una curtiembre mediante la electrocoagulación en un reactor continuo tipo batch con electrodos de aluminio. Para encontrar los niveles adecuados de los parámetros operacionales (tiempo de operación, voltaje y dilución) sobre la remoción de los contaminantes usaron el diseño factorial de dos niveles con tres variables. Como resultado a condiciones de 45 min, 10 V y dos de dilución lograron remover el 98% de cromo III y 48% DQO, de igual manera realizaron modelos matemáticos a partir de

datos experimentales para la remoción de Cr_{3+} y DQO, y dieron a conocer la influencia del tiempo, tensión y concentración en el proceso de electrocoagulación y fueron muy significativos.

Apaza et al. (2020), *Eficiencia de la electrocoagulación para el tratamiento de efluente de la industria de curtiembre*, en su trabajo de investigación sobre la aplicación de la electrocoagulación cuyo objetivo es determinar la eficiencia de la electrocoagulación sobre la remoción de contaminantes, para ello se armó un módulo tipo batch, con electrodos de hierro y aluminio de conexión eléctrica monopolar paralelo, las muestras se recogieron de las 6 etapas como: lavado, remojo, pelambre, curtido, desengrase y engrase. Como resultado lograron reducir en 93,86% de turbiedad para la zona de lavado y 88,67% para la zona de remojo y 98,63% para la zona de desengrase y curtido. Concluyendo que la electrocoagulación representa una alternativa por poseer una capacidad de remover la carga orgánica e inorgánica.

Castillo y Oliden (2017), *Influencia de la distancia entre electrodos y densidad de corriente en la disminución de la carga contaminante de residuos líquidos de pelambre por electrocoagulación*, emplearon la técnica de electrocoagulación con el objetivo de reducir la carga orgánica de las aguas residuales provenientes de la etapa de pelambre-curtiembre, utilizaron electrodos de aluminio para un reactor tipo batch. Para conocer la influencia de los parámetros operacionales sobre la reducción de la contaminación evaluaron en tres niveles la densidad y dos niveles la distancia de electrodos. Como resultado llegaron a reducir el DQO en 36,45% a condiciones de 100 A/m^2 y 54,8% de sulfuro a condiciones de 80 A/m^2

2.2. Bases teóricas

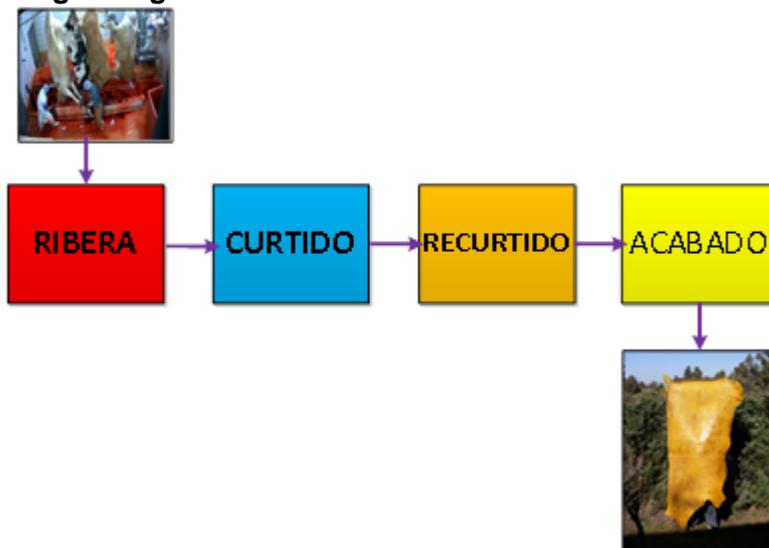
2.2.1. Proceso de transformación del cuero

La transformación de la piel a cuero necesita de operaciones químicas, físicas y mecánicas, la mayor parte se realizan en medio acuoso, el propósito general del proceso de la transformación es mantener la conservación de la piel a través del tiempo otorgándole algunas características como flexibilidad, belleza, resistencia y un valor comercial.

Estas operaciones están directamente relacionadas al tipo de piel (vacuno, caprino, ovino, porcino, etc.), conservación de la piel (fresco salado y seco dulce) y artículo final (calzados, marroquinería, tapicería, vestimenta, etc.)

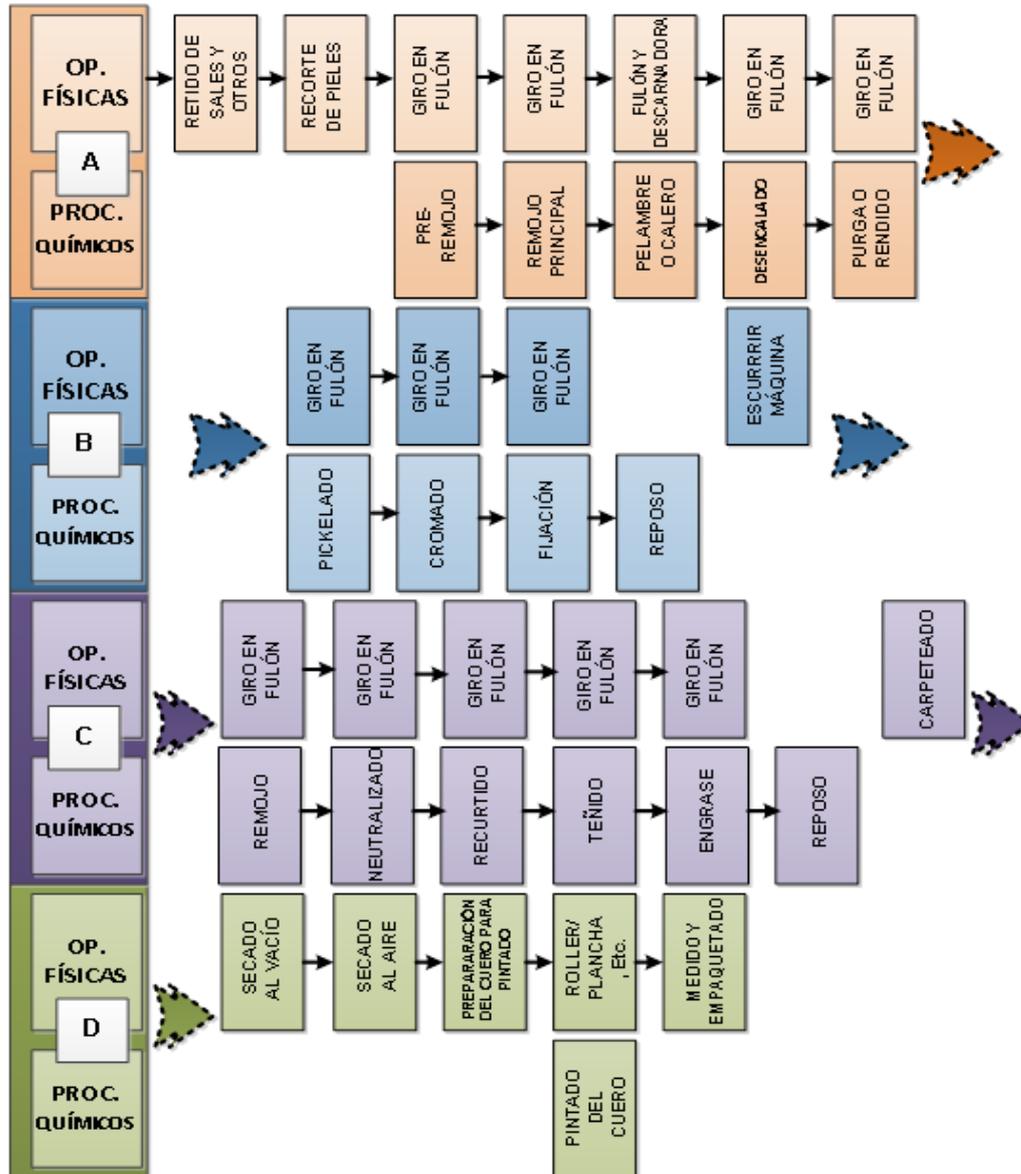
El proceso productivo se clasifica en cuatro zonas (ribera, curtido, recurtido y acabado en seco), en la **Figura 1** se observa el diagrama de transformación del cuero.

Figura 1
Diagrama general de transformación de la Piel a cuero



Cada etapa está conformada por proceso y operaciones unitarias con diferentes finalidades. La zona de ribera comprende las operaciones: acondicionamiento, pre-remojo, remojo principal, pelambre o calero, desencalado y purga o rendido; la zona curtido corresponde desde pickelado hasta escurrido; la zona recurtido corresponde desde el remojo de crust hasta el teñido final y la última zona corresponde a la etapa de acabados correspondiente desde el secado hasta el almacenamiento del cuero, en la **Figura 2 (Ver pag Nº 20)** se muestra las operaciones y procesos involucrados en la transformación del cuero.

Figura 2
Esquema de las diferentes operaciones en la zona ribera



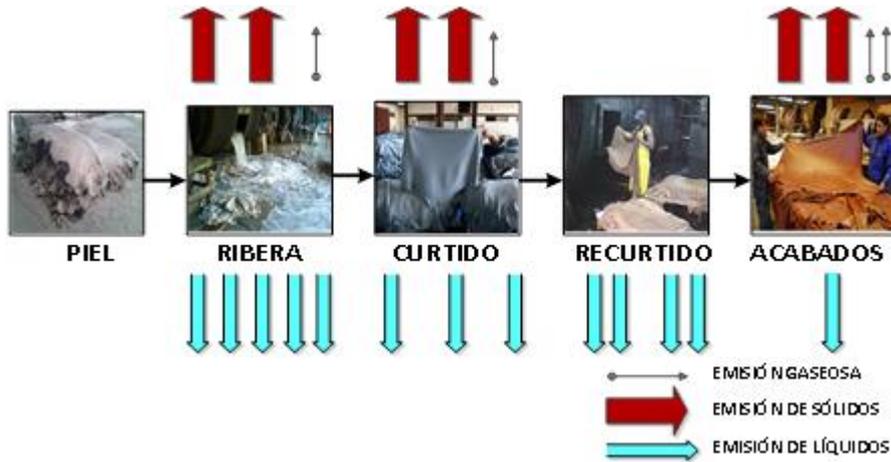
2.2.2. Caracterización ambiental en curtiembre

Como se indicó en los párrafos anteriores, el proceso de transformación del cuero consta de una serie de operaciones y procesos, con las cuales se llega a obtener cuero. Cada operación cumple con sus objetivos específicos, acompañado de entrada y salida de materia (agua, pieles, productos químicos, energía, etc.)

En las diferentes zonas del proceso se generan efluentes con diferentes grados de contaminación contenidos en estado sólido, gaseoso y líquido, en la **figura 3**

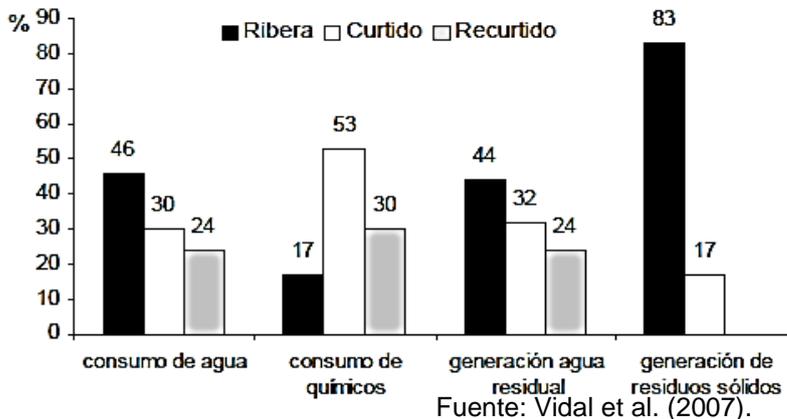
(Ver pag Nº 21) se muestran contaminantes generados en las cuatro zonas del proceso de transformación del cuero, indicados según su estado.

Figura 3
Diagrama de los diferentes contaminantes generados



A modo de comparar los flujos de balance global de materia de entrada de los insumos químicos, agua, y la generación de los desechos tanto sólidos y líquidos se muestran en la **Figura 4** (Vidal et al., 2007)

Figura 4
Consumo de agua, insumos químicos y generación de agua residual

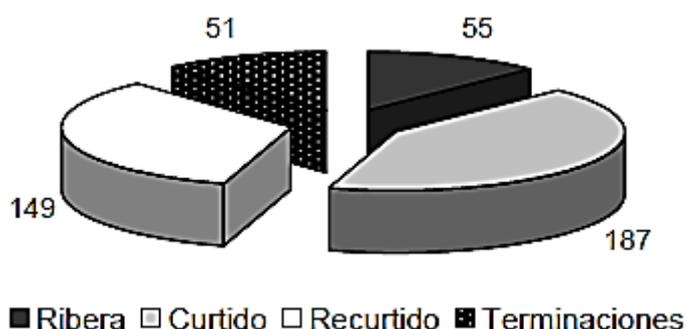


2.2.3. Insumos químicos en curtiembre

Según Vidal et al. (2007) el consumo promedio de los productos químicos utilizados en la industria del cuero varía en función del tipo de piel, conservación

de la piel y artículo final. En las cuatro zonas (ribera, curtido, recurtido y acabado) con respecto a la cantidad, tipo y finalidad de productos son muy diferentes, en la **Figura 5** se muestra el consumo promedio de productos químicos repartidos en las cuatro zonas del total de entrada (442 Kg/t_{phs})

Figura 5
Consumo de productos químicos en curtiembre
 Fuente: Vidal et al. (2007).



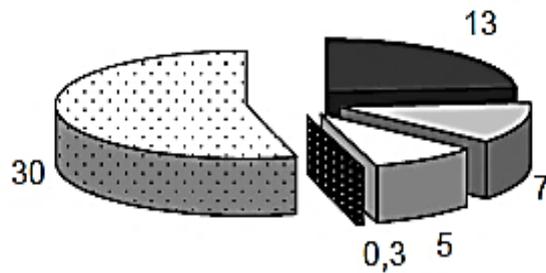
Los productos químicos empleados para la transformación de la piel en cuero en la zona de ribera, los más comunes son: Sal industrial (NaCl) para su conservación de la piel, productos auxiliares (tensoactivos, antisépticos, etc.), para la etapa de pelambre y calero (sulfuro de sodio, hidróxido cálcico, hidróxido de sodio, tensoactivos, enzimas, etc.), para la etapa de desencalado (sulfato de amonio, bisulfito de sodio, etc.) y la última etapa que es el rendido conformado por enzimas y productos auxiliares (Morera i Prat & Casanovas, 2002).

2.2.4. Consumo de agua en curtiembre

La curtiembre utiliza altos volúmenes de agua, esta puede variar de acuerdo a la tecnología empleada, conservación de la piel y artículo final producido. De las cuatro etapas de fabricación del cuero, la zona de ribera encabeza el número uno en consumo de agua a diferencia de otras zonas. Cabe mencionar las etapas de lavado representan las operaciones unitarias donde se consume mayor cantidad de agua, eso da como resultado mayor generación de efluente producido (Vidal et al., 2007)

En la **Figura 6 (Ver pag N° 23)** se muestra el consumo de agua por m³ en las cuatro zonas incluido en otros que corresponde a alimentación a la caldera, limpieza de la planta, limpieza de maquinarias, entre otros.

Figura 6
Consumo de agua con la tecnología fulón



■ Ribera □ Curtido □ Recurtido ■ Terminaciones □ Otros

Fuente: Vidal et al. (2007)

2.2.5. Aguas residuales de la zona ribera

La zona ribera genera altas cargas orgánicas causadas por la presencia de proteínas solubilizadas, grasas, pelos destruidos a causa de agentes reductores como el sulfuro, la cal que al combinarse con otras sustancias presentes en el efluente forman sustancias insolubles, seguido de un cambio de pH. Con respecto al sulfuro, en estado de sulfuro de hidrógeno, son conocidos como tóxicos, generando problemas posteriores en los tratamientos biológicos y operaciones en la planta.

Por tonelada de producción de piel vacuna se generan 50 Kg/ton de DQO, 10 Kg/ton de DBO, 60 Kg/ton de sólidos suspendidos, 8 Kg/ton de sulfuro y 20 m³/ton de volumen de agua (Thorstensen, 1993) En la **Tabla 1 (Ver pag N° 24)** se muestra el pH, la composición y las consecuencias del efluente saliente de la zona ribera.

2.2.6. Tratamiento de efluentes en curtiembres

Los tratamientos integrales convencionales utilizados para obtener efluente libre de contaminantes tóxicos (sulfuro, cromo, etc.) requiere implementar procesos acopladas muy eficientes y seguras.

Tabla 1
Composición de los efluentes generados en la zona ribera

| Operación | pH | Composición del efluente | Consecuencias | |
|--------------------------|-----------------------|--------------------------------------|--|--|
| PROCESO DE RIBERA | Remojo | Neutro, ligeramente ácido o alcalino | Estiércol, suegro de sangre, cloruro de sodio, carbonato de sodio, proteínas solubles, naftalina, tensoactivos, y otros preservantes plaguicidas | Altos niveles de DQO y sólidos suspendidos |
| | Pelambre y calero | (12–14) | Pelo, grasas, proteínas, queratina, sulfuros, cal y alto contenido de sólidos suspendidos | Emisión de H ₂ S |
| | Desencalado y rendido | (7–8) | Sales cálcicas solubles, pigmentos, proteínas solubles, alto contenido de nitrógeno por sales amoniacales | Emisión de NH ₃ |

Esparza y Gamboa (2001)

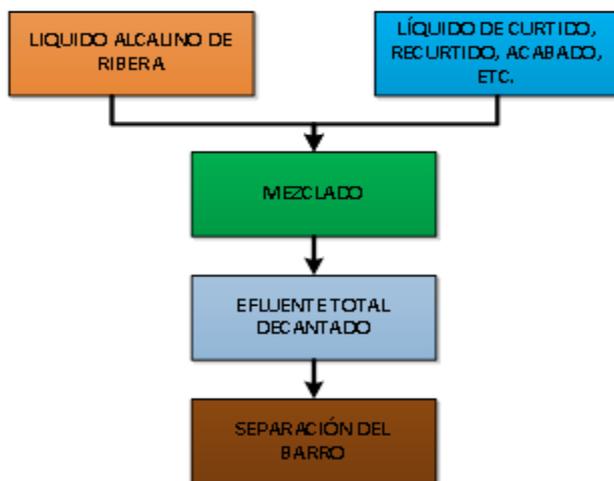
- a) **Tratamiento integral para eliminar sulfuros.** El tratamiento consiste en oxidar los sulfuros por medio de aireación catalizadas con iones de manganeso, de esta forma se reduce la concentración y llevarla para su posterior acidificación generando dos fases separables, logrando así disminuir los sólidos suspendidos, este tratamiento es recomendable para no generar gases sulfhídricos que es altamente mortal y para posteriores tratamientos biológicos. En **Figura 7** se aprecia el tratamiento en forma general.

Figura 7
Tratamiento para eliminar el sulfuro zona ribera



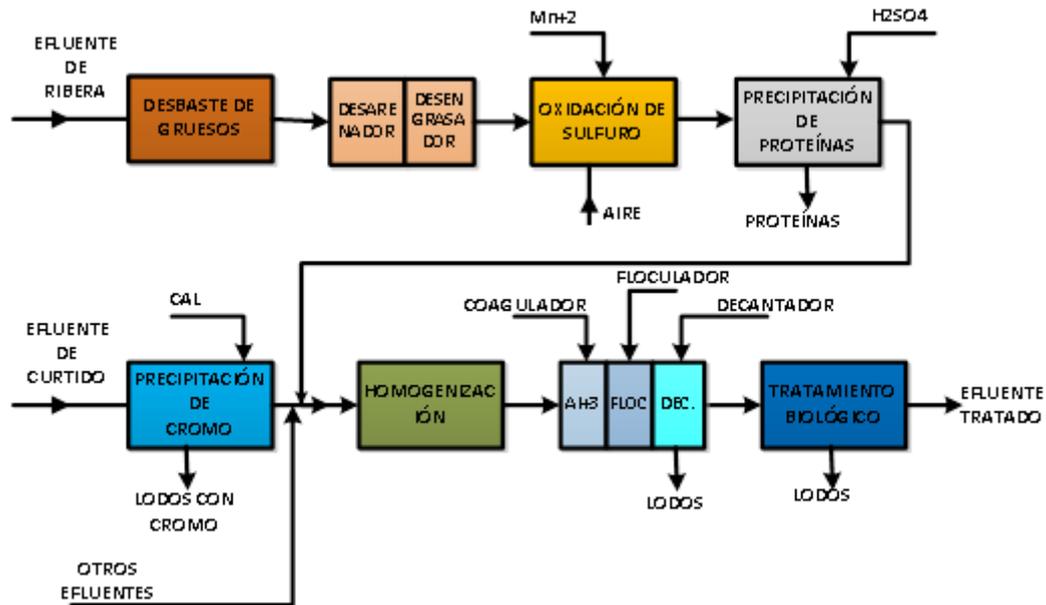
b) **Tratamiento por neutralización.**- Tratamiento basado en juntar el efluente proveniente de la zona de ribera y los demás efluentes con la finalidad de neutralizar el efluente total y formar dos fases. El efluente que viene de la zona ribera es alcalino y el resto es ácido, al juntarlos se forman un precipitado por reacción de neutralización, reduciendo de esa forma a los contaminantes. La **Figura 8** representa el tratamiento por neutralización.

Figura 8
Tratamiento por neutralización



c) **Tratamiento integrado para procesos biológicos.** Para posteriores tratamientos biológicos ya sea anaeróbicos o aerobios, los efluentes salientes de cualquier industria que contienen sustancias tóxicas deben ser sometidos a un tratamiento previo. Los efluentes líquidos de una curtiembre tienen dos características comunes ácido y alcalino, al mezclarse se forman compuestos de (H_2S), altamente tóxicos; para ellos y otras sustancias presentes se requiere hacer operaciones previas como el desbaste de gruesos, desengrasador, oxidación de sulfuro, precipitación de proteínas, seguido de un coagulador y floculador para su posterior tratamiento biológico. En la **Figura 9 (Ver pag Nº 26)** se muestran las operaciones y procesos previos antes del tratamiento biológico.

Figura 9
Esquema de tratamiento previo en efluentes de tenería



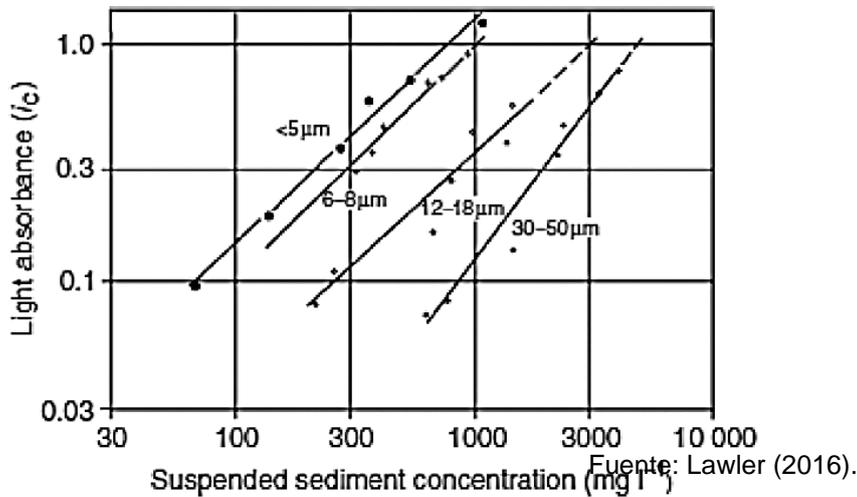
2.2.7. Turbiedad

Según la Organización Internacional de Normalización (1999), la turbidez es la reducción de la transparencia de un líquido causada por la presencia de materia no disuelta, las aplicaciones de la turbidimetría como medio de medición ha encontrado sus usos en laboratorios científicos, industria de alimentos, etc. En principio la turbidez relaciona la dispersión y absorbancia de la luz sobre los sólidos suspendidos, según Lawler (2016) la relación directa entre los datos de turbidez y las concentraciones de sólidos en suspensión se ve debilitada por las complejas interacciones de la energía luminosa con las partículas en suspensión. Esta interacción depende en gran medida de muchos factores:

- a) Concentración de partículas dispersas suspendidas en el medio y distribución de tamaño de partículas dispersas.
- b) Forma, orientación y estado de la superficie de las partículas dispersas.
- c) Índice de refracción de las partículas dispersas y suspendidas.
- d) Longitud de onda de la fuente de luz empleada.

En la **Figura 10** se muestra la influencia del diámetro de la partícula sobre la absorbancia de la luz.

Figura 10
Diámetro de sedimentos y su relación de absorbancias



2.2.8. Ozono en aguas residuales industriales

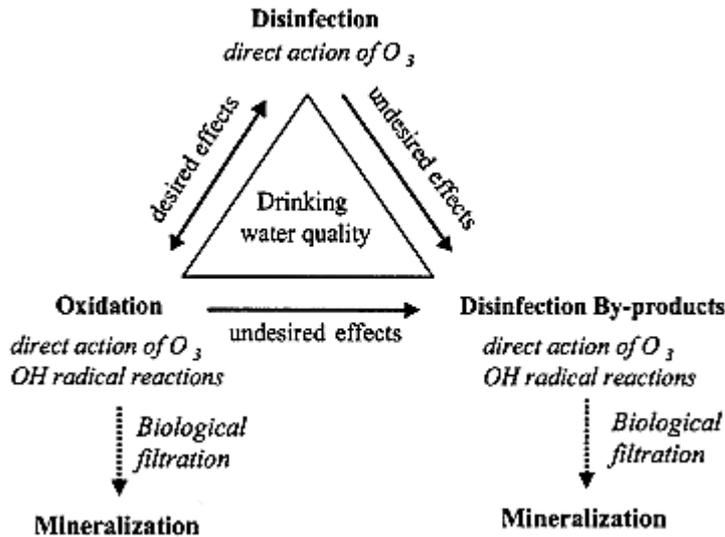
Ozono.- El ozono es un agente altamente oxidante, usado mayormente en tratamiento de efluentes líquidos, por su capacidad de desinfección, reducción de colores y olores y su principal característica es oxidar compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica; las reacciones suceden directa e indirectamente de acuerdo a su propiedad de descomposición del ozono, al descomponerse forma varios subproductos entre ellos la formación del hidroxilo.

Catálisis de ozono.- Los agentes catalíticos usualmente utilizados para descomponer y formar el radical hidroxilo son: peróxido de hidrógeno, UV y así como los iones de níquel (II), cobre (II), hierro (II), manganeso (II), zinc (II) y cobalto (II) (Andreozzi et al., 1999). Mediante la formación de radicales hidroxilos se logra oxidar compuestos altamente recalcitrantes llevándolos a mineralizar hasta sustancias simples, facilitando para los tratamientos posteriores.

Reactividad de ozono.- El ozono al entrar en contacto con los contaminantes lo hace por dos vías, una directamente y la otra indirectamente; las reacciones

directas son consideradas muy selectivas, en cambio las reacciones indirectas son con los radicales oxidrilos y otros subproductos, estas reacciones no son selectivas. La **Figura 11** muestra un esquema de las dos reacciones que suceden con los contaminantes.

Figura 11
Vías de reacción del ozono con los contaminantes



Gunten (2003)

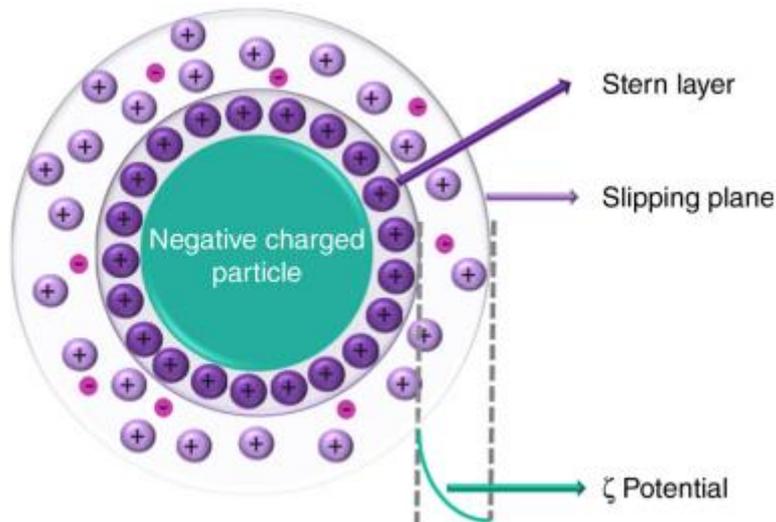
2.2.9. Mecanismos de coagulación Química

Las aguas residuales contienen contaminantes solubles e insolubles, estas partículas presentes en los efluentes se distribuyen de acuerdo a sus tamaños, los coloides poseen diámetro entre 1 y 1.000 milimicrómetros (Vargas, 2004). Las solubles están representadas por las partículas disueltas, en cambio las insolubles son partículas que tienen diferentes velocidades de sedimentación, cuanto más pequeña la velocidad es más lenta; sin embargo, los coloides tienen propiedades muy diferentes hacia otros sólidos presentes en el efluente.

Una de las propiedades que caracteriza a los coloides a parte de su tiempo de sedimentación es la relación a su superficie específica que es mucho mayor a comparación de otras partículas incrementando su capacidad de adsorción. Los coloides al tener carga negativa atraen iones de carga positiva formándose una serie de capas, entre ellas la capa difusa y la coexistencia de la doble capa

eléctrica, aumentando su estabilidad en medio acuoso, en la **Figura 12** se observa la formación de la doble carga.

Figura 12
Modelo de la doble capa

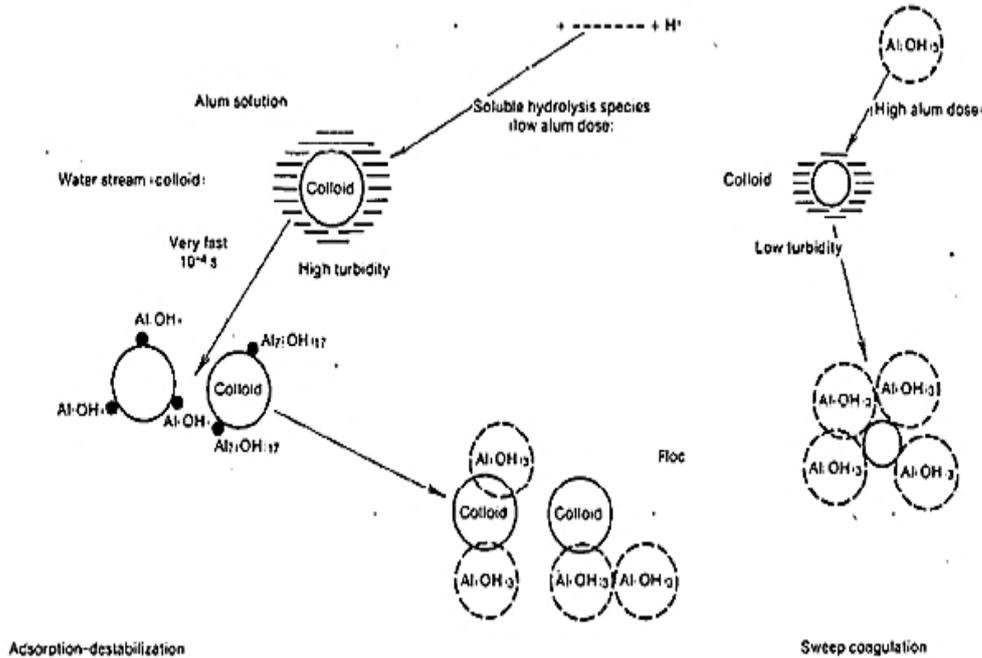


Gumustas et al. (1982)

La coagulación se puede considerar como un proceso de desestabilización de las partículas coloides con la finalidad de incrementar la fuerza de Van der Waals, de esa manera reducir la fuerza de repulsión, aumentando el peso de las partículas, seguido de una sedimentación. La coagulación es un proceso químico, es el resultado de diversos mecanismos como: compresión de la doble capa, adsorción y neutralización, barrido y adsorción y formación del puente (Vargas, 2004)

La coagulación se da por dos mecanismos, uno por adsorción y neutralización de las especies monoméricas formadas de los agentes coagulantes sobre los coloides, y la otra por coagulación por barrido, que atrapa en el interior de los precipitados formados a los coloides (Amirtharajah & Mills, 1982). En la **Figura 13 (Ver pag Nº 30)** se aprecia los dos mecanismos de coagulación que suceden paralelamente

Figura 13
Formas de coagulación mediante desestabilización



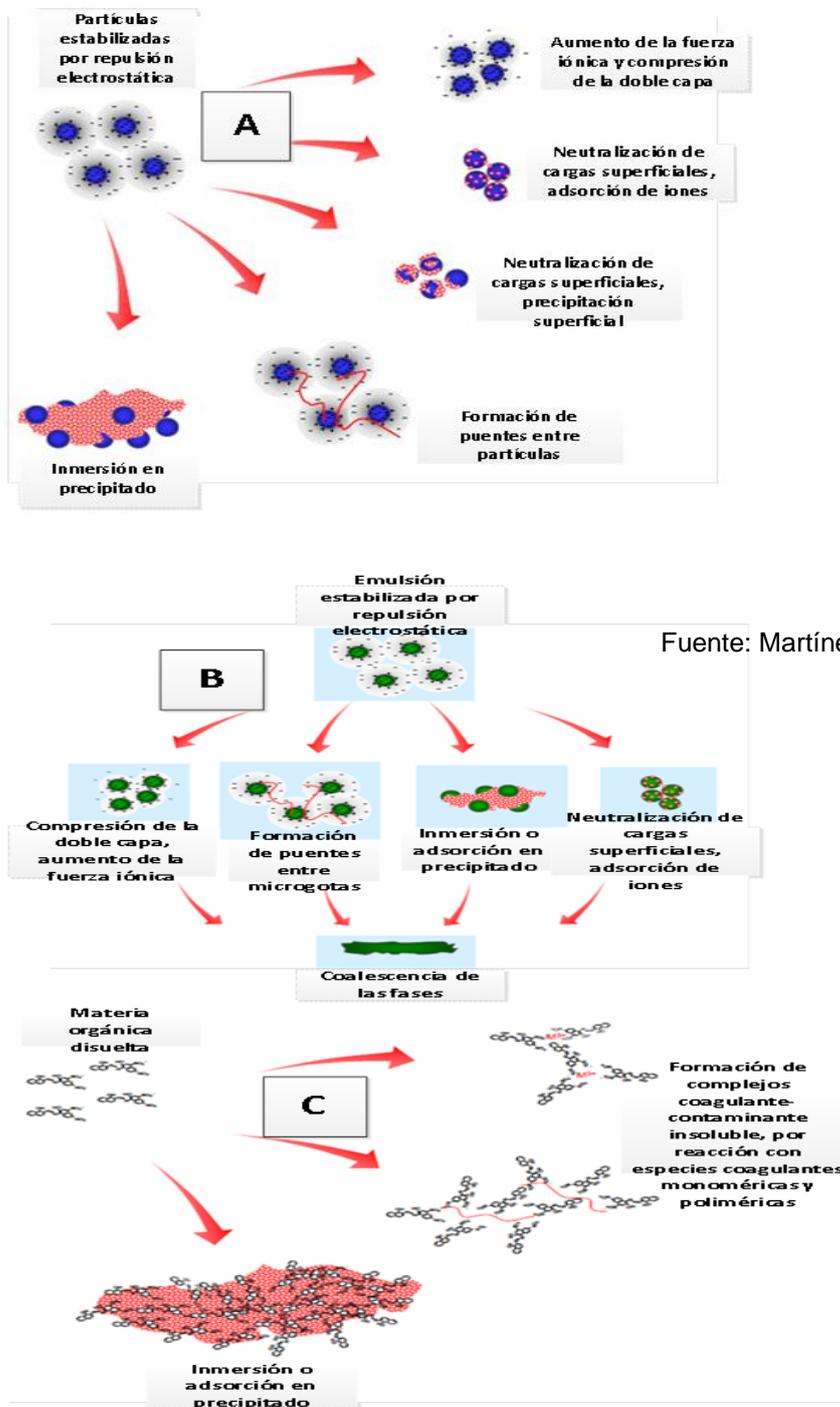
Amirtharajah y Mills (1982)

2.2.10. Coagulación sobre diversos contaminantes

Mediante los procesos de coagulación y floculación se eliminan diversos contaminantes, entre ellos los más conocidos los coloides, sustancias emulsionadas y materia orgánica, y cada uno con mecanismos diferentes de eliminación. (1) Los coloides al tener características como: carga negativa, diámetro pequeño, presentar capa difusa, tiempo de sedimentación muy prolongada, etc. hace imposible su eliminación por operaciones normales de sedimentación. Mediante la coagulación y floculación estas propiedades son alteradas, aumentando la velocidad de sedimentación. (2) En las tenerías los aceites son usados en forma emulsionada, una parte emulsionada es vertido al efluente generando problemas, estas emulsiones son sistemas formadas por dos sustancias que son inmiscibles, llegando a formar pequeñas gotas de aceite dentro del agua. Las emulsiones se encuentran en su estado estable por la carga eléctrica complicando su proceso de separación. (3) Otra de las sustancias contaminantes en mayor concentración es la carga orgánica presente en el efluente de la zona ribera. Estas sustancias son desestabilizadas mediante la

adición del coagulante y floculante, en la **Figura 14** se muestra los diferentes mecanismos para desestabilizar cada contaminante.

Figura 14
Formas de desestabilizar los contaminantes por coagulantes



Fuente: Martínez (2007).

2.2.11. Propiedades físico químicas de aluminio (III)

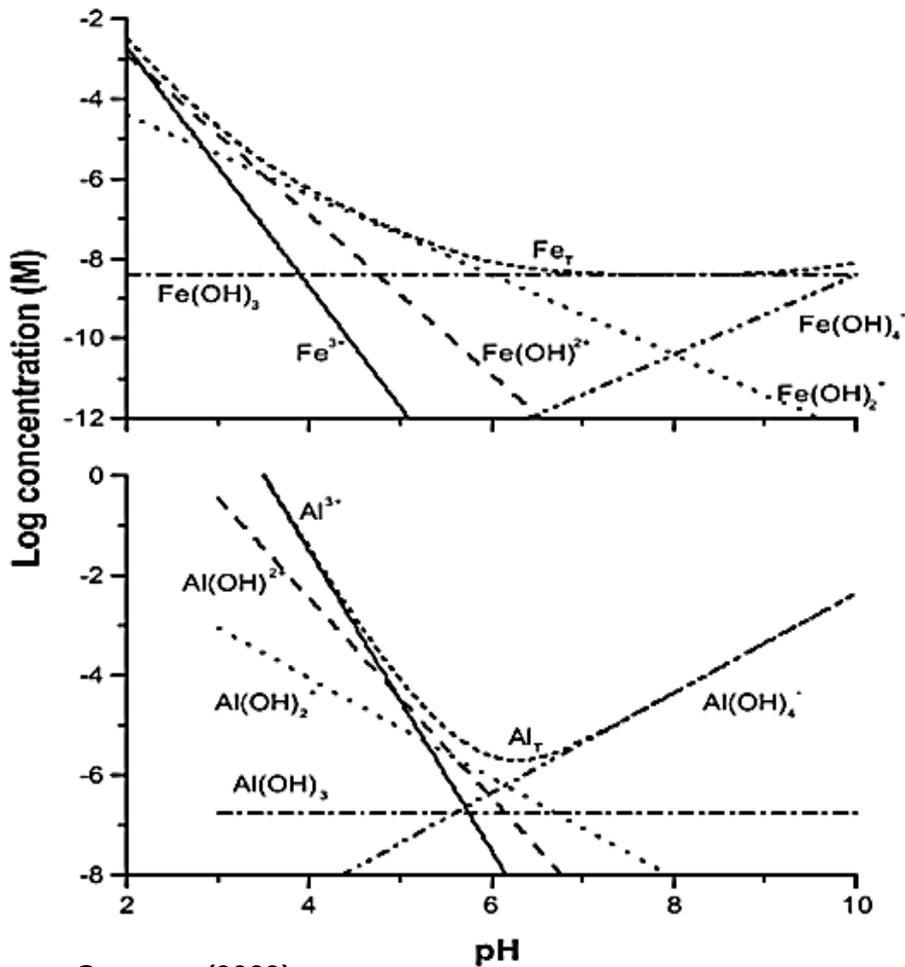
Las sales de aluminio al entrar en contacto con el agua empiezan a formar diversos productos desde lo más simple (monómeros) hasta especies complejas (precipitados), a medida que avanza el tiempo de reacción se van formando varias especies intermedias hasta llegar a formar especies insolubles, los cuales están gobernados por factores importantes como el pH, concentración, impurezas, entre otros (Amirtharajah & Mills, 1982)

Al tener carga positiva el ión de aluminio tiende a atraer a las moléculas del agua formando la configuración octaédrica, dando lugar a una polarización, generando pérdidas de protones, esto hace que se reemplace por grupos de hidroxilo resultando una carga positiva menor a la especie original, los diferentes mecanismo se muestra en las ecuaciones 1 a 5 (Amirtharajah & Mills, 1982).



La formación de especies monoméricas se da a concentraciones bajas y acompañando de un incremento del pH. En base a su solubilidad y la constante de hidrólisis se forma una gráfica de pH y concentración de diferentes especies formadas en equilibrio con el precipitado, la **Figura 15 (Ver pag N° 33)** muestra la concentración de especies monoméricas formadas en equilibrio con hidróxidos amorfos tanto para hierro y aluminio (Duan & Gregory, 2003)

Figura 15
Formación de diferentes especies a diferentes pH de Al y Fe



Duan y Gregory (2003)

Mediante diagramas uno puede saber el comportamiento de las especies formadas y escoger un camino adecuado para eliminar los contaminantes, optimizando la dosis del coagulante, el pH adecuado y otros factores. Las diferentes especies que se forman están influenciadas directamente por el pH, ejemplo la formación de las especies de hidróxido de aluminio y $Al(OH)_4^-$ se da entre 6 – 7

2.2.12. Fundamentación de la electrocoagulación

Los conductores metálicos al igual que algunos electrolitos en medio acuoso conducen corriente eléctrica, esto ocasiona cambios químicos en los extremos de los materiales conductores sumergidos, impulsados por una fuente externa, este mecanismo se conoce como electrólisis, mediante el cual se descompone

los electrolitos en la superficie del material (electrodo) originando reacciones químicas diversas (Thorstensen, 1993)

Las relaciones que establecen entre la conductividad de disolución electrolítica y las reacciones químicas que suceden en la superficie del electrodo se representan mediante las leyes de Faraday a nivel experimental, los cuales cuantifican los procesos electrolíticos (Skoog et al., 2014). Al juntarse estas leyes resulta la ecuación:

$$m = \frac{1}{F} \cdot I \cdot t \cdot E_q \quad (6)$$

Dónde: m la masa depositada o liberada en cada electrodo (gramos), F la constante de Faraday (96500 Culombios), I la intensidad de corriente aplicada (amperios), t es el tiempo electrolítico transcurrido (segundos) y E_q . Corresponde a equivalente electroquímico ($E_q = M = \text{masa molecular; valencia} = v$). En forma resumida los fenómenos que suceden en la superficie de los electrodos por el paso de corriente eléctrica son: En el cátodo hay captación de electrones por parte de los cationes (reducción) y en el ánodo hay liberación de electrones por la oxidación de compuestos. En los procesos electroquímicos se producen simultáneamente diversos mecanismos entre los electrodos y el medio electrolítico (disolución), entre ellos tenemos:

- a) **Oxidación.**- Oxidación de las impurezas en la superficie del ánodo impulsadas por electrones.
- b) **Reducción.**- Aceptación de electrones para reducir las impurezas en la celda.
- c) **Electroforesis.**- Fenómeno que ocurre en el paso de iones negativos hacia el ánodo y los cationes hacia el cátodo.
- d) **Ataque electroquímico.**- Ocasionada por una fuente externa como voltaje generando oxidación del ánodo liberando iones de metales catiónicos, regulando la conductividad del medio.
- e) **Electrólisis.**- Consiste en la generación de oxígeno e hidrógeno al descomponer el agua.

f) **Polarización.**- Efecto generado al aplicar un campo eléctrico mediante la acumulación de agua o impurezas en la superficie de los electrodos, haciendo el flujo de iones de carga opuestas hacia los electrodos.

Para que sucedan estos mecanismos se necesitan de una cédula electrolítica, electrodos, fuente de energía exterior, conductores, disolución electrolítica, etc.

2.2.13. Mecanismos y reacciones electroquímicas-químicas

Considerando desde un punto de vista electroquímico, en un sistema de electrocoagulación ocurren dos principales reacciones, en el ánodo la disolución del metal y en el cátodo la formación del radical hidróxido mediante la reducción del agua, dichas reacciones suceden paralelamente formando diversas especies y afectan el equilibrio de la celda (coagulantes, burbujas de gases y cambios en el pH)

Las reacciones que se dan en los electrodos de aluminio son (Picard et L., 1999):

En el ánodo (oxidación):

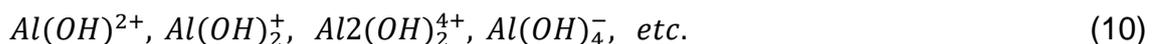


En el cátodo (reducción):



Los productos que se forman en el seno electrolítico a consecuencia de los fenómenos químicos y físicos son (Rebhun & Lurie , 1993):

Especies monoméricas:



Especies poliméricas:



Especie de precipitado:



Estas especies que se forman están controladas por la intensidad de corriente, pH, tiempo de permanencia, tipo de material, entre otros (Rebhun & Lurie, 1993). En la **Tabla 2** se aprecia el tiempo medio de formación de algunas especies.

Tabla 2
Tiempo medio de formación de especies químicas

| COMPONENTES | t _{1/2} |
|---|--------------------|
| Formación de hidróxidos monoméricas | 10 ⁻⁴ s |
| Formación de dímeros | 1s |
| Formación de Al ₁₃ polímeros | Minutos |
| Al(OH) _{3(s)} (am) precipitación | A años |
| Al(OH) _{3(s)} cristalización | Meses o años |

Rebhun y Lurie (1993)

La liberación de los iones aluminio (Al³⁺), casi en su totalidad están influenciadas en las reacciones de equilibrio ácido y base, complejación, precipitación, co-precipitación y otros. (Hakizimana et al., 2017). La formación de las diferentes especies coagulantes provenientes sea de mecanismos electroquímicos o corrosión química dentro de la celda electrolítica, está gobernada por parámetros de suma importancia, como la intensidad de corriente, el pH, el tiempo de tratamiento, etc.

La cantidad de metal disuelto en el ánodo se calcula mediante la ecuación de Faraday (Hakizimana et al., 2017):

$$m = \emptyset \cdot \frac{It}{ZF} \cdot M \quad (13)$$

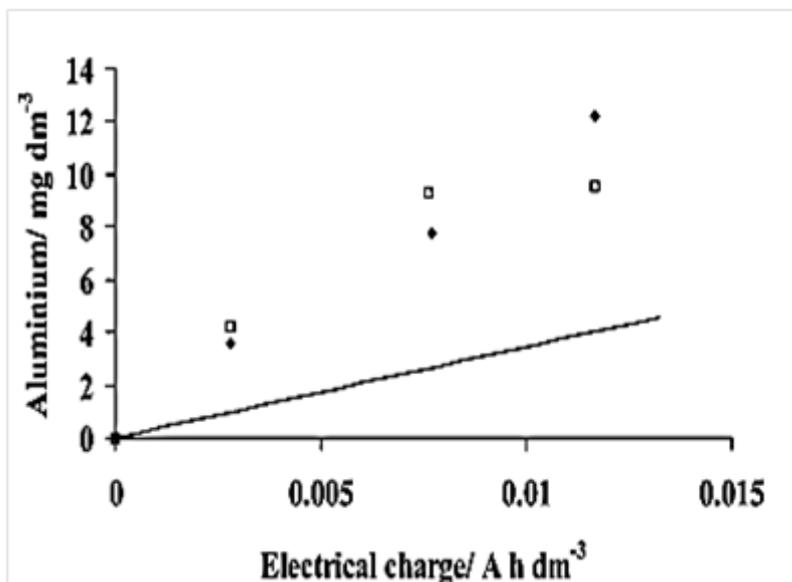
Dónde

\emptyset : Es la eficiencia farádica, m es la masa depositada o liberada en cada electrodo (gramos)

- F** : Es la constante de Faraday (96 500 Culombios)
- I** : Es la intensidad de corriente aplicada (amperios)
- t** ; Es el tiempo electrolítico transcurrido (segundos)
- z** : Son los electrones transferidos
- M** ; Es el peso molecular del metal (g/mol)

Teóricamente cuando ($\varnothing = 1$), se dice que la eficiencia es 100%, toda la corriente va directamente a la oxidación del ánodo, mientras ($\varnothing < 1$), la corriente es consumida no sólo en la disolución del ánodo si no en la oxidación del agua y otras reacciones secundarias, pero cuando ($\varnothing > 1$), se da cuando la cantidad de aluminio disuelto es mayor a lo teórico, en este caso ocurren los dos mecanismos (electroquímico y corrosión química). Este caso último se ve muy frecuente en la práctica cuando se usa electrodos de aluminio trabajando a condiciones de pH ácido y base. En la **Figura 16** la electrodisolución del aluminio a una baja intensidad de corriente, donde se compara la cantidad liberada experimentalmente y teóricamente (ley de Faraday), se aprecia una diferencia considerable superior en lo teórico con respecto a lo calculado con la ecuación 11 (Cañizares et al., 2005)

Figura 16
Disolución electroquímica/química del aluminio



Cañizares et al. (2005).

2.2.14. Efectos de la corriente eléctrica en la celda

Al aplicar una corriente eléctrica neta a una celda electroquímica se debe tomar en cuenta factores como el potencial termodinámico (calculado a partir de la ecuación de Nernst), la caída de potencial a causa de la celda del medio electrolítico, la polarización, etc. Estos fenómenos están relacionados y sujetos a la siguiente ecuación matemática donde $E_{aplicado}$ representa el potencial aplicado a la celda sumado a un valor superior al potencial termodinámico (Skoog et al., 2014):

$$E_{aplicado} = E_{celda} - IR \quad (14)$$

Dónde :

E_{celda} : Es el valor del potencial termodinámico (ecuación de Nernst) (voltios)

IR : Es la resistencia ocasionada por la celda (voltios). Según esta ecuación la relación de corriente sobre el potencial sigue una gráfica lineal considerando una pequeña resistencia, pero al aumentar el voltaje aparece una curva, comúnmente para celdas donde no se ajustan a la función lineal presentan fenómenos como la polaridad, pasivación, etc.

Adicionando el sobre voltaje a la ecuación 11 resulta:

$$E_{aplicado} = E_{celda} - IR - II \quad (15)$$

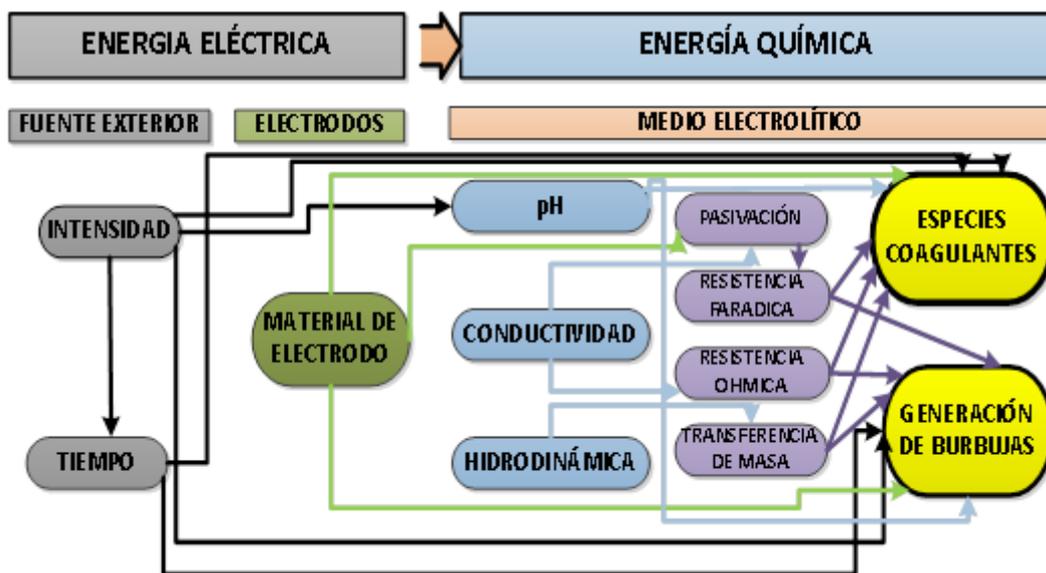
Los factores que influyen a la polarización son: los electrodos, composición de la disolución electrolítica, temperatura, nivel de corriente, estado físico de las especies, etc. Estos factores están relacionados con la eficiencia de la celda electrolítica. Estos fenómenos llevan a un grado alto de la polarización del electrodo llegando a generar el corriente límite, sin cambio alguno de flujo de electrones. La polarización se divide en dos categorías: uno de ellos es ocasionado por la concentración, que no es más que la limitación de la

transferencia de masa desde el seno de disolución hasta la superficie del electrodo, la polarización por efecto de la concentración se da cuando los reactantes no llegan a la superficie del electrodo o los productos no abandonan la superficie del electrodo, generando una deficiencia en la corriente eléctrica, no se comporta igual que la ecuación 12. En una celda electroquímica los reactantes o productos formados se transportan por tres mecanismos: difusión, convección y migración. La polarización cinética está limitada por la velocidad de transferencia de cargas eléctricas entre los reactantes y los electrodos.

2.2.15. Parámetros influyentes en la electrocoagulación

Los parámetros principales que afectan el desempeño en la reducción de la turbiedad en forma general se representan en la siguiente **Figura 17**

Figura 17
Relación entre factores para la generación de coagulante



a) **Densidad de corriente.**- Como lo hace notar Holt et al. (2004), es la intensidad de corriente suministrada a una celda, con la finalidad de generar iones (aluminio o hierro, etc.), se sugiere trabajar con densidades bajas entre 20 A/m^2 – 25 A/m^2 . Como afirma (Holt et al., 2004), la eficiencia en la densidad de corriente eléctrica para electrodos de aluminio es alrededor de 120 – 140%, se debe por la presencia de cloruros.

- b) Conductividad.-** Como dice Chen (2004), es otro de los factores a tener en cuenta, en este caso se recomienda al cloruro de sodio, porque tiene ventajas con respecto a otras sales, en reducir los efectos adversos de otros iones (bicarbonato, carbonato, etc.), de lo contrario precipitarían sobre los electrodos, causando mayor resistencia. Por lo general se recomienda la cantidad de cloruro en un 20% para una electrocoagulación eficaz, acompañado a una disminución en consumo de corriente.
- c) pH.-** Es otro de los parámetros importantes que refleja en la eficiencia de la celda, así como en la solubilidad de las especies formadas, algunos trabajos concluyeron que el pH óptimo para una mejor remoción está situado en pH ácido y alcalino y no en neutro como algunos dicen, esto se debe a la naturaleza del contaminante. El pH óptimo para la electrocoagulación se sitúa en el rango de pH 6 – 8 (Butler et al., 2011)
- d) Tipo de electrodo.-** Empleando las palabras de Chen (2004) los materiales generalmente utilizados son el aluminio y el hierro, principalmente por su bajo costo y accesibilidad, los electrodos de aluminio a diferencia de hierro son mayormente utilizados por tener la propiedad de autogenerarse como coagulante.

Según la **Figura 17 (Ver pag N° 39)** se aprecia una serie de factores principales que afectan la eficiencia de una celda de electrocoagulación y que a la vez están conectados vectorialmente a una serie de variables afectando en la producción y generación de las especies coagulantes, gases y subproductos.

2.2.16. Indicadores del proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada

Porcentaje de reducción de turbiedad.- Se determina el grado de turbiedad antes y después de su tratamiento, como tiempo de referencia se tomó una hora después de su tratamiento para su lectura final, el resultado es en porcentaje:

$$R_{turbiedad} = \left(\frac{T_{inicial} - T_{final}}{T_{inicial}} \right) * 100 \quad (16)$$

Dónde:

$T_{inicial}, T_{final}$: (NTU) y R turbiedad (%)

Cantidad de aluminio disuelto electroquímicamente.- La dosis de aluminio generado en el ánodo por la intensidad de corriente se calcula mediante la ecuación:

$$m = \frac{M}{n \cdot F} \int_{t.inicial}^{t.final} I(t) * dt \quad (17)$$

Dónde

- M** : Es la masa molar de aluminio (27 g/mol)
- n** : Es el número de electrones liberados (3 e⁻)
- F** : Es la constante de Faraday (96 500 C/mol)
- t** : Es el tiempo (segundos) e I en la intensidad en Amperios.

Rendimiento de Faraday.- Relaciona la cantidad de masa generada de ión aluminio tanto teórico y experimental mediante la ecuación:

$$R_F = \frac{m_{experimental Al^{3+}}}{\frac{M}{n \cdot F} \int_{t.inicial}^{t.final} I(t) * dt} \quad (18)$$

Dónde:

- m** : Es la masa liberada tanto electroquímica y química en gramos
- M** : Es la masa molar de aluminio (27 g/mol)
- n** : Es el número de electrones liberados (3 e⁻)
- F** : Es la constante de Faraday (96 500 C/mol)
- t** : Es el tiempo (segundos) y I en la intensidad en Amperios.

Determinación de la energía consumida electrolíticamente.- Es el consumo energético de la celda de electrocoagulación expresada en KWh/m³:

$$W_c = \frac{1}{V_R} \int_0^t U(t) * I(t) dt \quad (19)$$

Dónde:

- V_R** : Es el volumen de muestra en m³
- t** : Es el tiempo de electrocoagulación en segundos
- U** : Es el voltaje aplicado en voltios
- I** : Es la intensidad de corriente en Amperios
- W_c** ; En KWh/m³

Costo de operación de la celda acoplada de electrocoagulación y ozono.-

El costo de operación en celdas acopladas se determina por la relación:

$$Costo\ de\ operación = a * C_{celda} + b * C_{electrodo} + a * C_{ozono} + a * C_{bomba} \quad (20)$$

Dónde

- a** : Es el costo de energía eléctrica en (\$/KWh)
- b** : Es el costo de aluminio (\$/Kg)
- C_{celda}** : Es el costo de operación de la celda en (KWh/m³)
- C_{electrodo}** : Es el costo del electrodo aluminio en (Kg/m³)
- C_{ozono}** : Es el costo de producción de ozono en (KWh/m³)
- C_{bomba}** : Es el consumo de energía eléctrica por la bomba de flujo de agua en (KWh/m³).

2.3 Conceptual

La legislación relativa a los efluentes industriales líquidos es cada vez más estricta tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo, esto requiere el tratamiento de todas las aguas residuales antes que se liberen al medio ambiente.

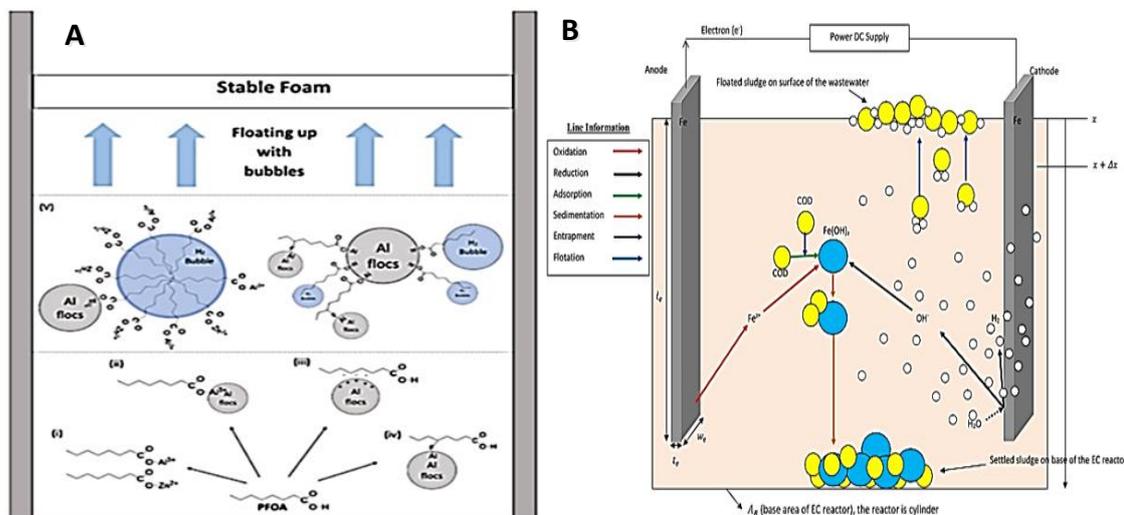
La turbidez se puede utilizar para controlar la calidad del agua de origen. Los cambios rápidos en la turbidez pueden ser un indicio de contaminación sustancial sobre eventos en las captaciones de aguas superficiales.

Para reducir la turbiedad de los efluentes se debe emplear una serie de operaciones y procesos unitarios que involucran mecanismos físicos, químicos y electroquímicos. Una de las opciones consideradas para poder alcanzar altos

niveles de calidad del agua es removiendo las partículas suspendidas, sólidos finamente divididos y materias coloidales, llevándolas a transformas en partículas grandes que sean fácilmente removibles y esto se logra mediante la coagulación, floculación y sedimentación (Pérez, 2005). En las plantas de tratamiento estos tres procesos descritos tienen en un mismo equipo denominado clarificador.

Estos procesos son secuenciales y empiezan con la desestabilización y posterior agregación de las partículas suspendidas en la **Figura 18** se muestra el mecanismo de la desestabilización mediante la adición del coagulante.

Figura 18
Mecanismo de reducción de los coloides en agua



Fuente: Yueh-Feng et al. (2020)

El uso de procesos acoplados da como resultado una mayor eliminación de contaminantes, reducción del tiempo de proceso y disminución de la generación de lodos. En este sentido, estos procesos tienden a ser más eficientes y sostenibles (Barrera-Díaz et al., 2018)

En el tratamiento acoplado de ozono-electrocoagulación, se tienen los siguientes procesos simultáneos:

- El ozono oxida las moléculas orgánicas que se disuelven en la solución y que no se puede eliminarse por electrocoagulación.
- Los iones metálicos disueltos proporcionados por la reacción electroquímica

promueven la producción de radicales de hidróxido porque los iones como el de Fe^{2+} catalizan la descomposición de ozono para generar radicales hidroxilos como un proceso de Fenton.

- c)** Las reacciones electroquímicas en el ánodo y el cátodo inducen las reacciones en solución acuosa que promueven la coagulación / floculación proceso.
- d)** El suministro de burbujas de ozono al reactor promueve la mezcla entre los reactivos, por lo que se mejora la transferencia de masa.
- e)** La acción del ozono contribuye a la reducción de la cantidad de lodos producido.

La aplicación de la electrocoagulación como técnica emergente de la ingeniería electroquímica en el tratamiento de efluentes líquidos se viene investigando desde hace varios años, presentando ventajas en relación hacia otras técnicas convencionales. La electrocoagulación representa un conjunto de mecanismos, los cuales suceden secuencialmente o paralelamente, dichos mecanismos son: electroquímicos (electrodisolución del metal y reducción del agua, reducción y oxidación de los contaminantes sobre los electrodos, etc.), mecanismos químicos (ácido y base con cambio de pH, precipitación de hidróxidos, reacciones redox en la disolución) y los mecanismos físicos (adsorción, flotación, sedimentación, etc.)

En la electrocoagulación la electrodisolución de electrodos ya sea de aluminio u otros metales (en el ánodo) es ejercida por la diferencial de potencial en los electrodos, estos iones empiezan una serie de reacciones químicas, logrando llegar a formar hidróxidos insolubles, hidróxidos solubles, con la finalidad de desestabilizar a los contaminantes: Los coloides, emulsiones, iones, materia orgánica disuelta, etc.

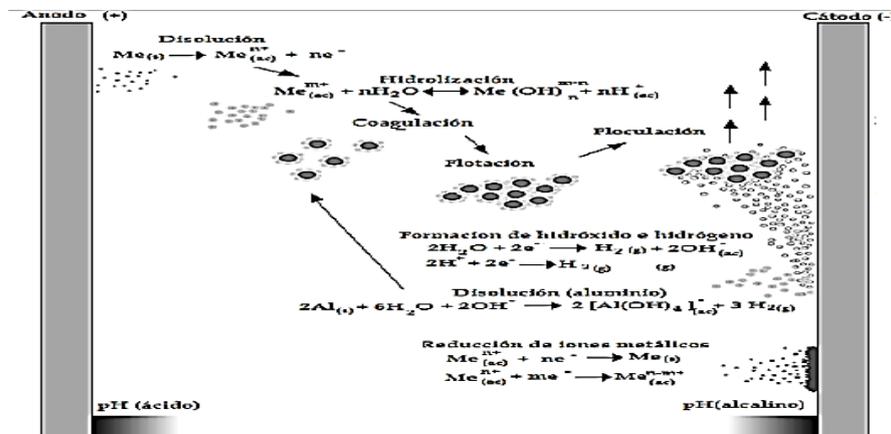
Otros de los mecanismos que suceden a las cercanías de los electrodos son los cambios de pH que se dan por la oxidación y reducción de la generarse oxígeno e hidrógeno, estos cambios son resultado de la formación de diversas especies como producto de la reacción entre el ion y el agua (Barrera-Díaz et al., 2018)

Por otra parte, en una celda de electrocoagulación ocurren reacciones secundarias entre directas e indirectas (electrólisis), formación de oxígeno e hidrógeno (electro flotación), reducción de iones metálicos en el cátodo (electrodeposición), todos estos procesos electroquímicos ayudan a eliminar a los contaminantes.

En el proceso de electrocoagulación la eliminación de los contaminantes por medio del coagulante insitu se realiza por etapas, según Mollah et al. (2001): (1) Formación de especies coagulantes por la electrodisolución del ánodo, (2) Desestabilización de los contaminantes (coloides, emulsiones, materia orgánica disuelta, etc.), por adsorción y (3) Formación de flocúlos debido a la adsorción y coagulación por barrido de los coloides y otros contaminantes.

En forma resumida, en la celda ocurren tres procesos electroquímicos, el primero el efecto de la diferencial de potencial en los electrodos lo cual origina la migración de iones opuestos y el electro oxidación y reducción de los electrodos, lo segundo la aglomeración en forma de flocúlos de los contaminantes por medio de coagulantes, y lo tercero la eliminación de las impurezas por formación de complejos por medio de atracción electrostática (Mills, 2000). En la **Figura 19** se aprecia las diferentes reacciones y mecanismos que suceden en una celda de electrocoagulación.

Figura 19
Reacciones principales en una celda de electrocoagulación



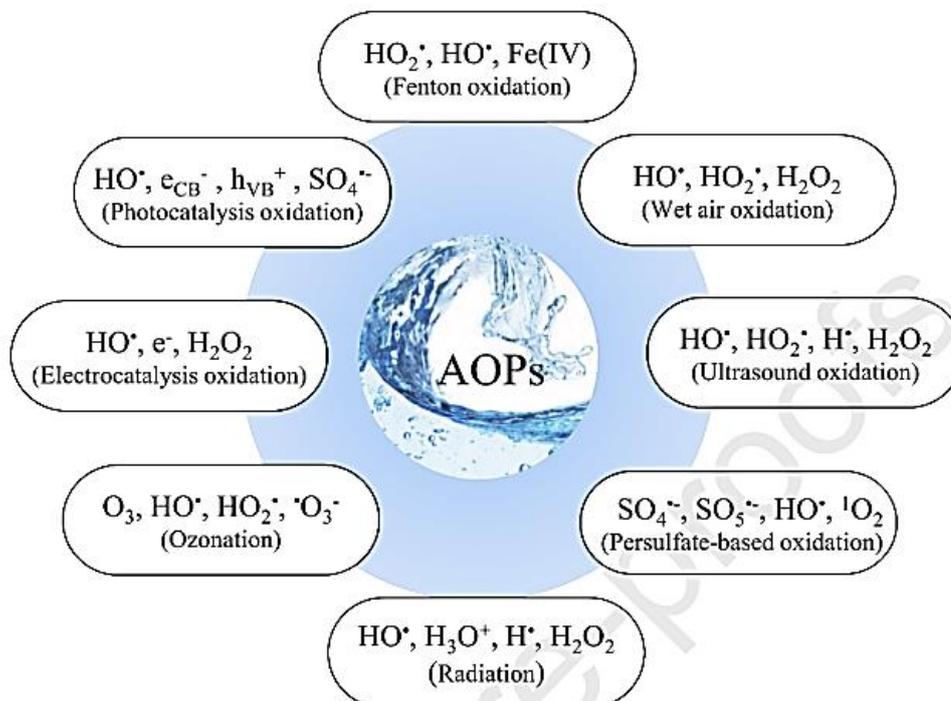
Rodríguez (2014)

La mayoría de los tratamientos convencionales sólo transfieren a los contaminantes de una fase a otra, generando contaminación hacia otros medios,

en cambio en los procesos de oxidación avanzada se utilizan diversos agentes oxidantes que tienen la finalidad de generar el radical hidroxilo para tratar efluentes industriales complejos, efluentes de alta carga no biodegradable, llevándolas a su completa mineralización y así facilitar para los posteriores tratamientos.

Para generar el radical hidroxilo se emplean diversas técnicas que usan a los agentes oxidantes y fuente de energía como iniciadores. Según Ameta (2018) estos procesos de oxidación avanzada se consideran superiores a los otros debido a que los contaminantes complejos (recalcitrantes) se degradan a simples y no generan desechos. En la **Figura 20** se aprecia diferentes mecanismos para generar los radicales hidroxilos.

Figura 20
Diferentes POAs para generar *OH radicales

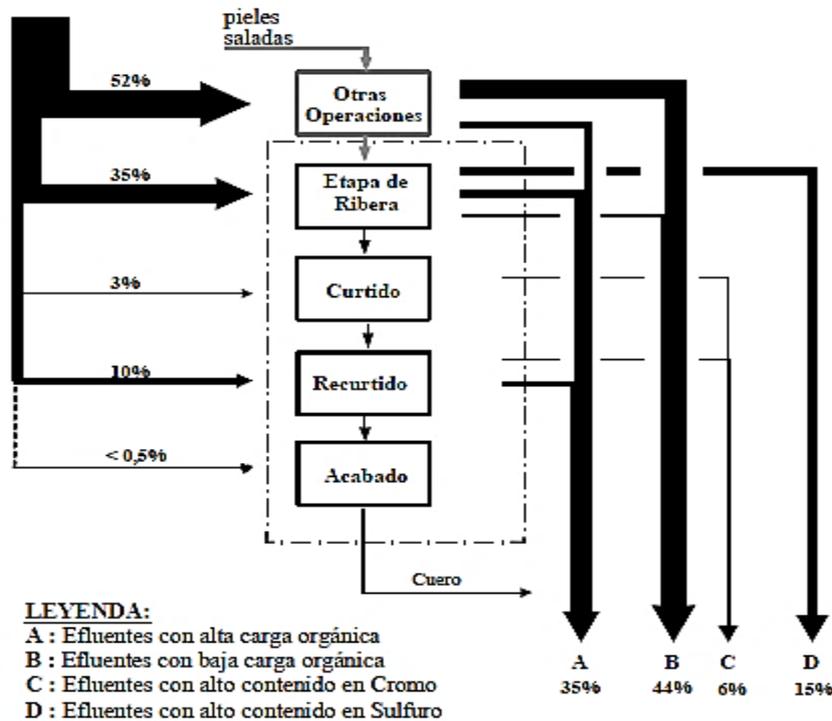


Wang y Wang (2020)

Los efluentes generados se caracterizan por tener una carga orgánica elevada y presentar concentraciones considerables de sulfuro y cromo como principales contaminantes tóxicos, generados en la zona de ribera y curtido

respectivamente. En la **Figura 21** se muestran los flujos de salida de los principales componentes generados (materia orgánica, sulfuro y cromo).

Figura 21
Flujo de salida de contaminantes en curtiembre



Vidal et al. (2007)

2.4 Definición de términos básicos

- Celdas electroquímicas.**- Una celda electroquímica consta de dos electrodos básicos, el electrodo de trabajo y el contraelectrodo (que pueden actuar individualmente como un cátodo o ánodo, aunque los electrodos de trabajo son típicamente los cátodos), junto con un electrolito (Choudhary et al., 2017)
- Electrodo.**- Los electrodos son simplemente el medio por el cual se conducen los potenciales electrocorticales al aparato de amplificación (Marcuse et al., 2016)
- Electrocoagulación.**- La electrocoagulación es un proceso electroquímico de una celda que consta de dos electrodos (ánodo y cátodo), una solución electrolítica y una fuente externa como generadora de corriente eléctrica,

donde ocurren diferentes reacciones como hidrólisis con la finalidad de generar especies coagulantes para desestabilizar y formar flóculos (Chen, 2004)

- d) Pelambre.-** Constituye una parte de operación del proceso de fabricación de cuero, donde se prepara a la piel física y químicamente para su posterior tratamiento, en el pelambre a la piel se le quitan los pelos, la grasa, algunas proteínas y partes que son inservibles para su fabricación de cuero (Morera i Prat & Casanovas, 2002)
- e) Curtiembre.-** La curtiembre es un lugar donde se transforma la piel a cuero, esta transformación se realiza sometiendo a las pieles a diferentes operaciones tanto físicas, químicas y biológicas, con la finalidad de obtener una piel con mayor tiempo de conservación en forma de cuero (Morera i Prat & Casanovas, 2002)
- f) Procesos de oxidación avanzada.-** Vienen hacer operaciones donde se utilizan agentes altamente oxidantes, con la finalidad de degradar a aquellos compuestos que se consideran recalcitrantes o difíciles de degradar en las operaciones posteriores por tratamientos ya sea químicos o biológicos, los más comunes son el ozono, el peróxido y radiación ultravioleta, etc. (Andreozzi et al., 1999)
- g) Coagulante químico.-** Sustancia química de naturaleza orgánica e inorgánica utilizada en el tratamiento de efluentes con la finalidad de reducir los sólidos suspendidos (coloides, emulsiones, etc.) (Amirtharajah & Mills, 1982)
- h) Turbiedad.-** La turbidez es la reducción de la transparencia de un líquido causada por la presencia de materia no disuelta, las aplicaciones de la turbidimetría como medio de medición ha encontrado sus usos en laboratorios científicos, industria de alimentos, etc. (ISO, 1999)

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1. Hipótesis General

El tratamiento mediante el proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada es eficiente en la reducción de la turbiedad de las aguas residuales procedentes de una curtiembre.

3.1.2. Hipótesis Específicos

- 1) Los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales procedentes de la curtiembre superan los valores máximos admisibles de la normativa de descarga al alcantarillado.
- 2) Con los parámetros operacionales entre sus rangos, potencial (4 V, 7 V y 10 V), pH (4; 7,5 y 10,8), flujo de alimentación (240 L/h, 300 L/h y 360 L/h), turbiedad inicial (375 NTU, 580 NTU y 1 130 NTU) y flujo de ozono (900 mg/h, 1 500 mg/h y 2 400 mg/h) se obtendrá alto porcentaje de remoción de la turbiedad.
- 3) A las condiciones de operación adecuadas se conseguirá un máximo porcentaje de remoción de la turbiedad.
- 4) Las aguas residuales provenientes de la curtiembre, logran aumentar su biodegradabilidad mediante el proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada.

3.2 Definición conceptual de variables

Variable dependiente

Son respuestas que se obtienen al manipular las variables independientes, este trabajo se enfocó como respuesta principal en la reducción de la turbiedad, las demás variables se tomaron como referencia:

- a) Remoción de la turbiedad en aguas residuales procedentes de una curtiembre (Y)

Variable independiente

Parámetros operacionales de un proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada (X)

- X1** : Voltaje (V)
- X2** : Flujo de alimentación (L/h)
- X3** : Turbiedad inicial (NTU)
- X4** : pH
- X5** : Flujo de ozono (m/h)

3.2.1. Operacionalización de las variables

Con la necesidad de corroborar la hipótesis enunciada en el trabajo, detallamos la Operacionalización de las variables (dependientes e independientes), estructurando con sus dimensiones, indicadores y métodos utilizados para lograr llevar adelante un buen recojo de datos y generar un modelo matemático del proceso.

$$Y = f(X1, X2, X3, X4, X5)$$

Tabla 3
Operacionalización de variables

| VARIABLE | DIMENSIONES | INDICADORES | MÉTODO |
|--|--|----------------------|--|
| Dependiente | | | |
| Remoción de la turbiedad en aguas residuales procedentes de una curtiembre | Contenido de turbiedad antes de tratamiento y contenido de turbiedad después del tratamiento | NTU(0-1130) | Turbidímetro EZDO TUB-430 |
| Independiente | | | |
| Parámetros operacionales de un proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada | Voltaje | V (4-10) | Rectificador de corriente (0-30 V) |
| | Flujo de alimentación | L/h (240-360) | Sistema volumétrico de Flujómetro (2-18 LPM) |
| | Turbiedad inicial | NTU (375-1130) | Turbidímetro EZDO TUB-430 |
| | pH | (-log (H-)) (4-10,8) | Potenciómetro pH : 300 Hanna Instrument |
| | Flujo de ozono | mg/h (900-2 400) | Fuente generadora de ozono (0-3 g/h) Ozono Fonth |

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y Diseño de Investigación

4.1.1. Tipo de investigación

La investigación realizada se clasifico de acuerdo al siguiente criterio de Supo y Zacarías (2020):

Según la planificación de mediciones de las variables de estudio: Es prospectivo, porque se trabajó con datos primarios recogidos del campo sobre la turbiedad y otros parámetros fisicoquímicos de la muestra. *Según el número de las mediciones de la variable de estudio:* corresponde a longitudinal, porque se realizó más de una medición de las variables analíticas. *Según el número de variables:* El estudio realizado es analítico, porque tiene más de una variable analítica representado por el proceso acoplado de EC/O₃ y la reducción de la turbiedad en aguas residuales procedentes de la zona de ribera. Y por último *según la intervención del investigador:* Con intervención, porque se modificarán las variables a nivel laboratorio.

- a) **Enfoque.**- Este estudio es de enfoque cuantitativo porque se recolectaron los datos numéricos en base a los objetivos planteados y fueron evaluados y analizados estadísticamente para probar las hipótesis planteadas.
- b) **Alcance o nivel.**- El nivel de estudio realizado corresponde a explicativo, porque se analizaron las relaciones de casualidad y efecto, donde se estudió los efectos de los parámetros operacionales de la electrocoagulación y ozono sobre la reducción de los contaminantes de las aguas residuales de curtiembre para ello se realizó una investigación estrictamente experimental.

4.1.2. Diseño de investigación

La estrategia utilizada para abordar eficazmente el problema de la presente investigación fue de tres etapas: Primera la recopilación de datos sobre la muestra en estudio, segunda la adecuación de los parámetros operacionales en base al diseño estadístico experimental, la tercera recopilación de datos sobre la muestra tratada, tal como se muestra en la **Figura 22 (Ver pag N° 53)**

Figura 22
Diseño de investigación



Para el diseño de experimentos se utilizó el arreglo ortogonal robusto L27 de metodología Taguchi, con ello se logró minimizar el número de experimentos necesarios. Para el proceso acoplado EC/O₃ se estudiaron 5 factores continuos, cada uno con tres niveles de entrada, en la **Tabla 4** se muestran los factores con sus respectivos niveles.

Tabla 4
Factores operacionales con sus niveles

| Nº EXP. | Factores | Notación | Nivel Bajo | Nivel Intermedio | Nivel Alto |
|---------|-----------------------------|----------|------------|------------------|------------|
| 1 | Voltaje (V) | X1 | 4 | 7,0 | 10,0 |
| 2 | Flujo de alimentación (L/h) | X2 | 240 | 300,0 | 360,0 |
| 3 | Turbiedad (NTU) | X3 | 375 | 580,0 | 1 130,0 |
| 4 | pH | X4 | 4 | 7,5 | 10,8 |
| 5 | Flujo de ozono (mg/h) | X5 | 900 | 1 500,0 | 2 400,0 |

Para seguir el diseño adecuado en las combinaciones de las variables independientes, como se mencionó anteriormente se utilizó el diseño de la metodología Taguchi, mediante el cual se realizó 27 experimentos con su

respectiva réplica que en total son 54 experimentos, La metodología Trabaja con porciones pequeñas de muchas de las posibles combinaciones de variables de entrada, en la **Tabla 5** se muestra el diseño elaborado mediante el software Minitab 17 para una metodología Taguchi.

Se utilizó la metodología de superficie de respuesta para relacionar la influencia entre los factores operacionales sobre el porcentaje de reducción de la turbiedad, del mismo modo con los datos obtenidos se optimizó los parámetros operacionales mediante el análisis estadístico utilizando Minitab 17.

Tabla 5
Matriz de metodología Taguchi L27 (3x5)

| N° | X1 (A/m ²) | X2 (L/h) | X3 (NTU) | X4 (pH) | X5 (mg/h) | Y (NTU) |
|----|---------------------------|-------------|-------------|------------|--------------|------------|
| 1 | 4.0 | 240 | 375 | 4,0 | 900 | Y1 |
| 2 | 4.0 | 240 | 375 | 4,0 | 1 500 | Y2 |
| 3 | 4.0 | 240 | 375 | 4,0 | 2 400 | Y3 |
| 4 | 4.0 | 300 | 580 | 7,5 | 900 | Y4 |
| 5 | 4.0 | 300 | 580 | 7,5 | 1 500 | Y5 |
| 6 | 4.0 | 300 | 580 | 7,5 | 2 400 | Y6 |
| 7 | 4.0 | 360 | 1 130 | 10,8 | 900 | Y7 |
| 8 | 4.0 | 360 | 1 130 | 10,8 | 1 500 | Y8 |
| 9 | 4.0 | 360 | 1 130 | 10,8 | 2 400 | Y9 |
| 10 | 7.0 | 240 | 580 | 10,8 | 900 | Y10 |
| 11 | 7.0 | 240 | 580 | 10,8 | 1 500 | Y11 |
| 12 | 7.0 | 240 | 580 | 10,8 | 2 400 | Y12 |
| 13 | 7.0 | 300 | 1 130 | 4,0 | 900 | Y13 |
| 14 | 7.0 | 300 | 1 130 | 4,0 | 1 500 | Y14 |
| 15 | 7.0 | 300 | 1 130 | 4,0 | 2 400 | Y15 |
| 16 | 7.0 | 360 | 375 | 7,5 | 900 | Y16 |
| 17 | 7.0 | 360 | 375 | 7,5 | 1 500 | Y17 |
| 18 | 7.0 | 360 | 375 | 7,5 | 2 400 | Y18 |
| 19 | 10.0 | 240 | 1 130 | 7,5 | 900 | Y19 |
| 20 | 10.0 | 240 | 1 130 | 7,5 | 1 500 | Y20 |
| 21 | 10.0 | 240 | 1 130 | 7,5 | 2 400 | Y21 |
| 22 | 10.0 | 300 | 375 | 10,8 | 900 | Y22 |
| 23 | 10.0 | 300 | 375 | 10,8 | 1 500 | Y23 |
| 24 | 10.0 | 300 | 375 | 10,8 | 2 400 | Y24 |
| 25 | 10.0 | 360 | 580 | 4,0 | 900 | Y25 |
| 26 | 10.0 | 360 | 580 | 4,0 | 1 500 | Y26 |
| 27 | 10.0 | 360 | 580 | 4,0 | 2 400 | Y27 |

Etapas de la investigación

Está conformada por las siguientes etapas:

Primera etapa: Diseño y construcción del módulo experimental a escala laboratorio.

Segunda etapa: Evaluación del módulo experimental (pruebas hidráulicas y eléctricas).

Tercera etapa: Prueba preliminar con una muestra sintética preparada.

Cuarta etapa: Recojo de muestra problema y su acondicionamiento.

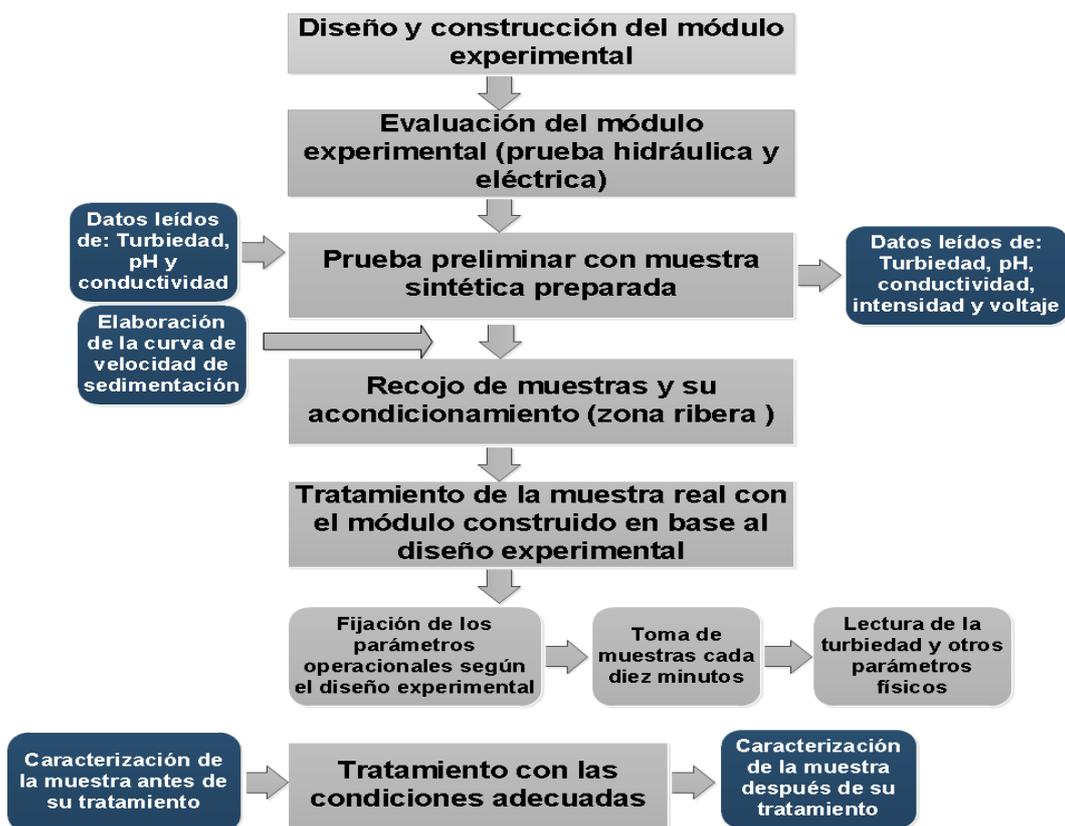
Quinta etapa: Tratamiento con el módulo acoplado de electrocoagulación y ozono en base al diseño estadístico experimental.

Sexta etapa: Tratamiento a las condiciones adecuadas

Séptima etapa: Caracterización de algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos después de su tratamiento.

En la siguiente **Figura 23** se muestra los pasos secuenciales que se realizaron:

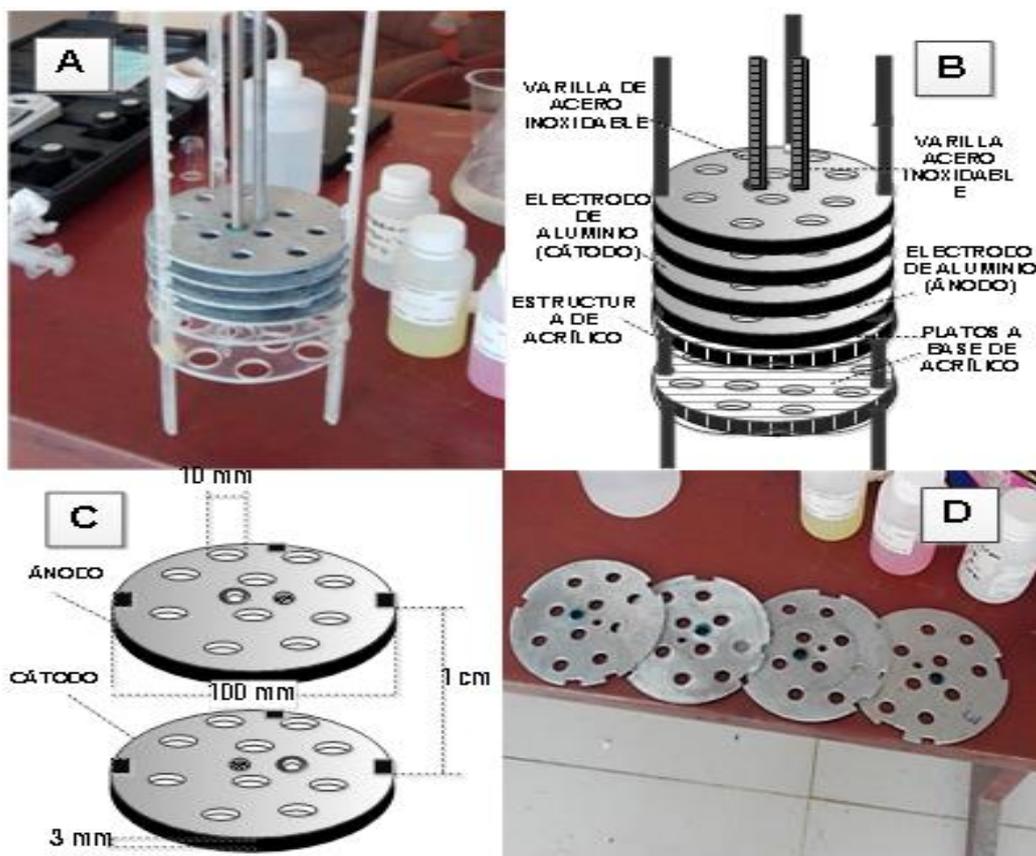
Figura 23
Secuencia de la etapa de investigación



4.2. Método de investigación

La presente investigación se realizó aplicando el método científico, consistente en la percepción directa del objeto de investigación y está conformado por siete etapas. En el presente estudio se contempló el empleo de un diseño de investigación con intervención (experimental), por ser experimental primero se construyó un módulo de electrocoagulación acoplado a ozono a nivel laboratorio, tal como se muestra en la **Figura 25 (Ver pag N° 57)**, el módulo consta de una celda electrolítica de electrocoagulación alimentado por una fuente exterior de voltaje, un depósito de volumen útil de 7 litros, un generador de ozono acoplado mediante el sistema de Venturi, una bomba de recirculación y un Flujómetro.

Figura 24
Características de los electrodos

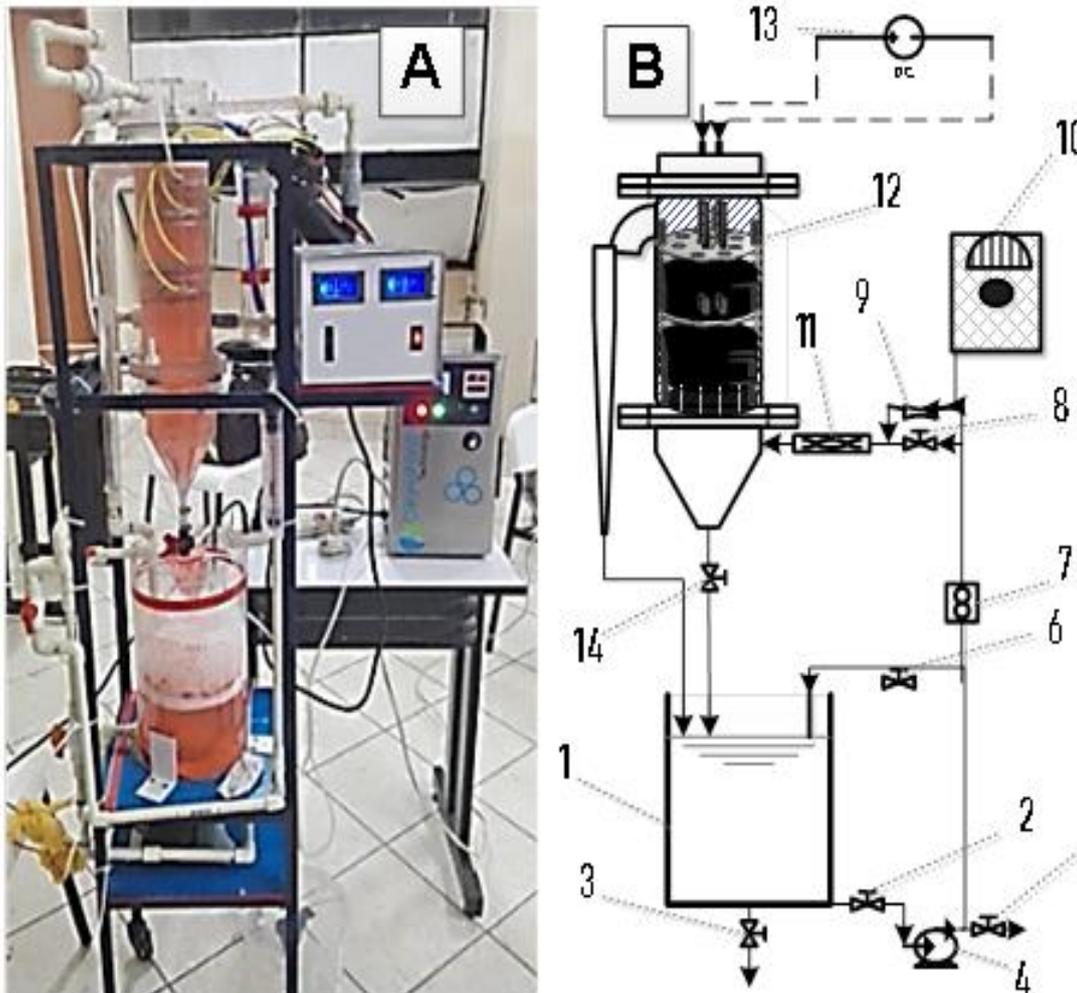


Los electrodos usados para generar la coagulación electroquímica fueron hechos de aluminio, de forma circular atravesados con diez agujeros, se usaron

2 electrodos para ánodo y dos de cátodo ambos del mismo material de aluminio, la conexión eléctrica de los electrodos fue paralela monopolar (A-A-A-A), separados a una distancia de 1 cm para todas las corridas, en la **Figura 24 (Ver pag N° 56)** se muestran los electrodos.

Figura 25

Módulo experimental acoplado de electrocoagulación/ozono



4.3. Población y muestra

La representación para la población como estudio está enfocado al efluente proveniente de la zona de ribera del proceso productivo de cuero, la curtiembre está localizada en el Distrito de Ate Vitarte – Lima. Las operaciones involucradas a la zona de ribera son: Acondicionamiento, pre-remojo, remojo principal,

pelambre o calero, desencalado y purga o rendido, estos efluentes líquidos vienen mayormente con altas concentraciones de materia orgánica. Las muestras fueron sacadas en el mes de diciembre del año 2019

Las muestras recogidas para el tratamiento fueron en total de 240 litros, de los cuales se repartieron en tres bidones para regular el pH. Para su dilución, lavado del equipo y otras operaciones se utilizaron agua destilada. Para bajar el pH se utilizó ácido sulfúrico y para subir el pH se utilizó soda caústica. Por cada experimento se utilizó 7 L de muestra acondicionadas, en total se utilizó 378 litros incluido su réplica. Para la toma de muestras durante el tratamiento electroquímico, se sacaron muestras cada 10 minutos en vasos desechables con un volumen de 180 mL

4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

La parte experimental se realizó en la misma curtiembre ubicada en el Distrito de Ate Vitarte, para ello se implementó un espacio adecuado para fijar el equipo experimental y los demás instrumentos utilizados en el campo experimental. Con respecto al periodo desarrollado es aquel comprendido entre 24 de diciembre de 2019 hasta 3 de enero de 2020

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

4.5.1. Técnicas

Recolección de muestras zona ribera

La técnica utilizada en el procesamiento del cuero fue con un proceso de pelambre con destrucción del pelo. Según lo detallado anteriormente la muestras se recolectaron finalizadas en las operaciones y procesos unitarias que corresponden a la zona ribera, el procesamiento de la piel en la zona ribera para este tipo de procesamiento de pieles (pieles saladas frescas – ovino) duró 3 días, el primer día se sacó muestras de las operaciones de pre-remojo y lavado, día dos de la etapa de remojo principal y del tercer día se recoge muestras provenientes de lavado de descarnado, desencalado, purga y rendido, después se les junta todos los efluentes y dejarlo sedimentar por un lapso de 3 horas y luego llevarlo al lugar de trabajo, en la **Figura 26 (Ver pag N° 71)** se muestra la recolección de muestras.

Figura 26
Recolección de muestras de la zona ribera



Metodología de ensayo para caracterización fisicoquímica de las muestras antes, durante y después del tratamiento

Las muestras condicionadas antes, durante y después del tratamiento fueron analizadas para determinarse las características fisicoquímicas, entre los parámetros fueron: Turbiedad, pH, conductividad y sólidos disueltos totales, adicional a ello se determinaron la intensidad de corriente y potencial aplicado, en la **Tabla 6 (Ver pag Nº 60)** se muestra los métodos ensayos usados para su caracterización de las muestras.

Ensayos preliminares con el equipo

Una vez terminado de construir el equipo, se procedió a realizar algunos ensayos para ver fugas, para eso se procedieron a utilizar agua y ver la correcta instalación, después comprobar la conexión de corriente eléctrica hacia los electrodos mediante la generación de burbujas en los electrodos, lo cual indica una buena instalación. Una vez terminado de corroborar la parte hidráulica se

procedió a realizar ensayos previos con una muestra sintética preparada con la finalidad de comprobar el efecto de la electrocoagulación y estudiar la velocidad de sedimentación mediante la generación de la curva altura versus tiempo, y obtener un parámetro de tiempo de sedimentación la cual se tomó como referencia para determinar la turbiedad para cada experimento, en este caso 1 hora de reposo para cada muestra antes de su análisis. En la **Figura 27** se aprecia los ensayos previos.

Tabla 6
Métodos de caracterización del efluente

| Análisis fisicoquímico | Métodos de ensayo |
|---|---|
| Evaluación de la turbiedad | SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B. Turbidity. Nephelometric Method. 23rd Edition, 2017. |
| Evaluación de pH | SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H ⁺ B. pH Value. Electrometric Method. 23rd Edition, 2017. |
| Evaluación de conductividad | SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B. Conductivity. Laboratory Method. 23rd Edition, 2017 |
| Evaluación de sólidos disueltos totales | SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C. Solids. Total Dissolved Solids Dried at 180°C. 23 rd Edition, 2017. |

Ensayos definitivos

Después de haber realizado algunos experimentos con la muestra sintética, se procedió a realizar los 27 experimentos, con sus respectivas réplicas (54 experimentos) con las muestras acondicionadas pH (ácido, neutro y alcalino). En la **Tabla 7 (Ver pag N° 61)** se muestra parámetros operacionales que se mantuvieron constantes durante los ensayos definitivos.

Figura 27
Toma de muestras sobre muestra modelo

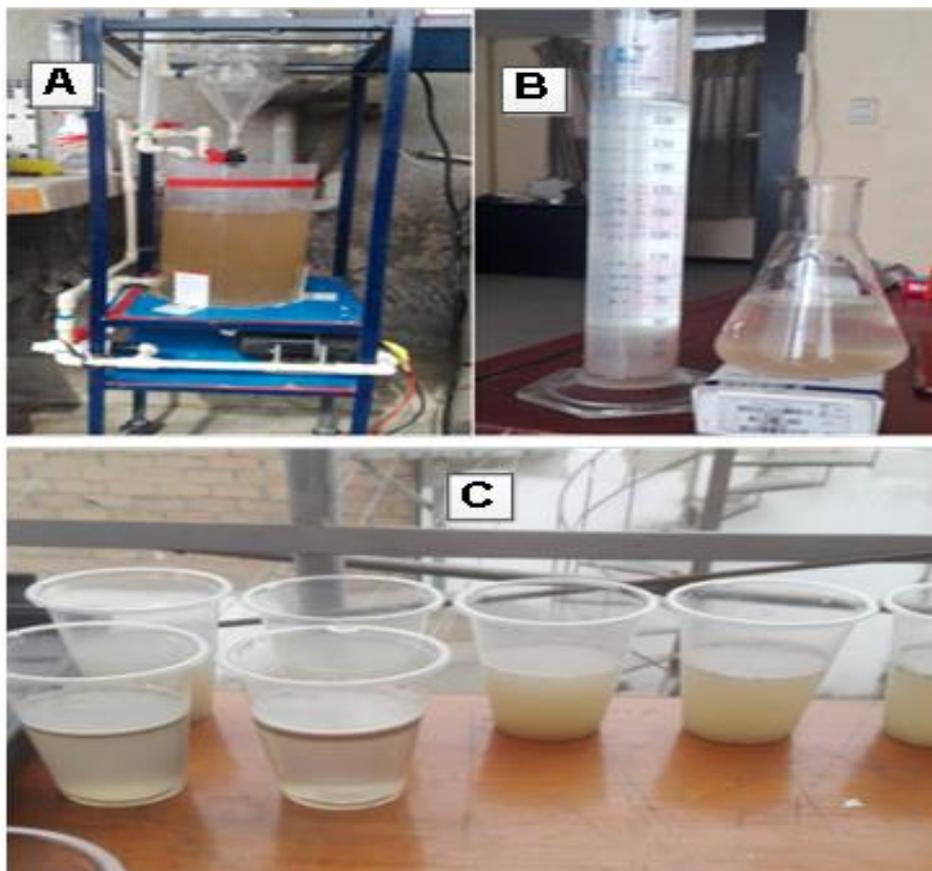


Tabla 7
Parámetros variables y constantes durante el experimento

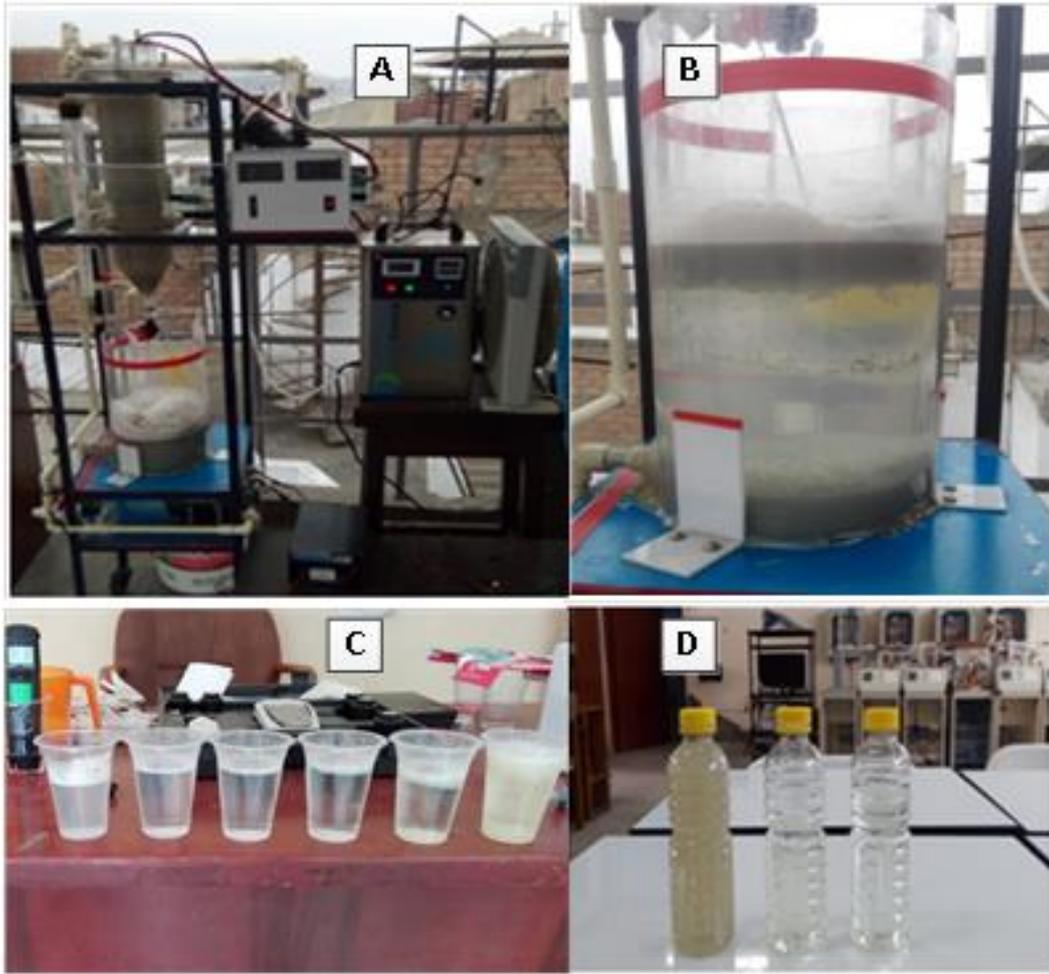
| Parámetros | Constante | Variable |
|----------------------------------|-------------------------|----------|
| Voltaje | | * |
| pH | | * |
| Flujo de alimentación al reactor | | * |
| Flujo de ozono | | * |
| Concentración del efluente | | * |
| Volumen de trabajo | 7 L | |
| Distancia entre electrodos | 1 cm | |
| Tiempo de tratamiento | 1 hora | |
| Temperatura | Ambiente | |
| Conductividad | Efluente | |
| Área específica de un electrodo | 0,013988 m ² | |
| Electrodo | Aluminio (4 unidades) | |
| Configuración electrodo | Monopolar - paralelo | |

Antes de cada experimento, se establecieron los parámetros con sus respectivos niveles, se sacaron muestras cada 10 m por experimento y se dejó reposar una hora luego se determinó los parámetros de turbiedad, pH, sólidos totales disueltos, voltaje e intensidad.

Una vez realizado los 27 experimentos más sus réplicas, en base a los resultados obtenidos sobre la reducción de la turbiedad, se volvió a experimentar manteniendo los parámetros optimizados encontrados con la ayuda de la herramienta optimizador del Software Minitab, las muestras recogidas del antes y después del tratamiento se le envió a una institución certificada encargada de analizar los demás parámetros.

Por cada experimento realizado se procedió a limpiar el equipo con agua destilada, los electrodos se limpiaron después de cada experimento con una lija para retirar los restos depositados y luego sumergidos en una solución diluida de ácido y base para una limpieza química. En la **Figura 28 (Ver pag N° 63)** se aprecia las imágenes del proceso del antes y después de su tratamiento óptimo.

Figura 28
Toma de muestras sobre muestra real



4.5.2. Instrumentos

Los materiales e instrumentos requeridos en el desarrollo de la investigación se indican en la siguiente **Tabla 8 (Ver pag N° 64)**

Tabla 8
Relación de reactivos y materiales usados en la investigación

| | |
|---|--|
| Reactivos | Soda caústica (NaOH) |
| | Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) |
| | Fenolftaleína |
| | Agua destilada (H ₂ O) |
| | Antiespumante |
| | Limpiador míster músculo |
| Materiales | Pipetas (15 ml) |
| | Buretas |
| | Embudo |
| | Vasos (50 ml - 500ml) |
| | Lija fina para metal |
| | Escobilla de ropa |
| | Cepillo de alambre largo |
| | Papel filtro AP40 Millipore equivalente a 934 ha Whatman |
| | Electrodos de aluminio |
| | Material acrílico |
| | Accesorios para tubería (codo, tubos, etc.) |
| Estructura metálica | |
| Equipos | Balanza analítica (0.00001 gramos) |
| | Multiparámetro (pH, EC, TDS, T°C), marca Hanna |
| | Multímetro digital de gancho (amperios, voltaje, -temperatura, etc.) |
| | Cronómetro |
| | Turbidímetro (Ezodo) modelo TUB - 430 |
| | Generador de ozono marca Ozonofonth (3g/h) |
| | Rectificador de corriente (30 voltios y 5 amperios) |
| | Bomba de presión marca Flojet de 8LPM |
| Flujómetro de capacidad 18 LPM marca YYZX | |
| Tubo de Venturi de media pulgada | |

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Los datos números obtenidos en base a los experimentos realizados, se procedió a realizar el análisis estadístico utilizando el Software de Minitab 17, mediante el cual se conoció los factores de mayor importancia sobre la reducción de la turbiedad, del mismo modo se realizaron tablas y figuras que nos ayudaron a entender mejor el comportamiento de algunos parámetros en estudio. El análisis estadístico que se realizó tiene etapas:

- a) Test de significancia del modelo de regresión global
- b) Pruebas de coeficiente de regresión individuales para analizar la tabla de ANOVA.
- c) Presentación de figuras de superficie de respuesta

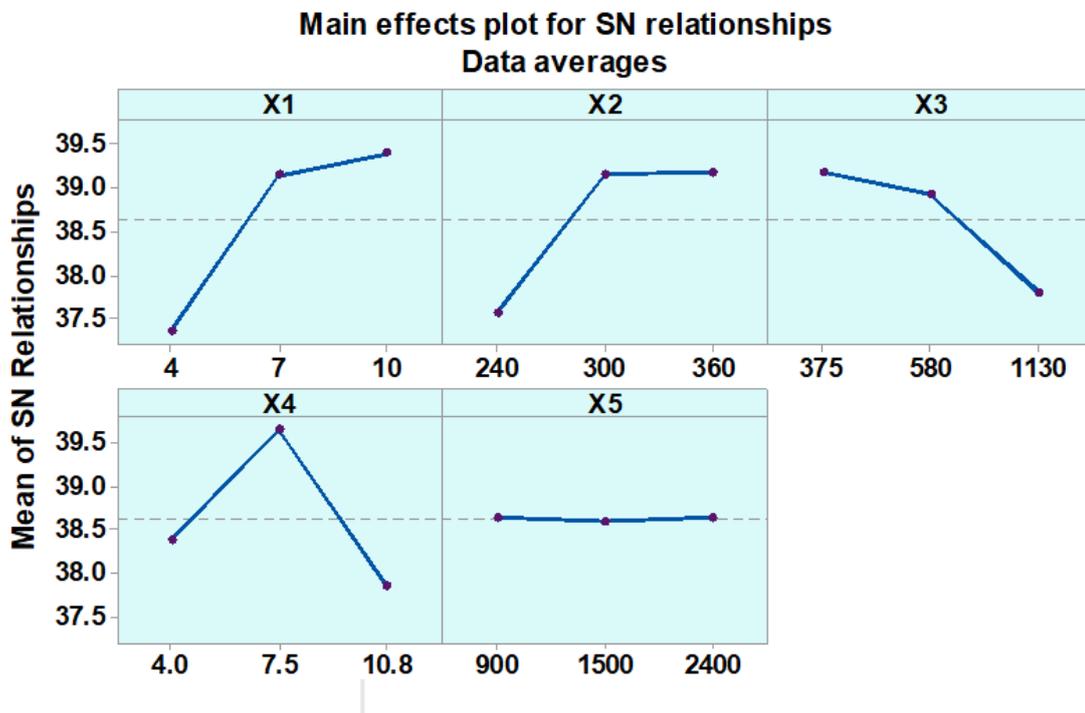
V. RESULTADOS

Se procedió a realizar las primeras etapas del desarrollo de la investigación recolectando datos sobre los ensayos preliminares y los definitivos.

5.1. Resultados descriptivos

Después de obtener los datos experimentales se procedió a realizar el análisis estadístico para conocer los efectos de los factores operacionales de mayor importancia sobre el porcentaje de reducción de la turbiedad, mediante la figura de efectos de señal a ruido, ANOVA y la figura de superficie de respuesta. En la **Figura 29** y **Tabla 9 (Ver pag N° 66)** se muestra análisis estadístico sobre los efectos de señal y ruido para % de reducción de la turbiedad.

Figura 29
Efectos principales relación señal y ruido



En la **Figura 29** se observa que los factores que tienen mayor pendiente son voltaje y pH, por lo tanto, son los que influyen bastante sobre la turbiedad, entonces para maximizar el porcentaje de reducción de la turbiedad se recomienda poner el voltaje en su nivel alto y el pH en su nivel medio, este tratamiento hará más eficiente en la reducción de contaminantes.

Tabla 9
Respuesta de relaciones señal y ruido

| Nivel | Voltaje X1 (V) | Flujo de alimentación X2 (L/h) | Turbiedad inicial X3 (NTU) | pH X4 | Flujo de ozono X4 (mg/h) |
|------------|----------------|--------------------------------|----------------------------|-------|--------------------------|
| 1 | 37,34 | 37,55 | 39,17 | 38,38 | 38,64 |
| 2 | 39,14 | 39,15 | 38,92 | 39,65 | 38,59 |
| 3 | 39,39 | 39,17 | 37,79 | 37,84 | 38,64 |
| Delta | 2,05 | 1,62 | 1,38 | 1,81 | 0,04 |
| Clasificar | 1,00 | 3,00 | 4,00 | 2,00 | 5,00 |

En la **Tabla 9** se muestra la clasificación de los valores delta por su significancia e importancia, entonces el factor de potencia de voltaje es el más significativo seguido de pH, flujo de alimentación, turbiedad inicial y por último el factor que no tiene mucha significancia es el flujo de ozono.

Con relación al resumen del modelo adecuado, según la **Tabla 10** se puede concluir que hay una conexión entre el porcentaje de reducción de la turbiedad y las variables independientes porque el valor del coeficiente de regresión $R^2 = 99,91\%$ y el valor de $R_{adj}^2 = 99,85\%$ son muy cercanos a uno, por lo tanto, el modelo propuesto tiene un nivel de significancia del 95% y así explicar el 99.85% del tratamiento por el método.

Tabla 10
Coeficiente de regresión

| | |
|---------------------|-----------|
| R cuadrado | 99,9100% |
| R cuadrado ajustado | 99,8500% |
| R (pred) | 99,7300% |
| S | 0,553484 |
| Press | 13,957800 |

En la **Tabla 11 (Ver pag N° 67)** se muestra el análisis de varianza para el modelado, observándose valores de F muy elevados y valores de ($p = 0,000$) entre cero, lo que significa que el modelo es muy significativo para describir el tratamiento.

Tabla 11
Análisis de varianza (ANOVA)

| Fuente | GL | SC Sec. | Contribución | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|---|----|----------|--------------|-----------|-----------|----------|---------|
| Modelo | 14 | 5 252,01 | 99,94% | 5 252,01 | 375,14 | 1 337,59 | 0,000 |
| Lineal | 5 | 3 347,20 | 63,69% | 3 392,40 | 678,48 | 2 419,14 | 0,000 |
| Voltaje | 1 | 1 669,48 | 31,77% | 1 560,97 | 1 560,97 | 5 565,70 | 0,000 |
| Flujo de aliment. | 1 | 924,79 | 17,60% | 919,82 | 919,82 | 3 279,66 | 0,000 |
| Turbiedad inicial | 1 | 514,58 | 9,79% | 656,93 | 656,93 | 2 342,30 | 0,000 |
| pH | 1 | 238,29 | 4,53% | 254,67 | 254,67 | 908,05 | 0,000 |
| Flujo de O ₃ | 1 | 0,06 | 0,00% | 0,06 | 0,06 | 0,23 | 0,643 |
| Cuadrado | 5 | 1 903,28 | 36,22% | 1 903,28 | 380,66 | 1 357,24 | 0,000 |
| Voltaje*Voltaje | 1 | 193,78 | 3,69% | 193,78 | 193,78 | 690,95 | 0,000 |
| (Flujo de alimentación) ² | 1 | 256,89 | 4,89% | 256,89 | 256,89 | 915,95 | 0,000 |
| (Turbiedad inicial) ² | 1 | 210,76 | 4,01% | 210,76 | 210,76 | 751,48 | 0,000 |
| pH*pH | 1 | 1 241,12 | 23,62% | 1 241,12 | 1 241,12 | 4 425,26 | 0,000 |
| (Flujo de ozono) ² | 1 | 0,72 | 0,01% | 0,72 | 0,72 | 2,56 | 0,135 |
| Interacción de 2 factores | 4 | 1,54 | 0,03% | 1,54 | 0,38 | 1,37 | 0,302 |
| Voltaje*Flujo de O ₃ | 1 | 0,57 | 0,01% | 0,57 | 0,57 | 2,05 | 0,178 |
| Flujo de aliment.*Flujo de O ₃ | 1 | 0,05 | 0,00% | 0,05 | 0,05 | 0,17 | 0,684 |
| Turbiedad inicial*Flujo de O ₃ | 1 | 0,84 | 0,02% | 0,84 | 0,84 | 3,00 | 0,109 |
| pH*Flujo de O ₃ | 1 | 0,07 | 0,00% | 0,07 | 0,07 | 0,25 | 0,624 |
| Error | 12 | 3,37 | 0,06% | 3,37 | 0,28 | | |
| Total | 26 | 5 255,38 | 100,00% | | | | |

En la columna de la **Tabla 11** se muestra los valores de p con nivel de significancia, observándose que los términos de flujo de ozono, (flujo de O₃)² y la interacción de dos factores diferentes están por encima de (p < 0,05), en cambio el resto está por debajo del valor aceptado, esto indica que el flujo de ozono y los demás términos no tienen influencias sobre la reducción de la turbiedad por lo que pueden ser descartados del modelo, otro de los aspectos a tener en cuenta es la contribución en porcentaje de cada factor sobre la

respuesta en orden de importancia, por ejemplo la tensión contribuye en un 31.77%, y así sucesivamente.

En base a ello se obtiene una expresión para el modelado de la predicción del % de reducción de la turbiedad:

$$\begin{aligned} \% \text{ Reducción de Turbiedad} = & -224.57 + 8.711 * \text{Voltaje} + 1,2078 * \\ & \text{Flujo alimentación} + 0,09639 * \text{Turbiedad} + 17,273 * (\text{pH}) \\ & - 0,00390 * \text{Flujo O}_3 - 0,4752 * (\text{Voltaje})^2 - 0,001818 * (\text{Flujo alimentación})^2 \\ & - 0,000054 * (\text{Turbiedad})^2 - 1,2454 * (\text{pH})^2 + 0,000001 * (\text{Flujo de O}_3)^2 \\ & + 0,000082 * \text{Voltaje} * \text{Flujo O}_3 + 0,000001 * \text{Flujo alimentación} * \text{Flujo O}_3 \\ & + 0,000001 * \text{Turbiedad} * \text{Flujo O}_3 + 0,000030 * (\text{pH}) * \text{Flujo O}_3 \end{aligned}$$

En la **Figura 30 (Ver pag N° 69)** de superficie de respuesta se muestra el porcentaje de reducción de la turbiedad, consumo de energía en la celda electroquímica y costo de operación frente a los efectos de los parámetros operacionales.

5.2. Resultados inferenciales

Esta investigación no tiene resultados inferenciales, debido a que el criterio de población y muestra a nivel de diseño metodológico no fue aplicado, por lo tanto, el muestreo considerado para esta investigación es no probabilístico debido a que las muestras se seleccionaron y recogieron de acuerdo a la accesibilidad y criterio del investigador.

5.3. Otro tipo de resultados de acuerdo a la naturaleza del problema y la hipótesis

5.3.1. Resultados de ensayos preliminares con la muestra sintética

En la **Tabla 12 (Ver pag N° 71)** se muestra la variación de los parámetros (turbiedad, pH, conductividad, STD, voltaje e intensidad de corriente).

Figura 30
Superficie de respuesta

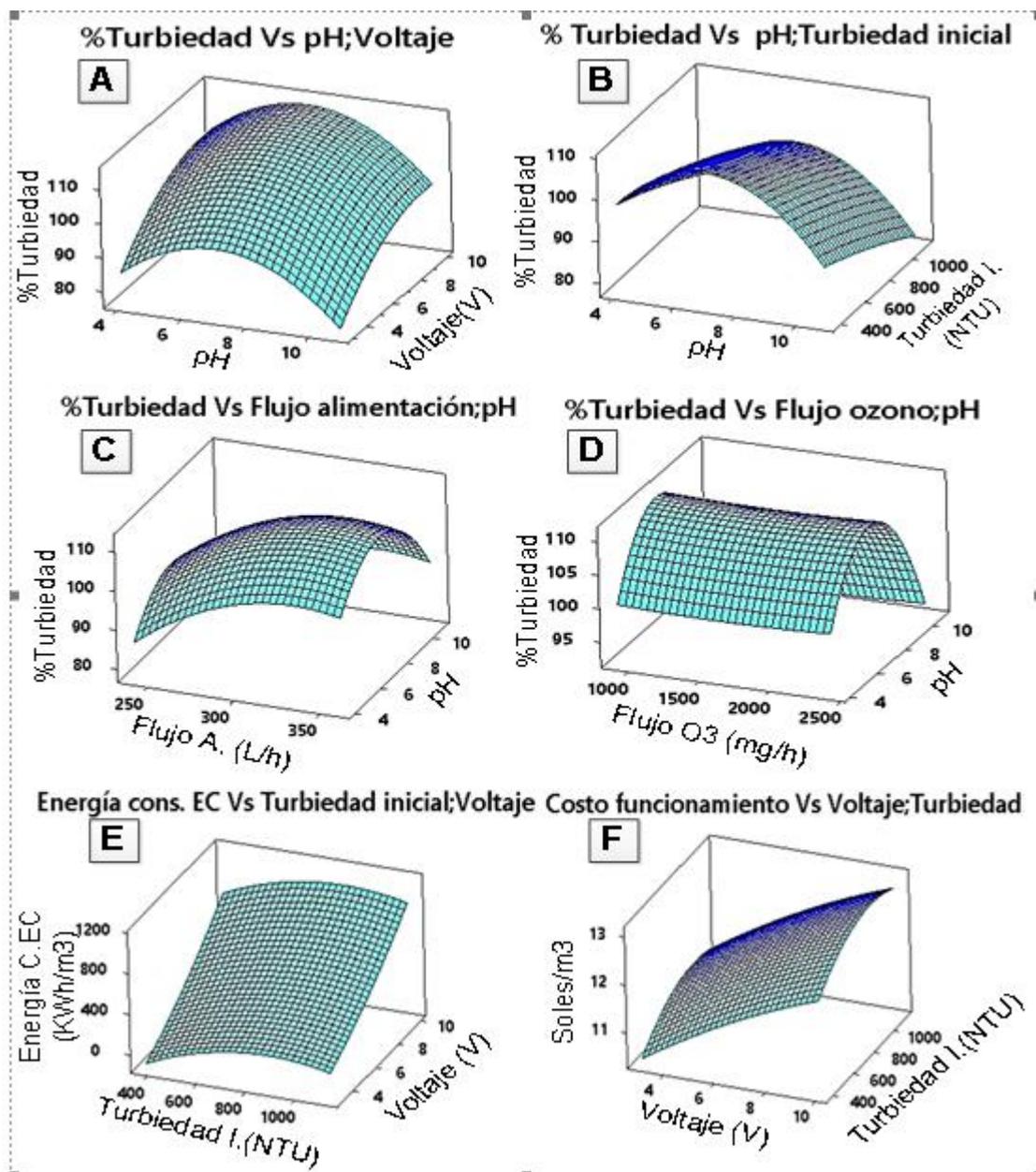


Tabla 12
Resultados de pruebas preliminares en muestra sintética

| Tiempo (minutos) | pH | Conductividad (μ s) | STD (ppm) | Turbiedad (NTU) | Voltaje (V) | Intensidad (Amperios) | Temperatura ($^{\circ}$ C) |
|------------------|------|--------------------------|-----------|-----------------|-------------|-----------------------|-----------------------------|
| 0 | 5,80 | 1 523 | 856 | 171,00 | 11,2 | 0,280 | 28 |
| 10 | 6,68 | 1 467 | 733 | 22,00 | 11,3 | 0,260 | 29 |
| 20 | 7,21 | 1 261 | 629 | 17,29 | 11,3 | 0,256 | 29 |
| 30 | 7,37 | 1 210 | 605 | 15,98 | 11,5 | 0,247 | 29 |
| 40 | 7,53 | 1 166 | 585 | 9,95 | 11,4 | 0,249 | 30 |
| 50 | 7,67 | 1 125 | 563 | 2,00 | 11,7 | 0,159 | 30 |
| 60 | 7,76 | 1 115 | 559 | 3,58 | 11,7 | 0,148 | 30 |

En la **Tabla 13** se muestra los resultados del pesaje de los electrodos (ánodo y cátodo)

Tabla
Resultados sobre los electrodos

13

| Tipo electrodo | Masa inicial | Masa final | Masa (gramos) | |
|---------------------|--------------|------------|---------------|----------|
| | (gramos) | (gramos) | Depositada | Liberada |
| Cátodo | 55,3212 | 55,3312 | 0,01 | |
| ánodo | 58,0611 | 57,9044 | | 0,1567 |
| Cátodo | 56,4106 | 56,5607 | 0,05 | |
| ánodo | 57,5508 | 57,4308 | | 0,1200 |
| Masa total (gramos) | | | 0,06 | 0,2767 |

5.3.2. Resultados de la caracterización del agua residual de curtiembre

Las muestras se mandaron analizar a un laboratorio para determinar las características fisicoquímicas antes de su tratamiento, entre los parámetros que se mandaron fueron: pH, turbiedad, DQO, DBO₅, aceites y grasas, nitrógeno amoniacal, sulfuros, coliformes fecales y aluminio, tal como se muestra en la **Tabla 14 (Ver pag N° 72)**

Figura 31
Comportamiento de muestra sintética EC/O₃

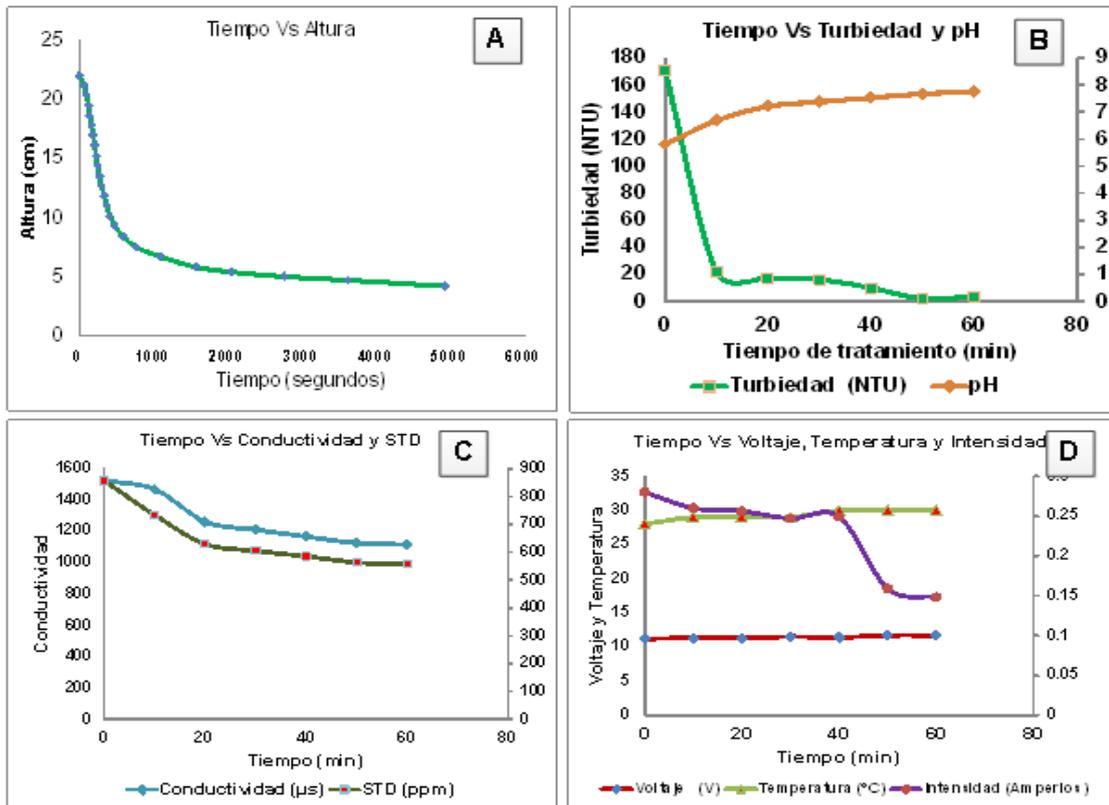


Tabla 14
Resultados de caracterización de las aguas residuales ribera

| Parámetros | Unidad | Valor |
|------------------------------|--------------------------|----------|
| pH | Unidad pH | 9,43 |
| Turbiedad | NTU | 1 130,00 |
| Demanda química de oxígeno | mg/L | 2 638,00 |
| Demanda biológica de oxígeno | mg/L | 1 232,00 |
| Aceites y grasas | mg/L | 15,10 |
| Nitrógeno amoniacal | NH ³⁺ -N mg/L | 88,85 |
| Sulfuros | S ⁼ mg/L | 21,40 |
| Coliformes fecales | NMP/100 mL | <1,800 |
| Aluminio | mg/L | 0,29 |

Fuente del informe de laboratorio de ensayo de ZEDERLAB S.A.C.

5.3.2. Resultados del experimento central

Los resultados obtenidos del experimento en base a la metodología Taguchi, donde se manipularon las variables del proceso de tratamiento, en la **Tabla 15, 16 (Ver pag N° 74) y 17 (Ver pag N° 74)** se muestran los datos obtenidos.

Tabla 15
Resultados obtenidos a pH 4

| N° Pruebas | Factores | | | | | Respuesta | | | | | |
|------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------|---|--|
| | X1 (V) Voltaje | X2 (L/h) Flujo alimentación | X3 (NTU) Turbiedad | X4 (pH) | X5 (mg/h) Flujo ozono | Turbiedad (NTU) | % Reducción turbiedad | masa aluminio Faraday (g) | Rendimiento Faraday | Energía consumida en la celda (KWh/m ³) | Costo funcionamiento - equipo (Soles/m ³) |
| 1 | 4 | 240 | 375 | 4 | 900 | 471,40 | 58,28 | 0,1176 | 64.38 | 175.178231 | 11.69077 |
| 2 | 4 | 240 | 375 | 4 | 1 500 | 487,80 | 56,83 | 0,0535 | 141.41 | 85.34855 | 11.10297 |
| 3 | 4 | 240 | 375 | 4 | 2 400 | 483,60 | 57,20 | 0,0471 | 142.54 | 76.3564659 | 11.04391 |
| 13 | 7 | 300 | 1 130 | 4 | 900 | 3,20 | 99,14 | 0,1111 | 124.72 | 365.337854 | 11.73389 |
| 14 | 7 | 300 | 1 130 | 4 | 1 500 | 1,30 | 99,65 | 0,1135 | 152.23 | 362.051644 | 11.75282 |
| 15 | 7 | 300 | 1 130 | 4 | 2 400 | 0,00 | 100,00 | 0,1360 | 156.47 | 421.106503 | 11.97331 |
| 25 | 10 | 360 | 580 | 4 | 900 | 0,00 | 100,00 | 0,2380 | 139.85 | 1060.69915 | 13.16499 |
| 26 | 10 | 360 | 580 | 4 | 1 500 | 1,20 | 99,79 | 0,2312 | 126.03 | 1029.15433 | 13.0915 |
| 27 | 10 | 360 | 580 | 4 | 2 400 | 1,57 | 99,73 | 0,2371 | 115.68 | 1042.1303 | 13.14785 |

Tabla 16
Resultados obtenidos a pH 7.5

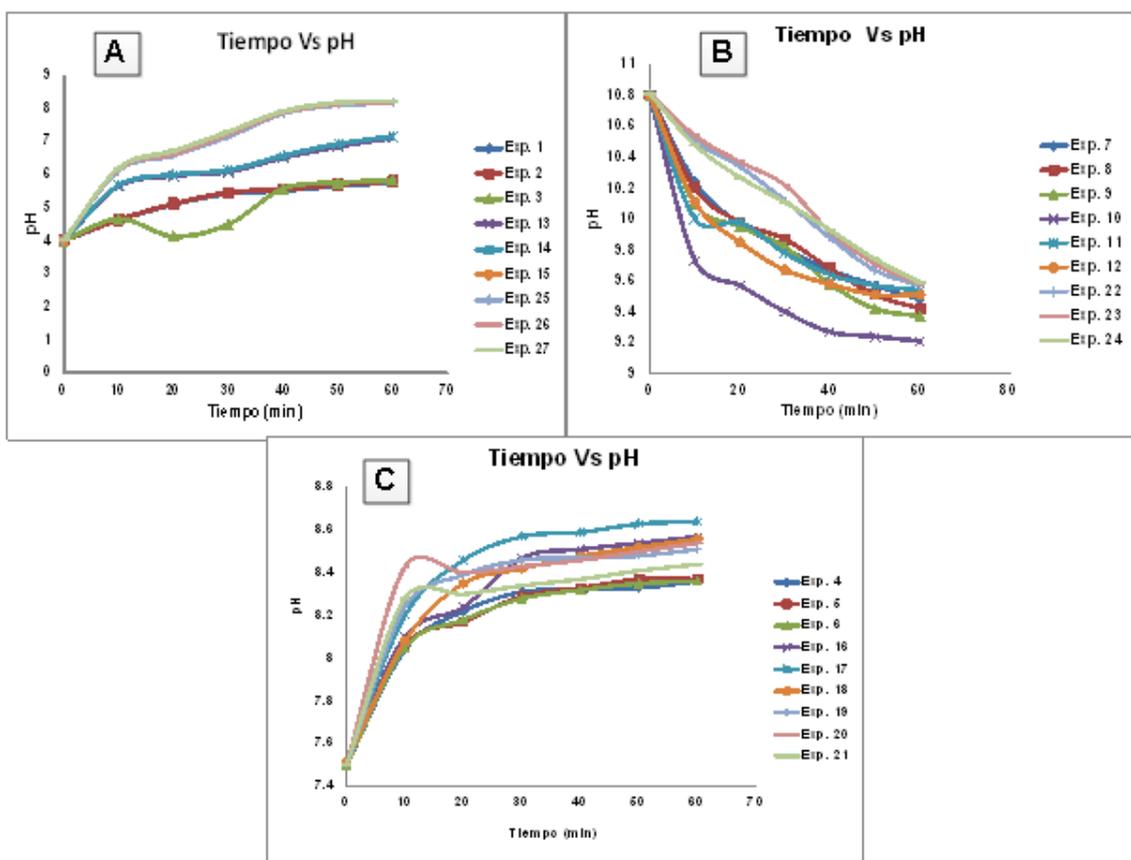
| TN° Pruebas | Factores | | | | | Respuesta | | | | | |
|-------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------|------------------------------|------------------------|---|--|
| | X1 (V) Voltaje | X2 (L/h) Flujo alimentación | X3 (NTU) Turbiedad | X4 (pH) | X5 (mg/h) Flujo ozono | Turbiedad (NTU) | % Reducción turbiedad | masa aluminio Faraday (g) | Rendimiento Faraday | Energía consumida en la celda (KWh/m ³) | Costo funcionamiento - equipo (Soles/m ³) |
| 4 | 4 | 300 | 580 | 7,5 | 900 | 48,7 | 91,65 | 0,0279 | 51,22 | 45,5415310 | 10,86564 |
| 5 | 4 | 300 | 580 | 7,5 | 1 500 | 55,5 | 90,48 | 0,0314 | 99,98 | 50,2227925 | 10,89800 |
| 6 | 4 | 300 | 580 | 7,5 | 2 400 | 52,3 | 91,03 | 0,0397 | 104,31 | 63,8113377 | 10,97499 |
| 16 | 7 | 360 | 375 | 7,5 | 900 | 17,5 | 98,45 | 0,1822 | 87,05 | 570,442584 | 12,44024 |
| 17 | 7 | 360 | 375 | 7,5 | 1 500 | 13,8 | 98,78 | 0,1936 | 78,23 | 604,951810 | 12,55432 |
| 18 | 7 | 360 | 375 | 7,5 | 2 400 | 15,2 | 98,66 | 0,1485 | 107,75 | 479,175584 | 12,10858 |
| 19 | 10 | 240 | 1 130 | 7,5 | 900 | 7,2 | 98,11 | 0,1402 | 41,78 | 652,357715 | 12,12758 |
| 20 | 10 | 240 | 1 130 | 7,5 | 1 500 | 5,2 | 98,64 | 0,1546 | 75,76 | 748,961688 | 12,29940 |
| 21 | 10 | 240 | 1 130 | 7,5 | 2 400 | 2,8 | 99,27 | 0,1492 | 100,55 | 712,033996 | 12,23445 |

Tabla 17
Resultados obtenidos a pH 10.8

| N° Pruebas | Factores | | | | | Respuesta | | | | | |
|------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------|------------------------------|------------------------|---|--|
| | X1 (V) Voltaje | X2 (L/h) Flujo alimentación | X3 (NTU) Turbiedad | X4 (pH) | X5 (mg/h) Flujo ozono | Turbiedad (NTU) | % Reducción turbiedad | masa aluminio Faraday (g) | Rendimiento Faraday | Energía consumida en la celda (KWh/m ³) | Costo funcionamiento - equipo (Soles/m ³) |
| 7 | 4 | 360 | 1 130 | 10,8 | 900 | 88,3 | 76,45 | 0,0246 | 179,96 | 37,1275175 | 10,83355 |
| 8 | 4 | 360 | 1 130 | 10,8 | 1 500 | 91,2 | 75,68 | 0,0275 | 140,11 | 43,8684290 | 10,86170 |
| 9 | 4 | 360 | 1 130 | 10,8 | 2 400 | 87,1 | 76,77 | 0,0294 | 116,61 | 46,7517464 | 10,87902 |
| 10 | 7 | 240 | 580 | 10,8 | 900 | 135,2 | 76,49 | 0,2093 | 95,54 | 657,3199680 | 12,71467 |
| 11 | 7 | 240 | 580 | 10,8 | 1 500 | 145,1 | 74,77 | 0,1539 | 79,81 | 499,218017 | 12,16486 |
| 12 | 7 | 240 | 580 | 10,8 | 2 400 | 139,7 | 75,70 | 0,1726 | 65,37 | 551,083022 | 12,34977 |
| 22 | 10 | 300 | 375 | 10,8 | 900 | 207,0 | 81,63 | 0,2704 | 61,28 | 1 178,649890 | 13,49987 |
| 23 | 10 | 300 | 375 | 10,8 | 1 500 | 195,2 | 82,68 | 0,2993 | 65,87 | 1 310,355350 | 13,81181 |
| 24 | 10 | 300 | 375 | 10,8 | 2 400 | 198,0 | 82,43 | 0,1530 | 183,04 | 726,038635 | 12,27368 |

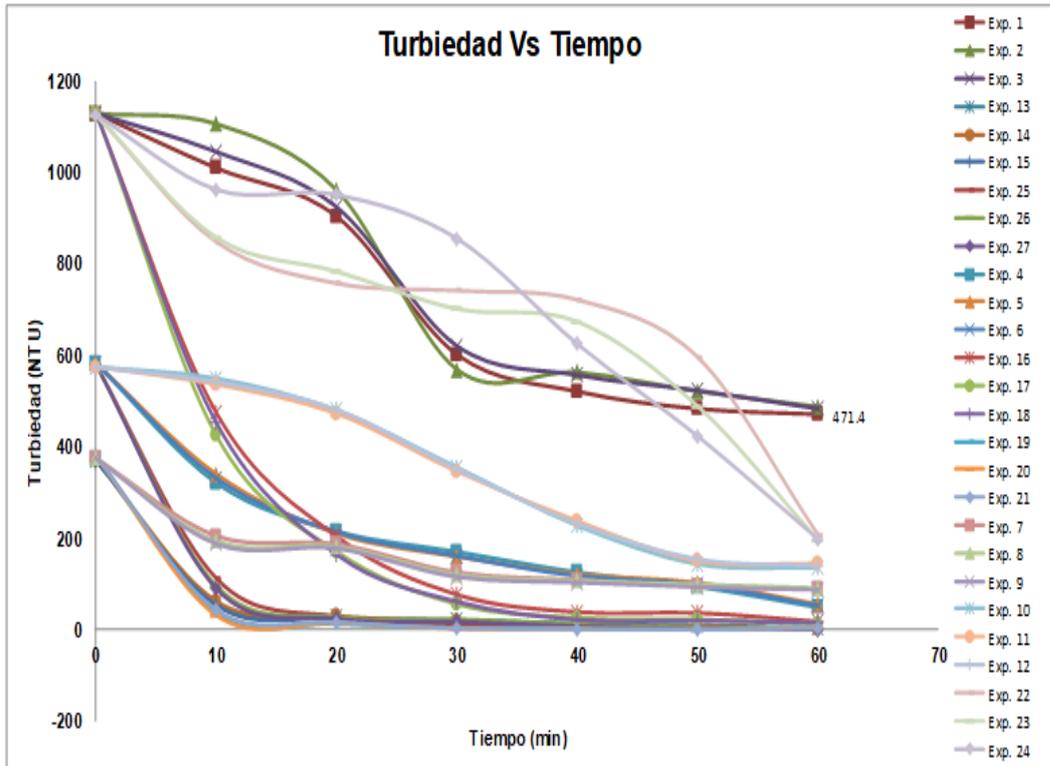
Comportamiento del pH inicial de la muestra en el transcurso del proceso de electrocoagulación y ozono, en la **Figura 30 (Ver pag N° 69)** se muestran las curvas de formación. En la **Figura 32 (A)**, se muestra para los 9 experimentos trabajados a condiciones ácidas iniciales a medida que transcurre el tiempo el pH de la solución sube, y este incremento es mayor a medida que se incrementa el voltaje, en cambio trabajadas a condiciones iniciales básicas el pH baja con el tiempo, en cambio cuando se empieza a trabajar en un pH casi neutro tal como se aprecia en la **Figura 32 (C)** el pH con el tiempo empieza a estabilizarse, con un poco variación

Figura 32
Cambio del pH de la solución en proceso EC/O₃



Comportamiento de la turbiedad de la muestra en función al tiempo de tratamiento por EC/O₃, en la **Figura 33 (Ver pag N° 77)** se muestra los cambios.

Figura 33
Cambio de turbiedad Inicial durante el proceso EC/O₃



En la **Figura 33** se aprecia que, en los 27 experimentos realizados, en su totalidad se reduce la turbiedad llegando en otros hasta reducir el 100%, también se observa que para reducir la turbiedad mayor al 90% se necesita entre 10 a 15 minutos.

Figura 34
Cambio del pH Inicial durante EC/O₃ para los 27 Experimentos

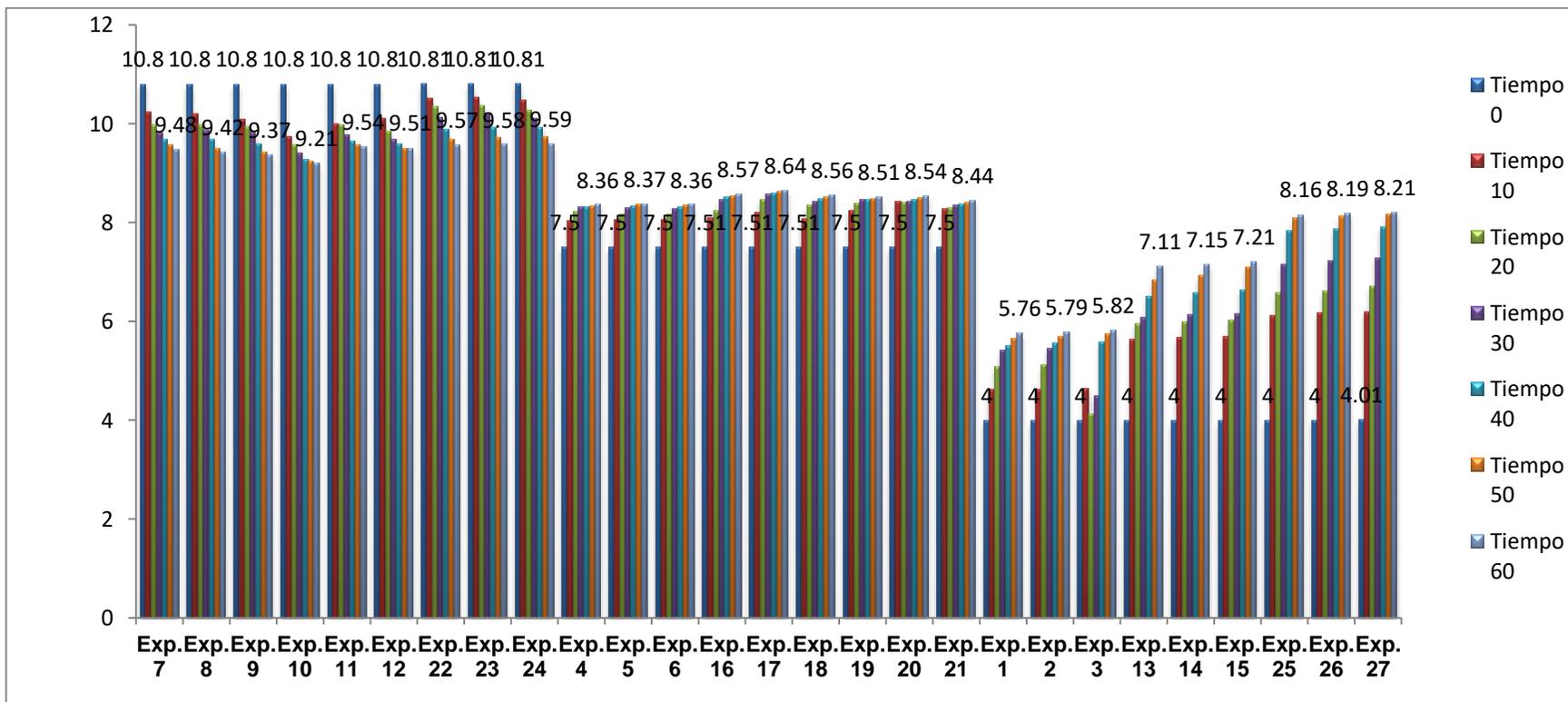
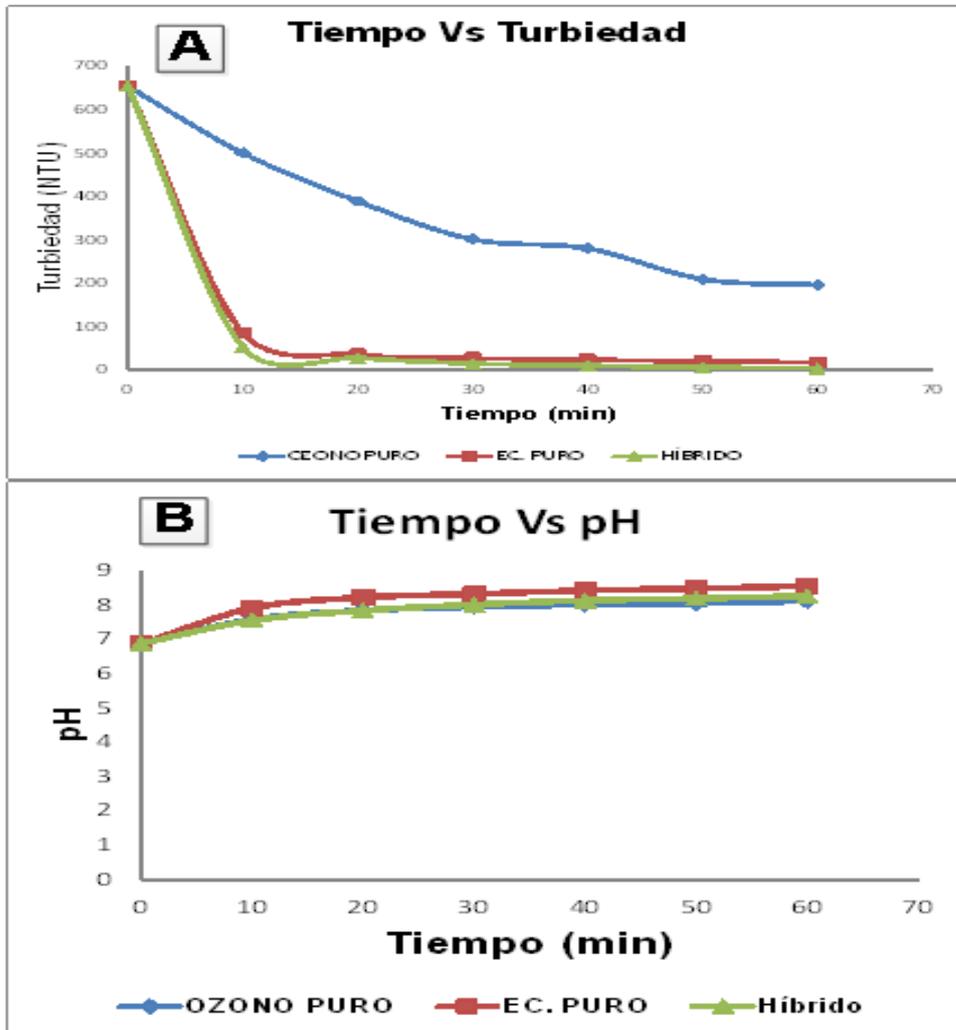


Figura 35
Cambio de turbiedad para ozono, electrocoagulación y EC/O₃



En la **Figura 35** se observa el comportamiento de la reducción de la turbiedad haciendo una comparación entre sistema de electrocoagulación sólo, ozono sólo y sistema acoplado, el sistema que tiene mayor influencia en la reducción de la turbiedad es el proceso de electrocoagulación sólo a diferencia del proceso de ozonización, en el proceso acoplado se observa un pequeñísimo aumento de la reducción de la turbiedad adicional al proceso solo de EC con el cual se observa que la influencia del ozono en la reducción de la turbiedad es casi nada, y esto también está demostrado en la **Figura 29 (Ver pag N° 65)** de efectos principales.

Según el análisis estadístico obtenido de los efectos principales de señal y ruido para maximizar el % de reducción de la turbiedad se debe trabajar bajo los niveles operacionales de 10 voltios, 7,5 pH, 360 L/h de flujo de alimentación, 375 NTU de turbiedad y 2 400 mg/h de flujo de ozono, por lo tanto, bajo estas condiciones se evaluó el agua residual de la zona ribera a excepción de la turbiedad que fue trabajada a 1 130 NTU. En la **Tabla 18** se muestran los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del agua residual después de su tratamiento con el módulo acoplado de electrocoagulación a ozono.

Tabla 18
Resultados de caracterización de la muestra tratada

| Parámetros | Unidad | Valor | PRODUCE LMP | VIVIENDA VMA – ALC. |
|------------------------------|-----------------------------|---------|-------------|---------------------|
| pH | Unidad pH | 8,600 | (6 – 9) | (6 – 9) |
| Turbiedad | NTU | 2,800 | (–) | (–) |
| Demanda química de oxígeno | mg/L | 876,000 | 1 500 | 1 000 |
| Demanda biológica de oxígeno | mg/L | 485,000 | 500 | 500 |
| Aceites y grasas | mg/L | <1,200 | 50 | 100 |
| Nitrógeno amoniacal | NH ³⁺ –N mg/L | 32,750 | 30 | 80 |
| Sulfuros | S ⁼ mg/L | <0,002 | 3 | 5 |
| Coliformes fecales | NMP/100 mL | <1,800 | (–) | (–) |
| Aluminio | mg/L | 44,060 | (–) | 10 |

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

En base a los resultados obtenidos de pruebas experimentales, como se aprecia en la **Tabla 12 y 13 (Ver pag Nº 71)** y **14 (Ver pag Nº 72)**, donde se evaluaron los parámetros operacionales más adecuados del proceso acoplado de electrocoagulación con oxidación avanzada, se ha conseguido la reducción de la turbiedad en 100% en dos de los experimentos correspondientes a la máxima eliminación y en 56,83% correspondiente a la mínima reducción de la turbiedad. Esto muestra la hipótesis general formulada porque se consiguió reducir la turbiedad mayor al 99% en aguas residuales provenientes de una curtiembre mediante el proceso acoplado de electrocoagulación/ozono. De esta forma probamos nuestra hipótesis alterna y rechazamos la hipótesis nula.

“Los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales procedentes de la curtiembre superan los valores máximos admisibles de la normativa de descarga al alcantarillado”.

En la **Tabla 11 (Ver pag Nº 67)** se puede apreciar que los valores obtenidos al caracterizar el agua residual proveniente de la zona ribera superan a los valores máximos admisibles para ser descargados al alcantarillado, a excepción de pH que se encuentra en el rango permitido de 6 a 9. Concluyendo que el agua residual estudiada supera los valores máximos admisibles, de esta manera se probó la primera hipótesis específica alternativa, rechazando la nula.

“Con los parámetros operacionales entre sus rangos, potencial (4 V, 7 V y 10 V), pH (4: 7,5 y 10,8), flujo de alimentación (240 L/h, 300 L/h y 360 L/h), turbiedad inicial (375 NTU, 580 NTU y 1 130 NTU) y flujo de ozono (900 mg/h, 1 500 mg/h y 2 400 mg/h) se obtendrá alto porcentaje de remoción de la turbiedad”.

Los resultados de la **Tabla 12 y 13 (Ver pag Nº 71)** y **14 (Ver pag Nº 72)**, muestran claramente que en dos de los experimentos se logró llegar a reducir al 100%, la primera trabajando a las condiciones de 7 voltios, 4 pH, 1 130 NTU de turbiedad inicial, 300 L/h de flujo de alimentación y 2 400 mg/h de flujo de ozono y la segunda a condiciones de 10 voltios, 4 pH, 375 NTU de turbiedad inicial, 360 L/h de flujo de alimentación y 900 mg/h de flujo de ozono. Del análisis se concluye que en los experimentos Nº 15 y 25 se logró reducir la totalidad de la

turbiedad del agua residual de la zona ribera, con esto probamos la segunda hipótesis específica.

“A las condiciones de operación adecuadas se conseguirá un máximo porcentaje de remoción de la turbiedad”

Al someterse al análisis estadístico los datos experimentales de la **Tabla 12 y 13 (Ver pag Nº 71) y 14 (Ver pag Nº 72)**, primero se analizó el efecto principal de relación señal y ruido según la **Figura 34 (Ver pag Nº 78)**, para comprobar que variables tienen mayor influencia sobre la reducción de la turbiedad, afirmando que el voltaje y el pH tienen mucha influencia sobre el tratamiento, después se analizó el análisis de varianza según la **Tabla 18 (Ver pag Nº 80)**, para ver la correlación de los parámetros operacionales del tratamiento sobre la reducción de la turbiedad y sobre ello se obtiene una expresión matemática para el modelado de la predicción del porcentaje de reducción de la turbiedad, afirmando con un nivel de certeza estadística del 99,5% describe el comportamiento del porcentaje de reducción de la turbiedad mediante el proceso acoplado. Esta validación del modelo se justifica por los valores de coeficiente de determinación tanto de R^2 y ($R^2_{ajustado}$) cercanos a 1, según la **Tabla 17 (Ver pag Nº 75)**. Por lo tanto, con los niveles adecuados de cada variable según la **Tabla 15 (Ver pag Nº 73)**, se permite remociones mayores al 99% de turbiedad, con esto probamos la tercera hipótesis específica.

“Las aguas residuales provenientes de la curtiembre, logran aumentar su grado de biodegradabilidad de la carga orgánica mediante el proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada”.

Del análisis de la **Tabla 11 (Ver pag Nº 67) y 15 (Ver pag Nº 73)**, sobre los datos provenientes de la caracterización fisicoquímica del agua residual no tratada y tratada, se puede ver que la relación entre DBO_5/DQO tiene un valor de 0,467 posesionándola en agua residual difícilmente biodegradable, sin embargo al someterlo al tratamiento a condiciones óptimas de voltaje, pH, flujo de ozono y flujo de alimentación se obtuvo un efluente con una relación de DBO_5/DQO igual a 0,55 llevándola a condiciones de agua tratable biológicamente. De los resultados analizados concluimos que mediante el proceso de electrocoagulación y oxidación avanzada se logra aumentar su grado de

biodegradabilidad de las aguas residuales provenientes de la zona ribera. De esta forma demostramos la hipótesis propuesta.

6.2. Contratación de resultados con otros estudios similares

No se encontraron trabajos similares a esta investigación, pero si relacionados al uso de electrocoagulación acoplado a otras técnicas sobre aguas residuales de una curtiembre.

El estudio realizado por Villalobos-Lara et al. (2020), titulado “Electrocoagulation treatment of industrial tannery wastewater employing a modified rotating cylinder electrode reactor”, redujeron la turbiedad mayor a 90%, llevado a cabo en un reactor de electrodo de cilindro rotatorio con seis ánodos de aluminio y dos tanques de sedimentación a una densidad de 6 mA/cm², velocidad de giro de 100 rpm y 3 horas de tratamiento para un volumen de 21 L de muestra, haciendo la comparación con el trabajo que realizamos, se redujo la turbiedad mayor a 99% con una hora de tratamiento demostrando mayor eficiencia del proceso acoplado.

Según Ziati et al. (2018), mediante su trabajo publicado de “Reduction of Turbidity and Chromium Content of Tannery Wastewater by Electrocoagulation Process”, lograron reducir la turbiedad al 99%, realizados en un sistema por lotes, utilizando dos electrodos de aluminio, a condiciones operacionales de 15 voltios, 1 cm de distancia entre electrodos, 6,1 pH y 90 minutos de tratamiento. Haciendo una comparación con el trabajo que realizamos, se tiene casi la misma eficiencia del 99%

La investigación realizada por Loukanov et al. (2020) titulada “Large-scale removal of colloidal contaminants from artisanal wastewater by bipolar electrocoagulation with aluminum sacrificial electrodes”, lograron reducir la turbiedad, cromo total, fósforo y DQO mayores a 90%, trabajados a través de sistemas bipolares con electrodo de aluminio, a condiciones de 7,0 – 7,5 de pH, densidad de corriente mínima y un tiempo de tratamiento corto entre 10 a 30 minutos, nuevamente haciendo la comparación con el trabajo que realizamos es mucho mayor la eficiencia con respecto a la reducción de la turbiedad.

En los siguientes apartados se va discutir los efectos combinados de las variables operacionales del proceso para la reducción del porcentaje de

turbiedad.

Voltaje aplicado con el pH inicial de la muestra sobre porcentaje de turbiedad: Como afirma Gao et al. (2005) el voltaje es uno de los factores de mayor influencia sobre las celdas de electrocoagulación. Según la **Figura 35 (A) (Ver pag N° 79)** la eficiencia en porcentaje de reducción de la turbiedad aumenta a medida que se incrementa el potencial eléctrico a cualquier valor de pH de la muestra, esto es debido a la mayor generación de iones aluminio producidos mediante la electrodisolución del electrodo, provocando la coagulación y formación de burbujas en los electrodos (Ayhan & Özacar, 2009). El voltaje influye en la subida inicial del pH, tal como se aprecia en la **Figura 30 (Ver pag N° 69)**. De igual manera al aumentar el voltaje hay un incremento y reducción de tamaño de las burbujas logrando una mayor reducción de la turbiedad (Burns et al., 1997)

Por otra parte, el voltaje a medida que pasa el tiempo empieza a subir para todas los experimentos, esto se debe a la disminución de la conductividad del medio, en cambio la intensidad de corriente empieza a bajar, también esto se debe a un aumento de resistencia generado por la polarización o pasivación de los electrodos y disminución de la conductividad (Skoog et al., 2014)

La influencia del pH sobre la electrocoagulación ha sido estudiada por varios investigadores. Según la **Figura 30 (Ver pag N° 69)** el pH inicial de la solución no permanece constante con el tiempo, según la **Figura 35 (A) (Ver pag N° 79)** se observa un incremento del porcentaje de reducción de la turbiedad a medida que se sube el pH de 4 hasta 7,5 y después baja la eficiencia cuando se lo lleva a condiciones alcalinas de 7,5 a 11, este aumento de reducción de la turbiedad se debe a que las especies coagulantes se forman a pH de 4 – 7,5, condiciones apropiadas para la coagulación química con aluminio (Amirtharajah & Mills, 1982). Otro de los aspectos a tener en cuenta es que a condiciones ácidas y alcalinas predominan las especies monoméricas solubles, en cambio a condiciones neutras predominan los precipitados de $Al(OH)_3$ que son insolubles ayudando a la reducción de la turbiedad (Lu et al., 2017). En la **Figura 32 (Ver pag N° 76)** podemos apreciar el cambio del pH de 4 hasta 8,21, en cambio cuando se empieza a trabajar a pH básico 10,8 baja a 9,45, en cambio a pH

iniciales de 7,5 sube a 8,24, estos cambios grandes se debe a la formación de radicales (OH^-) en el cátodo, formación de (H^+) en el ánodo y al efecto amortiguante generado por el $\text{Al}^{3+}/\text{Al}(\text{OH})_3$ (Koby et al., 2006)

- a) pH inicial de la muestra con la turbiedad inicial de la muestra.-** Según la **figura 35 (B) (Ver pag N° 79)** se aprecia una mayor reducción de la turbiedad a medida que la turbiedad inicial sea menor a 1130 NTU, este comportamiento podría explicarse porque la cantidad de flocúlos formados es suficiente para su adsorción y así disminuir rápidamente la turbiedad. Esta tendencia también se deduce de la ley de Faraday, que establece que Al^{3+} liberado a la solución para la misma solución aplicada es constante (Aber et al., 2009)
- b) pH inicial de la muestra con flujo de alimentación al reactor.-** Según la **Figura 35 (C) (Ver pag N° 79)**, a medida que se incrementa el flujo de alimentación (240 a 360 L/h) hay un aumento en la reducción de la turbiedad, esto se podría atribuir a medida que se va aumentando el flujo de alimentación hacia el reactor, hay una mayor formación de burbujas, esto es influenciado por el principio de cavitación hidrodinámica que se forma en el tubo de Venturi (Wang et al., 2019), lo cual como consecuencia predomina el mecanismo de flotación para la reducción de la turbiedad, esta formación de burbujas aumenta cuando se trabaja a condiciones ácidas llegando a formar dos fases (80% de espumas y 20% líquido) (Fukui & Yuu, 1985). Pero esta generación de burbujas genera un problema en los electrodos (la polarización por activación), generando un aumento en el voltaje y una disminución de corriente eléctrica por ende un aumento en el consumo de energía (Skoog et al., 2014)
- c) pH inicial de la muestra con flujo de ozono.-** El flujo de ozono es uno de los factores que tiene menor influencia en la reducción de la turbidez tal como se aprecia en la **Figura 35 (D) (Ver pag N° 79)**. Para la activación del ozono y transformarse en radicales (OH^-) se logra a través del electro reducción, que en este caso ayudaría en la oxidación ya sea directa o indirectamente a los componentes presentes en el efluente (materia orgánica, nitratos, sulfuros, entre otros) (Sivagami et al., 2018). Para oxidar el sulfuro, el ozono

es una alternativa a los tradicionales (Fe^{+2} , oxígeno, etc.), tal como se comprobó en la investigación realizado de “Remoción de sulfuro empleando ozono como agente oxidante en aguas residuales de curtiembres) por Umbarila–Ortega et al. (2019)

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes

Los autores de la presente investigación se responsabilizan por la información emitida en el informe final de investigación, de acuerdo al Reglamento del Código de Ética de la Investigación de la UNAC, Resolución de Consejo Universitario N° 260–2019–CU., donde se señala los principios éticos como norma de comportamiento conductual, así como también los autores están de acuerdo con el reglamento en donde se reconoce que la investigación es una función esencial y obligatoria en la UNAC, por ello los investigadores son responsables de los procesos y procedimientos de diseño, desarrollo y evaluación de su investigación para lo cual se actualiza permanentemente sus conocimientos y dedica el tiempo suficiente para desarrollar sus proyectos de investigación.

VII. CONCLUSIONES

Después de un adecuado tratamiento se alcanzo reducir la turbiedad mayor al 99% para 7 L de muestra y una hora de proceso. Por lo tanto, el tratamiento es recomendado para la reducción de turbiedad en curtiembre.

Como punto de partida de la caracterización de la muestra antes de su tratamiento, se confirma que esta agua residual supera los valores máximos admisibles para la descarga al alcantarillado en la mayoría de sus parámetros, entre ellos la turbiedad, DQO, DBO₅, aceites grasos, sulfuros y nitrógeno amoniacal, generando un índice de biodegradabilidad de 0,467

Mediante distintas pruebas realizadas, se llegó reducir la turbiedad en 100% en dos experimentos, para el primer experimento a niveles de 7 Voltios, 300 L/h de flujo de alimentación, 1 130 NTU de turbiedad inicial, 4,0 pH y 2 400 mg/h de flujo de ozono y para el segundo a 10 voltios, 360 L/h de flujo de alimentación, 580 NTU de turbiedad inicial, 4 pH y 900 mg/h de flujo de ozono.

Empleando la figura de efectos principales para señal y ruido, se pudo seleccionar los niveles adecuados para el proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada: 10 voltios, 7,5 pH, 360 L/h de flujo de alimentación, 2 400 mg/h de flujo de ozono y 375 NTU de turbiedad inicial. Utilizando estos niveles a excepción de la turbiedad inicial donde se empezó con 1 130 NTU, el proceso de tratamiento acoplado ha logrado reducir la turbiedad mayor a 99%. De esta manera en sus variables maximizadas permite un tratamiento eficiente y efectivo sobre la turbiedad.

Se consiguió caracterizar el agua residual después de su tratamiento a condiciones adecuadas logrando aumentar su grado de transparencia de la muestra, así mismo modo reducir los otros parámetros a diferencia de aluminio incrementándose en 99.34% y aumentar su biodegradabilidad de 0,467 a 0,554.

VIII. RECOMENDACIONES

Se recomienda cambiar el uso de ozono por aire para efluentes con poca carga tóxica y si el único propósito es reducir la turbiedad, esto lleva bajar los costos operacionales. Esto es debido a que el ozono no tiene mucha influencia sobre la reducción de la turbiedad.

Se recomienda para trabajos posteriores, en caso de utilizar el mismo módulo aumentar el tamaño del depósito con el fin de regular la espuma generada por la recirculación y no alterar los resultados.

Para el muestreo, se recomienda utilizar un material que se preste para la formación de tres zonas: sedimentada, clara y suspendida, con tal que al momento de sacar la muestra de la zona clara para su lectura de la turbiedad no se altere.

Se recomienda hacer estudios posteriores en caso de utilizar el mismo módulo experimental sobre el efecto del Venturi en la generación de burbujas y ver la influencia en la reducción de la turbiedad y otros contaminantes.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aber, S., Amani-Ghadim, A., & Mirzajani, V. (2009). Removal of Cr(VI) from polluted solutions by electrocoagulation: Modeling of experimental results using artificial neural network. *Journal of Hazardous Materials, Volume 171*, 484-490. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.025>
- Agarwal, A., Jern Ng, W., & Liu, Y. (2011). Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere 84*, 1175–1180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.054>
- Ameta, S. C. (2018). *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment*. India: PAHER University, Udaipur, Rajasthan,. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00384-4>
- Ameta, S., & Ameta, R. (2018). *Advanced oxidation processes for wastewater treatment*. India: Emily thomson. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1>
- Amirtharajah, A., & Mills, K. M. (1982). Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. *Research and Technology*, 210-216. <http://www.jstor.org/stable/41271001>
- Andreozzi, R., Caprio, V., Insola, A., & Marotta, R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today 53*, 51–59. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00102-9](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00102-9)
- Apaza, H., Carrillo, E., Castilla, D., & Huaraya, F. (2020). Eficiencia de la electrocoagulación para el tratamiento de efluente de la industria de curtiembre. *Ñawparisun- Revista de investigación científica, vol. 2, Num. 3*, 83-90. <https://doi.org/10.26788/riepg.v9i3.2278>
- Ayhan, I., & Özacar, M. (2009). The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials, Volume 161*, 1369-1376. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.100>

- Barrenechea, A. (2004). Coagulación. En L. Vargas, *Tratamiento de agua para consumo humano* (págs. 153-224). Lima.
<http://www.ingenieroambiental.com/4014/cuatro.pdf>
- Barrera Díaz, C. E. (2014). *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. España: Editorial Reverté.
<https://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/52617/Barrera+D%EDaz+tripa+2014.pdf;jsessionid=C028D53F01DC151B1739DEEB4749804F?sequence=1>
- Barrera-Díaz, C. E., Balderas-Hernández, P., & Bilyeu, B. (2018). *Electrocoagulation: Fundamentals and Prospectives*. México: Editorial Reverté. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813160-2.00003-1>
- Barzegar, G., Wu, J., & Ghanbari, F. (2019). Enhanced treatment of greywater using electrocoagulation/ozonation: Investigation of process parameters. *Process Safety and Environmental Protection, Volumen 121*, 125-132.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.10.013>
- Burns, S. E., Yiacoumi, S., & Tsouris, C. (1997). "Microbubble generation for environmental and industrial separations". *Sep Purif Technol 11*, 221-232.
[https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(97\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(97)00024-5)
- Butler, E., Hung, Y.-T., Yeh, R. Y.-L., & Al Ahmad, M. S. (2011). Electrocoagulation in Wastewater Treatment. *Water*, 495-525.
[doi:10.3390/w3020495](https://doi.org/10.3390/w3020495)
- Cañizares, P., Carmona, M., Lobato, J., Martínez, F., & Rodrigo, M. A. (2005). Electrodissolution of Aluminum Electrodes in Electrocoagulation Processes. *Ind. Eng. Chem. Res. 2005, 44*, 4178-4185.
<https://doi.org/10.1021/ie048858a>
- Castillo Castro, C., & Oviden Agurto, B. (2017). *Influencia de la distancia entre electrodos y densidad de corriente en la disminución de la carga contaminante de residuos líquidos de pelambre por electrocoagulación*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.
<http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/9854>

- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology* 38, 11–41.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>
- Das, P., Anweshan, Mondal, P., Sinha, A., Biswas, P., Sarkar, S., & Purkait, M. K. (2021). Integrated ozonation assisted electrocoagulation process for the removal of cyanide from steel industry wastewater. *Chemosphere Volumen* 263, 128370. DOI: [10.1016/j.quimiosfera.2020.128370](https://doi.org/10.1016/j.quimiosfera.2020.128370)
- Deveci, E., Akarsu, C., Gönen, Ç., & Özay, Y. (2019). Enhancing treatability of tannery wastewater by integrated process of electrocoagulation and fungal via using RSM in an economic perspective. *Process Biochemistry* 84, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.06.016>
- Duan, J., & Gregory, J. (2002). Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in Colloid and Interface Science*, 475–502.
[https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(02\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(02)00067-2)
- Esparza, E., & Gamboa, N. (2001). Contaminación debida a la industria curtiembre. *Revista de Química Volumen XV N° 1*, 41-63.
<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/4756>
- Fukui, Y., & Yuu, S. (1985). Removal of Colloidal Particles in Electroflotation. *AICHE J.*, 201-208. <https://doi.org/10.1002/aic.690310205>
- Gholamreza Moussavi, M. (2018). Enhanced treatment of tannery wastewater using the electrocoagulation process combined with UVC/VUV photoreactor: Parametric and mechanistic evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 0-31. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.069>
- Gao, P., Chen, X., Shen, F., & Chen, G. (2005). Removal of chromium(VI) from wastewater by combined electrocoagulation–electroflotation without a filter. *Separation and Purification Technology, Volume* 43, 117-123.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.10.008>
- Gutterres, M., Benvenuti, J., Fontoura, J., & Ortiz-Monsalve, S. (2015). Caracterización de aguas residuales crudas de curtiembres. *J Soc Leather Technol Chem* 99 (6), 280-287.

- Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chaf, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., & Naja, J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 1-21.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>
- Holt, P. k., Barton, G. W., & Mitchell, C. A. (2004). Deciphering the science behind electrocoagulation to remove suspended clay particles from water. *Water Science and Technology Vol 50 No 12*, 177–184.
<https://doi.org/10.2166/wst.2004.0711>
- Hunter, R. (1981). Zeta Potentia in Colloid Science. Principles and Applications. *Academic Press*.
<https://www.amazon.com/-/es/Robert-J-Hunter/dp/0123619610>
- Kanagaraj , J., Velappan, K., Chandra, N., & Sadulla, S. (2006). Solid wastes generation in the leather industry and its utilization for cleaner. *Journal of Scientific and Industrial Research* 65, 541-548. DOI: [10.1002/chin.200649273](https://doi.org/10.1002/chin.200649273)
- Kobyas , M., Demirbas, E., Can, O. T., & Bayramoglu, M. (2006). Treatment of levafix orange textile dye solution by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials B132* , 183–188.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.084>
- Lawler, D. (2016). Turbidity, Turbidimetry, and Nephelometry. *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering* , 1-12. DOI: [10.1016/B978-0-12-409547-2.11006-6.](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.11006-6)
- Lofrano, G., Meriç, S., Zengin, E., & Orhon, D. (2013). Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A review. *Science of the Total Environment* , 265-281.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.004>
- Loukanov, A., El Allaoui, N., Omor, A., Elmadani, F., Bouayad, K., & Nakabayashi, S. (2020). Large-scale removal of colloidal contaminants from artisanal wastewater by bipolar electrocoagulation with aluminum sacrificial electrodes. *Results in Chemistry* 2 , 100038.
<https://doi.org/10.1016/j.rechem.2020.100038>

Lu, J., Wang, Z., Ma, X., Tang, Q., & Li, Y. (2017). Modeling of the electrocoagulation process: a study on the mass transfer of electrolysis and hydrolysis products. *Chemical Engineering Science*, 1-36.

[DOI: 10.1016/J.CES.2017.03.001](https://doi.org/10.1016/J.CES.2017.03.001)

Martínez, F. (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. Real: Universidad de Castilla la Mancha. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=77603>

Mayta, R., & Mayta, J. (2017). Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación. *Revista de la Sociedad Química del Perú*.

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2017000300008

Mills, D. (2000). A new process for electrocoagulation. *American Water Works Association, Journal AWWA June 2000*, 34-43.

<https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2000.tb08957.x>

Mohammed, K., & Sahu, O. (2019). Recovery of chromium from tannery industry waste water by membrane separation technology: Health and engineering aspects. *Scientific African*, 4, e00096.

<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00096>

Mollah, M. Y., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC) — science and applications. *Journal of Hazardous Materials B84*, 29–41. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5)

Moradi, M., & Moussavi, G. (2019). Enhanced treatment of tannery wastewater using the electrocoagulation process combined with UVC/VUV photoreactor: Parametric and mechanistic evaluation. *Chemical Engineering Journal* 358, 1038–1046.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.069>

Morera i Prat, J., & Casanovas, P. (2002). *Química técnica de curtición*. España: Igualada : Consorci Escola Tècnica d'Igualada, 2002.

Mosquera-Corral, A., Campos, J. L., Vidal, G., & Méndez, R. (2007). Efluentes líquidos de curtidurías: parámetros de caracterización y de operación de

las unidades biológicas de depuración. *Producción Limpia en la Industria de la Curtiembre*. , 21-41.

<http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/produccion-limpia-en-la-industria-de-curtiembre.pdf>

Murugananthan, M., Raju, G., & Prabhakar, S. (2004). Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electro coagulation. *Journal of Hazardous Materials B109*, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2003.12.009>

Nidheesh, P., Kumar, A., Syam, D., Scaria, J., & Suresh, M. (2020). Treatment of mixed industrial wastewater by electrocoagulation and indirect electrochemical oxidation. *Chemosphere*, 251, 126437. DOI: [10.1016/j.quimiosfera.2020.126437](https://doi.org/10.1016/j.quimiosfera.2020.126437)

Picard, T., Cathalifaud-Feuillade, G., Mazet, M., & Vandensteendam, C. (1999). Cathodic dissolution in the electrocoagulation process using aluminium electrodes. *J. Environ. Monit*, 77-80. DOI: [10.1039/A908248D](https://doi.org/10.1039/A908248D)

Prat i Morera, J. M. (2002). *Química Técnica de Curtición*. España: Consorci Escola Tècnica d'Igualada.

Quijano, A., Castillo, C., & Meléndez, I. (2015). Potencial mutagénico y genotóxico de aguas residuales de la curtiembre Tasajero en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 18(1), 13-20.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-42262015000100003&script=sci_abstract&tlng=es

Raisman, J., & Gonzales, M. (2007). *Hipertextos del área de biología*. Obtenido de Impacto de los residuos de tenería sobre el ambiente y la salud humana:

http://www.biologia.edu.ar/tesis/forcillo/impacto_de_los_residuos.htm

Rebhun, M., & Lurie, M. (1993). Control of organic matter by coagulation and floc separation. *Wat. Sci. Tech. Vol. 27, No. II*, 1-20.

<https://doi.org/10.2166/wst.1993.0260>

Reyes-Serrano, A., López-Alejo, J., Hernández-Cortázar, M., & Elizalde, I. (2020). Removing contaminants from tannery wastewater by chemical

- precipitation using CaO and Ca(OH)₂. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.12.023>
- Richter, C., Pérez, J., & Cánepa, L. (1984). *Coagulación*. Lima: PE.CEPIS.
- Rodríguez, J. (2014). *Evaluación de reactores de electrocoagulación para el tratamiento de agua de purga de torres de enfriamiento*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/handle/132.248.52.100/6977>
- Rosales, A., Rodríguez, C., & Ballen-Segura, M. (2018). Remoción de contaminantes y crecimiento del alga *Scenedesmus* sp. en aguas residuales de curtiembres, comparación entre células libres e inmovilizadas. *Ingeniería y Ciencia*, 11-34.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-91652018000200011&script=sci_abstract&tlng=es
- Sawalha, H., Al-Jabari, M., Elhamouz, A., Abusafa, A., & Rene, E. (2020). Tannery wastewater treatment and resource recovery options. En T. Bhaskar, A. Pandey, E. Rene, & D. Tsang, *Integración de biorrefinerías para la valorización de residuos* (págs. 679-705). Países Bajos: Susan Dennis. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818228-4.00025-3>
- Sanjay, M., Sudarsanam, D., Raj, G., & Baskar, K. (2020). Isolation and identification of chromium reducing bacteria from tannery effluent. *Revista de la Universidad King Saud - Ciencia*, Vol. 32, Núm. 1, 265-271.
<https://doi.org/10.1016/j.iksus.2018.05.001>
- Sivagami, K., Sakthivel, K. P., & Nambi, I. M. (2018). Advanced oxidation processes for the treatment of tannery wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3656-3663.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.06.004>
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Fundamentos de química analítica, Novena edición*. México: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V., una Compañía de Cengage Learning, Inc.
- Supo, J., & Zacarías, H. (2020). *Metodología de la investigación científica: Para las ciencias de la salud y las ciencias sociales*. Huánuco: Independently published.

- Thorstensen, T. (1993). *Practical Leather Technology*. Florida, U.S.A.: Krieger Publishing company.
- Umbarila-Ortega, M. F., Prado-Rodríguez, J. S., & Agudelo-Valencia, R. N. (2019). Remoción de sulfuro empleando ozono como agente oxidante en aguas residuales de curtiembres. *Scielo*, Colombia.
https://redib.org/Record/oai_revista1336-facultad-de-ingenier%C3%ADa
- Vidal, G., Lorber, K., & Márquez, F. (2007). Producción limpia e la industria de curtiembre. *ResearchGate*, 65-78.
<http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/produccion-limpia-en-la-industria-de-curtiembre.pdf>
- Villalobos-Lara, A., Álvarez, F., Gamiño-Arroyo, Z., Navarro, R., Peralta-Hernández, J., Fuentes, R., & Pérez, T. (2020). Electrocoagulation treatment of industrial tannery wastewater employing a modified rotating cylinder electrode reactor. *Chemosphere*, 128491. DOI: [10.1016/j.quimiosfera.2020.128491](https://doi.org/10.1016/j.quimiosfera.2020.128491)
- Wang, J., Luyan, W., Xu, S., Ji, B., & Largo, X. (2019). experimental research on cavitation behavior in a venturi reactor with special emphasis on asphyxiation flow. *Thermal Science y Fluid Experimental*, 215-225.
- Yasri, N., Hu, J., Kibria, G., & Roberts, E. (2020). Electrocoagulation Separation Processes. En I. Chernyshova, S. Ponnurangam, & Q. Liu, *Avances multidisciplinarios en procesos de separación eficientes* (págs. 167-203). DOI: [10.1021/bk-2020-1348.ch006](https://doi.org/10.1021/bk-2020-1348.ch006)
- Ziati, M., Khemmari, F., Aitbara, A., & Hazourli, S. (2018). Reduction of Turbidity and Chromium Content of Tannery Wastewater by Electrocoagulation Process. *Water Environment Research*, 598-603. DOI: [10.2175/106143017X15131012152906](https://doi.org/10.2175/106143017X15131012152906)

ANEXOS

ANEXO 01 : Matriz de consistencia.

ANEXO 02 : Informe de ensayo de la caracterización de las muestras en estudio.

ANEXO 01

MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO : “REMOCIÓN DE LA TURBIEDAD MEDIANTE EL PROCESO ACOPLADO DE ELECTROCOAGULACIÓN Y OXIDACIÓN AVANZADA EN AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA CURTIEMBRE”

| PROBLEMAS PROBLEMA GENERAL | OBJETIVOS OBJETIVO GENERAL | HIPÓTESIS HIPÓTESIS GENERAL | VARIABLE DEPENDIENTE | DIMENSIONES | INDICADORES | MÉTODO |
|--|---|---|--|--|-------------------------------------|---|
| ¿Cómo es la remoción de la turbiedad mediante el proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada en aguas residuales procedentes de una curtiembre? | Determinar la remoción de la turbiedad mediante el proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada en aguas residuales procedentes de una curtiembre. | El tratamiento mediante el proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada es eficiente en la reducción de la turbiedad de las aguas residuales procedentes de una curtiembre. | Remoción de la turbiedad en aguas residuales procedentes de una curtiembre | Contenido de turbiedad antes y después del tratamiento | Contenido de turbiedad | Ecuación |
| PROBLEMAS ESPECÍFICOS | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | HIPÓTESIS ESPECÍFICA | VARIABLE INDEPENDIENTE | DIMENSIONES | INDICADORES | MÉTODO |
| ¿Cuáles serán las características físico-químicas de las aguas residuales procedentes de la curtiembre de la zona ribera? | Determinar las características físicoquímicas de las aguas residuales procedentes de la curtiembre de la zona ribera. | Los resultados obtenidos de los parámetros físicoquímicos de las aguas residuales procedentes de la curtiembre superan los valores máximos admisibles de la normativa de descarga al alcantarillado | | X1 = Voltaje | Voltaje | Fuente de energía, 0-30V, 0-5A, multímetro |
| ¿Cuáles serán los valores más adecuados del potencial aplicado, pH, Flujo de alimentación, flujo de ozono y turbiedad inicial al proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada para alcanzar un alto porcentaje de remoción de la turbiedad? | Determinar los valores más adecuados del potencial aplicado, pH, Flujo de alimentación, flujo de ozono y concentración de alimentación al proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada para alcanzar un alto porcentaje de remoción de la turbiedad. | Con los parámetros operacionales entre sus rangos, potencial (4V, 7V y 10V), pH (4, 7.5 y 10.8), flujo de alimentación (240L/h, 300L/h y 360L/h), turbiedad inicial (375 NTU, 580 NTU y 1130 NTU) y flujo de ozono (900mg/h, 1500mg/h y 2400mg/h) se obtendrá alto porcentaje de remoción de la turbiedad | Parámetros operacionales en un proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada | X2 = Flujo de alimentación del efluente | L/h de operación | Sistema volumétrico de Flujoómetro (2-18LPM) |
| ¿Cuál será el porcentaje de remoción de la turbiedad a las condiciones de operación óptimas del proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada? | Determinar el porcentaje de remoción de la turbiedad a las condiciones de operación óptimas del proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada. | A las condiciones de operación óptima se conseguirá un máximo porcentaje de remoción de la turbiedad | | X3 = Turbiedad del efluente | Unidades Nefelométrica de Turbidez | Turbidímetro EZDO TUB-430 |
| ¿Cuáles serán las características físicoquímicas del agua residual después del tratamiento? | Determinar las características físicoquímicas del agua residual después del tratamiento. | Las aguas residuales provenientes de la curtiembre, logran aumentar su biodegradabilidad mediante el proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada | | X4 = pH X5 = Flujo de ozono | (0-14) g/h de funcionamiento | Potenciómetro pH Hanna Instrumens Fuente generadora de ozono (0-3g/h) OzonoFonth |

Certificado



La Dirección de Acreditación del Instituto Nacional de Calidad - INACAL, en el marco de la Ley N° 30224, OTORGA el presente Certificado de Acreditación a:

ZEDERLAB S.A.C.

Laboratorio de Ensayo

En su sede ubicada en: Avenida Michel Faraday S/N Mz. B Lotes 24-25, distrito de Ate, provincia y departamento de Lima

Con base en la norma

NTP- ISO/IEC 17025:2017 Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración

Facultándolo a emitir Informes de Ensayo con Símbolo de Acreditación. En el alcance de la acreditación otorgada que se detalla en el DA-acr-06P-21F que forma parte integral del presente certificado llevando el mismo número del registro indicado líneas abajo.

Fecha de Acreditación: 20 de setiembre de 2019

Fecha de Vencimiento: 19 de setiembre de 2022

ESTELA CONTRERAS JUGO
Directora, Dirección de Acreditación - INACAL

Cédula N° : 0727-2019-INACAL/DA
Código N° : 014-3019-INACAL-DA
Registro N° : 1E - 146

Fecha de emisión: 01 de octubre de 2019

El presente certificado tiene validez con su correspondiente Alcance de Acreditación y escala de medición solo que el alcance puede estar sujeto a ampliaciones, reducciones, actualizaciones y suspensiones temporales. El alcance y vigencia debe consultarse en la página web www.inacal.gob.pe/portal/inacal/actualizaciones al momento de hacer uso del presente certificado.
La Dirección de Acreditación del INACAL es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (RAM) del Inter American Accreditation Co-operation (IAAC) e International Accreditation Forum (IAF) y del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo con la International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).

DA-acr-01P-02M Ver. 02

ANEXO 02: INFORME DE ENSAYO DE LA CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS EN ESTUDIO

| | |
|----------------------------------|--|
| RAZÓN SOCIAL | : PAUL ALCOGER |
| SOLICITADO POR | : PAUL ALCOGER |
| REFERENCIA | : TRATAMIENTO DE AGUA |
| PROCEDENCIA | : PLANTA HUAYCAN |
| FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRA | : 2020-01-03 |
| FECHA(S) DE ANÁLISIS | : 2020-01-03 AL 2020-01-10 |
| FECHA(S) DE MUESTREO | : 2020-01-03 |
| MUESTREADO POR | : EL CLIENTE |
| CONDICIÓN DE LA MUESTRA | : LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS SE APLICAN A LA MUESTRA(S) TAL COMO SE RECIBIÓ. |

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO

| Ensayo | Método | L.C. | Unidades |
|----------------------------------|---|--------------------|-------------------------------------|
| pH | SHEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-N+ B, 23rd Ed 2017 pH Value, Electronic Method. | 0.01 | Unidad pH |
| Turbidez | SHEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 23rd Ed. 2017 | 0.01 | NTU |
| Demanda Química de Oxígeno | SHEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd Ed. 2017 Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method. | 3.00 | mg/L |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | SHEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 23rd Ed. 2017. Biochemical Oxygen Demand (BOD) | 2.00 | mg/L |
| Aceites y Grasas | Method-1664-Revision B n-Hexane-Extractable Material/HEM-Oil-and-Grease-and-Silica-Gel-Treated-n-Hexane-Extractable Material/SGT-HEM-Non-polar-Material-by-Extraction-and-Gravimetry | 1.20 | mg/L |
| Nitrógeno Amoniacal / Amoniaco | SHEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-NH3-S,C, 23rd Ed. 2017. Nitrogen (Ammonia), Preliminary Distillation Step, Titrimetric Method. | 1.00 | NH ₄ ⁺ -N mg. |
| Sulfuros | SHEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500 S2- D, Sulfide, 23rd Ed. 2017, Methylblue Blue Method. | 0.002 | S ²⁻ mg/L |
| Numeración de Coliformes Fecales | SHEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9223 E-1, 23rd Ed. 2017. Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group, Fecal Coliform Procedure. | 1.0 ⁽¹⁾ | NP/100ml |
| Metales totales (Aluminio) | EPA Method 200.7, Rev.4.4, EMHC Version / 1994. Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry. | — | mg/L |

L.C.: Límite de cuantificación.

(a) Límite de detección del método para estas metodologías por ser se

II. RESULTADOS

| Producto declarado | Agua Residual | Agua Residual | Agua Residual | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------|-------|
| Matriz analizada | Agua Residual | Agua Residual | Agua Residual | | |
| Fecha de muestreo | 2020-01-03 | 2020-01-03 | 2020-01-03 | | |
| Hora de inicio de muestreo(h) | 10:00 | 10:00 | 10:00 | | |
| Condiciones de la muestra | Refrigerada/ Preservada | Refrigerada/ Preservada | Refrigerada/ Preservada | | |
| Código del Cliente | E-01 | E-02 | E-03 | | |
| Código del Laboratorio | 20010143 | 20010144 | 20010145 | | |
| Ensayo | Unidad | Resultados | | | |
| pH | Unidad pH | 9.43 | 8.2 | 8.6 | |
| Turbidez | NTU | 1130.0 | 152.1 | 2.8 | |
| Demanda Química de Oxígeno | mg/L | 2638 | 1789 | 875 | |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | mg/L | 1232 | 915 | 485 | |
| Aceites y Grasas | mg/L | 15.1 | <1.2 | <1.2 | |
| Nitrógeno Amoniacal / Amoniaco | NH ₄ ⁺ -N mg/L | 88.85 | 67.34 | 32.75 | |
| Sulfuros | S ²⁻ mg/L | 31.4 | 1.12 | <0.002 | |
| Numeración de Coliformes Fecales (1) | NP/100ml | <1.8 | <1.8 | <1.8 | |
| Ensayo | L.D.M | Unidad | Resultados | | |
| Metales totales | | | | | |
| Aluminio (Al) | 0.01 | mg/L | 0.29 | 1.18 | 44.06 |

(1) Coliformes Fecales es lo mismo que coliformes termotolerantes. L.D.M.: límite de detección del método.

Lima, 16 de Enero del 2020


 José David Corvalán Romero
 CEO Director Ejecutivo
