

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15
			VERSIÓN	02
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN		FECHA	16/11/2023
			PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad	

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S) Keisy Brayani APELLIDOS: Castro Diaz

NOMBRE(S) Laiz Dayana APELLIDOS: Villamizar Toloza

FACULTAD: Ciencias Agrarias y del Ambiente

PLAN DE ESTUDIOS: Ingeniería Ambiental

DIRECTOR:

NOMBRE(S): Dorance APELLIDOS: Becerra Moreno

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CURTIEMBRES MEDIANTE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO CATALIZADO CON BICARBONATO DE SODIO

En este proyecto se implementó un Proceso Avanzado de Oxidación basado en Peróxido de Hidrogeno catalizado con Bicarbonato de Sodio, con el fin de observar su efecto en la remoción de la Demanda Química de Oxigeno principalmente, dicho proyecto se llevó a cabo de la metodología aplicado-experimental, aplicado, debido a que pretende dar soluciones a las problemáticas identificadas en el territorio y experimental ya que implica la manipulación de las variables de estudio bajo condiciones controladas (Concentración de Peróxido de Hidrogeno, Concentración de Bicarbonato de Sodio, Condiciones de pH). Como resultado de la implementación de los tratamientos se observaron remociones de hasta de 22,30% en DQO, 50% en DBO5, a su vez se observaron incrementos en las concentraciones de Solidos Totales presentes en la muestra, así como el aumento en los valores de Alcalinidad de la misma. Además, se observó un patrón común en los tratamientos, donde se alcanzó la máxima eficacia en los primeros 30 minutos del proceso, seguido de una disminución gradual de la eficacia a medida que transcurría más tiempo. La muestra fue tomada en el corregimiento de San Faustino, a una temperatura promedio de 28°C, del tanque homogeneizador de la planta de tratamiento de la empresa, donde se mezclaban los efluentes del proceso de curtido y recurtido (pH ácido) y del proceso de pelambre (pH básico).

PALABRAS CLAVES: Procesos Avanzados de Oxidación, Bicarbonato De Sodio, Peróxido De Hidrogeno, Curtiembres, Tratamiento.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 121

PLANOS: NO

CD ROOM: NO

ILUSTRACIONES: 39

Palabras claves: Procesos Avanzados de Oxidación,
Curtiembres, Aguas Residuales, Peróxido de Hidrógeno,
Bicarbonato de Sodio.

**Tratamiento de aguas residuales de curtiembres mediante peróxido de hidrógeno
catalizado con bicarbonato de sodio**

Keisy Brayani Castro Diaz

Laiz Dayana Villamizar Toloza

Universidad Francisco de Paula Santander

Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente

Programa de Ingeniería Ambiental

San José de Cúcuta

2023

**Tratamiento de aguas residuales de curtiduría mediante peróxido de hidrógeno catalizado
con bicarbonato de sodio**

Keisy Brayani Castro Diaz

Laiz Dayana Villamizar Toloza

**Proyecto de grado modalidad investigación presentado como requisito para optar el título
de Ingeniero Ambiental**

Director: Dorance Becerra Moreno

Ingeniero Sanitario

M.Sc Ingeniería

Universidad Francisco de Paula Santander

Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente

Programa de Ingeniería Ambiental

San José de Cúcuta

2023

Agradecimientos

Agradecemos a todas las personas que nos tendieron la mano en todo este proceso, familiares, docentes, compañeros y jóvenes investigadores.

Al profesor Dorance Becerra por guiarnos en este camino y creer en nosotras.

A mi abuelo por siempre apoyarme en todas mis decisiones y ser una persona incondicional.

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido	4
Lista de Figuras	8
Lista de tablas	10
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	13
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
Formulación del problema	16
Hipótesis	16
Hipótesis nula	16
Hipótesis alterna	16
Justificación	16
Objetivos.....	18
Objetivo General	18
Objetivos Específicos	18
Alcances y limitaciones.....	19
Alcances	19
Limitaciones	19
Delimitación Espacio-Temporal	20
Delimitación Espacial	20
Delimitación Temporal	21
MARCO REFERENCIAL	22
Delimitación Conceptual	22
Aguas Residuales Industriales	22
Bicarbonato De Sodio	22
Carbono Orgánico Total.....	22
Catalizador.....	23
Contaminantes Emergentes	23
Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	23

Demanda Bioquímica De Oxígeno (DBO5).....	24
Peróxido de Hidrógeno	24
Proceso de Oxidación Avanzado (POA).....	24
Radical Hidroxilo.....	25
Wet-blue	25
Alcalinidad	25
Sólidos Suspendidos Totales	26
Absorbancia (A).....	26
pH.....	26
Antecedentes	27
Marco Teórico.....	34
Industria de las Curtiembres	34
Generación De Aguas Residuales De Curtiembres.....	35
Caracterización De Las Aguas Residuales De Curtiembres	38
Procesos De Oxidación Avanzada	39
Procesos De Oxidación Avanzada: Peróxido De Hidrógeno Catalizado Con Bicarbonato De Sodio (BAP).....	41
Usos del Proceso de Oxidación Avanzada: Peróxido De Hidrógeno Catalizado Con Bicarbonato De Sodio (BAP).....	42
Resultados del tratamiento	43
Marco Legal	44
METODOLOGIA	47
Tipo de investigación.....	47
Esquema metodológico.....	48
Muestra	49
Variables	51
Caracterización de la muestra	51
Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	52
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)	56
Alcalinidad Total	58
Peróxido de hidrógeno residual	61

Parámetros para la caracterización de las aguas residuales pH, temperatura TDS y conductividad.....	63
Solidos Totales (ST).....	64
Solidos sedimentables (SSD).....	65
Montaje experimental del tratamiento con peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio	66
RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	74
Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres, muestra obtenida de la empresa CURTIEMBRES S.A.S.....	75
Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	76
Demanda Bilógica de Oxígeno (DBO5)	77
Biodegradabilidad de la materia contaminante (DBO5/DQO).....	77
Solidos totales (ST).....	78
Solidos Sedimentables (SSD).....	78
Alcalinidad	78
Implementar el tratamiento de oxidación avanzada a partir del proceso de peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio en base a los antecedentes consultados a las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres.....	81
DQO a pH 3.....	84
DQO a pH 6.....	87
DQO a pH 9.....	90
Determinar las condiciones óptimas de operación para el tratamiento de la muestra de agua residual con el proceso de peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio.	93
Evaluación de condiciones óptimas del tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembres con Peróxido de Hidrógeno Catalizado con Bicarbonato de Sodio.....	96
Análisis de Varianza ANOVA.....	97
Diagrama de Pareto estandarizado para la remoción de DQO	99
Análisis de efectos principales para la remoción de DQO	100
Superficie de respuesta.....	100
Evaluar la potencial aplicación del sistema de tratamiento aplicado a las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres en base a lo estipulado en la resolución 0631 de 2015	102
pH.....	102

Demanda Biológica de Oxígeno	103
Solidos Totales.....	103
Solidos Sedimentables	104
Alcalinidad	105
Peróxido de Hidrógeno Residual	109
CONCLUSIONES	111
RECOMENDACIONES	112
BIBLIOGRAFIA	114

Lista de Figuras

Figura 1 Imagen satelital según coordenadas de georreferenciación de la empresa Curtiembres S.A.S	21
Figura 2 Imagen de los laboratorios de Calidad Ambiental UFPS- Sede Campos Elíseos	21
Figura 3 Imagen del proceso de curtido	37
Figura 4 Esquema metodológico del proyecto	49
Figura 5 Efluentes del proceso de curtido y recurtido	50
Figura 6 Efluentes del proceso de pelambre.....	50
Figura 7 Tanque Homogeneizador.....	51
Figura 8 Solución patrón para la curva de calibración de DQO	54
Figura 9 Curva de Calibración de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	55
Figura 10 Método Winkler para la DBO5	58
Figura 11 Test de Peróxidos de Mquant.....	61
Figura 12 Procedimiento de medición de Peróxido de Hidrógeno	61
Figura 13 Toma de características iniciales del agua residual.....	63
Figura 14 Procedimiento para calcular los Solidos Totales (ST) presentes en el agua residual ..	64
Figura 15 Procedimiento para calcular los Solidos Sedimentables (SSD) presentes en el agua ..	66
Figura 16 Reactor Batch a escala laboratorio tratamiento por Peróxido de Hidrógeno catalizado con Bicarbonato de Sodio.....	69
Figura 17 Adición de Peróxido de Hidrógeno al reactor	70
Figura 18 Adición de Bicarbonato de sodio al reactor Batch.....	70
Figura 19 Ajuste de pH	71
Figura 20 Resultados de DQO a pH 3.....	84
Figura 21 Resultados de remoción de DQO a pH 3.....	85
Figura 22 Resultados de DQO en el tratamiento más eficaz en condiciones de pH 3.....	86
Figura 23 Resultados de remoción de DQO en el tratamiento más eficaz en condiciones de pH 3	86
Figura 24 Resultados de DQO a pH 6.....	87
Figura 25 Resultados de remoción de DQO a pH 6.....	88
Figura 26 Resultados de DQO en el tratamiento más eficaz en condiciones de pH 6.....	89
Figura 27 Resultados de remoción de DQO en el tratamiento más eficaz en condiciones de pH 6	89
Figura 28 Resultados de DQO a pH 9.....	90
Figura 29 Resultados de remoción de DQO a pH 9.....	91
Figura 30 Resultados de DQO en el tratamiento más eficaz en condiciones de pH 9.....	92
Figura 31 Resultados de remoción de DQO en el tratamiento más eficaz en condiciones de pH 9	93
Figura 32 Comparación de Valores de DQO de acuerdo con sus condiciones de pH.....	94

Figura 33 Comparación de Porcentajes de remoción de DQO de acuerdo a sus condiciones de pH.....	95
Figura 34 Diagrama de Pareto Estandarizada para Remoción de DQO	99
Figura 35 Grafica de efectos principales para la remoción de DQO	100
Figura 36 Grafica de Superficie de Respuesta del Tratamiento de Peróxido de Hidrógeno catalizado con Bicarbonato de Sodio.	101
Figura 37 Valor de pH al finalizar el tratamiento	102
Figura 38 Valor registrado del parámetro de Solidos Sedimentables (SSD)	105
Figura 39 Medida de Peróxido de Hidrógeno residual	109

Lista de tablas

Tabla 1 Caracterización Físicoquímica de los efluentes de curtiembres	38
Tabla 2 Normatividad Colombiana.....	44
Tabla 3 Parámetros para la caracterización físicoquímica de la muestra.....	52
Tabla 4 Curva de calibración DQO.....	55
Tabla 5 Volúmenes para dilución de muestras	57
Tabla 6 Diseño de Experimentos para el Tratamiento de Bicarbonato de Sodio con Bicarbonato de Sodio para Aguas Residuales de Curtiembres	72
Tabla 7 Parámetros Iniciales de la Muestra de Aguas Residuales de Curtiembre.....	75
Tabla 8 Relaciones y Valores de Alcalinidad.....	78
Tabla 9 Resultados de viraje de la muestra con indicador de Fenolftaleína, Volumen (F).....	79
Tabla 10 Resultados de viraje de la muestra con indicador de Naranja de Metilo, Volumen (M).	79
Tabla 11 Resultados de la Alcalinidad Total de la muestra	80
Tabla 12 Condiciones de los tratamientos de Peróxido de Hidrógeno catalizado con Bicarbonato de Sodio implementados a la muestra.....	82
Tabla 13 Valores de DQO registrados durante los tratamientos	82
Tabla 14 Porcentaje de remoción de DQO calculados.....	83
Tabla 15 Análisis de Varianza para Remoción de DQO.....	98
Tabla 16 Resultados de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) en el tratamiento óptimo	103
Tabla 17 Resultados de los Solidos Totales (ST) en el tratamiento más óptimo	104
Tabla 18 Resultados de viraje de la muestra con indicador de Fenolftaleína, Volumen (F).....	105
Tabla 19 Resultados de viraje de la muestra con indicador de Naranja de Metilo, Volumen (M).	106
Tabla 20 Resultados de la Alcalinidad Total del tratamiento.....	106
Tabla 21 Resultados de alcalinidad durante el tratamiento	108
Tabla 22 Resultados Finales del Tratamiento.....	110

RESUMEN

Las aguas residuales industriales representan una fuente significativa de contaminación del agua, con efectos potencialmente dañinos en los ecosistemas debido a su compleja composición, baja biodegradabilidad y alta toxicidad. Este contexto impulsa la necesidad urgente de investigar y desarrollar nuevas tecnologías de tratamiento para abordar esta problemática.

Los procesos de oxidación avanzada (PAO) se han destacado como una solución eficaz para garantizar la calidad del agua tratada, ya que ofrecen una mayor capacidad de oxidación, velocidades de reacción superiores, menos contaminación secundaria y una aplicación versátil en el tratamiento de aguas residuales en comparación con las tecnologías tradicionales.

En este proyecto se implementó un proceso avanzado de oxidación (PAO) basado en Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) catalizado con Bicarbonato de Sodio ($NaHCO_3$) para tratar las aguas residuales de esta industria, el cual tuvo la finalidad de observar su efecto en la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) principalmente, dicho proyecto se llevó a cabo a partir de la metodología aplicado-experimental, lo cual implica la manipulación de las variables de estudio bajo condiciones controladas, en este caso, las variables de estudio fueron las siguientes; Concentración de Peróxido de Hidrógeno, Concentración de Bicarbonato de Sodio y Condiciones de pH. Como resultado de la implementación de los tratamientos se observaron remociones de hasta de 22,30% de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), 50% de remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5), por otra parte, durante el tratamiento se percibió un incremento de las concentraciones de sólidos totales (ST) presentes en la muestra y valores mayores de alcalinidad durante el mismo. Además de esto, los tratamientos tuvieron un patrón en común, el cual fue alcanzar la máxima remoción en los primeros 30 minutos del proceso, seguido de una disminución gradual de la eficacia a medida que transcurría más tiempo. El

tratamiento que mayor remoción de DQO demostró fue el que contenía mayor concentración de Peróxido de Hidrógeno(H_2O_2) y Bicarbonato de Sodio ($NaHCO_3$) y en condiciones de pH 9 (Alcalino-Débil).

Es importante destacar que, en comparación con el estudio de referencia, el cual trató aguas residuales de la industria textil, el porcentaje de eliminación de DQO en este estudio fue relativamente bajo. Esto podría atribuirse a las diferencias en las características de las aguas residuales tratadas, que contenían diversos compuestos químicos y sustancias utilizadas en la producción de cuero, lo que subraya la necesidad de considerar la especificidad de las aguas residuales en futuros proyectos de tratamiento.

Palabras clave: Catalizador, Aguas Residuales, Bicarbonato De Sodio, Peróxido De Hidrógeno, Curtiembres, Tratamiento.

INTRODUCCIÓN

Una curtiembre es un establecimiento dedicado al proceso de curtido, que transforma las pieles de animales en cuero. El cuero producido por las curtidurías se utiliza en diversas aplicaciones, como la fabricación de calzado, marroquinería y tapicería. El proceso de curtido se divide en varias etapas, que incluyen limpieza, curtido, recubrimiento y acabado (Cango & Alexandra, 2020).

Las aguas residuales industriales de curtido se refieren a los efluentes líquidos generados por la industria del curtido de cuero. Estas aguas residuales contienen una variedad de contaminantes específicos de la industria del curtido, como metales pesados, productos químicos tóxicos, microplásticos y residuos orgánicos sintéticos. El proceso de curtido implica el tratamiento de las pieles de animales para convertirlas en cuero, lo que resulta en la generación de grandes cantidades de aguas residuales que contienen altas cargas orgánicas e inorgánicas. (Parra & Marcela, 2019).

Las curtidurías son una fuente importante de contaminación en todo el mundo. A pesar de que la industria del cuero genera empleo y es una parte importante de la economía, también tiene un fuerte impacto negativo en el medio ambiente debido a su contribución a la contaminación del agua y otros problemas ambientales.

Según Greenpeace (2012), se estima que se requieren aproximadamente 500 kg de agentes químicos para la transformación de una tonelada de cuero acabado. Sorprendentemente, el 85% de estos productos se convierten en residuos de proceso, lo que los hace tóxicos y nocivos para cualquier forma de vida. Además de estos químicos, también se deben considerar los desechos animales como cuero crudo, grasa y pelo, ya que su eliminación combinada genera una cantidad importante de desechos líquidos y sólidos que se vierten a los cuerpos de agua

locales. Este vertido contribuye significativamente a la contaminación provocada por la industria del curtido.

Cuando estos materiales de desecho se vierten a los ríos, tienen un impacto adverso sobre la fauna, afectando a peces y larvas que son componentes naturales del ecosistema acuático, así como a la flora, como las plantas acuáticas. En resumen, la eliminación de estos agentes naturales tiene un efecto perjudicial sobre todo el ecosistema, lo que a su vez puede contribuir al fenómeno del calentamiento global (Soto, 2015).

A raíz de lo anterior, se realizó un estudio del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una curtiduría mediante un proceso de oxidación avanzado. Este proceso implicó el uso de peróxido de hidrógeno activado con bicarbonato de sodio con el fin de maximizar las ventajas de este método y lograr la separación de la carga orgánica contaminante. La Demanda Biológica de Oxígeno y la Demanda Química de Oxígeno se utilizaron principalmente como guía para determinar la dosificación más efectiva, con el objetivo de reducir los impactos al entorno ambiental.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El cuero es reconocido mundialmente como un material duradero y flexible, fabricado mediante el proceso de curtido de pieles de animales (Lofrano et al., 2013). El cual se divide en distintos procedimientos mecánicos, físicos y químicos que ayudan en la eliminación de carne, grasa, pelo residual con el objetivo de mejorar su aspecto y propiedades funcionales (Elabbas et al, 2016), Su industria forma parte de los sectores de manufactura más grandes del mundo (Giaccherini et al., 2017) y utilizan importantes cantidades de agua, lo que conlleva a generar enormes cantidades de aguas residuales, produciendo aproximadamente 35 L por 1 Kg de piel curtida (Deghles y Kurt, 2016), el proceso para curtir pieles está seccionado en varias etapas,

para las cuales se utilizan sustancias químicas altamente peligrosas que terminan por ser componentes del agua que resulta de esta actividad productiva.

La industria de las curtiembres ha cobrado relevancia en Colombia y específicamente en la ciudad de Bogotá, desde el año 2015, debido al aumento de sus ventas y la oferta de empleo en la región. Las exportaciones de piel salada y wet-blue en los primeros seis meses del año 2015 ascendieron a US \$99.2 millones. Los países a los que se exporta mayormente wet-blue son Italia con una participación del 27%, China con un 19% y Venezuela con un 11%, entre otros destinos (DANE, 2015).

Las aguas residuales industriales son una fuente importante de contaminación del agua y pueden tener un impacto inmenso en los ecosistemas debido a su composición compleja, su escasa biodegradabilidad y su elevada toxicidad (Wang et al., 2019). Por tanto, existe una necesidad urgente de explorar y desarrollar nuevas tecnologías para tratar las aguas residuales industriales refractarias. Se han desarrollado diversas tecnologías de tratamiento físico, químico y biológico para eliminar la toxicidad de estas aguas residuales en el medio ambiente. La coagulación y el tratamiento biológico son los métodos de tratamiento tradicionales más utilizados y aunque estas tecnologías tienen ventajas, no pueden descomponer completamente los contaminantes orgánicos en las aguas residuales industriales (Zhao et al., 2018). Los Procesos avanzados de oxidación (PAOs) han sido ampliamente empleados como tratamiento avanzado para garantizar la calidad de los efluentes (Wang et al., 2019) y en comparación con las tecnologías de tratamiento tradicionales, estos tienen una mayor capacidad de oxidación, una mayor velocidad de reacción, menor contaminación secundaria, condiciones de reacción más suaves y aplicaciones más amplias en el campo del tratamiento del agua (Ganiyu et al., 2015).

Por lo tanto, con este proyecto se busca desarrollar el tratamiento de aguas residuales de curtiembre, mediante un proceso avanzado de oxidación utilizando peróxido de hidrógeno catalizado por bicarbonato de sodio, para así dar un referente de viabilidad del proceso en este tipo de aguas según las normas establecidas.

Formulación del problema

¿Qué influencia tiene el proceso de oxidación avanzando de Peróxido de Hidrógeno catalizado con Bicarbonato de Sodio en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres?

Hipótesis

Hipótesis nula

El proceso avanzado de oxidación de Peróxido de Hidrógeno catalizado con Bicarbonato de sodio es técnicamente viable para el tratamiento de aguas residuales provenientes de curtiembres.

Hipótesis alterna

El proceso avanzado de oxidación de Peróxido de Hidrógeno catalizado con Bicarbonato de sodio no es técnicamente viable para el tratamiento de aguas residuales provenientes de curtiembres.

Justificación

La industria de la curtiduría es uno de los sectores manufactureros más antiguos, además de ser de las actividades más contaminantes en términos de volumen debido a la complejidad del tratamiento de sus efluentes de descarga. La mayoría de estas industrias vierten al medio

ambiente descargas sin ningún tipo de tratamiento con esto provocan su degradación.

Actualmente se sabe que los efluentes de las industrias de curtiduría contienen grandes cantidades de aguas residuales potencialmente tóxicas y tienen una alta concentración de proteínas, cloruros, nitrógeno, sulfato, sulfuros, demanda biológica de oxígeno (DBO), DQO, cromo trivalente y sólidos en suspensión (Muthukkauppan & Parthiban, 2018.)

El Centro Nacional de Producción más Limpia en convenio con el Instituto para el desarrollo de la Ciencia y la Tecnología, Colciencias y El SENA (2004) a través del Diagnóstico Ambiental del sector Curtiembre en Colombia hace evidente la problemática del país frente a los impactos ambientales producidos por las industrias curtidoras en Colombia resaltando la baja calidad de los tratamientos usados, su efectividad y en casos de curtiembres ilegales el nulo tratamiento de estos vertimientos. respecto a esto se han aplicado diversidad de métodos para la degradación de aguas residuales producto de esta actividad tales como la biodegradación, la adsorción, el intercambio iónico, la oxidación/precipitación química, la coagulación/floculación, y procesos de oxidación avanzada, siendo este último de los más efectivos.

Los procesos de oxidación avanzada (POA), se consideran el método más eficiente y eficaz para tratar las aguas residuales complejas (Roshini et al., 2017), comparado con los sistemas de tratamiento convencionales, puesto que son capaces de degradar las sustancias orgánicas recalcitrantes, debido a la oxidación que ocurre a través de los radicales hidroxilos o sulfatos que se generan de estos procesos (Nidheesh, 2017), estos métodos nos permiten asegurar resultados muy favorables a bajo costo.

El método de POA usando peróxido de hidrógeno activado con bicarbonato se destaca debido a que el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) es una sustancia de bajo costo, alta solubilidad

en agua, con capacidad buffer a pH 8-9, el cual es un catalizador del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) formando así el ion peroximonocarbonato (HCO_2^-), con el sistema BAP ocurre la formación adicional de especies reactivas como el Peroximonocarbonato (HCO_4^-), Carbonato (CO_3^{2-}) y Bicarbonato (HCO_3^-). La presencia del radical CO_3 en altas concentraciones y mayor vida media en el medio de reacción, ofrece más oportunidad de reacción con los contaminantes (Karimifard & Alavi Moghaddam, 2018), lo que hace de este un método viable para el tratamiento de aguas residuales de curtiembre.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el tratamiento de aguas residuales producidas en la industria de curtiembre mediante el proceso de oxidación avanzada de peróxido de hidrógeno activado con bicarbonato de sodio.

Objetivos Específicos

- Realizar la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres
- Implementar el tratamiento de oxidación avanzada a partir del proceso de peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio en base a los antecedentes consultados a las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres
- Determinar las condiciones óptimas de operación para el tratamiento de la muestra de agua residual con el proceso de peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio.

- Evaluar la potencial aplicación del sistema de tratamiento aplicado a las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres en base a lo estipulado en la resolución 0631 de 2015

Alcances y limitaciones

Alcances

La investigación tuvo como objetivo principal evaluar a escala laboratorio la remoción de parámetros y contaminantes tales como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5), Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Sedimentables, Alcalinidad Total y Peróxido de Hidrógeno Residual, a partir de la caracterización de las aguas residuales procedentes de las industrias de curtiembres, específicamente de la empresa “Curtiembres S.A.S” (Cúcuta), mediante la aplicación del proceso de oxidación avanzado de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) catalizado por bicarbonato de sodio (NaHCO₃) y condiciones variables de pH. La viabilidad de este tratamiento se determinó en base a la degradación de la carga orgánica contaminante utilizando principalmente la Demanda Química de Oxígeno como guía para seleccionar la dosificación más efectiva.

Limitaciones

La investigación presentó las siguientes limitaciones:

- Información secundaria insuficiente: Estado de las industrias de curtiembres en Colombia y Norte de Santander y aplicación del tratamiento BAP a las aguas procedentes de la industria de curtiembres.

- Imposibilidad de uso de equipos necesarios para realizar una investigación más profunda y detallada, debido a falta de insumos, mantenimiento o calibración de los mismos (Equipo TELEDYNE TEKMAR TOC TORCH, para la medición del Carbono Orgánico Total, Papel filtro de fibra de vidrio para la medición de Sólidos Suspendidos Volátiles, etc)

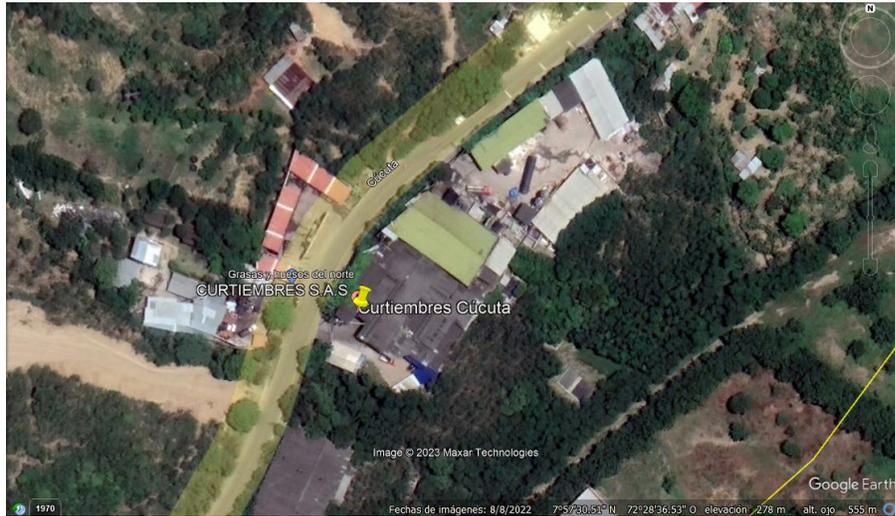
Delimitación Espacio-Temporal

Delimitación Espacial

El proyecto se desarrolló en departamento de Norte de Santander, en las siguientes localidades:

- La muestra de agua residual de curtiembre fue recolectada de la Empresa “Curtiembres S.A.S”, ubicada en el municipio de Cúcuta, específicamente en el Barrio San Faustino, coordenadas $7^{\circ}57'30.51''N$ latitud, $72^{\circ}28'36.53''O$ longitud y una altitud de 278 m.s.n.m. (ver figura 1)

Figura 1 Imagen satelital según coordenadas de georreferenciación de la empresa Curtiembres S.A.S



Fuente: (Google Earth, 2022)

- Caracterización y tratamiento de muestras (Laboratorio de Calidad Ambiental de la Universidad Francisco de Paula Santander – sede campos Elíseos-los Patios-N. d. S.) (ver figura 2)

Figura 2 Imagen de los laboratorios de Calidad Ambiental UFPS- Sede Campos Elíseos



Fuente: (Google Earth, 2023)

Delimitación Temporal

La fase experimental del proyecto se desarrolló en seis meses (6).

MARCO REFERENCIAL

Delimitación Conceptual

Para un adecuado desarrollo del proyecto y correcta interpretación de los resultados, se debieron conocer los siguientes términos:

Aguas Residuales Industriales

Son efluentes ocasionados por las actividades antrópicas como procesos para el manejo, manipulación y modificación de recursos en la producción de diversos bienes y servicios.

(Corredor Camargo, Castro Escobar, Páez Barón, & Fonseca Carreño, 2017)

Bicarbonato De Sodio

Se caracteriza por ser sólido, cristalino de color blanco y soluble en agua, es incoloro y tiene un ligero sabor alcalino, su fórmula está basada en los componentes que lo constituyen Na_2CO_3 (Calvet et al., 1945)

Carbono Orgánico Total

El carbono orgánico total (COT) es la cantidad de carbono que contienen los compuestos orgánicos no volátiles. Es el material derivado de la descomposición de las plantas, el crecimiento bacteriano y las actividades metabólicas de los organismos vivos, o de compuestos químicos. En el agua y las aguas residuales está compuesto por una variedad de compuestos orgánicos en varios estados de oxidación. (Godoy, R. B., & Centro Universitario de Estudios Medioambientales, 2021)

Catalizador

Son sustancias que se pueden agregar a una reacción para aumentar la velocidad de reacción sin que se consuman en el proceso. Generalmente funcionan reduciendo la energía del estado de transición, así disminuyendo la energía de activación, y/o cambiando el mecanismo de la reacción. Esto también cambia la naturaleza (y la energía) del estado de transición. Muchos procesos bioquímicos, tales como la oxidación de la glucosa, dependen mucho de las enzimas, proteínas que se comportan como catalizadores. Otros tipos comunes de catalizadores incluyen a los catalizadores ácido-base y los catalizadores heterogéneos (o de superficie) (*Tipos de catalizadores*, s.f.)

Contaminantes Emergentes

Son sustancias químicas de reciente interés que se encuentran en aguas de desecho, en biosólidos, en sedimentos de río y en agua potable. (Becerril, 2009)

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO es la demanda química de oxígeno del agua. Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en CO₂ y H₂O. Cuanto mayor es la DQO, más contaminada está el agua. La DQO es una prueba que sólo toma alrededor de tres horas, por lo que los resultados se pueden tener en mucho menor tiempo que lo que requiere una prueba de DBO. (Induanalisis, 2019)

Demanda Bioquímica De Oxígeno (DBO5)

Se define como la cantidad de oxígeno utilizada por microorganismos no fotosintéticos para convertir compuestos orgánicos biodegradables en dióxido de carbono y agua. Para su determinación es necesario proporcionar condiciones adecuadas a los microorganismos durante 5 días, como temperatura (20°C), pH neutro, ausencia de luz, entre otros. Existen diferentes métodos para determinar la cantidad de oxígeno consumida por los microorganismos en estos 5 días. (Bes Monge et al., 2018)

Peróxido de Hidrógeno

El peróxido de hidrógeno es un compuesto químico representado con la fórmula empírica H_2O_2 . Aunque es considerado un compuesto inodoro, el peróxido de hidrógeno presenta un olor dulce a altas concentraciones de vapor, es considerado como un oxidante intermedio con base en el rango de potenciales de oxidación, y puede lograr algunas oxidaciones por sí mismo; reacciona lentamente con sustratos como olefinas, hidrocarburos aromáticos, alquenos, etc., pero para la mayoría de las aplicaciones, requiere activación de alguna u otra manera, este se activa en presencia de una gran variedad de entidades químicas, ya sea orgánicos o inorgánicos. (Rodríguez Peña et al., 2020)

Proceso de Oxidación Avanzado (POA)

Los POA encuentran su aplicación principal en el tratamiento terciario, siendo el objetivo de estos procesos eliminar compuestos difícilmente biodegradables e incluso disminuir la contaminación microbiológica. Las tecnologías de POA tienen la capacidad de oxidar una gran variedad de contaminantes, pudiendo llegar a la mineralización si el proceso se prolonga lo

suficiente o quedándose en estados de oxidación intermedios que permitan un acoplamiento con otros métodos de depuración como pueden ser los procesos biológicos. (Bes Monge et al., 2018)

Radical Hidroxilo

El radical hidroxilo $\text{OH}\cdot$ es el oxidante natural más importante en la química troposférica. A menudo se le denomina "detergente" de la atmósfera, ya que reacciona con muchos contaminantes, iniciando el proceso de depuración de éstos. Asimismo, juega un papel importante en la eliminación de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono y el metano. La importancia de los Procesos de Oxidación Avanzados (POA) radica en que su aplicación destruye el contaminante. Se logra de este modo una mineralización casi total de los contaminantes orgánicos, es decir, tienen aplicación en la inhibición de la gran mayoría de compuestos orgánicos, especialmente en compuestos no biodegradables como organoclorados, PCBs, HAPs, etc. Es una tecnología limpia. (*Alta tecnología de radicales hidroxilos*, s.f.)

Wet-blue

Producto del proceso de curtido al cromo, en donde las pieles no han recibido los procesos de acabado en húmedo y acabado en seco (Secretaría de Ambiente, 2017).

Alcalinidad

Esta hace referencia a presencia de sustancias hidrolizables en agua y que, como producto de esto, generan el ion hidroxilo (OH^-), a su vez puede referirse como la capacidad que tiene el agua para neutralizar o regular cambios en la acidez (Martinez de la cruz, 2012).

Sólidos Suspendidos Totales

Se define cómo la cantidad de sólidos que el agua conserva en suspensión después de 10 minutos de asentamiento, principalmente de naturaleza orgánica, pero también comprenden sales inorgánicas como las formadas con calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos, que están disueltas en el agua y se miden en partes por millón (Farmani et al, 2008).

Absorbancia (A)

La absorbancia de una solución está relacionada con la transmitancia en forma logarítmica (ver ecuación 1 y 2); Donde (I_0) hace referencia a la intensidad de radiación incidente y (I) a la luz que emerge de la muestra. Considerando la Ley de Lambert Beer, este concepto está asociado linealmente con la concentración (c) de las especies absorbentes y con la longitud de la trayectoria de la radiación (b) en el medio absorbente (ver ecuación 3); Donde A_0 , es una constante de proporcionalidad llamada Absortividad Molar ($L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) (Myriam Yaneth Chacón, 2017)

$$A = -\text{Log} (T) \quad (1)$$

$$A = \text{Log} \frac{I_0}{I} \quad (2)$$

$$A_0 = \epsilon bc \quad (3)$$

pH

El potencial hidrógeno indica la concentración de hidrogeniones o de iones hidroxilo en una solución acuosa. Este puede tener valores desde 0 a 14, siendo 7 un valor neutro, valores de acidez menos de 7 y alcalinos mayores a este mismo número (COSMOS, 2009)

Antecedentes

Gelvez N., (2021), Tratamiento de aguas residuales con contenido de clorpirrifos mediante peróxido de hidrógeno activado con bicarbonato de sodio (Tesis) Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia.

Resumen: Se realizó un sistema de tratamiento para aguas residuales agroindustriales con contenido de clorpirrifos mediante un proceso avanzado de oxidación, utilizando peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio. El estudio del proceso de tratamiento se realizó escala laboratorio y se encontró que a concentraciones de 0,003 mol. L⁻¹ de H₂O₂ y NaHCO₃ de 0,005 mol. L⁻¹ y pH de 9, este proceso demostró remover clorpirrifos en un 82%, COT en un 98,6%, DQO en un 84,0%, DBO₅ del 53,1%, y concentración de plaguicida del 98,1%, sobre aguas residuales reales provenientes del Distrito de Riego El Zulia. (Gelvez N., 2021).

Jawad A., Chen Z, y Yin G, (2016), Activación con bicarbonato de peróxido de hidrógeno: una nueva tecnología emergente para el tratamiento de aguas residuales (Artículo) Laboratorio clave de Hubei de química de materiales y fallo de servicio, Escuela de Química e Ingeniería Química, Universidad de Ciencia y Tecnología de Huazhong, Wuhan, China

Resumen: Esta revisión se encargó de representar el progreso reciente del uso de peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato para el tratamiento de aguas residuales altamente contaminadas. Se consideró que el tratamiento catalítico parece ser uno de los sistemas de tratamiento más efectivos, ya que es capaz de degradar varios compuestos orgánicos con la ayuda de los radicales OH⁻. En este artículo se examina la introducción del bicarbonato en el tratamiento en sistemas homogéneos y heterogéneos y se observó que ha tenido un impacto

positivo en ellos, no solo en su eficiencia, si no a su vez en la estabilidad del proceso. La degradación mejorada, lixiviación limitada o falta de lixiviación durante la degradación heterogénea, y la estabilidad prolongada de los catalizadores durante la degradación son características sobresalientes de este sistema. Esta revisión permite que los lectores adquieran nuevos conocimientos sobre el bicarbonato, entre ellos, que no siempre daña la degradación de los contaminantes y que pueden beneficiar significativamente la degradación en algunas condiciones (Jawad et al, 2016).

Wang T., Wang Q., Soklun H., Qu G., Xia T., Guo X., Jia H., Zhu L., (2019), Una estrategia verde para la descomplejación simultánea de Cu (II)-EDTA y Cu, precipitación del agua por peróxido de hidrógeno activado con bicarbonato /precipitación química (Artículo) Facultad de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Universidad A&F del Noroeste, Laboratorio clave de nutrición vegetal y agroambiente en el noroeste de China, Ministerio de Agricultura, Yailing, China.

Resumen: En este estudio, se planteó una estrategia novedosa y ecológica de acoplamiento de la oxidación con peróxido de hidrógeno activado por bicarbonato (BHP) y la precipitación alcalina para la descomplejación simultánea del ácido etilendiaminotetraacético (Cu-EDTA) y la precipitación del Cu. La eficacia de la descomplejación del Cu-EDTA alcanzó el 92,0% en 60 minutos del tratamiento con BHP, y el proceso de descomplejación fue espontáneo y endotérmico. El débil ambiente alcalino proporcionado por el bicarbonato favoreció la generación de las sustancias reactivas y la subsiguiente descomplejación del Cu-EDTA. Una dosis relativamente alta de H₂O₂ favoreció la descomplejación del Cu-EDTA,

mientras que una dosis excesiva de bicarbonato inhibió la reacción. La eficiencia de eliminación de COT y de Cu alcanzó el 78,4% y el 68,3% después de 60 minutos de tratamiento, respectivamente. Los enlaces CueO y CueN en el Cu-EDTA fueron destruidos por las sustancias reactivas, y una serie de intermedios que contienen Cu, pequeñas moléculas orgánicas como etanamina, etilenglicol y butanodiol, y NO_3^- se produjeron. Los iones de Cu liberados se precipitaron como $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$, CuCO_3 , $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y CuO en este sistema.

Li Y., Li L., Chen Z., Zhang J., Gong L., Wang Y., Zhao H., Mu Y., (2018), Proceso de oxidación de peróxido de hidrógeno activado por carbonato para la decoloración de colorantes azoicos: proceso, cinética y mecanismos (Artículo) Laboratorio clave de conversión de contaminantes urbanos de CAS, Centro de Innovación Colaborativa de Suzhou Nano Ciencia y Tecnología, Departamento de Química, Universidad de Ciencia y Tecnología de China, Hefei, China

Resumen: Este estudio es el primero en investigar el potencial del proceso de oxidación del peróxido de hidrógeno activado por carbonato (CAP) para la eliminación de contaminantes orgánicos de aguas residuales altamente alcalinas. Se seleccionó el azo colorante ácido naranja 7 (AO7) como contaminante modelo. Se evaluaron las influencias de varios parámetros sobre la decoloración de AO7 por oxidación de CAP. Además, las especies activas involucradas en la degradación de AO7 se exploraron mediante experimentos de barrido y análisis de resonancia de espín de electrones. Además, se identificaron los productos de degradación de AO7 por oxidación de CAP para dilucidar posibles vías de transformación. Los resultados mostraron que la oxidación de CAP tuvo un mejor rendimiento de decoloración AO7 en comparación con el

método de peróxido de hidrógeno activado con bicarbonato. $\pm 0,76\%$ a $54,27 \pm 2,65\%$ cuando la concentración de carbonato aumentó de 0 a 50 mM a pH 13,0, y luego cambió ligeramente con un aumento adicional de la concentración de carbonato a 70 mM. Aumentó casi linealmente desde $5,95 \pm 0,32\%$ a $94,03 \pm 0,39\%$ como H_2O_2 la concentración se aumentó de 5 a 50 mM. Además, trazas de Co (II) podrían facilitar la decoloración de AO7 por la reacción de CAP. Los radicales superóxido y carbonato podrían ser las principales especies reactivas de oxígeno involucradas en el proceso CAP. Finalmente, se propuso una posible ruta de degradación de AO7 por oxidación de CAP en base a los productos identificados.

Bokare A., Choi W., (2016), Activación de H_2O_2 inducida por bicarbonato para la desulfuración oxidativa libre de metales (Tesis) Escuela de Ciencias Ambientales e Ingeniería, Universidad de Ciencias y Ciencias de Pohang, Pohang, Corea

Resumen: Utilizando la formación in situ de peroximonocarbonato como oxidante, la transformación del sustrato modelo principal DBT en la DBT-sulfona correspondiente se logró fácilmente en condiciones de reacción bifásicas. La capacidad oxidante del catalizador de bicarbonato se mantuvo durante ciclos repetidos de ODS, pero la eficiencia de eliminación de DBT dependía críticamente de la capacidad de extracción de la fase polar. En condiciones de reacción heterogéneas, la resina de intercambio iónico modificada con bicarbonato logró una actividad ODS similar en comparación con el sistema catalítico homogéneo. Además, la formación eficiente de peroximonocarbonato utilizando un precursor de CO_2 gaseoso en condiciones alcalinas también se utilizó para la oxidación de DBT.

Dong, H., Feng, X., Guo, Y., Jia, Z., Zhang, X., Xu, A., & Li, X. (2021). Peróxido de hidrógeno activado con bicarbonato con nanopartículas de cobalto incrustadas en nanotubos de carbono dopados con nitrógeno para una degradación de tinte orgánico altamente eficiente, Escuela de Química e Ingeniería Química, Universidad Textil de Wuhan

Resumen: En este documento, se preparó un nuevo catalizador, nanopartículas de cobalto encapsuladas en nanotubos de carbono dopados con nitrógeno (CoNC) mediante pirólisis de sal de Co y melamina, seguido de tratamiento con ácido para eliminar el exceso de cobalto metálico. Combinando el nanotubo de carbono hueco estructura y nanopartículas de Co, el CoNC ofrece un excelente rendimiento catalítico para la degradación del naranja ácido 7 en el sistema BAP. Se observó una alta estabilidad frente a la lixiviación de iones de cobalto del CoNC, que es superior a los catalizadores heterogéneos informados previamente.

Kan, H., Soklun, H., Yang, Z., Wu, R., Shen, J., Qu, G., & Wang, T. (2020). Purificación de aguas residuales de tintura utilizando peróxido de hidrógeno activado con bicarbonato: proceso y mecanismos de reacción, Facultad de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Universidad A&F del Noroeste, Yangling, Provincia de Shaanxi, República Popular China

Resumen: Las técnicas avanzadas de oxidación basadas en la activación de H₂O₂ han despertado gran interés recientemente en el tratamiento de aguas residuales de tintura. En este estudio, se empleó un enfoque de activación verde, el sistema HCO₃⁻ -H₂O₂, para el tratamiento de aguas residuales con tinte, y se seleccionó Acid Orange II (AO7) como el tinte

objetivo. El O₂ fue la principal sustancia activa para la descomposición del AO₇, y el punto radical OH y el IO₂ también participaron en la descomposición del AO₇, según lo analizado por diferentes pruebas de eliminación. Finalmente, la eliminación de la demanda química de oxígeno alcanzó el 72% después de 60 min de tratamiento de oxidación. Además, los rendimientos de eliminación de diferentes tintes en este sistema fueron todos satisfactorios.

Jawad, A., Lu, X., Chen, Z. y Yin, G. (2014). Degradación de clorofenoles por hidrotalcita doble en capas de Co-Mg-Al soportada con peróxido de hidrógeno activado con bicarbonato, Education, School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. Chin

Resumen: Este trabajo demuestra la degradación de 4-clorofenol, 2,4-diclorofenol, 2,4,6-triclorofenol y fenol como compuestos modelo utilizando H₂O₂ activado con bicarbonato. Sistema de oxidación en presencia de catalizadores soportados. La actividad catalítica del catalizador se investigó en términos de degradación de los compuestos objetivo, demanda química de oxígeno (DQO) y remociones de carbono orgánico total (TOC) tanto para el modo por lotes como en el reactor de lecho fijo utilizando CoMgAl-HT y CoMgAl-SHT, respectivamente. La lixiviación del ion cobalto se prohibió eficientemente debido a la presencia de un medio débilmente básico proporcionado por bicarbonato, y se encontró que el catalizador CoMgAl-SHTs retuvo su estabilidad y buena actividad catalítica en el reactor de lecho fijo durante más de 300 h.

Macías-Quiroga, I. F., Pérez-Flórez, A., Arcila, J. S., Giraldo-Gómez, G. I., & Sanabria-Gonzalez, N. R. (2021). Síntesis y caracterización de Co/Al-PILC para la oxidación de un colorante azo mediante el sistema de peróxido de hidrógeno activado por bicarbonato. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, Campus La Nubia, km 7 vía al Aeropuerto, Manizales, Colombia

Resumen: La arcilla con pilares de aluminio (Al-PILC) se sintetizó y se impregnó con nitrato de Co (II) (1,0, 3,0 y 6,0% en peso de cobalto), utilizando un método de impregnación por humedad incipiente. La influencia de la cantidad de H₂O₂, el H₂O₂ /NaHCO₃ Se estudió la relación molar y la cantidad de Co impregnado en Al-PILC sobre la oxidación del colorante azoico en solución acuosa. La toxicidad de los subproductos formados después de la oxidación del colorante con el sistema BAP se exploró en una prueba de digestión anaeróbica. Se obtuvieron decoloraciones totales para las reacciones realizadas con tres catalizadores impregnados de cobalto, con 8 veces la dosis estequiométrica de H₂O₂ y relaciones molares H₂O₂ /NaHCO₃ de 0.25 y 4.0. La concentración de cobalto lixiviado en las pruebas, con los catalizadores impregnados con 1,0 y 3,0% en peso de cobalto, fue inferior al límite de detección (< 0,01 mg/L), lo que indicó que la fase activa era muy estable a pH básico.

Pan, H., Gao, Y., Li, N., Zhou, Y., Lin, Q., & Jiang, J. (2020) (Artículo). Avances recientes en el sistema de peróxido de hidrógeno activado por bicarbonato para el tratamiento de agua. Revista de ingeniería química.

Resumen:: Esta revisión recopiló los desarrollos del sistema BAP para el tratamiento de agua en los siguientes aspectos: 1) las propiedades de equilibrio y la formación de HCO_4^- en el sistema BAP; 2) la generación in situ de múltiples especies reactivas y mecanismos en sistemas BAP, incluido el proceso de oxidación directa sin catalizador y el proceso de oxidación mejorado con catalizadores homogéneos o heterogéneos. En el sistema metal-BAP, el complejo metal- HCO_3^- – también contribuye a la descontaminación además de las especies reactivas anteriores. HCO_3^- – exhibe múltiples funciones en el sistema BAP, incluida la participación en la generación de HCO_4^- – y complejo intermedio, proporcionando un tampón de pH para estabilizar las reacciones, apagando OH^- para generar el radical de larga duración ($\text{CO}_3^{\cdot -}$), etc. Hace que el sistema BAP muestra un buen rendimiento en la estabilización del proceso de catálisis y la prolongación de la vida útil del catalizador en condiciones alcalinas neutras o débiles.

Marco Teórico

Industria de las Curtiembres

La industria del curtido de cuero es una de las más antiguas y lucrativas del mundo, generando miles de millones de dólares a nivel global (Silva, M. J., & Salinas Morales, D. 2022). Sin embargo, también enfrenta crecientes críticas debido a su impacto ambiental. La producción de cuero implica un uso ineficiente de recursos, generando una gran cantidad de desperdicios y requiriendo grandes cantidades de agua, además de producir residuos tóxicos (Silva, M. J., & Salinas Morales, D. 2022).

La cría extensiva de ganado para obtener cuero contribuye a la deforestación, al uso excesivo de agua y tierra, y a la emisión de gases de efecto invernadero (Silva, M. J., & Salinas

Morales, D. 2022).

En cuanto a las fuentes de agua, cada curtiembre posee su propio pozo profundo, con autorización de la CVC. En la mayoría de los casos, el agua se considera un recurso inagotable, disponible en cualquier momento y no un insumo para la producción. Se ha estimado que las curtiembres consumen entre 15 y 40m³ de agua por cada 1.000kg de piel procesada (Centro Nacional de Producción Más Limpia, 2004)

Las curtiembres son reconocidas por la carga contaminante de los efluentes líquidos que son vertidos, en la mayoría de los casos, al alcantarillado o a las fuentes de agua sin tratamiento previo (Faouzi et al 2013). Ejemplo de la problemática son los resultados del índice de calidad del agua (ICA), del río Cerrito, ilustran esta situación, según reporte de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2006), donde se observa que el ICA disminuye a su paso por el municipio. El mismo comportamiento mostró el Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO), que aumentó considerablemente hacia la desembocadura sobre el río Cauca, con un índice de contaminación entre alto y muy alto.

Según el informe social y medio ambiental realizado por la industria europea de curtido, investigaciones científicas también han abordado las preocupaciones medioambientales del curtido de cueros y pieles, como la reducción de la contaminación en los efluentes y el uso eficiente de los recursos. Estos estudios buscan encontrar soluciones más sostenibles y eficientes para la producción de cuero, minimizando su impacto ambiental (Industria Europea de Curtido, 2020).

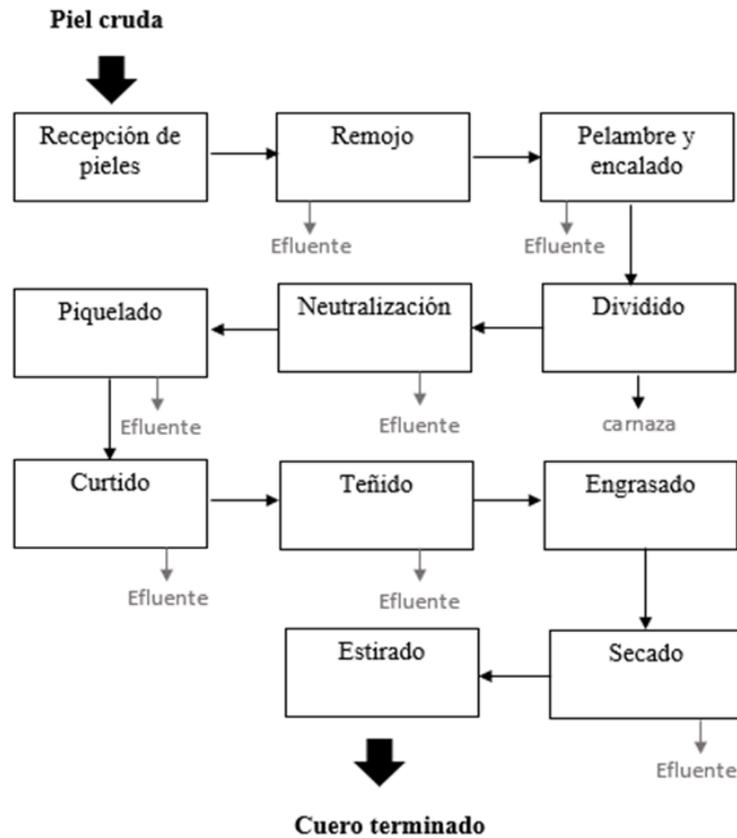
Generación De Aguas Residuales De Curtiembres

Las aguas residuales de curtiembres representan un problema ambiental global debido a la baja biodegradabilidad de algunos de sus contaminantes (Aniyikaiye T, et al, 2019). Según

(Purwono et al, 2017) se ha demostrado que los altos contenidos de nitrógeno en el agua originan condiciones eutróficas y por consiguiente altera los niveles de biomasa acuática y limita la biodiversidad. También precisa que elevados valores de DQO, pueden causar toxicidad en los medios acuáticos, gracias a las sustancias orgánicas recalcitrantes presentes. Todo esto debido a que en el proceso de curtido se le adicionan al cuero una gran cantidad de sustancias químicas que aumentan la toxicidad y la dificultad para tratar estos vertimientos.

La primera operación que se realiza es el remojo, en la que se utiliza la cal para humectar la piel y eliminar impurezas, después es sometida a la etapa de pelambre, en la cual es introducido en una solución de cal apagada (Ca(OH)_2) y sulfuro de sodio (Na_2S), con un pH próximo a 12,3, que se encarga de aumentar el espesor de la piel, lo que permite que la piel pueda ser dividida dos partes; la externa o flor, que estará involucrada en el proceso de curtido y la interna o carnaza que se emplea para la fabricación de otros productos. Seguidamente al haber obtenido la parte externa de la piel, debe realizarse un proceso para disminuir su pH a un valor cercano a 8, el cual es conocido como neutralización, en el que se hace uso de sales de amonio, ácidos orgánicos o burbujeo de CO_2 , luego de esto se realiza el piquelado y curtido, en donde la piel es sumergida en agua con ácido fórmico, ácido sulfúrico y cloruro de sodio y sulfato de cromo (III), siendo el cromo el elemento que estabiliza el colágeno de la piel. Cuando haya finalizado el proceso de curtido se realizan otras etapas como el teñido, engrasado, secado y estirado (Lazo Cuentas, E. A. 2017) (Ver Figura 3).

Figura 3 Imagen del proceso de curtido



Fuente: (Lazo Cuentas, E. A. 2017).

Producto de todo este proceso no solo resulta el cuero terminado, si no que a su vez ocasiona problemas medioambientales y tecnológicos ya que las aguas residuales que provienen de él, contiene características tóxicas y elevadas concentraciones de proteínas, cloruros, nitrógeno, sulfatos, cromo, sulfuros (Doumbi et al., 2022) y altas concentraciones de parámetros como sólidos disueltos totales (TDS) y demanda química de oxígeno (DQO) en el agua, que representa un problema para los sistemas de tratamiento convencionales (Pinto et al., 2019; Sodi et al., 2020; Saxena et al., 2021). Esto debido a los productos químicos que se utilizan en los procesos de curtido como tensioactivos, ácidos, colorantes, sales y, en especial, curtientes como

el cromo, el cual es un metal pesado considerado cancerígeno (Vilardi et al., 2018).

Caracterización De Las Aguas Residuales De Curtiembres

Se han realizado varios estudios y mediciones de las características de las aguas residuales de curtiembres en el país, uno de estos caracterizo los vertimientos de los efluentes la industria, en Villapinzon (Cundinamarca, Colombia) y según Cristancho Montenegro et al., (2019) el estudio arrojó valores alarmantes de parámetros como pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Sedimentables (SSED) y Cromo (Cr), los cuales son vertidos directamente al Río Bogotá (Tramo Villapinzon - Choconkota), sin ningún tipo de tratamiento. Los resultados expuestos en la (Tabla 1), Son comparados con la normatividad ambiental, mediante la Resolución 0631 de 2015, la cual fue expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”. En la cual se puede observar el incumplimiento en la mayor parte de los parámetros establecidos en la norma.

Tabla 1 Caracterización Físicoquímica de los efluentes de curtiembres

Parámetros	Unidades	Valores (Cristancho Montenegro et al., 2019)	Valores máximos permisibles Resolución 0631 2015
pH	Unidades de	8,85	6-9

	pH		
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	24900	1,200,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	5187,5	600,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	33030	600,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	943	2,00
Grasas y Aceites	mg/L	-	60,00
Sulfuros	mg/L	-	3,00
Cromo	mg/L	267,8	1,50

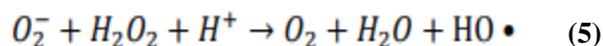
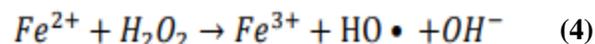
Fuente: Elaboración propia.

Procesos De Oxidación Avanzada

Los procesos de oxidación avanzada funcionan generando radicales activos de oxidación, tales como los radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$), mediante una serie de complejos procesos físicos y químicos. Estos radicales tienen la capacidad de descomponer eficazmente los contaminantes orgánicos debido a su gran capacidad de oxidación y logran convertir los contaminantes orgánicos refractarios en sustancias orgánicas más sencillas, como el dióxido de carbono y el agua (Ribeiro et al., 2015)

A continuación, se muestran las Ecuaciones 4 y 5 de generación del radical hidroxilo

(OH•).



El radical hidroxilo ($\cdot OH$) posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica en condiciones bajas de presión y temperatura, hasta la mineralización completa de estos contaminantes. Gracias a la altísima reactividad de estas especies es posible eliminar los compuestos orgánicos e inorgánicos, logrando así una reducción de DQO, COT y toxicidad de las aguas residuales tratadas. Así, la generación de radicales hidroxilos se puede acelerar por la combinación de algunos agentes oxidantes como ozono, peróxido de hidrógeno, radiación UV, sales de hierro [Fe (II) y Fe (III)] y catalizadores como dióxido de titanio. (Bes Monge et al., 2018)

Una de las estrategias utilizadas para reducir el impacto ambiental de la industria del curtido de cuero es la reutilización de las aguas residuales. Esto implica el uso de procesos de oxidación avanzados (AOP, por sus siglas en inglés) que utilizan agentes oxidantes fuertes y catalizadores para degradar los contaminantes presentes en las aguas residuales. Los AOPs generan radicales hidroxilos (OH^*), que son altamente reactivos y pueden oxidar eficazmente una amplia gama de contaminantes orgánicos.

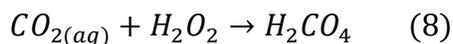
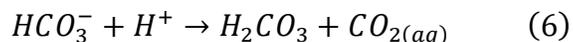
El proceso de oxidación avanzada (POA) con peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio es una técnica prometedora para el tratamiento de aguas residuales contaminadas. Esta metodología se basa en la generación de radicales hidroxilos ($\bullet OH$) altamente reactivos, que tienen la capacidad de degradar una amplia gama de contaminantes orgánicos presentes en el agua residual.

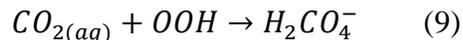
El peróxido de hidrógeno (H₂O₂) es un oxidante fuerte que puede ser utilizado como fuente de •OH en presencia de un catalizador apropiado. En este caso, el bicarbonato de sodio (NaHCO₃) actúa como catalizador, facilitando la generación de los radicales hidroxilos mediante una serie de reacciones químicas. La presencia de NaHCO₃ aumenta la concentración de iones hidróxido (OH⁻) en el sistema, lo que favorece la formación de •OH a través de la reacción de dismutación del peróxido de hidrógeno (Urbano 2019).

Procesos De Oxidación Avanzada: Peróxido De Hidrógeno Catalizado Con Bicarbonato De Sodio (BAP)

El (BAP) es muy beneficioso en el tratamiento de aguas residuales, ya que la operación del proceso es simple, no produce contaminación secundaria, tiene una fuerte capacidad oxidante y no es selectivo en su reacción.

El peróxido de hidrógeno (H₂O₂), es un oxidante ampliamente utilizado con un alto contenido de oxígeno activo, pero es un lento agente oxidante en ausencia de catalizadores, por lo tanto, se hace necesaria la activación con la especie reactiva formada en el sistema BAP, el ion peroximonocarbonato (HCO₄⁻) y la cual se muestra en las siguientes ecuaciones (Ver Ecuaciones 6,7,8,9).





Este sistema de tratamiento muestra rendimientos satisfactorios en el tratamiento de aguas residuales que contienen colorantes, como es el caso de las aguas procedentes de la industria textil, desempeñando un papel importante en la destrucción de grupos funcionales característicos del naranja ácido II y de la misma forma en anillos de benceno y naftaleno (Kan et al., 2020). También ha sido utilizado para la degradación de compuestos tóxicos y bioresistentes como es el caso del 4-clorofenol, 2,4-diclorofenol, 2,4,6-triclorofenol y fenol (Jawad et al., 2014), adaptándose con éxito en la transformación oxidativa de estos compuestos. Este aprovecha los activadores naturales que se encuentran comúnmente en el entorno natural para potencializar la rentabilidad de este, como consecuencia, el sistema BAP es un atractivo tecnológico para el desarrollo sostenible en el tratamiento de aguas residuales. (Pan et al., 2021).

Usos del Proceso de Oxidación Avanzada: Peróxido De Hidrógeno Catalizado Con Bicarbonato De Sodio (BAP)

El método BAP es una técnica utilizada en el tratamiento de aguas residuales para eliminar ciertos contaminantes, como metales pesados y otros compuestos inorgánicos. Esto se basa en la capacidad de ciertos microorganismos y sustancias precipitantes para absorber y precipitar estos contaminantes del agua. A continuación, se presentan algunas situaciones en las que se ha utilizado el método BAP para el tratamiento del agua:

Eliminación de metales pesados: El método BAP se ha utilizado en la eliminación de

metales pesados como plomo, cadmio, mercurio y cromo de aguas contaminadas, particularmente en sitios industriales o mineros donde hay una liberación significativa de metales pesados al medio ambiente.

Tratamiento de residuos mineros: En la industria minera se han aplicado métodos BAP para tratar las aguas residuales generadas durante la extracción y procesamiento de minerales, ya que estas aguas suelen contener altas concentraciones de metales y otros compuestos peligrosos.

Eliminación de arsénico: El arsénico es un contaminante común en el agua subterránea en algunas áreas y se han utilizado métodos BAP para eliminarlo, convirtiéndolo en una forma sólida y menos tóxica.

Tratamiento de aguas residuales industriales: Varias industrias producen aguas residuales que contienen compuestos inorgánicos indeseables. El método BAP se puede aplicar para tratar esta agua y reducir la concentración de contaminantes antes de su eliminación o reutilización.

Limpieza de sitios contaminados: en proyectos de remediación ambiental, se han utilizado métodos BAP para tratar agua contaminada en sitios industriales abandonados o áreas donde se han vertido contaminantes inorgánicos.

Tratamiento de agua potable: aunque son menos comunes, los métodos BAP también se han considerado en el tratamiento de agua potable para eliminar contaminantes inorgánicos y mejorar la calidad del agua para el consumo humano. (Medina, 2020)

Resultados del tratamiento

Un estudio realizado sobre el tratamiento de aguas residuales del curtido de cuero utilizando un sistema de bicarbonato-peróxido (BAP) demostró resultados prometedores. El estudio encontró que temperaturas superiores a 50 °C y niveles iniciales de pH ligeramente

ácidos eran óptimos para el sistema BAP. Este sistema logró porcentajes de eliminación superiores al 78% para contaminantes como nitritos, nitrógeno amoniacal, cromo, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, conductividad y cloruros. Los porcentajes de eliminación para la demanda química de oxígeno y el carbono orgánico total fueron superiores al 45% (Urbina-Suarez et al., 2023).

Este artículo resumió el progreso reciente en la utilización de bicarbonato para activar H₂O₂ para la degradación de contaminantes. El mérito del sistema BAP es su pH amortiguador (alrededor de neutro o débilmente alcalino) durante todo el proceso de tratamiento de aguas residuales, lo que hace que los catalizadores heterogéneos sean más resistentes a la lixiviación y, por lo tanto, más estables con el tiempo. La formación de HCO₃⁻ y H₂CO₃—Los oxidantes son méritos adicionales de este sistema. Los datos revisados aquí también destacaron el efecto de promoción del bicarbonato en H₂O₂ basada en la degradación de contaminantes, mientras que anteriormente se consideraba un inconveniente para el tratamiento de aguas residuales (Jawad et al., 2016).

Marco Legal

A continuación, en la Tabla 2. se indica la normatividad colombiana por la cual se fundamenta y se respalda este proyecto:

Tabla 2 Normatividad Colombiana

Ley	Descripción
------------	--------------------

Constitución política de Colombia 1991- Cap. 3 Art. 80	De los derechos colectivos y de ambiente: “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.”
Ley 99 de 1993, artículo 5	Se fijan las funciones del Ministerio del Medio Ambiente, estableciendo la responsabilidad de evaluar, controlar y hacer seguimientos ambientales al uso del agua. Además, se delegan responsabilidades a las autoridades ambientales regionales.
Decreto Ley 2811 de 1974, Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Medio Ambiente.	Se establecen acciones de prevención y control de la contaminación del recurso hídrico, para garantizar la calidad del agua para su uso posterior, e inserta el concepto de tasa retributiva como pago por la afectación de los recursos hídricos.
Decreto 1541 de 1978.	Incluye una clasificación de los cuerpos de agua en función de su capacidad de recibir vertimientos y se establece la obligatoriedad de solicitar permiso de vertimientos a todo aquel que, de igual manera, posea o solicite una concesión de aguas.

Decreto 4741 de 2005	Se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral con el objetivo de proteger la salud humana y el ambiente.
Decreto 3930 de 2010	Se establecen las disposiciones relacionadas con los usos, ordenamiento y vertimientos al recurso hídrico, suelo y alcantarillados
Decreto 1076 del 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	En el que se establecen prohibiciones de conductas que puedan generar la alteración del ambiente natural, como el vertimiento, introducción, distribución, uso o abandono de sustancias tóxicas o contaminantes que puedan perturbar los ecosistemas o causar daños en ellos; aspectos sobre la conservación y preservación de las aguas y sus cauces y sobre el vertimiento por uso doméstico y municipal
Resolución 0631 del 2015.	Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. En su capítulo VI, Artículo 13, se dictan los parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas

residuales no domésticas - ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes

Resolución 0330 de 2017.

Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. En este se fijan criterios técnicos para el desarrollo de proyectos de saneamiento básico, en todas y cada una de sus fases

Fuente: Elaboración propia

METODOLOGÍA

Tipo de investigación

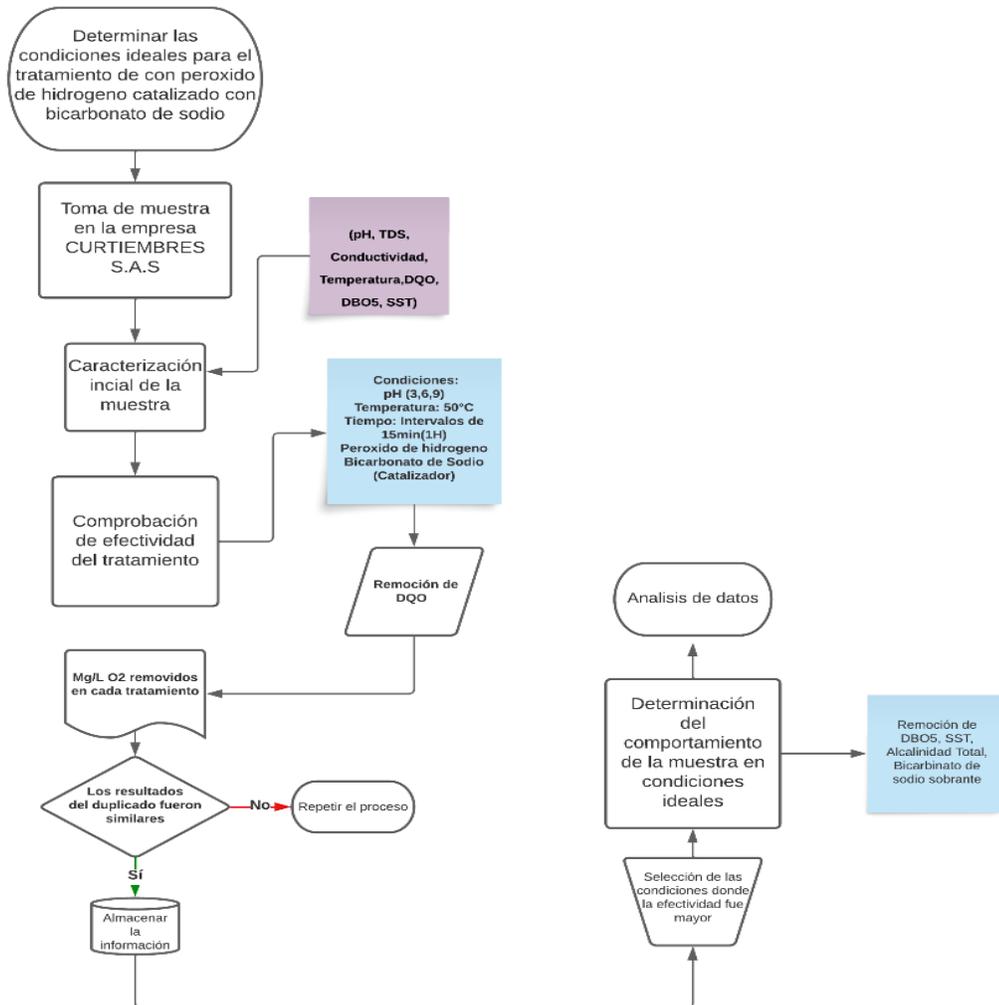
Para el desarrollo de este proyecto de investigación se va a adoptó un enfoque metodológico de tipo aplicado-experimental. Aplicado, ya que este método se enfoca en resolver problemas en un contexto específico, es decir, buscar una aplicación o uso de los conocimientos de una o más áreas de competencia orientados a su aplicación práctica para satisfacer necesidades específicas y dar solución a problemas de la sociedad o del sector productivo (Cevallos et al. 2017); experimental, debido a que en este método se manipulan una o más variables de estudio para controlar el aumento o la disminución de esas variables y su efecto en el comportamiento observado. En otras palabras, un experimento involucra una variable independiente y observa su efecto sobre otra variable dependiente. Se realiza bajo condiciones

estrictamente controladas para describir cómo o por qué ocurrió una situación o evento en particular. Los métodos experimentales son adecuados para probar hipótesis causales (Murillo, 2010).

Esquema metodológico

En la Figura 4 se presenta el esquema metodológico a nivel general con el que se realizó el presente estudio, este inicio con el objetivo de determinar las condiciones ideales para el tratamiento de aguas residuales de curtiembres mediante peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio, como primer paso realizamos la toma de muestras en la empresa Curtiembres S.A.S, seguido de la caracterización inicial de la muestra donde se midió el pH, TDS, Conductividad, Temperatura, DQO, DBO5, ST, SSED y Alcalinidad, posteriormente se llevó a cabo la implementación de los tratamientos en un sistema de reactor batch de 500ml, con las condiciones propias de cada experimento (pH, Concentración de H₂O₂, Concentración de NaHCO₃, Temperatura e Intervalos de tiempo) con el fin de ver su efecto en la remoción de DQO en la muestra, luego de esto se realiza la selección del tratamiento que tuvo mayor remoción de este contaminante y se determinan los valores finales de las características medidas inicialmente para verificar la efectividad del tratamiento.

Figura 4 Esquema metodológico del proyecto



Fuente: Elaboración propia

Muestra

La muestra del agua residual fue recolectada del tanque homogeneizador (Ver Figura 7) de la planta que, recibe el efluente de los tanques de almacenamiento de los tratamientos primarios (trampas de grasa y sedimentadores) de los procesos de curtido (Ver Figura 5) y de pelambre (Ver figura 6). La muestra se almacenó en pimpinas de plástico por el personal autorizado de la empresa de transformación de pieles CURTIEMBRES S.A.S.

Figura 5 Efluentes del proceso de curtido y recurtido



Fuente: Elaboración propia

Figura 6 Efluentes del proceso de pelambre



Fuente: Elaboración propia

Figura 7 Tanque Homogeneizador

Fuente: Elaboración propia

Variables

Para la investigación se controlaron variables operacionales como la concentración de Peróxido de Hidrógeno, Bicarbonato de Sodio y el pH. El tiempo de control fue la variable de control y como variables independientes se tuvieron en cuenta los valores de DQO, DBO5, Solidos Suspendidos Totales, Conductividad, Temperatura, Alcalinidad Total y Peróxido de Hidrógeno Residual.

Caracterización de la muestra

En la primera fase de la investigación se realizó la caracterización de la muestra obtenida del tanque homogeneizador (Ver figura 7) de la empresa CURTIEMBRES S.A.S. Esto se realizó con el fin de conocer las características de la muestra inicial y posteriormente hacer lo mismo con la muestra final, de esta forma determinando la efectividad del tratamiento.

En la Tabla 3, se presenta el resumen de los parámetros medidos en el laboratorio, con los cuales se realizó la caracterización fisicoquímica de la muestra que se llevaría a tratamiento

mediante peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio. La medición del parámetro de DQO se realizó mediante espectrofotometría y los demás parámetros se emplearon los Métodos Estándar.

Tabla 3 Parámetros para la caracterización fisicoquímica de la muestra

Variable	Unidades	Método de medición
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O_2/L	Espectrofotometría
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)	mg O_2/L	Método Estándar 5210 B
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	Método Estándar 2540 D
Alcalinidad Total	mg/L	Método Estándar N° 110011
Test Peróxido	mg/L H_2O_2	Test Peróxidos Método colorimétrico con tiras de ensayo MQuant™
pH	Unidades de pH	4500-H+B
Temperatura	°C	Método Estándar 2550 B
Conductividad	μS	Método Estándar 2510 B

Fuente: Elaboración propia

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Para las preparaciones de soluciones de estos análisis, se siguió los protocolos establecidos por el IDEAM

La determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) mediante

espectrofotometría implica la oxidación de las sustancias orgánicas e inorgánicas en la muestra mediante una solución fuertemente ácida de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en exceso. Para acelerar la reacción, se agrega sulfato de plata (Ag_2SO_4) y sulfato de mercurio ($HgSO_4$) como catalizadores y para eliminar interferencias de cloruros. Después de la digestión, se mide la absorbancia (ABS) de la solución restante de $K_2Cr_2O_7$ utilizando un espectrofotómetro.

Para convertir este valor en DQO en mgO_2/L , se utiliza una ecuación generada a partir de una curva de calibración, que se obtiene al medir la absorbancia de estándares de DQO conocidos. Esta curva se utiliza posteriormente para determinar la concentración de DQO en las muestras desconocidas.

Reactivos y procedimiento

Solución digestora:

Se preparó la solución siguiendo el procedimiento que dicta la guía, “Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría” del Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales – IDEAM. Las aguas residuales de curtiembre se caracterizan por tener una DQO elevada, por lo cual, el $K_2Cr_2O_7$ se estableció a 0,25N, la cual se preparó con 12,2825 g de $K_2Cr_2O_7$, 33,3 g de $HgSO_4$ y 167 ml de H_2SO_4 aforados con agua desionizada a un volumen final de 1000 ml;

Se procedió a secar durante 2 horas en el horno a $150^\circ C$, aproximadamente 12,2825 g de Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) hasta obtener peso constante, luego se disolvió 4.913g de $K_2Cr_2O_7$ en un vaso de 1000 ml con 500 ml de agua desionizada,

por último, se le adiciono muy lentamente 167 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4)

concentrado y 33 g de Sulfato mercuríco (HgSO_4) se diluyó y se dejó enfriar a temperatura ambiente posteriormente se aforó hasta 1000 ml con agua destilada en un balón aforado; luego se guardó en una botella ámbar.

Solución Catalizadora:

Se preparó con una semana de anticipación. En una botella de 2500 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), adicionando 25.2294g de Sulfato de Plata (AgSO_4), se dejó en reposo hasta que se disolviera en su totalidad. (Guía “Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría”, IDEAM).

Solución patrón: Es la solución que se utilizó para la curva de calibración de las soluciones de DQO, primero se trituró el Biftalato de potasio ($\text{HOOC}_6\text{H}_4\text{COOK}$) luego se puso a secar a 110°C hasta peso constante; luego de tener peso constante se tomó 0.0425g de Biftalato de potasio y se diluyó con agua desionizada en un balón aforado de 100 ml. En la Figura 8, se observa el alistamiento de la solución patrón y de las soluciones calculadas para realizar la curva de calibración.

Figura 8 Solución patrón para la curva de calibración de DQO



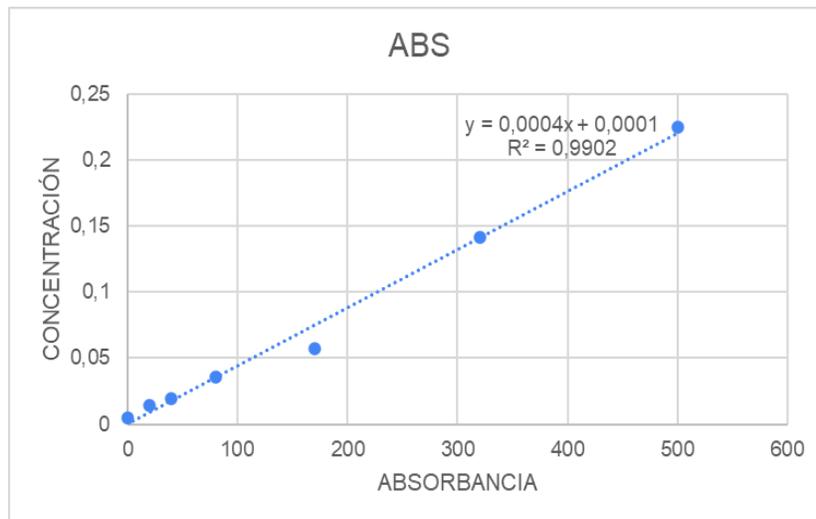
Fuente: Elaboración propia

Curva de calibración

La curva de calibración se creó a partir de patrones de DQO con soluciones de concentración conocida (0, 20, 40, 80, 170, 320, 500 mg/L).

Se realizó la medición de la absorbancia por duplicado para comprobar que los datos de las muestras sean reproducibles. Con el promedio de las absorbancias y la concentración del patrón de DQO, se genera una gráfica que representa una curva de calibración como se observa en la figura 9 de la cual se obtiene una expresión matemática, donde de acuerdo a la ABS que arroje la muestra de agua residual a determinar, se obtiene la DQO en unidades de mgO₂/L.

Figura 9 Curva de Calibración de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4, se encuentran los resultados de las mediciones de cada solución preparada en valores de absorbancia.

Tabla 4 Curva de calibración DQO.

DQO (mg /L)	Absorbancia
0	0,005
20	0,014

40	0,019
80	0,036
170	0,057
320	0,141
500	0,225

Fuente: Elaboración propia

La ecuación 10, fue la utilizada para determinar el valor de DQO que otorgaba la absorbancia medida en el espectrofotómetro

$$DQO = \left(\frac{\text{Absorbancia muestra} - \text{Absorbancia blanco}}{0,0004} \right) - 0,0001 \quad (10)$$

Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)

La Demanda Biológica de Oxígeno corresponde a la Prueba de DBO a 5 Días. Para obtener unos resultados más acertados, se realizó por el método de Winkler, el cual consiste en llenar con 50 ml de muestra, una botella hermética (winkler) de 300 ml e incubar a 20°C durante 5 días. El oxígeno disuelto (OD) se mide inicialmente y después de la incubación, y la DBO se calcula a partir de la diferencia entre OD inicial y final. El procedimiento de laboratorio consistió en:

Se ajustó el pH de la muestra entre 7,0 y 7,2 usando una solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄) e hidróxido de sodio (NaOH) 2 N, evitando diluir la muestra en más de 0,5%. La temperatura se ajustó a 20 ± 3 °C.

A partir del resultado de la DQO se realizó la dilución de la muestra, adicionando un volumen determinado directamente sobre la botella de Winkler de 300 mL, como lo indica la

Tabla 5.

Tabla 5 Volúmenes para dilución de muestras

VOLUMEN ADICIONADO DE MUESTRA (mL)	INTERVALO DE VALORES DE DQO (mg O₂/L)
0,02	30.000-105.000
0,05	12.000-42.000
0,1	6.000-21.000
0,2	3.000-10.500
1,0	600-2.100
2,0	300-1.050
5,0	120-420
10,0	60-210
20,0	30-105
50,0	12-42
100,0	6-21
300,0	0-7

Fuente: Instructivo de Prácticas Académicas, Laboratorio de Calidad Ambiental

- Se agregaron 2 mL del agua residual seleccionada como inóculo.
- Se llenaron las botellas con suficiente agua de dilución, de tal manera que al insertar el tapón se desplazara todo el aire, sin dejar burbujas.
- Se midió el oxígeno disuelto inicial.
- Se incubaron durante 5 días a 20° ± 1° C las botellas que contenían las diluciones, el control de semilla y el blanco de agua de dilución.
- Se midió el oxígeno disuelto final (Ver figura 10)
- El cálculo de la DBO se realizó mediante la ecuación 11

$$DBO_5, \text{ mg / L} = \frac{(D_1 - D_2) - (B_1 - B_2)f}{P} \quad (11)$$

Donde:

D1 = OD de la muestra en el tiempo 0, mg/L

D2 = OD de la muestra después de 5 d, mg/L

P = fracción volumétrica decimal de la muestra empleada

B1 = OD del control de semilla antes de la incubación, mg/L

B2 = OD del control de semilla después de la incubación, mg/L

Figura 10 Método Winkler para la DBO5



Fuente: Elaboración propia

Alcalinidad Total

La alcalinidad se refiere a la capacidad que tiene una sustancia para neutralizar ácidos y está determinada principalmente por el sistema carbonato, bicarbonato e hidróxido, es decir: HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- y H^+ , respectivamente.

Para este caso en particular es importante saber cómo se comporta este parámetro, debido a que para la llevar a cabo este proceso avanzado de oxidación se utiliza el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) que contribuye al aumento de la alcalinidad en las aguas.

El procedimiento implementado fue adoptado del Instituto de Hidrología, Meteorología y

Estudios Ambientales, PSO DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD POR POTENCIOMETRIA del año 2005.

Preparación de los reactivos

Solución H₂SO₄ 0,1N: Coloque un vaso de 600 mL con unos 300 mL de agua desionizada, Agregue muy lentamente 2,8 mL de ácido sulfúrico concentrado del 98%, cuando este a temperatura ambiente complete a 1 Litro en un balón aforado.

Solución H₂SO₄ 0,02N: En un vaso de precipitado de 600ml, se adicionan 300ml de agua desionizada, posteriormente se agregan 200ml de ácido sulfúrico al 0,1N en un balón aforado y se completa hasta los 1000ml.

Solución de carbonato de sodio 0,05N: Secar de 1 a 1,5 g de Na₂CO₃ estándar primario a 250 °C durante 4 h y enfriar en un desecador. El carbonato seco tiene a adquirir carga estática por lo que se aconseja pesar 0,6250 g o una cantidad cercana, exactamente medida, en un vaso de 50 mL y llevar a 250 mL (tener en cuenta este peso para el cálculo de la normalidad del ácido). No conservar por más de una semana. Con este reactivo se lleva a cabo la estandarización de la solución de H₂SO₄ 0,02N.

Procedimiento

En primer lugar, se estandarizó la solución de ácido sulfúrico al 0,02N con el objetivo de conocer la concentración exacta de la solución, esto se hizo con el titulante de Na₂CO₃, preparado y utilizando indicador de Naranja de Metilo, que permite demostrar cuando la solución ya se encuentra en un pH de 4,5 para comprobar la concentración exacta del mismo.

Para realizar este análisis se tomaron como referencia 3 pasos del tratamiento

1. La muestra pura
2. La muestra con el tratamiento de peróxido de hidrógeno y bicarbonato de sodio al T0

3. La muestra con el tratamiento de peróxido de hidrógeno y bicarbonato de sodio al T4

A cada uno de estos se tomó un volumen de 10ml y se realizó por duplicado la determinación de alcalinidad parcial y total. En donde se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se tomó una alícuota de 10 ml y se agregó a un Erlenmeyer de 250ml.
2. Se adicionaron 2 gotas de indicador de fenolftaleína a la muestra.
3. Se titulo la muestra con la solución del ácido sulfúrico al 0,02N preparada, hasta el cambio de rosa a incoloro.
4. Se registro el volumen gastado.
5. Cálculo de la alcalinidad (F)
6. Se adicionaron 2 gotas de indicador de Naranja de Metilo a la muestra.
7. Se titulo la muestra con la solución del ácido sulfúrico al 0,02N preparada, hasta el cambio de amarillo a rojo.
8. Se registró el volumen gastado.
9. Cálculo de alcalinidad (M)

Cálculos

Para realizar los cálculos de alcalinidad se utilizó la ecuación 12, descrita a continuación.

$$Alcalinidad = \frac{Volumen\ gastado * Normalidad\ H_2SO_4 * Meq * 1000}{Volumen\ de\ la\ muestra\ (L)} \quad (12)$$

$Meq = 0,05$
 $Normalidad\ H_2SO_4 = 0,02N$
 $Volumen\ muestra = 0,001L$

Peróxido de hidrógeno residual

Con el objetivo de cuantificar el contenido sobrante de Peróxido de Hidrógeno, utilizado para el tratamiento, se utilizó el Test de Peróxidos de Mquant (Ver Figura 11), el cual su manual, describe la siguiente metodología.

Introducir la zona de reacción de la tira de ensayo durante 1 segundo en la muestra preparada (15 - 30 °C). Dejar que se escurra el exceso de líquido por el borde longitudinal de la tira sobre un pañuelo de papel absorbente y, después de 15 segundos, clasificar el color de la zona de reacción de la mejor manera posible de acuerdo con una zona de color de la etiqueta. Leer el correspondiente valor de medición en mg/l de H₂O₂ (Ver figura 12).

Figura 11 Test de Peróxidos de Mquant



Fuente: Elaboración propia

Figura 12 Procedimiento de medición de Peróxido de Hidrógeno



Fuente: Elaboración Propia

Notas sobre la medición:

- Toda coloración azul dentro de 3 minutos puede interpretarse todavía como hallazgo positivo.
- Si el color de la zona de reacción corresponde a la tonalidad más oscura de la escala colorimétrica o es más intenso o aparece otra coloración, debe repetirse la medición con nuevas muestras a su vez diluidas con agua destilada exento de peróxidos, hasta que se obtenga un valor inferior a 25 mg/l de H₂O₂.

Parámetros para la caracterización de las aguas residuales pH, temperatura TDS y conductividad

Los parámetros de temperatura, pH y conductividad fueron tomados de la muestra de Aguas residuales de curtiembre, con un multiparámetro Waterproof PCTestr 35. En un vaso de precipitado se tomó una muestra del agua residual y se tomó la lectura de los parámetros en el equipo (Ver figura 13).

Estos parámetros fueron medidos antes y después del tratamiento, con el fin de tener los datos y poder comparar el resultado; para estos análisis se utilizó un equipo multiparámetro de la siguiente manera:

1. Tomar 100 ml de la muestra previamente agitada en un vaso de precipitado.
2. Limpiar los electrodos con agua destilada.
3. Homogenizar la muestra.
4. Introducir con precaución el electrodo hasta la mitad del volumen de la muestra.
5. Registrar el valor del pH.
6. Registrar el valor de la temperatura
7. Registrar el valor de TDS
8. Registrar el valor de la Conductividad

Figura 13 Toma de características iniciales del agua residual



Fuente: Elaboración propia

Sólidos Totales (ST)

Los sólidos totales son definidos como la materia orgánica que se obtiene como residuo después de someter al agua a una temperatura entre 103°C y 105°C hasta que se evapore. Los sólidos totales incluyen los sólidos suspendidos y los sólidos disueltos totales.

El procedimiento utilizado para calcular la concentración de los Sólidos Totales presentes en la muestra se ilustra en la figura 14.

Figura 14 Procedimiento para calcular los Sólidos Totales (ST) presentes en el agua residual

Preparación de la capsula



Tratamiento de la muestra



$$\text{Sólidos totales ST(mg/L)} = \frac{W2 - W1}{\text{Volumen}} * 1000$$

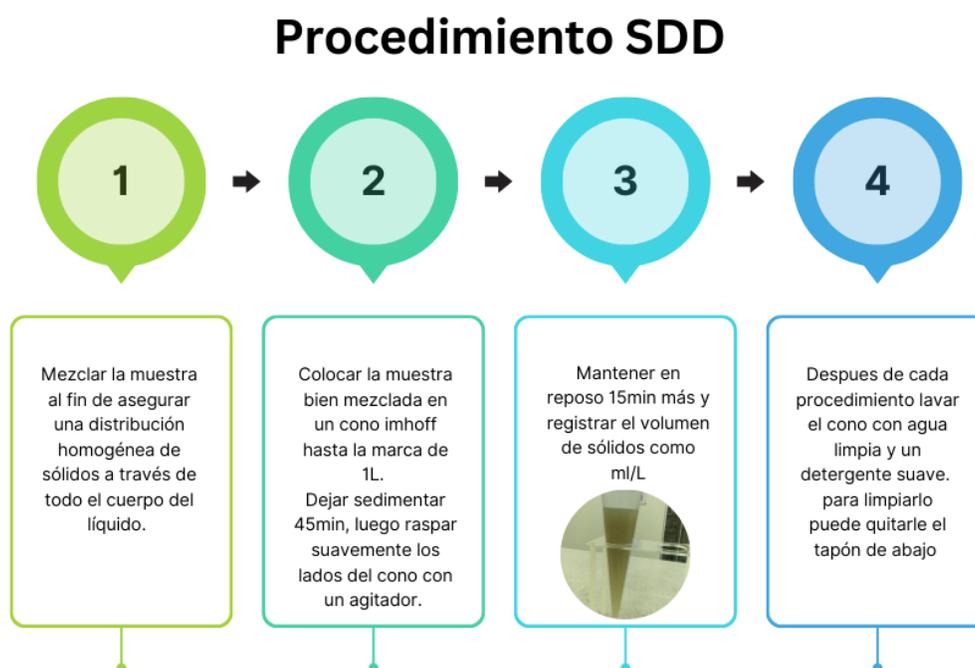
ST= Sólidos Totales
W1= Masa de la capsula vacía en g
W2= Masa de la capsula con residuo en g
V= Volumen de la muestra en L
1000= Factor de conversión de gramos a miligramos

Fuente: Instructivo de Prácticas Académicas, Laboratorio de Calidad Ambiental,
Elaboración propia.

Sólidos sedimentables (SSD)

Los sólidos sedimentables son los que consiguen decantarse en momentos de quietud, en una hora y debido a la influencia de la gravedad, estos pueden ser expresados en unidades de ml/L o mg/L y se cuantifica en un recipiente llamado *cono de Imhoff*. Solamente se sedimentan los sólidos suspendidos más gruesos y con gravedad específica mayor que la del agua. La fracción no sedimentada representa los sólidos no sedimentables y solo pueden ser retirados por una barrera física como un filtro (Ver figura 15).

Figura 15 Procedimiento para calcular los Solidos Sedimentables (SSD) presentes en el agua



Fuente: Instructivo de Prácticas Académicas, Laboratorio de Calidad Ambiental.
Elaboración propia.

Montaje experimental del tratamiento con peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio

Las aguas residuales se sometieron al proceso de tratamiento por peróxido de hidrógeno activado con bicarbonato de sodio, en un reactor a escala laboratorio en batch (matraces cónicos de 500 mL). En la Figura 16 se presenta el detalle del montaje usado para los experimentos.

Para estos ensayos se realizó una dilución de la muestra inicial al 50% con el fin de disminuir la turbidez de la muestra y trabajando en base de nuestra curva de calibración. Sobre estas muestras se realizaron ensayos con el fin de determinar las condiciones óptimas de operación en las cuales el tratamiento proporciona la mayor remoción de la Demanda Química

de Oxígeno (DQO), en términos de absorbancia a la longitud de onda de máxima absorbancia por espectrofotometría de luz ultravioleta.

- **Concentración de Peróxido de Hidrógeno:** se seleccionaron dos concentraciones a partir de los resultados obtenidos por (Kan, Soklun, Yang, Wu, Shen et al, 2020). Estas concentraciones fueron baja (0,003 mol L⁻¹) y alta (0,004 mol L⁻¹). El peróxido de hidrógeno empleado fue un producto comercial con una concentración de 50% de H₂O₂ a partir de la cual se hicieron las respectivas disoluciones.
- **Concentración de Bicarbonato de Sodio:** se seleccionaron dos concentraciones a partir de los resultados obtenidos por (Kan, Soklun, Yang, Wu, Shen et al, 2020). Estas concentraciones fueron baja (0,001 mol L⁻¹) y alta (0,003 mol L⁻¹). El Bicarbonato de sodio fue un producto comercial, que se encontraba en un estado puro.
- **Condiciones de pH:** Se seleccionaron tres valores de pH a partir de los resultados obtenidos por (Kan, Soklun, Yang, Wu, Shen et al, 2020). Estos corresponden a pH bajo (3,0), medio (6,0) y alto (9,0), el pH deseado se obtuvo mediante una solución 2N de ácido sulfúrico y 2 N de hidróxido de sodio, haciendo las mediciones con un analizador multiparámetro.

Cálculo de las cantidades del reactivo según su concentración

- **Cálculo de cantidades Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂)**
 1. Se calcula la Molaridad del Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂), con la que contábamos.

Peróxido de Hidrógeno al 50%

$$\frac{50ml H_2O_2}{100 ml H_2O_2} * \frac{1,1710g H_2O_2}{1ml H_2O_2} * \frac{1 mol H_2O_2}{34,0147g H_2O_2} * \frac{100ml H_2O_2}{1L H_2O_2}$$

$$= 17,21M$$

$$Molaridad = \frac{Moles\ sto}{Litro\ sln}$$

2. Procedemos a calcular las cantidades, para preparar 500 ml de tratamiento, de acuerdo a las concentraciones requeridas utilizando la siguiente formula:

$$V1 * C1 = V2 * C2$$

3. Para una concentración de 0,003M de Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2)

$$V1 = \frac{V2 * C2}{C1}$$

$$V1 = \frac{500ml * 0,003M}{17,21M} = 0,0871ml H_2O_2$$

4. Para una concentración de 0,004M de Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2)

$$V1 = \frac{V2 * C2}{C1}$$

$$V1 = \frac{500ml * 0,004M}{17,21M} = 0,1162ml H_2O_2$$

• **Cálculo de cantidades Bicarbonato de Sodio ($NaHCO_3$)**

1. Para cada concentración requerida se calcularon las cantidades necesarias, teniendo como referencia preparar 500ml de tratamiento.
2. Para una concentración de 0,001M de Bicarbonato de Sodio ($NaHCO_3$)

$$0,001 \frac{mol}{L} * 0,5L = 0,0005mol NaHCO_3$$

$$0,0005 mol NaHCO_3 * \frac{84,007g NaHCO_3}{1mol NaHCO_3} = 0,0420 g NaHCO_3$$

3. Para una concentración de 0,003M de Bicarbonato de Sodio ($NaHCO_3$)

$$0,003 \frac{mol}{L} * 0,5L = 0,0015mol NaHCO_3$$

$$0,0015 mol NaHCO_3 * \frac{84,007g NaHCO_3}{1mol NaHCO_3} = 0,1260 g NaHCO_3$$

Preparación de los reactores:

El orden de adición de los reactivos para la preparación de los reactores fue el siguiente:

1. medir los 500 ml de muestra
2. llevar a calentamiento la muestra hasta una temperatura de 50°C (Ver Figura 15)
3. Adición de la cantidad respectiva de peróxido de hidrógeno (Ver Figura 17)
4. Adición de la cantidad respectiva de bicarbonato de sodio (Ver Figura 18)
5. Ajuste de pH (Ver figura 19)

Figura 16 Reactor Batch a escala laboratorio tratamiento por Peróxido de Hidrógeno catalizado con Bicarbonato de Sodio



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 17 Adición de Peróxido de Hidrógeno al reactor



Fuente: Elaboración propia

Figura 18 Adición de Bicarbonato de sodio al reactor Batch



Fuente: Elaboración propia.

Figura 19 Ajuste de pH

Fuente: Elaboración propia

El seguimiento de la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), se realizó con mediciones de absorbancia, mediante un espectrofotómetro de luz ultravioleta a los 0, 15, 30, 45 y 60 minutos del tratamiento, a la longitud de onda de 610 nm.

Unidad experimental y tratamientos

Las Unidades Experimentales estuvieron constituidas por reactores en batch de 500 mL (con una agitación de 500 rpm y una temperatura de 50°C), a los cuales se les aplicaron los diferentes tratamientos resultantes de la combinación de factores y niveles. La asignación de los tratamientos a las unidades experimentales se realizó de manera aleatoria.

A continuación, en la tabla 6 se presenta el diseño experimental para el tratamiento propuesto

Tabla 6 Diseño de Experimentos para el Tratamiento de Bicarbonato de Sodio con Bicarbonato de Sodio para Aguas Residuales de Curtiembres

Tratamiento	Condiciones		
	[H ₂ O ₂]	[NaHCO ₃]	pH
1	0,003	0,001	3
2	0,003	0,001	6
3	0,003	0,001	9
4	0,003	0,003	3
5	0,003	0,003	6
6	0,003	0,003	9
7	0,004	0,001	3
8	0,004	0,001	6
9	0,004	0,001	9
10	0,004	0,003	3
11	0,004	0,003	6
12	0,004	0,003	9

Fuente: Elaboración propia

Variable de respuesta

Se definió como variable de respuesta la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), seguida mediante espectrofotometría de luz ultravioleta a la longitud de onda de 610 nm.

Frecuencia de muestreo

El seguimiento de la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), se realizó en intervalos de 15 minutos, (0, 15, 30, 45, 60) minutos de prueba.

Análisis de resultados mediante superficie de respuesta

Los resultados que obtuvimos en los ensayos realizados, fueron analizados mediante el Software Statgraphics Centurion, con un modelo de análisis estadístico de Superficie de Respuesta, con el fin de establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable de respuesta, es decir aquellos parámetros operacionales con los que alcanzan las mayores remociones en el tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembres por Peróxido de Hidrógeno catalizado con Bicarbonato de Sodio.

Determinación de la eficacia del tratamiento propuesto de las aguas residuales de la industria de curtiembres de la empresa curtiembres S.A.S

De acuerdo a lo especificado, a partir de las condiciones óptimas halladas para el proceso de tratamiento por Peróxido de Hidrógeno activado con Bicarbonato de Sodio, se determinó la eficacia del tratamiento sobre la muestra de las aguas residuales recolectadas de la empresa Curtiembres S.A.S, que corresponde al tanque homogeneizador de la planta de tratamiento que recibe el efluente de los tanques de almacenamiento de los tratamientos primarios (Trampas de grasa y sedimentadores de los procesos de curtido y pelambre respectivamente.

El seguimiento del tratamiento se realizó mediante la medición durante los 60 minutos del tratamiento de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Estos resultados se usaron para calcular el porcentaje de remoción de contaminantes del proceso y verificar el cumplimiento de la norma de vertimientos líquidos de Colombia (Resolución 0631 de 2017).

RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Para poder cumplir con los objetivos propuestos en el presente estudio, se utilizaron las instalaciones de Laboratorios del Complejo de Experimental de Calidad Ambiental de la Universidad Francisco de Paula Santander, Sede Campos Elíseos, Los Patios, ocupando específicamente el Laboratorio de Físicoquímica de Aguas y Laboratorio de Calidad del Aire.

Esta investigación se realizó a partir de las siguientes etapas:

- Caracterización físicoquímica de las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres, muestra obtenida de la empresa CURTIEMBRES S.A.S
- Implementar el tratamiento de oxidación avanzada a partir del proceso de peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio en base a los antecedentes consultados a las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres
- Determinar las condiciones óptimas de operación para el tratamiento de la muestra de agua residual con el proceso de peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio.
- Evaluar la potencial aplicación del sistema de tratamiento aplicado a las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres en base a lo estipulado en la resolución 0631 de 2015

Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres, muestra obtenida de la empresa CURTIEMBRES S.A.S

Se evaluaron los parámetros como pH, TDS, Temperatura y Conductividad, los cuales fueron tomados al momento después de llegar de la empresa CURTIEMBRES S.A.S. En la tabla 7 se muestran los resultados de los análisis iniciales de la muestra obtenida.

Tabla 7 Parámetros Iniciales de la Muestra de Aguas Residuales de Curtiembre.

Parámetro	Resultado	Unidades	Valores máximos permisibles Resolución 0631 2015
pH	7,94	Unidades de pH	6-9
Temperatura	22,4	°C	-
Conductividad	1136	(uS/cm)	-
TDS	5681	Ppm	-
DQO	1689,999 1344,999	mg\L O2	1,200,00
DBO5	1260	mg\L O2	600,00

ST	4948	mg\L	600,00
Alcalinidad	19800	mg\L	Análisis y Reporte
SSD	<1	G	2,00

Fuente: Elaboración Propia.

Para la medición del pH de la muestra se observa un valor de 7,94 Unidades de pH, encontrándose dentro del rango establecido de la resolución 0631 del 2015, cumpliendo con el requisito de vertimientos industriales a aguas superficiales, teniendo en cuenta exclusivamente este parámetro, este valor esta influenciado por la unión de los efluentes de los tanques de almacenamiento de los tratamientos primarios (trampas de grasa y sedimentadores) de los procesos de curtido (pH ácido) y pelambre (pH básico) de la planta de tratamiento, contenidas en el tanque homogeneizador de donde se obtuvo la muestra. El Potencial Hidrógeno (pH), es considerado dentro de esta investigación como un parámetro importante, ya que es una de las variables experimentales consideradas para la evaluación de los tratamientos, Así mismo la temperatura pudo verse influenciada por las características climáticas del lugar de ubicación (Máx. 33°C; Min. 24°C). así mismo se comparte el resultado de la conductividad del agua la cual representa la concentración de iones disueltos en ella y la cantidad de sólidos disueltos en el agua comúnmente llamada (TDS) por sus siglas en inglés Total Dissolved Solids.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En cuanto a las concentraciones iniciales de DQO, de la muestra se puede observar que

incumple los límites permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015, sobrepasando los 1200 mg/LO₂ denotados en la misma. Durante el desarrollo del proyecto se obtuvieron dos valores diferentes de DQO (1689,999 y 1344,999 mg/L O₂), la medición se realizó mediante duplicado de la muestra para así tener una mayor confiabilidad de los datos.

Demanda Bilógica de Oxígeno (DBO5)

En cuanto a las concentraciones iniciales de DBO₅ de la muestra se puede observar que incumple los límites permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015, sobrepasando los 600 mg/LO₂ denotados en la misma. Este procedimiento se realizó por duplicado para así lograr tener un resultado con menor margen de error, el resultado obtenido fue de 1260 mg/L O₂.

Biodegradabilidad de la materia contaminante (DBO5/DQO)

La relación entre los valores de DBO₅ y DQO según Miguel Rigola, 1999, indica la biodegradabilidad de la materia contaminante, por lo tanto, se establece que:

$$\frac{DBO}{DQO} < 0,2 \text{ Inorganico}$$

$$\frac{DBO}{DQO} > 0,6 \text{ Organico}$$

De acuerdo a lo anterior,

$$\frac{1260}{1689,999} = 0,745$$

$$\frac{1269}{1344,99} = 0,936$$

De acuerdo a los resultados anteriores, podemos inferir que la materia orgánica presente en la muestra es biodegradable.

Sólidos totales (ST)

Este procedimiento fue realizado por duplicado con el fin de comprobar que los resultados son reproducibles y obtener un promedio de la cantidad de sólidos totales en la muestra.

Como resultado se obtuvo que los sólidos totales en la muestra fueron de 4948 mg/L, lo que representa que en este parámetro también se incumple según lo establecido en la resolución 0631 de 2015 el cual describe un valor máximo de 600mg/L de este parámetro.

Sólidos Sedimentables (SSD)

En este parámetro se obtuvo un resultado de menos de 1mg/L, cumpliendo así con el valor límite de 2mg/L, establecido en la resolución 0631 de 2015.

Alcalinidad

La alcalinidad puede deberse a muchos factores, puede existir alcalinidad debido a bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos (Myriam Yaneth Chacón,2017)

En la tabla 8, se describen las relaciones y valores de alcalinidad para cada caso.

Tabla 8 Relaciones y Valores de Alcalinidad

RELACIONES DE ALCALINIDAD			VALORES DE ALCALINIDAD			
CASO	RELACIÓN	CONDICIÓN	OH ⁻	CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁼	TOTAL
1	F = M	OH ⁻	F = M	Ø	Ø	M

2	$F > \frac{M}{2}$	OH^- y $\text{CO}_3^{=}$	$2F - M$	$2(M - F)$	\emptyset	M
3	$F = \frac{M}{2}$	$\text{CO}_3^{=}$	\emptyset	$2F = M$	\emptyset	M
4	$F < \frac{M}{2}$	$\text{CO}_3^{=}$ y $\text{HCO}_3^{=}$	\emptyset	$2F$	$M - 2F$	M
5	$F = 0$	$\text{HCO}_3^{=}$	\emptyset	\emptyset	M	M

Fuente: (Myriam Yaneth Chacón,2017)

A continuación, en la Tabla 9, 10 y 11, se registran los factores y valores necesarios para el cálculo de la alcalinidad total de la muestra.

Tabla 9 Resultados de viraje de la muestra con indicador de Fenolftaleína, Volumen (F).

FENOFTALEINA	V (gastado)	Normalidad de H ₂ SO ₄	Meq	Volumen muestra (L)	Alcalinidad	Promedio
Muestra	1,5	0,02	0,05	0,001	1500	
Muestra	1,5	0,02	0,05	0,001	1500	1500

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10 Resultados de viraje de la muestra con indicador de Naranja de Metilo, Volumen (M).

NARANJA DE METILO	V(gastado)	Normalidad de H ₂ SO ₄	Meq	Volumen muestra (L)	Alcalinidad	Promedio
Muestra	18,6	0,02	0,05	0,001	18600	18300

Muestra	18	0,02	0,05	0,001	18000
---------	----	------	------	-------	-------

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11 Resultados de la Alcalinidad Total de la muestra

ALCALINIDAD TOTAL	
Promedio de la muestra	18300

Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos valores se verifica el cumplimiento de alguna de las condiciones plasmadas en la Tabla 8, de igual manera se calcula la Alcalinidad Total (Ver ecuación 12) y las concentraciones de Hidróxidos, Bicarbonatos o Carbonatos presentes en la muestra.

F= Alcalinidad a la fenolftaleína = 1500 mg/L

Volumen gastado = 1,5ml

Meq = 0,05

Normalidad H₂SO₄ = 0,02N

Volumen muestra = 0,001L

M= Alcalinidad al Naranja de Metilo =18,600 mg/L

Volumen gastado = 18,6ml

Meq = 0,05

Normalidad H₂SO₄ = 0,02N

Volumen muestra = 0,001L

Por lo que;

F = 1500mg/L

$$M = 18600\text{mg/L}$$

$$\frac{M}{2} = 9300\text{mg/L}$$

$$F < \frac{M}{2} \quad \text{Condición 4}$$

Debido a que la muestra cumple con la condición número 4, se puede inferir que la alcalinidad de la misma es por la presencia de carbonatos ($\text{CO}_3^{=}$) y bicarbonatos ($\text{HCO}_3^{=}$) en el agua y se calcula la cantidad de ambos de acuerdo al siguiente procedimiento.

$$\text{Concentración de Carbonatos } (\text{CO}_3^{=}) = 2(F) = 2(1500\text{mg/L}) = 3000\text{mg/L } (\text{CO}_3^{=})$$

$$\text{Bicarbonatos } (\text{HCO}_3^{=}) = M - 2F = 18600\text{mg/L} - 3000\text{mg/L} = 15600\text{mg/L } (\text{HCO}_3^{=})$$

Dentro de los parámetros descritos anteriormente, podemos inferir un incumplimiento de la mayoría en esta etapa inicial, sobrepasando los límites permisibles establecidos en la Resolución 0631 del 2015.

Implementar el tratamiento de oxidación avanzada a partir del proceso de peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio en base a los antecedentes consultados a las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres

Para la determinación de las condiciones óptimas del proceso de tratamiento, se realizaron 12 experimentos, en los cuales se monitorearon los resultados de la variable de respuesta establecida, la Demanda Química de Oxígeno (DQO), en intervalos de tiempo de 15min; T0 (0min), T1(15min), T2 (30min), T3(45min), T4 (60min) , con la variación de las concentraciones de Peróxido de Hidrógeno y Bicarbonato de Sodio y una temperatura constante

(Ver tabla 12) para cada tratamiento de los contemplados en la Tabla 6.

Tabla 12 Condiciones de los tratamientos de Peróxido de Hidrógeno catalizado con Bicarbonato de Sodio implementados a la muestra

Experimento	[H ₂ O ₂]	[NaHCO ₃]	Temperatura °C	pH	Intervalos de tiempo (min)
(1,3)	0,003M	0,001M	50	(3,6,9)	0,15,30,45,60.
(1,4)	0,003M	0,003M	50	(3,6,9)	0,15,30,45,60.
(2,3)	0,004M	0,001M	50	(3,6,9)	0,15,30,45,60.
(2,4)	0,004M	0,003M	50	(3,6,9)	0,15,30,45,60.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los valores de DQO en los tratamientos se encuentran registrados en la Tabla 13 y los porcentajes de remoción obtenidos al implementarlos están contemplados en la Tabla 14.

Tabla 13 Valores de DQO registrados durante los tratamientos

Exp	DQO inicial	(T0)	(T1)	(T2)	(T3)	(T4)
1	1839,9990	1805,0004	1778,8356	1745,0551	1749,9996	1854,9996
2	1344,9998	1318,0447	1300,1562	1227,8503	1302,4998	1404,9998
3	1344,9998	1318,3944	1298,5812	1262,8203	1392,4998	1442,4998
4	1344,9998	1313,8980	1295,8898	1153,7408	1319,9998	1372,4998
5	1344,9998	1319,9998	1288,9581	1132,4998	1189,9998	1207,4998
6	1344,9998	1306,6498	1303,4019	1139,9998	1197,4998	1187,4998
7	1344,9998	1207,6926	1191,1197	1179,9998	1299,9998	1279,9998
8	1344,9998	1198,7811	1156,8138	1129,9998	1299,9998	1277,3498
9	1689,9990	1587,4998	1495,7156	1417,4998	1459,9998	1479,4998

10	1689,9990	1484,9998	1501,0833	1357,4998	1397,4998	1409,9998
11	1344,9998	1209,9998	1142,1382	1054,9998	1057,4998	1079,9998
12	1344,9998	1099,9998	1063,1612	1044,9998	1047,4998	1072,4998

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Porcentaje de remoción de DQO calculados

Exp	Muestra Inicial	(T0)	(T1)	(T2)	(T3)	(T4)
1	0	1,9021	3,3241	5,1600	4,8913	-0,8153
2	0	2,0041	3,3341	8,7100	3,1599	-4,4610
3	0	1,9781	3,4512	6,1100	-3,5316	-7,2491
4	0	2,3124	3,6513	14,2200	1,8587	-2,0446
5	0	1,8587	4,1667	15,7993	11,5242	10,2230
6	0	2,8513	3,0928	15,2416	10,9665	11,7100
7	0	10,2087	11,4409	12,2677	3,3457	4,8327
8	0	10,8713	13,9915	15,9851	3,3457	5,0297
9	0	6,0650	11,4961	16,1242	13,6094	12,4556
10	0	12,1301	11,1785	19,6745	17,3077	16,5680
11	0	10,0372	15,0826	21,5613	21,3755	19,7026
12	0	18,2156	20,9545	22,3048	22,1190	20,2602

Fuente: Elaboración propia.

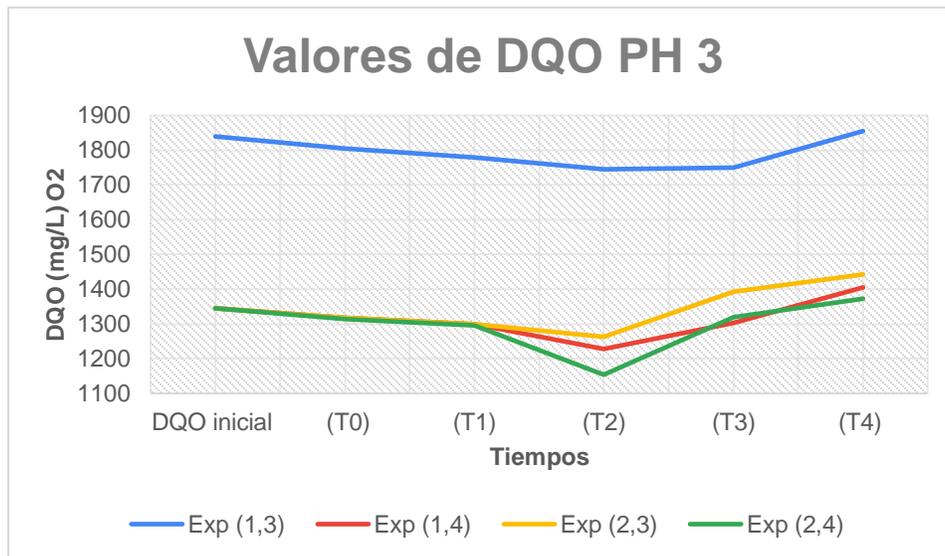
En las siguientes figuras, se muestran las variaciones de los valores de DQO calculados y los porcentajes de remoción de DQO, registrados en función del tiempo transcurrido durante el proceso, las concentraciones del Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂) y del Bicarbonato de Sodio (NaHCO₃) adicionados de acuerdo al tratamiento y su comportamiento ante las diferentes condiciones de pH (pH 3, pH6 y pH 9).

DQO a pH 3

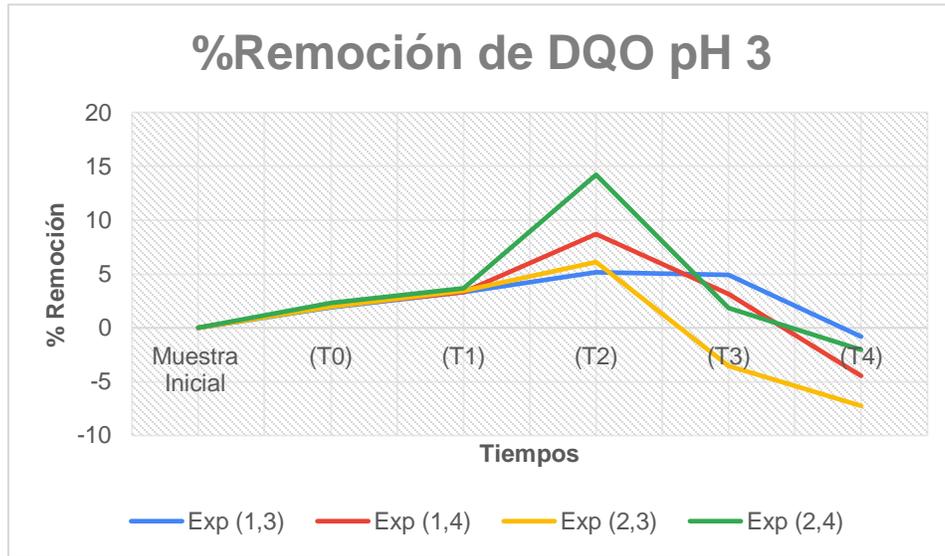
Para poder analizar cuál fue el tratamiento que más tuvo efectividad bajo estas condiciones de pH acidas, comparamos como se comportó la muestra a los diferentes tipos de tratamientos adicionados en cuanto a los valores de DQO y porcentajes de remoción obtenidos (Ver Tabla 13 y Tabla 14).

Los resultados obtenidos se ven reflejados en las Figuras 20,21,22,23.

Figura 20 Resultados de DQO a pH 3



Fuente: Elaboración propia.

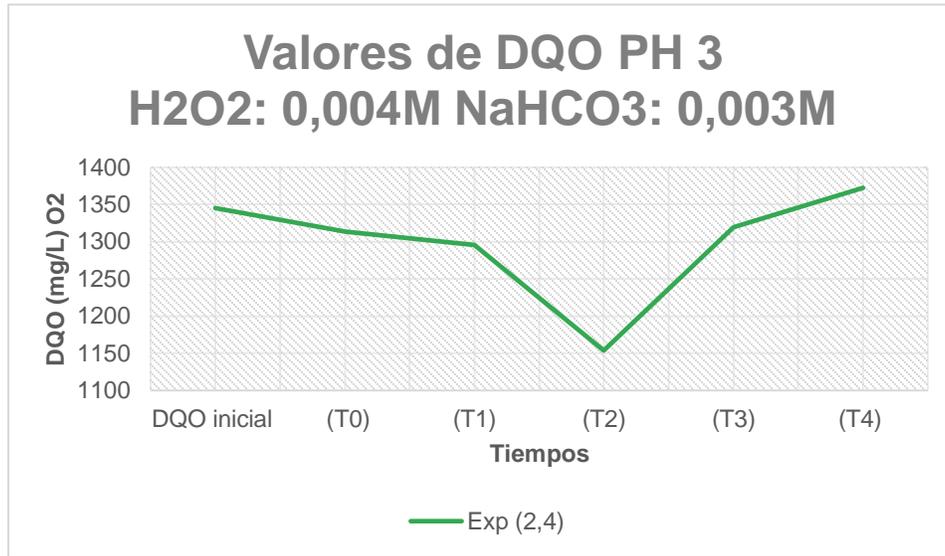
Figura 21 Resultados de remoción de DQO a pH 3

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los resultados, podemos inferir que el tratamiento que mayor eficacia demostró fue el tratamiento (2,4), para el cual se utilizó una concentración de 0,003M de NaHCO_3 y una concentración de 0,004M para H_2O_2 , siendo estas las mayores concentraciones de Bicarbonato de Sodio y Peróxido de Hidrógeno, respectivamente. A su vez, se observó un patrón de comportamiento en los tratamientos, el cual fue alcanzar su mayor capacidad de remoción en el transcurso de los primeros 30 minutos (T2) del proceso y un decrecimiento al sobrepasar este tiempo.

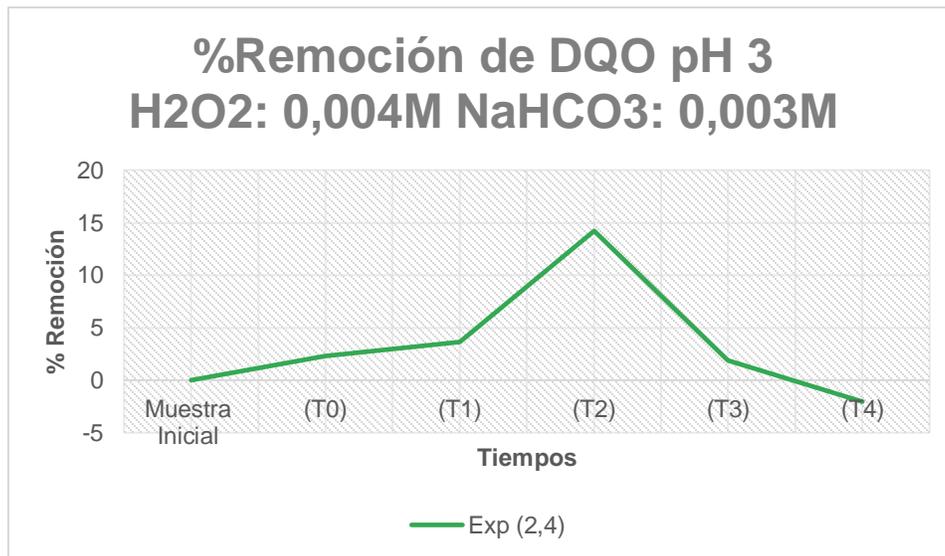
En las figuras 22 y 23, se encuentra a mayor detalle el comportamiento del tratamiento (2,4) a condiciones de pH 3.

Figura 22 Resultados de DQO en el tratamiento más eficaz en condiciones de pH 3



Fuente: Elaboración propia.

Figura 23 Resultados de remoción de DQO en el tratamiento más eficaz en condiciones de pH 3



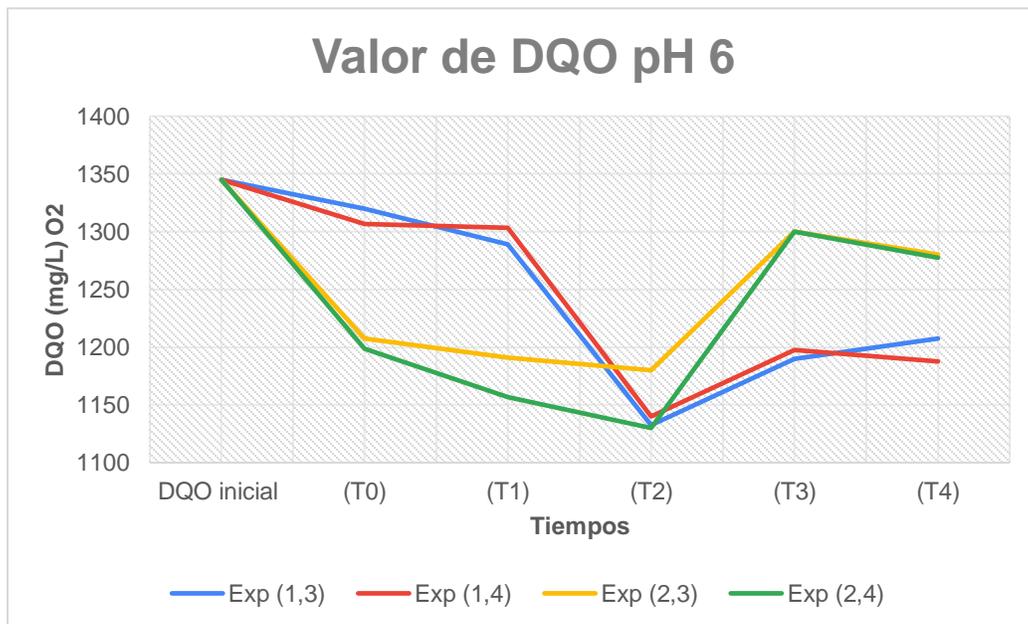
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con las Figuras 22 y 23 y a los datos registrados en la Tabla 14, se obtuvo para este experimento una remoción del 14,2200 % de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) con respecto a la concentración inicial, observándose una mayor remoción al transcurrir los primeros 30min del tratamiento y una disminución de la remoción hasta llegar al valor de DQO inicial e incluso con un mayor valor.

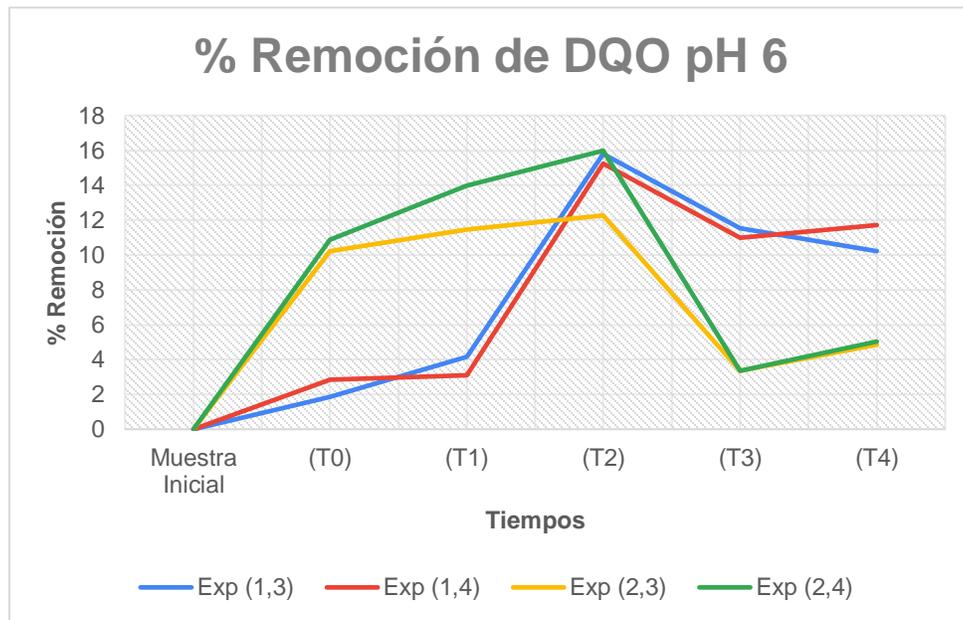
DQO a pH 6

Para poder analizar cuál fue el tratamiento que más tuvo efectividad bajo estas condiciones de pH acidas-neutras, comparamos como se comportó la muestra a los diferentes tipos de tratamientos adicionados (Tabla 12) de acuerdo con los valores de DQO y porcentajes de remoción obtenidos (Tabla 13 y Tabla 14).

Figura 24 Resultados de DQO a pH 6



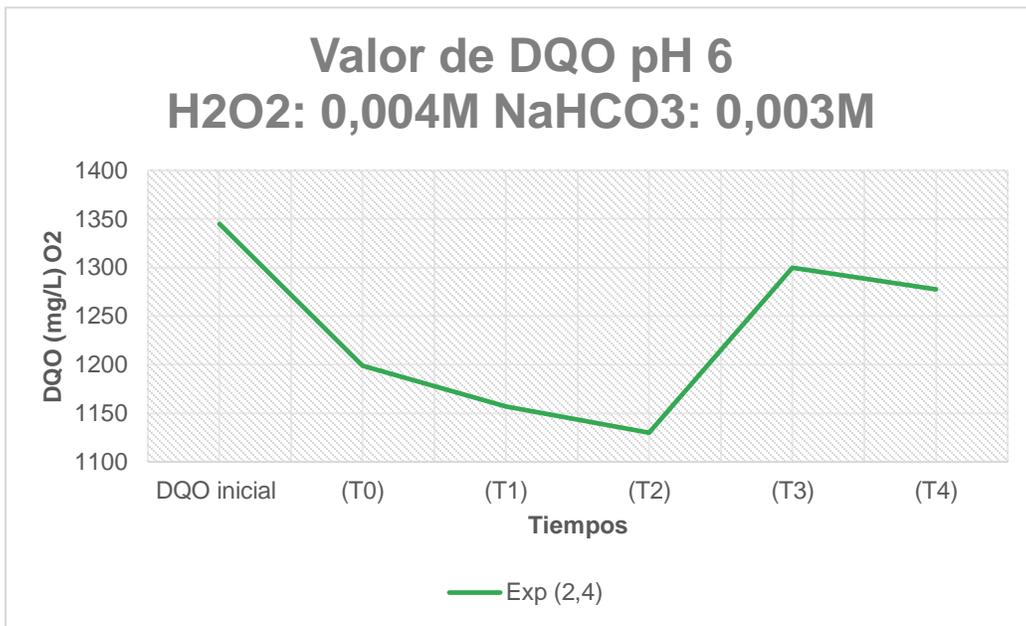
Fuente: Elaboración propia

Figura 25 Resultados de remoción de DQO a pH 6

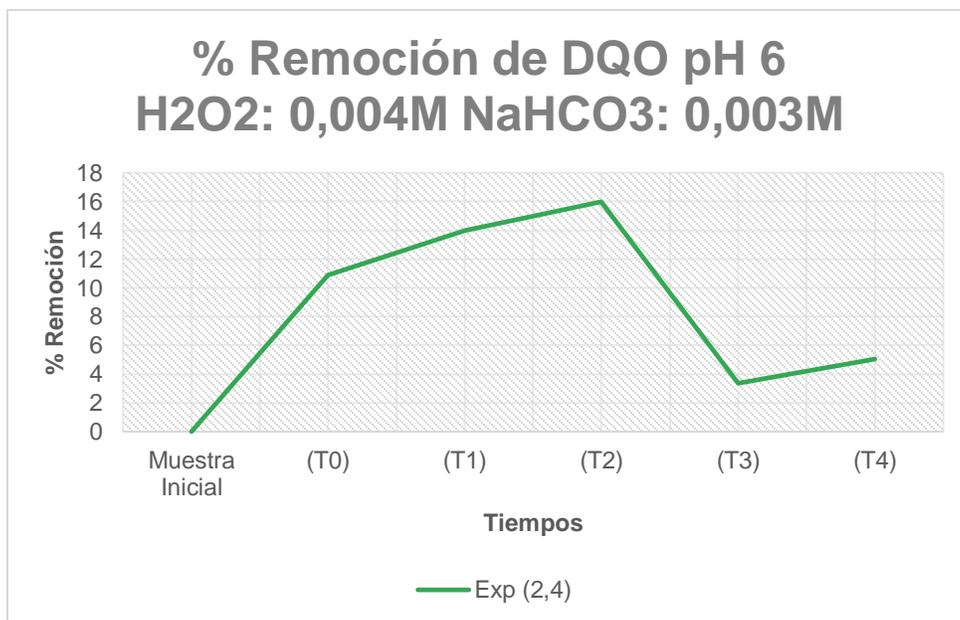
Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar el análisis de las Figuras 24 y 25, se infiere que el tratamiento que mayor eficacia demostró fue el tratamiento (2,4), para el cual se utilizó una concentración de 0,003M de NaHCO₃ y una concentración de 0,004M para H₂O₂, siendo estas las mayores concentraciones de Bicarbonato de Sodio y Peróxido de Hidrógeno, respectivamente. A su vez, se observó un patrón de comportamiento en los tratamientos, el cual fue alcanzar su mayor capacidad de remoción en el transcurso de los primeros 30 minutos (T2) del proceso y un decrecimiento al sobrepasar este tiempo. Sin embargo, en comparación con las condiciones de pH anteriores (pH 3), no se observa un cambio tan marcado en los siguientes intervalos de tiempo (T3, T4).

En las Figuras 26 y 27, se observan los resultados del tratamiento que mayor remoción de DQO obtuvo en función de estas condiciones:

Figura 26 Resultados de DQO en el tratamiento más eficaz en condiciones de pH 6

Fuente: Elaboración propia

Figura 27 Resultados de remoción de DQO en el tratamiento más eficaz en condiciones de pH 6

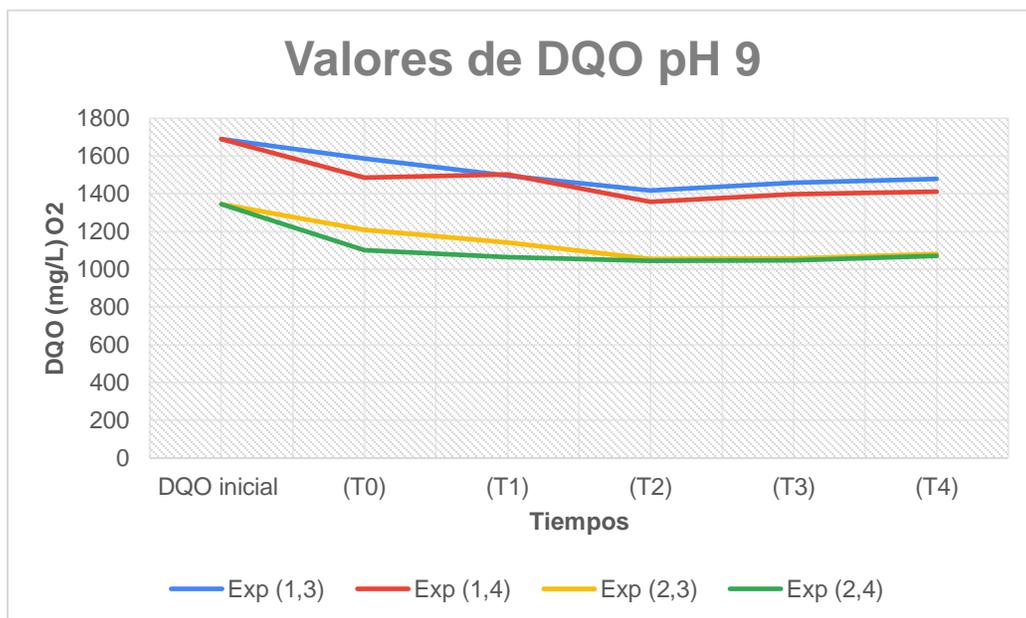
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las Figuras 26 y 27, y a los datos registrados en la Tabla 14, se obtuvo para este experimento una remoción de 15,2416 % de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) con respecto a la concentración inicial, observándose una mayor remoción al transcurrir los primeros 30min del tratamiento y una disminución de la remoción luego de avanzar este tratamiento (T3, T4).

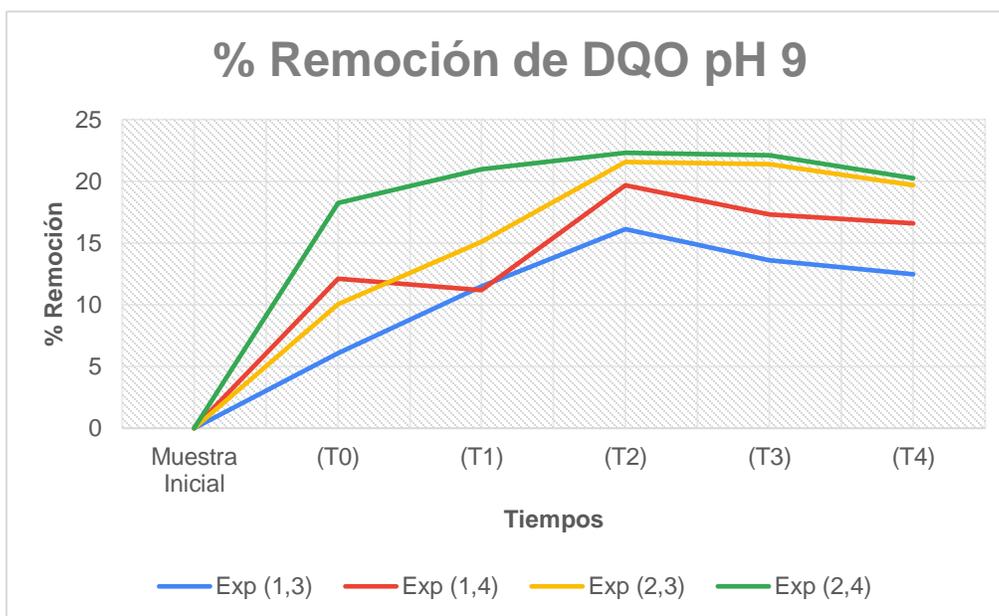
DQO a pH 9

Para poder analizar cuál fue el tratamiento que más tuvo efectividad bajo estas condiciones de pH básicas, comparamos el comportamiento de la muestra en cada tipo de tratamiento adicionado (Tabla 12) de acuerdo con los valores de DQO y porcentajes de remoción obtenidos (Ver Tabla 13 y Tabla 14).

Figura 28 Resultados de DQO a pH 9



Fuente: Elaboración propia

Figura 29 Resultados de remoción de DQO a pH 9

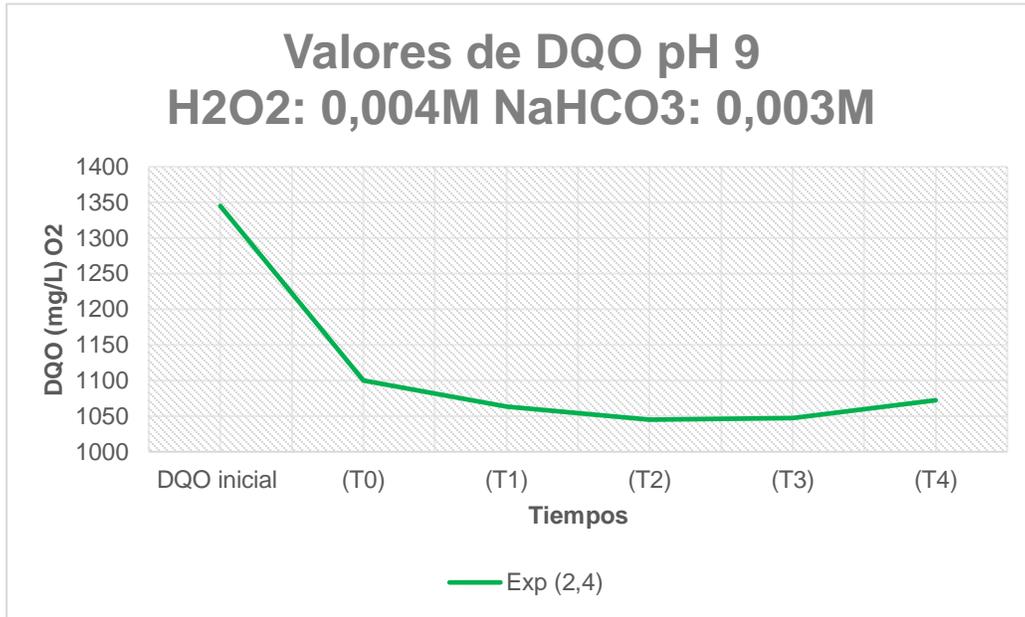
Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar el análisis de las Figuras 28 y 29, se infiere que el tratamiento que mayor eficacia demostró fue el tratamiento (2,4), para el cual se utilizó una concentración de 0,003M de NaHCO₃ y una concentración de 0,004M para H₂O₂, siendo estas las mayores concentraciones de Bicarbonato de Sodio y Peróxido de Hidrógeno, respectivamente. A su vez, se observó un patrón de comportamiento en los tratamientos, el cual fue alcanzar su mayor capacidad de remoción en el transcurso de los primeros 30 minutos (T2) del proceso y un decrecimiento al sobrepasar este tiempo.

Es importante resaltar que en contraste con las condiciones de pH ácidas (pH 3) y pH ácido- neutras (pH 6), los valores de DQO y por consecuencia los porcentajes de remoción de la misma no variaron en gran magnitud luego de alcanzar su mayor porcentaje de remoción al avanzar en el proceso, por lo que se puede inferir que, en condiciones de pH más básicas, el tratamiento es más estable y nos promueve un mayor rendimiento.

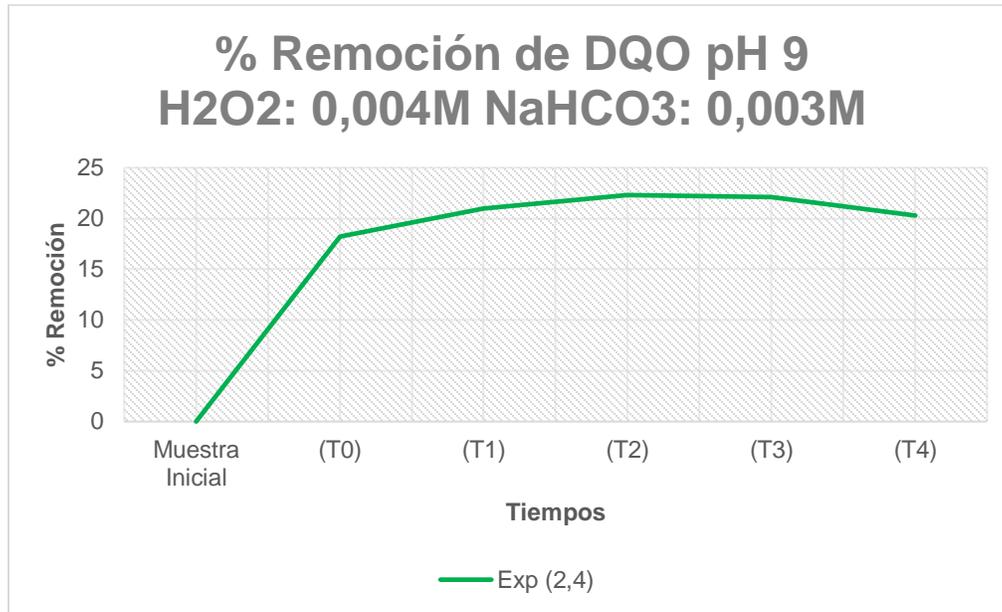
En las Figuras 30 y 31, se observan los resultados del tratamiento que mayor remoción de DQO obtuvo en función de estas condiciones, a mayor detalle:

Figura 30 Resultados de DQO en el tratamiento más eficaz en condiciones de pH 9



Fuente: Elaboración propia

Figura 31 Resultados de remoción de DQO en el tratamiento más eficaz en condiciones de pH 9



Fuente: Elaboración propia

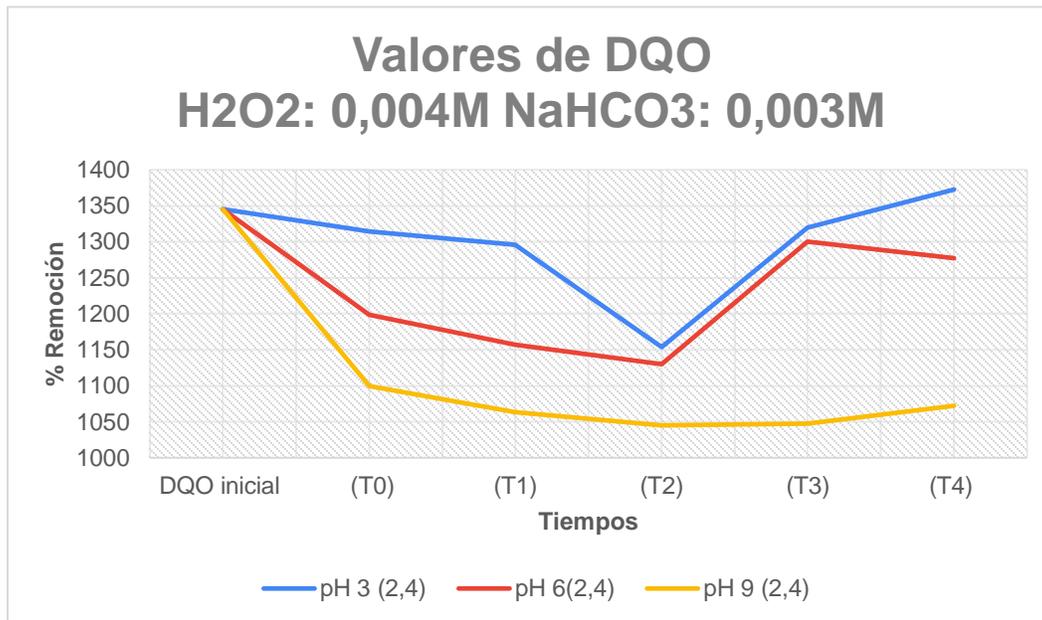
De acuerdo con las Figuras 30 y 31 y a los datos registrados en la Tabla 14, se obtuvo para este experimento una remoción de 22,3048 % de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) con respecto a la concentración inicial, observándose una mayor remoción al transcurrir los primeros 30min del tratamiento y una disminución muy baja de la remoción luego de avanzar este tratamiento (T3, T4).

Determinar las condiciones óptimas de operación para el tratamiento de la muestra de agua residual con el proceso de peróxido de hidrógeno catalizado con bicarbonato de sodio.

Luego de realizar el análisis del comportamiento de las muestras de aguas residuales de curtiembres al Proceso de Oxidación Avanzada (PAO) de Peróxido de Hidrógeno catalizado con Bicarbonato de Sodio (BAP), en cada una de las condiciones establecidas en el presente proyecto, se realizó una comparación de los experimentos que obtuvieron mayor remoción de

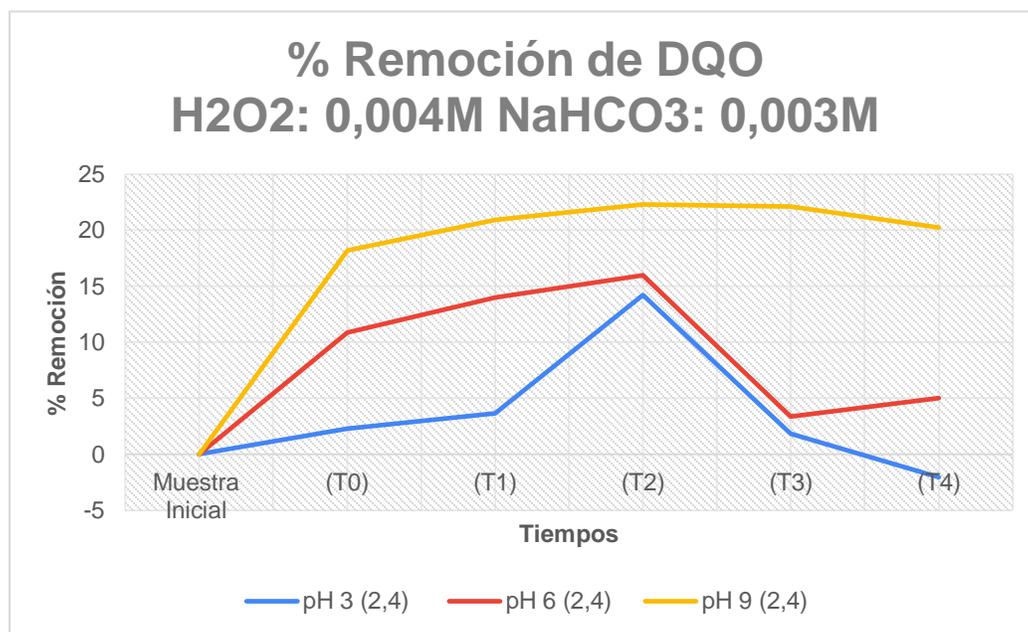
Demanda Química de Oxígeno (DQO), en cada una de las condiciones de pH, la cual se puede observar en la Figura 32.

Figura 32 Comparación de Valores de DQO de acuerdo con sus condiciones de pH



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 33 Comparación de Porcentajes de remoción de DQO de acuerdo a sus condiciones de pH



Fuente: Elaboración propia.

Como conclusión de este análisis se identificó que tras pasar los primeros 30 minutos del tratamiento, se obtiene el mayor porcentaje de remoción, dato relevante para implementaciones futuras de proyectos de depuración de aguas residuales de la industria de curtiembres

A su vez se identificó que en comparación con nuestro estudio de caso base (Kan et al, 2019), los porcentajes de remoción de DQO fueron bajos. Esto puede considerarse debido a las características diferenciales de los tipos de aguas residuales tratadas. En el estudio base se trataron aguas residuales de la industria textil y aunque está presente concentraciones altas de DQO, tenga presencia de colorantes, surfactantes, sales inorgánicas y distintos compuestos químicos empleados en el proceso productivo (Buscio et al. 2015), No es comparable con toda la carga orgánica que contienen los efluentes de la industria de curtiembres, debido a que está a pesar de contar con concentraciones altas de colorantes a su vez recibe todos los subproductos

por los que atraviesa la piel animal para transformarse en cuero, resistente y flexible, (Ver Figura 1). Por lo que se estima que el tratamiento puede tener mayor rendimiento con mayores concentraciones de Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) y Bicarbonato de Sodio ($NaHCO_3$), respectivamente en condiciones de pH alcalino- débil (Ph:9), debido a la efectividad que presenta el tratamiento en estas condiciones.

A partir de los resultados obtenidos de DQO, se analiza las condiciones óptimas para este tratamiento:

Evaluación de condiciones óptimas del tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembres con Peróxido de Hidrógeno Catalizado con Bicarbonato de Sodio

En el software Statgraphics se analizó la condición óptima para maximizar la remoción de DQO en el lixiviado por medio del diseño de experimentos de superficie de respuesta, cuya programación de las configuraciones obtenidas del programa para la aplicación de tratamientos.

Continuando con la idea anterior, se analizaron los resultados mediante el software Statgraphics Centurion 18, con la finalidad de conocer las condiciones óptimas en las que se desarrolla el tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembres, a continuación, se presentan las condiciones en las que se realizó el análisis:

Clase de diseño: Superficie de Respuesta

Nombre del Diseño: Factorial de 3 niveles: 3^3

Nombre del archivo: Tratamiento BAP curtiembres sfx

Diseño Base

Número de factores experimentales: 3

Número de bloques: 1

Número de respuestas: 1

Número de corridas: 24, incluyendo 3 puntos centrales por bloque

Grados de libertad para el error: 7

Aleatorizar: No

Factores	Bajo	Alto	Unidades	Continuo
H2O2	0,003	0,004	mol. L-1	Sí
NaHCO3	0,001	0,003	mol. L-1	Sí
pH	3	9	Unidades de pH	Sí

Respuestas	Unidades
% Remoción DQO	%

Se generó un análisis de la estadística descriptiva con el ANOVA, además del diagrama de Pareto estandarizada para remoción de DQO, así como, las gráficas de efectos principales para remoción de DQO, de Superficie de Respuesta.

Análisis de Varianza ANOVA

Con análisis del diseño de experimentos se realizó la prueba ANOVA de las varianzas para Remoción de DQO, donde se identificaron los parámetros más significativos analizados durante el proceso y sus respectivas interacciones.

En la Tabla 15, Se observan los resultados del Análisis de Varianza ANOVA arrojada en el software Statgraphics Centurión 18, la cual muestra que el modelo es efectivamente es significativo estadísticamente. El análisis demostró que los Valor-P están por encima del error máximo generalmente aceptado, y el cual se toma para esta prueba (5%), solo 2 de efectos

presentados en (Valor -P) fue inferiores inferior a 0,05. Por lo tanto, el análisis de Varianza ANOVA demuestra que la prueba aplicada para el análisis del tratamiento óptimo representa un 95 % del nivel de confianza en los resultados.

Tabla 15 Análisis de Varianza para Remoción de DQO

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:H2O2	11,2714	1	11,2714	2,68	0,1457
B: NaHCO3	30,115	1	30,115	7,16	0,0318
C: pH	259,464	1	259,464	61,66	0,0001
AA	0,0237696	1	0,0237696	0,01	0,9422
AB	2,97008	1	2,97008	0,71	0,4286
AC	0,28125	1	0,28125	0,07	0,8034
BC	6,9938	1	6,9938	1,66	0,2383
Error total	29,4571	7	4,20815		
Total (corr.)	839,773	14			

Fuente: Extraída del Software Statgraphics Centurion

R-cuadrada = 96,4923 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 92,9845 por ciento

Error estándar del est. = 2,05138

Error absoluto medio = 1,03033

Estadístico Durbin-Watson = 2,64479 (P=0,3536)

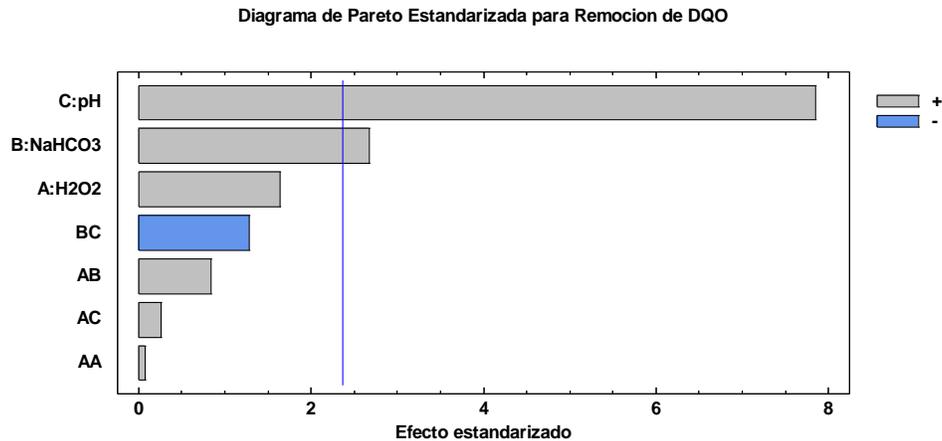
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,332307

Considerando los resultados del análisis ANOVA, se obtuvo una correlación de 0,964923, el cual es un valor alto (cercano a 1), lo cual hace referencia a que las probabilidades a que se presente un error son del 4%.

Diagrama de Pareto estandarizado para la remoción de DQO

El diagrama de Pareto es una representación de la prueba ANOVA del diseño de experimentos, la cual permite identificar los factores con mayor influencia en su respectivo orden sobre el proceso. En la figura 34, se muestran las cuáles de las interacciones fueron las más significativas en el proceso.

Figura 34 Diagrama de Pareto Estandarizada para Remoción de DQO



Fuente: Extraída del Software Statgraphics Centurion

A su vez se evidenció que las condiciones de pH, tiene un efecto mayor sobre la remoción de DQO en comparación con las otras dos condiciones (Bicarbonato de sodio (NaHCO_3) y Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2)). Complementando a la afirmación anterior se observan en el análisis que la interacción entre los factores BC, muestra una de las mayores incidencias en la remoción de la demanda química de oxígeno.

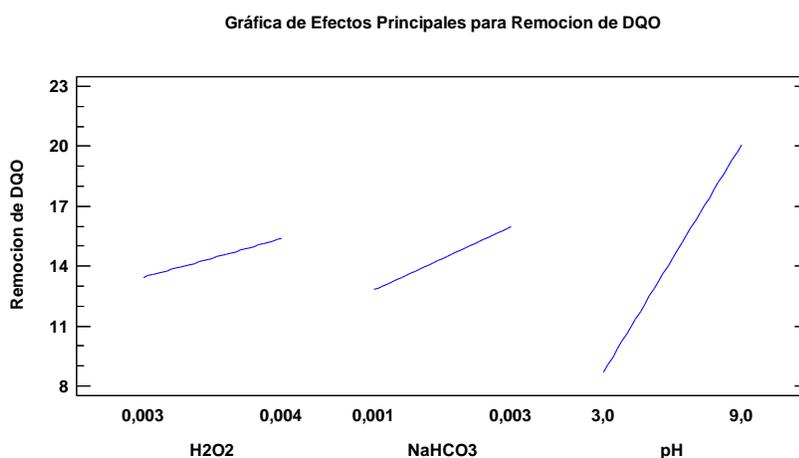
Esto concuerda con los resultados obtenidos en la presente investigación donde se observó, mayores remociones a la condición de pH más alta (pH 9: alcalino débil). Según (Guo et al, 2015), en su investigación encontró un mayor rendimiento en la decoloración de Acid

Orange (II), en estas mismas condiciones de alcalinidad débil en el sistema de Peróxido de Hidrógeno catalizado con Bicarbonato de Sodio.

Análisis de efectos principales para la remoción de DQO

En la figura 35 se presenta la gráfica de efectos principales para la remoción de DQO, donde se puede visualizar, la línea de tendencia de la remoción de la variable de respuesta con respecto a la variabilidad de cada factor.

Figura 35 Gráfica de efectos principales para la remoción de DQO



Fuente: Extraída del Software Statgraphics Centurion

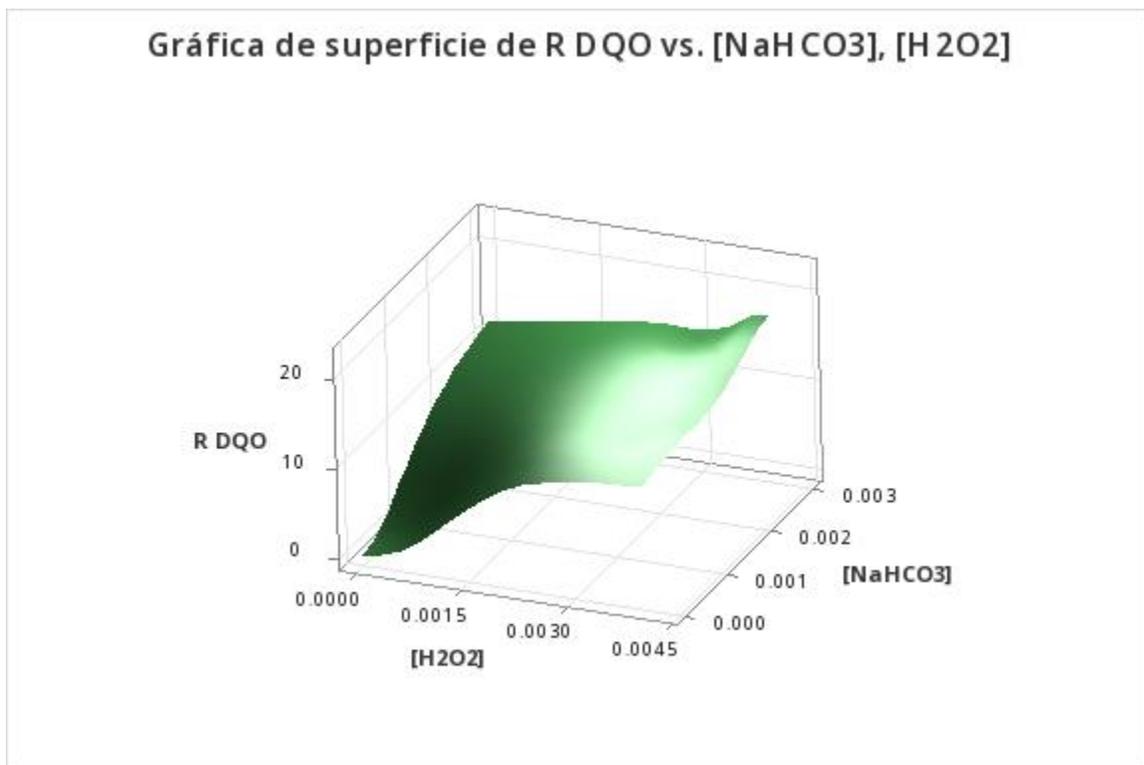
En la Figura 35, se puede identificar que las variables que más tienen efecto sobre la respuesta de remoción de DQO, son el catalizador (NaHCO₃) y el pH, considerando una mayor remoción al tener concentraciones más elevadas y condiciones de pH más básicas (alcalino-débil).

Superficie de respuesta

En la figura 36 se puede observar la relación entre el Peróxido de Sodio (H₂O₂), el

Bicarbonato de Sodio NaHCO_3 y el pH, donde se puede observar que la concentración de NaHCO_3 , tiene un fuerte efecto sobre el porcentaje de remoción de la Demanda Química de Oxígeno

Figura 36 Grafica de Superficie de Respuesta del Tratamiento de Peróxido de Hidrógeno catalizado con Bicarbonato de Sodio.



Fuente: Extraída del Software Statgraphics Centurion

Luego de analizar cada uno de los tratamientos implementados para la remoción de contaminantes en especial, la Demanda Química de Oxígeno (DQO), se seleccionó el tratamiento más efectivo, el cual fue el tratamiento (2,4) a condiciones de pH 9 (Alcalino débil), este tratamiento conto con las concentraciones más altas de Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) y Bicarbonato de Sodio (NaHCO_3), 0,004M y 0,004M respectivamente.

Evaluar la potencial aplicación del sistema de tratamiento aplicado a las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres en base a lo estipulado en la resolución 0631 de 2015

Después de obtener este resultado procedimos a evaluar el comportamiento de la muestra frente a la remoción de otros contaminantes y su respuesta a otras pruebas tales como el Potencial Hidrógeno (pH), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5), Solidos Totales (ST), Solidos Sedimentables (SSD), Alcalinidad y Peróxido de Hidrógeno residual.

pH

De acuerdo con el valor inicial de pH (7,94) de la muestra y su aumento para llegar a las condiciones ideales en el tratamiento con Peróxido de Hidrógeno y Bicarbonato de Sodio, el valor final registrado fue de (8,68), el cual se ajusta a lo estipulado en la Resolución 0631 de 2015, considerando que el rango en el que se aprueba este parámetro oscila entre valores de pH (6-9) (Ver Figura 37).

Figura 37 Valor de pH al finalizar el tratamiento



Fuente: Elaboración propia

Demanda Biológica de Oxígeno

Para realizar este análisis, tomamos dos muestras del tratamiento que tuvo mayor remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), para una mayor veracidad en los resultados (Ver Tabla 16).

Tabla 16 Resultados de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) en el tratamiento óptimo

Volumen de la muestra (ml)	Titulación 1 (ml)	Volumen Gastado Promedio (ml)	OD inicial	Titulación 2 (5Dias) (ml)	Volumen Gastado Promedio (ml)	OD final	DBO5 (Mg/L O2) Final	DBO5 (Mg/L O2) Inicial
1	4,4	4,3	8,6	3,1	3,25	6,5	630	1260
1	4,2			3,4				

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en la tabla 16, podemos concluir que la remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5), fue de un 50% respecto a su caracterización inicial, con un valor de 630 Mg/L O2 al final de la etapa de tratamiento. Así mismo se considera que, aunque el porcentaje de remoción de DBO5, fue alto, el valor final no cumple con lo establecido en la resolución 0631 de 2015 (600mg/L O2), por la cual se establecen los parámetros mínimos permisibles de vertimientos a aguas superficiales.

Sólidos Totales

Para realizar este análisis, tomamos las muestras del tratamiento que tuvo mayor remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los resultados se encuentran contemplados en la Tabla 17.

Tabla 17 Resultados de los Solidos Totales (ST) en el tratamiento más optimo

Toma de muestra	W1 (g)	W2 (g)	V (L)	ST (mg/L)
Caracterización inicial	40,5116	40,6353	0,025	4948
T0	44,1710	44,3087	0,025	5508
T1	37,2397	37,3911	0,025	6056
T2	41,7082	41,8515	0,025	6532
T3	41,8318	41,9770	0,025	5808
T4	40,8207	40,9646	0,025	5744

Fuente: Elaboración propia

Analizando los resultados descritos en la Tabla 17, se observa un aumento de los Solidos Totales durante el tratamiento, registrando valores desde 5508mg/L hasta 6532mg/L, considerando que el valor máximo estipulado en la Resolución 0631 de 2015 es de 600mg/L se observa el incumplimiento de esta característica en la etapa final del tratamiento.

Solidos Sedimentables

Para analizar este parámetro, se tomó la muestra del experimento más eficiente en cuanto a la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Ver figura 38).

Figura 38 Valor registrado del parámetro de Sólidos Sedimentables (SSD)

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de este análisis se observaron valores de 16mg/L de Sólidos Sedimentables, aumentando considerablemente su valor con respecto al valor inicial de 1mg/L y como consecuencia se observa que este valor final incumple con lo establecido en la Resolución 0631 de 2015 el cual estipula un valor máximo de 2mg/L de Sólidos Sedimentables.

Alcalinidad

Para realizar este análisis, tomamos dos muestras del tratamiento que tuvo mayor remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), para una mayor veracidad en los resultados.

A continuación, en la Tabla 18,19 y 20, se registran los factores y valores necesarios para el cálculo de la alcalinidad total de la muestra.

Tabla 18 Resultados de viraje de la muestra con indicador de Fenolftaleína, Volumen (F).

FENOFTALEINA	V (gastado)	Normalidad de H ₂ SO ₄	Meq	Volumen muestra (L)	Alcalinidad	Promedio
---------------------	----------------	---	-----	------------------------	-------------	----------

To	13,5	0,02	0,05	0,001	13500	12250
To	11	0,02	0,05	0,001	11000	
T4	12	0,02	0,05	0,001	12000	12000
T4	12	0,02	0,05	0,001	12000	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19 Resultados de viraje de la muestra con indicador de Naranja de Metilo, Volumen (M).

NARANJA DE METILO	V (gastado)	Normalidad de H ₂ SO ₄	Meq	Volumen muestra (L)	Alcalinidad	Promedio
To	39	0,02	0,05	0,001	39000	35600
To	32,2	0,02	0,05	0,001	32200	
T4	32,8	0,02	0,05	0,001	32800	32150
T4	31,5	0,02	0,05	0,001	31500	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20 Resultados de la Alcalinidad Total del tratamiento

ALCALINIDAD TOTAL	
To	35600
T4	32150

Fuente: Elaboración propia

A partir de estos valores se verifica el cumplimiento de alguna de las condiciones plasmadas en la Tabla 8, de igual manera se calcula la Alcalinidad Total (Ver ecuación 12) y las concentraciones de Hidróxidos, Bicarbonatos o Carbonatos presentes en la muestra

T0**F= Alcalinidad a la fenolftaleína = 12250 mg/L****M= Alcalinidad al Naranja de Metilo =35600mg/L****Por lo que;**

$$F = 12250\text{mg/L}$$

$$M = 35600\text{mg/L}$$

$$\frac{M}{2} = 17800\text{mg/L}$$

$$F < \frac{M}{2}$$

Condición 4

T4**F= Alcalinidad a la fenolftaleína = 12000 mg/L****M= Alcalinidad al Naranja de Metilo = 32150mg/L****Por lo que;**

$$F = 12000\text{mg/L}$$

$$M = 32150\text{mg/L}$$

$$\frac{M}{2} = 16075\text{mg/L}$$

Condición 4

$$F < \frac{M}{2}$$

Debido a que la muestra cumple con la condición número 4, se puede inferir que la alcalinidad de esta es por la presencia de carbonatos ($CO_3^{=}$) y bicarbonatos ($HCO_3^{=}$) en el agua y se calcula la cantidad de ambos de acuerdo al siguiente procedimiento.

$$\text{Concentración de Carbonatos } (CO_3^{=}) = 2(F)$$

$$\text{Bicarbonatos } (HCO_3^{=}) = M - 2F$$

En la Tabla 21 se observan los resultados de la alcalinidad durante el tratamiento.

Tabla 21 Resultados de alcalinidad durante el tratamiento

Toma de muestra	Alcalinidad total	[] Carbonatos	[] Bicarbonatos
Muestra	18600 mg/L	3000mg/L ($CO_3^{=}$)	15600mg/L ($HCO_3^{=}$)
T0	35600 mg/L	24500 mg/L ($CO_3^{=}$)	11100 mg/L ($HCO_3^{=}$)
T4	32150 mg/L	24000 mg/L ($CO_3^{=}$)	8150 mg/L ($HCO_3^{=}$)

Fuente: Elaboración propia

Durante el tratamiento implementado, así como lo muestra la Tabla 21 se puede observar un aumento en los valores de Alcalinidad Total, con presencia de Carbonatos ($CO_3^{=}$) y bicarbonatos ($HCO_3^{=}$), esto se debe a la adición de el catalizador de Bicarbonato de Sodio que al

entrar en contacto con la muestra aumenta la alcalinidad de esta.

En la resolución 0631 de 2015, no se especifica ningún parámetro para esta característica, más que su análisis y reporte, sin embargo, tener altos niveles de alcalinidad puede causar problemas en la salud de los consumidores y está directamente relacionada con la formación de precipitados, debido a su reacción con ciertos cationes en el agua (Jiménez, 2001). A partir de esto se puede relacionar el aumento en la cantidad de Sólidos Totales y Sedimentables durante el tratamiento con Peróxido de Hidrógeno y Bicarbonato de Sodio.

Peróxido de Hidrógeno Residual

Para analizar el Peróxido de Hidrógeno Residual, se tomó la muestra del tratamiento que tuvo mayor remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Figura 39 Medida de Peróxido de Hidrógeno residual



Fuente: Elaboración propia

El resultado en la Figura 39 muestra que el Peróxido de Hidrógeno residual osciló entre los 0 y 0,5 mg/L H₂O₂, lo que significa que el Peróxido de Hidrógeno añadido al tratamiento fue consumido y no quedaron sobrantes de esta sustancia al finalizar el tratamiento.

Para poder dimensionar de manera general el potencial del tratamiento utilizado, se realizó la Tabla 22 con los resultados de la caracterización final y sus valores respecto a la normatividad (Resolución 0631 de 2015).

Tabla 22 Resultados Finales del Tratamiento

Parámetros	Unidades	Valores máximos permisibles			Cumplimiento
		(Resolución 0631 de 2015)	Valores iniciales	Valores finales	
DQO	mg/L O ₂	1200,000	1344,996	1045,9996	Cumple
DBO ₅	mg/L O ₂	600,000	1230	630	No cumple
pH	Unidades de pH	6-9	7,94	8,68	Cumple
SST	mg/L	600,000	4948	6532	No cumple
SSED	mg/L	2,00	1-2	16	No cumple
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	18300	32150	-
Peróxido de Hidrógeno	mg/L H ₂ O ₂	-	1360,588	0-0,5	-

Fuente: Ministerio de Ambiente (2015), Elaboración propia.

Dentro de los parámetros analizados se observa un cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015, en la Demanda Química de Oxígeno y el pH, así mismo el incumplimiento de los parámetros como DBO₅, Sólidos Totales y Sólidos Sedimentables es notorio al aplicar el tratamiento de Peróxido de Hidrógeno Catalizado con Bicarbonato de Sodio.

Como resultado, se considera que el tratamiento de Peróxido de Hidrógeno, catalizado con Bicarbonato de Sodio es viable para el tratamiento de aguas industriales de curtiembres, ya que ayuda a remover parámetros como la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) y la DQO en mayor y en menor medida, respectivamente. Se estima que para lograr remociones mucho más altas de DQO en este tipo de aguas industriales, las concentraciones de Peróxido de Hidrógeno y Bicarbonato de Sodio deben ser mayores y deben conservarse las condiciones de pH (Alcalino-débil) tal y como lo especifican otros estudios relacionados (Kan et al 2019) (Jawad et al,2016). A su vez se identifican problemas en cuanto a la generación de Sólidos Totales y Sedimentables y el aumento en los valores de Alcalinidad (Jiménez, 2001), por lo que se recomienda acompañar al proceso con un sistema de coagulación y floculación para eliminar esos sólidos generados durante el proceso del tratamiento.

CONCLUSIONES

A partir del análisis de la aplicación de los tratamientos para la eliminación de los contaminantes, en particular la Demanda Química de Oxígeno (DQO), se ha identificado el tratamiento más eficaz. El tratamiento que se destacó como la elección óptima fue el tratamiento (2,4) bajo condiciones de pH 9 (medio alcalino débil), el cual cuenta con las condiciones más elevadas de contar con las concentraciones más elevadas de Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) y Bicarbonato de Sodio ($NaHCO_3$), factor más relevante de acuerdo al análisis estadístico para la variable de respuesta del experimento realizado (%Remoción de la DQO) con valores de 0,004M para ambas sustancias, respectivamente.

Es importante destacar que, en comparación con las condiciones de pH ácidas (pH 3) y pH ácido-neutras (pH 6), para los valores de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) los porcentajes de remoción de esta mostraron una variación más abrupta a medida que avanzaba el

proceso de tratamiento. Esto sugiere que, en condiciones de pH más básicas, el tratamiento se mantiene estable y ofrece un rendimiento continuo y eficiente.

Se considera que el tratamiento con peróxido de hidrógeno catalizado por bicarbonato de sodio es útil para el tratamiento de aguas industriales de curtidurías, ya que ayuda a eliminar parámetros como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) en proporciones mayores. Se estima que las concentraciones de peróxido de hidrógeno y bicarbonato de sodio deben ser mayores y mantener las condiciones de pH (ligeramente alcalinas) como indican otros estudios para conseguir una eliminación de DQO mucho mayor en este tipo de aguas industriales.

RECOMENDACIONES

En futuros proyectos de investigación relacionados con este tema, se sugiere considerar la implementación de procesos químicos previos al tratamiento experimental, como la floculación y coagulación. Esta recomendación surge a raíz de la elevada presencia de sólidos en las aguas residuales de las curtiembres. La inclusión de estos pasos preliminares puede ser fundamental para optimizar la eficacia del tratamiento posterior

Es importante llevar a cabo la evaluación del tratamiento en un régimen de flujo continuo y bajo condiciones reales de operación en campo. Esto permitirá resultados prácticos y directamente aplicables en la gestión de aguas residuales. A menudo, las tecnologías se evalúan en condiciones ideales de laboratorio, lo que dificulta el conocimiento acerca del comportamiento de la aplicación de los procesos avanzados de oxidación y sus beneficios en las fuentes generadoras de aguas residuales de la industria de curtiembres.

Así mismo, se subraya la importancia de mantener y calibrar periódicamente los equipos

utilizados en el proceso de tratamiento de aguas residuales. Este mantenimiento regular es esencial para garantizar la obtención de resultados confiables y consistentes a lo largo del tiempo.

BIBLIOGRAFIA

Aniyikaiye, T. E., Oluseyi, T., Odiyo, J. O., & Edokpayi, J. N. (2019). Physico-chemical analysis of wastewater discharge from selected paint industries in Lagos, Nigeria. *International journal of environmental research and public health*, 16(7), 1235.

<https://doi.org/10.3390/ijerph16071235>

Bes Monge, S., Torres-Pinto, A., Ribeiro, R. S., Silva, A. M. T., & Bengoa, C. (2018). Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales.

<https://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/136083/2/388266.pdf>

Buscio V., Marín M.J., Crespi M. y Gutiérrez-Bouzán C. (2015). Reuse of textile wastewater after homogenization–decantation treatment coupled to PVDF ultrafiltration membranes. *Chem. Eng. J.* 265, 122-128. DOI: 10.1016/j.cej.2014.12.057

Centro Nacional de Producción Más Limpia. (2004). Manual de Producción Más Limpia para la Industria de Curtiembres. Recuperado de <http://www.mpl.org.co/pdf/curtiembres.pdf>

Cango, C., & Alexandra, P. (2020). Recuperación de Cromo (III) mediante los métodos de electrocoagulación y precipitación en la empresa Tenería Díaz. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2006). Informe de Monitoreo de Calidad del Agua de los Ríos Cerrito y Cauca. Recuperado de <http://www.cvc.gov.co/documents/10184/100431/Informe+de+Monitoreo+de+Calidad+del+Agua+de+los+R%C3%ADos+Cerrito+y+Cauca/4d8b7fd0-9e12-4d58-a9e6-8c80d8e7e94c>

Cristancho, D. L., Pinto, L. M. & Tique, J. S. (2019). Evaluación de la eficiencia de un sistema de electrocoagulación en los vertimientos de curtiembres en el sector de Villapinzón (Cundinamarca). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12010/8466>.

Chacón, Y (2017). Análisis físico y químico de la calidad del agua.

Cuéllar, I. C. C., Cabra, J. R. V., Curbelo, M. Á. G., Martínez, D. A. V., & Valencia, E. R. (s/f). APLICACIONES Y GENERALIDADES DE UN ESPECTROFOTÓMETRO UV-VIS UV-1800 DE SHIMADZU. Edu.co. Recuperado el 18 de abril de 2023, de <https://editorial.universidadean.edu.co/media/acceso-abierto/aplicaciones-y-generalidades-de-un-espectrofotometro-uv-vis-uv-1800-ean.pdf>

Doumbi, R. T., Bertrand Noumi, G., Ngobtchok, B., & Domga. (2022). Tannery wastewater treatment by electro-Fenton and electro-persulfate processes using graphite from used batteries as free-cost electrode materials. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 5(100190), 100190. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100190>

Díaz, N. A., Antonio Bárcena Ruiz, J., Reyes, E. F., Cejudo, A. G., Novo, J. J., Peinado,

J. P., Meléndez-Valdés, F. T., & Fiñana, I. T. (s/f). 8. Espectrofotetría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. Uco.es. Recuperado el 18 de abril de 2023, de https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf

EMC=COSMOS, «La enciclopedia de la ciencia y tecnología en México,» 13 Octubre 2009. [En línea]. Available: http://www.izt.uam.mx/cosmosecm/VOCABULARIO_QUIMICA.html. [Último acceso: 5 Septiembre 2014].

Faouzi, A., Sghaier, R., & Bousselmi, L. (2013). Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments along the Bizerte Lagoon (Tunisia). *Water Quality, Exposure and Health*, 5(3), 137-146. DOI: 10.1007/s12403-013-0092-9

Farmani, B., Haddadexhodaparast, M. H., Hesari, J., & Aharizad, S. (2008). Determining optimum conditions for sugarcane juice refinement by pilot plant dead-end ceramic micro-filtration. *J. Agric. Sci*, 10, 351-357

Gogate, PR y Pandit, AB (2004). Una revisión de tecnologías imperativas para el tratamiento de aguas residuales I: tecnologías de oxidación en condiciones ambientales. *Avances en la investigación ambiental*, 8(3-4), 501-551.

Greenpeace. (2012). Nuevas evidencias de contaminación en la Cuenca Matanza-Riachuelo.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.021>

<https://www.greenpeace.org/archive-argentina/es/2012/10/16/nuevas-evidencias-de-contaminacion-en-la-cuenca-matanzariachuelo/>

Informe Social Y Medioambiental. (2020). Euroleather.com. Recuperado el 23 de octubre de 2023, de

<https://www.euroleather.com/doc/SER/Industria%20Europea%20del%20Curtido%20-%20Informe%20Social%20y%20Medioambiental%202020%20-%20ES%20web.pdf>

Jawad, A., Lu, X., Chen, Z., & Yin, G. (2014). Degradation of chlorophenols by supported Co-Mg-Al layered double hydroxide with bicarbonate activated hydrogen peroxide. *The Journal of Physical Chemistry. A*, 118(43), 10028–10035.

<https://doi.org/10.1021/jp5085313>

Jiménez, B. (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: UNAM y FEMISCA.

Kan, H., Soklun, H., Yang, Z., Wu, R., Shen, J., Qu, G., & Wang, T. (2020). Purification of dye wastewater using bicarbonate activated hydrogen peroxide: Reaction process and mechanisms. *Separation and Purification Technology*, 232(115974), 115974.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115974>

Lazo Cuentas, E. A. (2017). *Evaluación de la contaminación ambiental generada por*

efluentes industriales en el proceso productivo de una curtiembre de mediana capacidad del parque industrial de Rio Seco, Arequipa. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Medina, G. (2019). Desarrollo de métodos de extracción empleando líquidos iónicos y polímeros monolíticos para la determinación de contaminantes ambientales en agua de río (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).

Mizzouri, N. S., & Shaaban, M. G. (2013). Kinetic and hydrodynamic assessment of an aerobic purification system for petroleum refinery wastewater treatment in a continuous regime. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol 83, 1-9.

Oturan, MA y Aaron, JJ (2014). Procesos avanzados de oxidación en el tratamiento de aguas/aguas residuales: principios y aplicaciones. Una revisión. *Reseñas críticas en ciencia y tecnología ambientales*, 44(23), 2577-26

Pan, H., Gao, Y., Li, N., Zhou, Y., Lin, Q., & Jiang, J. (2021). Recent advances in bicarbonate-activated hydrogen peroxide system for water treatment. *Chemical Engineering Journal* (Lausanne, Switzerland: 1996), 408(127332), 127332.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127332>

Pinto, M.B., Samanamud, G.R.L., Baston, E.P., França, A.B., Naves, L.L.R., Loures, C.C.A., Naves, F.L., 2019. Multivariate and multiobjective optimization of tannery industry effluent treatment using *Musa sp* flower extract in the coagulation and flocculation process. *J.*

Clean. Prod. 219, 655–666.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.060>.

Purwono, A. R., Hibbaan, M., & Budihardjo, M. A. (2017). Ammonia-nitrogen (NH₃-N) and ammonium-nitrogen (NH₄⁺-N) equilibrium on the process of removing nitrogen by using tubular plastic media. *J Mater Environ Sci*, 8, 4915-4922.

Parra, C., & Marcela, D. (2019). Evaluación ambiental asociada a los vertimientos de aguas residuales generados por una empresa de curtiembres, en la Cuenca del Río Aburrá. Universidad de Manizales.

Ribeiro, A. R., Nunes, O. C., Pereira, M. F. R., & Silva, A. M. T. (2015). An overview on the advanced oxidation processes applied for the treatment of water pollutants defined in the recently launched Directive 2013/39/EU. *Environment International*, 75, 33–51.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.027>

Saxena, G., Kishor, R., Bharagava, R.N., Das, P., Gupta, P.K., Kumar, N., 2021. Emerging green technologies for biological treatment of leather tannery chemicals and wastewater. In: *Bioremediation for Environmental Sustainability*. Elsevier, pp. 435–457.

<http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-820524-2.00018-3>.

Silva, M. J., & Salinas Morales, D. (2022). La contaminación proveniente de la industria

curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana. Revista Científica UISRAEL, 9(1), 69-80.

Sodhi, V., Bansal, A., Jha, M.K., 2020. Minimization of excess bio-sludge and pollution load in oxic-settling-anaerobic modified activated sludge treatment for tannery wastewater. J. Clean. Prod. 243, 118492. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118492>

Soto, E. (2015). El calentamiento global y la degradación de la ozonfera (Un análisis científico desde la diversidad de criterios). Revista Integra Educativa, 8, 43-54.

Urbano Noguera, R. D. Evaluación de la adsorción de cromo hexavalente y fenton heterogéneo para el tratamiento de aguas residuales sintéticas de curtiduría utilizando nanopartículas de hierro soportadas en cascarilla de café.

Urbina-Suarez, N. A., Salcedo-Pabón, C. J., López-Barrera, G. L., García-Martínez, J. B., Barajas-Solano, A. F., & Machuca-Martínez, F. (2023). Using the response surface methodology to treat tannery wastewater with the bicarbonate-peroxide system.

ChemEngineering, 7(4), 62. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7040062>

Vilardi, G., Rodríguez-Rodríguez, J., Ochando-Pulido, J. M., Verdone, N., Martinez-Ferez, A., & Di Palma, L. (2018). Large Laboratory-Plant application for the treatment of a Tannery wastewater by Fenton oxidation: Fe(II) and nZVI catalysts comparison and kinetic modelling. Process Safety and Environmental Protection : Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B, 117, 629–638.

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.007>

Wang D., He, S., Shan, C., Ye, Y., Ma, H., Zhang, X., Zhang, W., Pan, B., 2016.
Cehomium speciation in tannery effluent afther alkanine precipitation: Isolation and
characterization. J, Haxard. Mater. 299,664-674.