



FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
RECUPERACIÓN DE CROMO HEXAVALENTE POR OXIDACIÓN QUÍMICA EN
LODOS INDUSTRIALES DE GALVANIZADO, 2021

Línea de Investigación

Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación.

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor(a):

Juscamaita Santos Yenny Ana

Asesor:

Vásquez Aranda, Omar Ahuber

Jurado:

Rojas León, Gladys

Leon Guillen Rogelia

Reyna Mandujano, Samuel Carlos

Lima - Perú

2022

Dedicatoria

A Mi tesis la dedico con todo mi amor y mi cariño a mis padres Marina Santos de la Cruz y Raúl Juscamaita Yaranga por su sacrificio y esfuerzo, por darme una carrera para mi futuro y por creer en mi capacidad, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han estado brindándome su comprensión, cariño y amor.

A mis amadas hermanas quienes con su palabra de aliento no me dejaban decaer para que siguiera adelante y siempre sea perseverante y cumpla con mis ideales.

A mis amigos presentes y pasados, quienes sin esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos, alegrías y tristezas y a todas aquellas personas que durante este tiempo estuvieron apoyándome de alguna u otra forma y lograron que este sueño se haga realidad..

Reconocimiento:

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme tener tan buena experiencia y los conocimientos adquiridos en los años que estude. Gracias a mi universidad por permitirme convertirme en ser una profesional en lo que tanto me apasiona, gracias a cada maestro que hizo parte de este proceso integral de formación, que deja como producto terminado este grupo de graduados, y como recuerdo y prueba viviente en la historia, esta tesis, que perdurará dentro de los conocimientos y desarrollo de las demás generaciones que están por llegar.

Finalmente agradezco a quien lee este apartado y más de mi tesis, por permitir a mis experiencias, investigaciones y conocimientos, incurrir dentro de su respetado de información mental.

Índice

I.	INTRODUCCIÓN	11
1.1.	Descripción y formulación del problema.....	12
1.1.1.	Problema general	14
1.1.2.	Problemas específicos	14
1.2.	Antecedentes	14
1.2.1.	Nacionales	14
1.2.2.	Internacionales	15
1.3.	Objetivos	18
1.3.1.	Objetivo General	18
1.3.2.	Objetivos específicos	19
1.4.	Justificación	19
1.4.1.	Justificación Teórica	19
1.4.2.	Justificación Metodológica	19
1.4.3.	Justificación Social	19
1.5.	Hipótesis	20
1.5.1.	Hipótesis General	20
1.5.2.	Hipótesis específicas	20
II.	MARCO TEÓRICO	21
2.1.	Bases teóricas sobre el tema de investigación	21
2.1.1.	Industria galvánica	21
2.1.2.	Lodos de galvanizado	22
2.1.3.	Contaminación por Cromo Hexavalente.....	23
2.1.4.	Tratamiento por oxidación química.	24

2.2.	Marco conceptual.....	26
2.2.1.	Cromo Hexavalente (C°)	26
2.2.2.	Potencial de Hidrógenos (pH).....	26
2.2.3.	Conductividad Eléctrica)	27
2.3.	Marco Legal Ambiental	28
III.	MÉTODO	30
3.1.	Tipo de investigación.....	30
3.2.	Ámbito temporal y espacial	30
3.3.	Variables	30
3.4.	Población y muestra.....	32
3.5.	Instrumentos.....	32
3.6.	Procedimientos.....	32
3.6.1.	Etapa 1 - Búsqueda, recolección y análisis del diseño metodológico	32
3.6.2.	Etapa 2 - Etapa experimental	33
3.7.	Análisis de datos	35
3.8.	Consideraciones éticas	35
IV.	RESULTADOS.....	36
4.1.	Caracterización físico química de lodo resultante de la industria Galvanica ..	36
4.1.1.	Caracterización del Lodo	36
4.2.	Resultados con diferentes dosis en los ensayos	37
4.2.1.	Resultados de recuperación de Cromo Hexavalente.....	37
4.3.	Análisis Estadístico.....	43
4.4.	Contrastación de Hipótesis	49

V.	DISCUSION DE RESULTADOS	51
VI.	CONCLUSIONES	54
VII.	RECOMENDACIONES	55
VIII.	REFERENCIAS	56
IX.	ANEXO	63
	9.1. Anexo A: Registro fotográfico.....	63

Índice de Tablas

Tabla 1	31
Tabla 2	36
Tabla 3	37
Tabla 4	38
Tabla 5	38
Tabla 6	39
Tabla 7	40
Tabla 8	40
Tabla 9	41
Tabla 10	42
Tabla 11	42
Tabla 12	43
Tabla 13	49

Índice de Figuras

Figura 1	25
Figura 2	46
Figura 3	47
Figura 4	48
Figura 8	63

Resumen

El presente estudio tuvo como finalidad recuperar los niveles de cromo hexavalente para reducir la dispersión del contaminante determinándose en muestras del cual se consideró 9 ensayos en la cual se realizan 3 corridas para cada temperatura de 40°C, 50°C y 60°C, donde varia para cada temperatura una dosis de H₂O₂/l, iniciando con 70, 50 y 90 g de peróxido de hidrógeno para 50°C, y así sucesivamente para las siguientes temperaturas, hasta encontrar finalmente la dosis óptima y las eficiencias alcanzadas para cada uno de los tratamientos realizados. De los resultados la temperatura y dosis óptima para la recuperación de Cromo Hexavalente fue de 60°C con una dosis de 90 g de H₂O₂/l, pudiendo afirmar que la dosis óptima de peróxido de hidrógeno es de 90 g; además es un parámetro esencial para la recuperación eficiente del cromo (VI), ya que, independientemente de la temperatura en concentraciones de 90 g de H₂O₂/l se presentaron mejores recuperaciones del metal pesado. Siendo en promedio la mayor recuperación de cromo en un 15.93, 18.02, 19.83, 21.62 y 23.43 con dosis de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 de H₂O₂ (ml) a una temperatura de 60 °C.

Palabra Clave: Cromo hexavalente, industrias galvánicas.

Abstract

The present study had the purpose of recovering the levels of hexavalent chromium to reduce the dispersion of the pollutant determined in samples of which 9 trials were considered in which 3 runs were carried out for each temperature of 40°C, 50°C and 60°C, where a dose of H₂O₂/l varied for each temperature, starting with 70, 50 and 90 g of hydrogen peroxide for 50°C, and so on for the following temperatures, until finally finding the optimum dose and the efficiencies reached for each of the treatments carried out. From the results, the optimum temperature and dose for the recovery of Hexavalent Chromium was 60°C with a dose of 90 g of H₂O₂/l, being able to affirm that the optimum dose of hydrogen peroxide is 90 g; it is also an essential parameter for the efficient recovery of chromium (VI), since, independently of the temperature at concentrations of 90 g of H₂O₂/l, better recoveries of the heavy metal were presented. On average, the highest chromium recovery was 15.93, 18.02, 19.83, 21.62 and 23.43 with doses of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5 of H₂O₂ (ml) at a temperature of 60 °C.

Keyword: hexavalent chromium, galvanic industries.

I. INTRODUCCIÓN

Esta tesis desarrolla un estudio de investigación sobre “Recuperación De Cromo Hexavalente por oxidación química En Lodos Industriales De Galvanizado, 2021” ya que, durante los procesos de galvanización se acumulan grandes cantidades de efluentes líquidos con alta carga de contaminantes como lo es el cromo hexavalente y este presenta una alta toxicidad que presenta impacto ambiental y de salud, debido a ello se busca recuperar los niveles de cromo hexavalente para reducir la dispersión del contaminante hacia el suelo, aire y agua.

La preocupación que se genera por recuperar los niveles de Cromo Hexavalente de los lodos resultantes de la industria de galvanizado, se da por el aumento de los niveles de vertidos de las industrias de la galvanoplastia, así como de otras operaciones de procesamiento/refinación de metales en el sector a pequeña y gran escala, los cuales están cargados de cantidades considerables de iones metálicos tóxicos. Además, el informe de la Comisión Europea afirma que estas emisiones contienen altas cantidades de metales pesados que son cancerígenos, mutagénicos y teratogénicos para las formas de vida

El cromo hexavalente es uno de los contaminantes más dañinos, es altamente móvil y un fuerte oxidante, además, un carcinógeno potencial que lo hace mil veces más tóxico que el Cr(III); en los efluentes de la industria de la galvanoplastia contienen concentraciones de Cr(VI) de hasta 200 mg L.

La presente tesis se encuentra organizada de la siguiente manera:

- Partes iniciales: Carátula, Dedicatoria, Agradecimiento, Índice e Introducción. El contenido temático está dividido en los siguientes capítulos:
- Capítulo I: Introducción, en la cual se describe el problema, formulación del problema general y problemas específicos, la búsqueda de los antecedentes nacionales e internacionales, presentación del objetivo general y objetivos específicos, así como la justificación e importancia del presente estudio.

- Capítulo II: Marco teórico. En la cual se detallan las bases teóricas sobre el tema de investigación.
- Capítulo III: Método. Que enfocan toda la metodología de la investigación: tipo de Investigación, ámbito temporal y espacial, variables, población y muestra, técnicas e instrumentos para la recolección de datos, procedimientos, análisis de datos y consideraciones éticas.
- Capítulo IV: Aspectos administrativos. Que incluye el cronograma de actividades, presupuesto y fuentes de financiamiento.
- Capítulo V: Discusión de resultados. Se realiza una breve comparación con los antecedentes.
- Capítulo VI: Conclusiones.
- Capítulo VII: Recomendaciones. Sugerencias y recomendaciones para futuras investigaciones.
- Capítulo VIII: Referencias. Se muestran las Referencias bibliográficas utilizadas en la presente investigación.
- Capítulo IX. Anexos. Se anexa información que integra a la investigación.

1.1. Descripción y formulación del problema

Los efluentes industriales basados en cromo (IV) se han convertido en una amenaza mundial; ya que, es uno de los compuestos más tóxicos que se encuentran en los efluentes industriales de las industrias textil, de refinado de petróleo, de chapado de metales, el curtido de pieles, las industrias de pinturas, pigmentos y galvanoplastia.

De acuerdo con Chen et al. (2020), el lodo de galvanoplastia que contiene cromo (Cr) es un residuo sólido peligroso y tiene un efecto perjudicial para la salud humana y el medio ambiente.

El Cr (VI) existe en forma acuosa como un ion tetraédrico de cromato (CrO_4^{2-}); donde el 35% del cromo utilizado en la galvanización se vierte en los efluentes es como Cr (VI)

hexavalente o cromo trivalente. El Cr (VI) tiene un efecto oxidante y, además, proporciona radicales libres que ayudan a reducir el Cr (VI) a cromo trivalente Cr (III), pero el Cr (VI) es 100 veces más virulento que el Cr (III). Este es de naturaleza hidrofílica, tiene afinidad por el agua, movilidad y se reduce fácilmente.

El cromo es necesario para el metabolismo de los carbohidratos, pero en concentraciones más altas, tiende a ser dañino. Los iones hexavalentes de cromo Cr (VI) prevalecen y su toxicidad causa preocupaciones ambientales y de salud pública.

Los compuestos de cromo hexavalente [Cr (VI)] son conocidos desde hace tiempo como carcinógenos ocupacionales que causan cánceres de pulmón, nasales y de senos paranasales y la exposición al Cr (VI) también provoca enfermedades no cancerígenas como asma, bronquitis; así mismo, el Cr (VI) afecta a la vida de las plantas verdes y entra en la cadena alimentaria humana generando que el cromo provoque ampollas en la piel, alteraciones renales, pústulas, aberración cromosómica perceptiva, lesión celular, disfunción hepática, deterioro de la cognición, hemólisis, generación de radicales hidroxilo, reducción de las enzimas antioxidantes y la actividad motora, y clorosis, sensibilización de la piel y dermatitis alérgica de contacto.

De acuerdo con Yusta García et al., (2017), un número importante de muestras de agua en el Perú presenta niveles de cromo hexavalente que no cumplen con las normas peruanas e internacionales sobre el agua. Generando el vertido de agua producida en los ríos de la Amazonia peruana un peligro a la población indígena y a la vida silvestre durante varias décadas.

La exposición al Cr(VI) puede producirse, por ejemplo, en actividades de soldadura, en la galvanoplastia de Cr(VI) y en otras actividades de tratamiento de superficies, como la aplicación de pintura y la eliminación de pintura vieja que contiene Cr(VI). De acuerdo con ello, en los trabajos de galvanizado el límite de exposición admisible (PEL) de la OSHA para

el Cr(VI) es de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como media ponderada en el tiempo de 8 horas y la OSHA regula la exposición de los trabajadores a esta sustancia peligrosa en virtud de su norma sobre el cromo (VI), 29 CFR 1910.1026 (Jias et al., 2020).

1.1.1. Problema general

- ¿Cuál es la recuperación de los niveles de Cromo Hexavalente por procesos de oxidación química presente en los lodos generados en la industria de galvanizado?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la recuperación de los niveles de Cromo Hexavalente por procesos de oxidación química presente en los lodos generados en la industria de galvanizado?.
- ¿Cuáles son los parámetros fisicoquímicos en los lodos resultantes de la industria de galvanizado?
- ¿Cuáles son las concentraciones de Cromo Hexavalente recuperado en los lodos resultantes de la industria de galvanizado?

1.2. Antecedentes

1.2.1. Nacionales

Tejada et al. (2015), en su investigación sobre “ABSORCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN SOLUCIONES ACUOSAS POR CASCARAS DE NARANJA (CITRUS SINENSIS)”, planteó como su objetivo principal estudiar la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) como un adsorbente de Cr (VI) en soluciones acuosas. Donde obtuvo como resultado que el residuo agroindustrial usado presenta una remoción de 66,6 % de Cr (VI) en un tiempo de 120 min. El fenómeno fue descrito de mejor manera por la isoterma de Langmuir, al mostrar una la capacidad de adsorción de 16,66 mg/g. La cinética siguió el comportamiento de adsorción de pseudo-segundo orden. Pudiendo concluir que las condiciones óptimas para la

adsorción del Cromo hexavalente se dan mediante un pH 3 y un tamaño de partícula de 0,425 mm. Y son efectivas para recuperar cromo (VI) de las aguas industriales.

Alonso et al (2016), en su investigación “LA POLIANILINA POROSA CON PLANTILLA DE CÉLULAS BACTERIANAS FACILITÓ LA DESINTOXICACIÓN Y LA RECUPERACIÓN DEL CROMO HEXAVALENTE”, teniendo como objetivo la recuperación del cromo hexavalente aplicando células bacterianas para servir como un nuevo agente formador de poros verdes y una plantilla para fabricar polianilina porosa mediante polimerización oxidativa in situ. Dicha investigación indica que se logró una eliminación eficiente tanto en soluciones ácidas como neutras debido a su alta capacidad de almacenamiento de H⁺. Más del 90% de Cr (VI) se puede reducir a cromo trivalente (Cr (III)) por oxidación de grupos amida en soluciones ácidas y neutras. Estos iones Cr (III) pueden ser adsorbidos por Bac PANI simultáneamente, como resultado de la inversión de la carga superficial negativa después del tratamiento de Cr (VI); entonces Bac PANI se puede recuperar fácilmente en una solución ácida

1.2.2. Internacionales

Rangel et al. (2015), en su estudio “CARACTERIZACIÓN Y RECUPERACIÓN DE SALES DE CROMO HEXAVALENTE DE UN PASIVO AMBIENTAL”, tiene como objetivo recuperar cromo hexavalente a partir de un residuo industrial regulado por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Para lo cual presentó como metodología un muestreo aleatorio simple. Obteniendo una eficiencia del 80 % en remoción de cromo hexavalente y por tanto una recuperación de 33 g/kg como CaCrO₄ (cromato de calcio). La concentración del Cr+6 presente en los lixiviados fue cuantificada por espectrometría de UV-Vis a una $\lambda = 540$ nm mientras que en la caracterización de las sales recuperadas por evaporación se empleó la técnica de fluorescencia de rayos X. Concluyendo que las sales recuperadas pueden ser utilizadas como

materia prima de uso industrial ya que sus principales elementos son Cr, Ca, Fe, y Mg, cuya concentración está en función de la disolución de lavado.

Gilhtra et al. (2021), en su estudio “TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO DE AGUA DE BAÑO DE CROMO DE ALTA RESISTENCIA: UN ESTUDIO COMPARATIVO PARA LAS MEJORES CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO”, tuvo como objetivo tratar el cromo hexavalente mediante un tratamiento electroquímico, para lo cual realizó como metodología de estudio experimentos preliminares utilizando aguas residuales sintéticas para optimizar los parámetros del proceso, a saber. pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento variando sistemáticamente estas variables según el enfoque de la metodología de superficie de respuesta (RSM). Donde los resultados mostraron que se logró una eficiencia de eliminación de cromo del 97,5% en condiciones de proceso optimizadas, es decir, pH 5, densidad de corriente 68 A / m² y tiempo de tratamiento 17 min. Concluyendo que la integración de la reducción-precipitación antes del tratamiento electroquímico es otra opción óptima.

Chirila et al. (2014), tuvo como investigación "OBSERVACIONES SOBRE DESARROLLOS RECIENTES EN LA REACCIÓN QUÍMICA DE ÓXIDO-REDUCCIÓN UTILIZADA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES", presentó como objetivo realizar la reacción química de óxido-reducción recuperar el cromo hexavalente del medio acuoso, presentando como resultados se obtuvo que el cromo hexavalente se redujo a cromo trivalente utilizando el metabisulfito de sodio como agente oxidante, en segundo lugar, el cromo trivalente se eliminó pasándolo a un Cr (OH)₃ precipitado en un medio alcalino; después de la sedimentación, se eliminó la suspensión, el agua así tratada se puede descargar en cualquier efluente.

Sibi et al. (2016), presentó como estudio de investigación “BIOSORCIÓN DE CROMO DE EFLUENTES INDUSTRIALES DE GALVANOPLASTIA Y

GALVANIZACIÓN EFLUENTES INDUSTRIALES EN CONDICIONES EXTREMAS UTILIZANDO CHLORELLA VULGARIS”, en el cual tuvo como objetivo utilizar biomasa seca de *Chlorella vulgaris* como biosorbente para la eliminación de Cr(VI) de efluentes de la industria de galvanoplastia y galvanización en función de la dosis de biosorbente, el tiempo de contacto, el pH, la salinidad y la concentración inicial de iones metálicos. Presentando como resultado que la mayor eliminación de Cr con una concentración de 81,3 mg/L se observó con un valor de conductividad eléctrica (CE) de 2,893 mS/cm; además, los resultados sugieren que la biomasa de *C. vulgaris* podría considerarse un prometedor biosorbente de bajo coste para la eliminación de Cr(VI) de los efluentes de la industria de galvanoplastia y galvanización.

Li et al. (2008), desarrolló un estudio de investigación “UNA NUEVA TECNOLOGÍA PARA LA BIOSORCIÓN Y RECUPERACIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PERLAS MAGNÉTICAS BIOFUNCIONALES”, teniendo como objetivo desarrollar una técnica aplicada para la remoción y recuperación de metales pesados en aguas residuales. Para lo cual realizó la aplicación de la tecnología de separación magnética para adsorber y recuperar el Cr (VI) mediante perlas magnéticas biofuncionales. Obteniendo que las perlas aún mantuvieron las características predominantes de adsorción, recuperación y magnetismo después de cinco ciclos de adsorción-desorción. Pudiendo concluir que las perlas exhibieron rendimientos superiores en limpieza, separación y recuperación de Cr (VI) y el potencial de perspectiva en la aplicación. y NH- jugaron un papel importante en la adsorción de Cr (VI).

Bachman et al. (2010), “Desarrolló un proyecto titulado “ESTUDIO DE VIABILIDAD SOBRE LA RECUPERACIÓN DE CROMO HEXAVALENTE DE UN EFLUENTE DE GALVANOPLASTIA SIMULADO UTILIZANDO ALAMINE 336 Y ACEITE DE PALMA REFINADO” con el objetivo de probar la idoneidad de Alamine 336 y un diluyente renovable y biodegradable, es decir, aceite de palma refinado, en la recuperación de cromo hexavalente

de efluentes de galvanoplastia concentrados sintéticos utilizando el proceso de intercambio iónico líquido aniónico (ALIX). Obteniendo como resultado que alamine 336: relaciones molares de diluyente de hasta 1: 1 se pueden llevar a cabo con aceite de palma refinado en un rango de pH de 1 a 4 con una eficiencia de extracción en un solo paso de hasta el 95%, pudiendo concluir que los hallazgos de este estudio brindan un paso significativo hacia un proceso de recuperación de cromo más ecológico y seguro en la industria de la galvanoplastia, pero también en los laboratorios analíticos comerciales y académicos.

Daneshvar et al. (2019), desarrolló un proyecto de investigación titulado “ELIMINACIÓN DE CROMO HEXAVALENTE DEL AGUA MEDIANTE MATERIALES A BASE DE MICROALGAS: ESTUDIOS DE ADSORCIÓN, DESORCIÓN Y RECUPERACIÓN”, donde su objetivo fue realizar una comparación exhaustiva del potencial de diferentes materiales basados en microalgas para la eliminación del cromo hexavalente (Cr (VI)) del agua. Obteniendo que los materiales probados, el biocarbón de microalgas mostró la mayor eficiencia de eliminación (100%) de Cr (VI). Las capacidades de adsorción estimadas de monocapa más altas fueron 23,98, 25,19 y 24,27 mg / ga 5, 22 y 35 ° C, respectivamente. Así mismo más del 97% del Cr (VI) desorbido se recuperó en menos de 10 min por BaCl₂. Concluyendo que los materiales de microalgas no vivas son más efectivos que las células vivas en la remoción y recuperación de Cr (VI) del agua.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Recuperar los niveles de Cromo Hexavalente por procesos de oxidación química presente en los lodos generados en la industria de galvanizado.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los parámetros fisicoquímicos en los lodos resultantes de la industria de galvanizado.
- Determinar las concentraciones de Cromo Hexavalente recuperado en los lodos resultantes de la industria de galvanizado.
- Determinar la dosis y temperatura óptima para la recuperación de Cromo Hexavalente presente en los lodos resultantes de la industria de galvanizado.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación Teórica

Con esta investigación se pretende recuperar los niveles de Cromo Hexavalente por procesos de oxidación química presente en los lodos generados en la industria de galvanizado, así mismo caracterizar los parámetros fisicoquímicos en los lodos, determinar las concentraciones de Cromo (VI) recuperado y determinar la dosis y temperatura óptima para poder recuperar el Cromo (VI).

1.4.2. Justificación Metodológica

Este estudio de investigación busca conseguir el rigor científico obteniendo la validez en base a las variables propuestas y los resultados generados con el procesamiento y recolección de la información.

1.4.3. Justificación Social

Este estudio se justifica debido a la necesidad de reducir la contaminación por cromo hexavalente generado por la industria del galvanizado, ya que, debido a su alta toxicidad y al amplio uso industrial del cromo, se tiene la necesidad de buscar una propuesta amigable con el medio ambiente y eficaz es su recuperación, para lo cual se propone la oxidación química.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

- La oxidación química presenta recuperación de cromo hexavalente en lodos de galvanizado de la industria galvánica, 2021.

1.5.2. Hipótesis específicas

- Los parámetros fisicoquímicos presentan recuperación de los niveles de cromo hexavalente en los lodos resultantes de la industria de galvanizado.
- Las concentraciones de Cromo Hexavalente presentan recuperación de sus niveles en los lodos resultantes de la industria de galvanizado.
- La dosis y temperatura óptima presentan recuperación de Cromo Hexavalente en los lodos resultantes de la industria de galvanizado

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1. *Industria galvánica*

El contenido de metales pesados en los lodos y las aguas residuales es una de las principales fuentes de contaminación en la industria galvánica (Panda, 2017).

La industria de la galvanización en caliente es una de las que produce numerosos contaminantes y provoca una grave contaminación del medio ambiente; ello debido a que la eliminación de los óxidos de las superficies metálicas mediante la limpieza con una solución ácida es uno de los pasos clave en las industrias de acabado de metales, un proceso denominado "decapado" (Arsenovic et al., 2012).

Las soluciones de decapado se consideran gastadas cuando la concentración de ácido en ellas disminuye en un 75-85%, lo que va acompañado de un aumento del contenido de metal. La composición de los baños gastados del decapado del acero en las plantas de galvanización en caliente difiere mucho según el periodo de uso, pero contienen principalmente zinc (II) (hasta 120 g/l), hierro (principalmente hierro (II), hasta 204 g/l), trazas de plomo, cromo y otros metales pesados (máx. 500 mg/l), y también ácido clorhídrico (10-80 g/l) [6,9,10]. La solución mixta de residuos metálicos puede ser mucho más tóxica que la solución simple del metal correspondiente de mayor concentración (Xia et al., 2020).

En la industria del galvanizado la corrosión galvánica es la disolución anódica de un metal acelerada por un material catódico acoplado mediante el conocido efecto galvánico, teóricamente se puede predecir a partir de las curvas de polarización del metal y el cátodo de acuerdo con la teoría del potencial mixto (Song et al., 2021).

La corriente galvánica (i_g), que representa la velocidad de corrosión galvánica del ánodo, se puede expresar de acuerdo con Song et al. (2004), mediante la fórmula nº 1:

$$I_g = (E_c - E_a) / (R_a + R_c + R_s) \dots\dots\dots \text{(Fórmula 1)}$$

donde E_c y E_a son los OCP del cátodo y el ánodo, R_c y R_a son la resistencia a la polarización del cátodo y la resistencia a la polarización del ánodo, y R_s es la resistencia de la solución entre el ánodo y el cátodo.

2.1.2. Lodos de galvanizado

El galvanizado es un proceso utilizado para proteger los objetos metálicos de la corrosión, mejorar la resistencia al desgaste o con fines ornamentales; el proceso consiste en la deposición electrolítica de una fina capa de metal en la superficie de objeto metálico. Debido a sus propiedades, los revestimientos galvánicos se utilizan en muchas industrias: producción de equipos eléctricos, industria metalúrgica, maquinaria (Innocenzi et al., 2020).

En general, la industria galvánica ofrece pasos de desengrase, galvanización, bruñido y decapado de materiales, que utilizan una gran cantidad de agua de proceso (Pinto et al., 2021). Las aguas residuales generadas son un problema importante que gestionar, debido a la dificultad de conseguir emisiones estándar; también los lodos galvánicos que se forman durante la depuración de las aguas residuales se consideran los residuos industriales más tóxicos (Makisha y Yunchina, 2017).

El lodo de galvanoplastia (ES) es un residuo generado por la industria de la galvanización y es altamente tóxico porque contiene metales pesados; donde el lodo galvanizado se deriva comúnmente de la neutralización y coagulación de los efluentes de galvanoplastia y son los residuos sólidos típicos producidos por las plantas de galvanización y tratamiento de superficies (Mao et al., 2019).

Los lodos galvanizados se consideran en general residuos peligrosos debido a su considerable nivel de metales pesados como el cromo hexavalente (Haccuria et al., 2017).

2.1.3. Contaminación por Cromo Hexavalente.

Las industrias metalúrgicas, las curtidorías, la fabricación de pinturas y las refinerías de petróleo se encuentran entre las diversas actividades humanas que descargan Cr (VI) en el medio ambiente (Azeez et al., 2021).

Qian et al. (2019), señala que, el cromo hexavalente [Cr (VI)] tiene amplias aplicaciones en las industrias, y la exposición ocupacional a largo plazo al Cr (VI) puede provocar carcinoma de pulmón entre otros cánceres; esto debido a que el cromo hexavalente es un importante carcinógeno laboral y se ha demostrado que causa cáncer en los seres humanos (Javanmard et al., 2020).

También se han observado asociaciones positivas entre la exposición al Cr(VI) y el cáncer de nariz y senos nasales, donde la toxicidad de los compuestos de cromo depende de su estado de oxidación (IARC, 2012).

La Agencia para las Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) ha declarado que el cromo es la séptima sustancia más peligrosa entre los 20 contaminantes de metales pesados, además, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer ha clasificado el Cr como el carcinógeno número 1 (Brasili et al., 2020).

La exposición a la contaminación por Cr en el aire provoca enfermedades respiratorias, daños oculares y bronquitis crónica o alérgica tuberculosis pulmonar (Abubakar I. et al., 2018). La concentración permitida de Cr(VI) en el aire según la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) es de 5 mgm³ y el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) recomienda 1 mgm³ como límite de seguridad (World Health Organization, 2016).

El medio ambiente (EPA) ha recomendado que el límite de seguridad de Cr(VI) en el agua es de 100mgL¹ (Landrigan et al., 2017).

Sin embargo, el suelo, el agua y el aire que rodean a las industrias de curtidoría, la minería y la metalurgia superan los límites de Cr(VI); además, los efluentes de estas industrias

se vierten en los ríos a los ríos, contaminando así el agua utilizada para el riego y la potable (Van Brusselen et al., 2020).

Por tal motivo el cromo (VI) es uno de los principales elementos tóxicos presentes en las muestras ambientales (Mane et al., 2016).

2.1.4. Tratamiento por oxidación química.

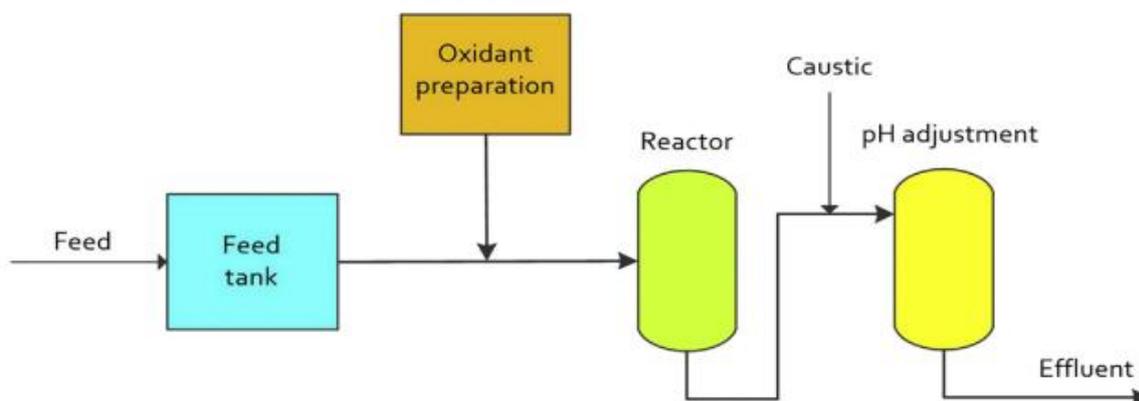
Los lodos generados por los procesos galvánicos contienen altas concentraciones de metales pesados sustancias tóxicas y tensioactivos, y pueden considerarse uno de los residuos más contaminantes y difíciles de depurar (Pervov et al., 2015). Por ello, este tipo de efluentes líquidos requieren necesariamente un tratamiento para reducir la concentración de contaminantes y ajustarse a los parámetros de la ley (Elena y Igor, 2015).

El método químico se lleva a cabo mediante la transferencia de iones de metales pesados a compuestos poco solubles (hidróxidos o carbonatos básicos) con la neutralización de las aguas residuales mediante reactivos alcalinos (Farooqi et al., 2021).

Siendo la tecnología de oxidación química utilizada para recuperar cromo hexavalente de soluciones acuosas (Kononova et al., 2019).

La oxidación química elimina el color, el olor, los compuestos orgánicos y los compuestos inorgánicos del agua producida mediante la aplicación de una serie de oxidantes y catalizadores. Los oxidantes más utilizados son el cloro, el ozono, el oxígeno, el peróxido y el permanganato, entre otros (Villegas et al., 2016).

La oxidación química se refiere al uso de reactivos de oxidación como peróxido de hidrógeno, dióxido de cloro y ozono para la reducción de DQO residual, compuestos no biodegradables y compuestos orgánicos traza como se muestra en la figura n° 1:

Figura 1*Sistema típico de oxidación química*

Extraído de: Jafarinejad S. (2017)

De acuerdo con la figura 1, se puede observar un sistema típico de oxidación química, donde la utilización de este sistema no es común en las EDAR de la industria petrolera, pero es aplicable a arroyos pequeños y concentrados, donde los procesos de oxidación biológica convencionales no son factibles.

En otras palabras, cuando las aguas residuales contienen compuestos recalcitrantes altamente tóxicos como la fracción aromática de los compuestos orgánicos disueltos y el uso del proceso biológico no es adecuado, la aplicación de este sistema puede ser eficaz para degradar estos compuestos (Chkili et al., 2017).

Así mismo, de acuerdo con Mostafa H. et al. (2018), los AOPs se refieren a procesos oxidativos en los que el radical hidroxilo ($\text{OH}\bullet$) se forma in situ a partir de compuestos oxidantes como O_2 , O_3 , H_2O_2 u otros oxidantes (radicales sulfatos, permanganato hipoclorito y dióxido de cloro), con o sin catalizador y/o en presencia de recursos energéticos como la electroquímica ultravioleta artificial, luz solar y ultrasonidos. Incluso aunque estos enfoques utilizan diversos mecanismos de reacción, todos comparten la producción de radicales hidroxilos (García y Hodaifa, 2017).

2.2. Marco conceptual

Para llevar a cabo la recuperación de los niveles de Cromo Hexavalente por procesos de oxidación química presente en los lodos generados en la industria de galvanizado, se tomaron en cuenta los parámetros fisicoquímicos del lodo, los cuales se detallan en los puntos siguientes:

2.2.1. Cromo Hexavalente (C[•])

El cromo hexavalente (Cr (VI)) es un metal pesado tóxico comúnmente utilizado como agente oxidante para la producción de acero inoxidable, soldadura, producción de pigmento de cromo y cromado (Wilson Frank, 2019).

Debido a su uso industrial generalizado, se han planteado preocupaciones con respecto a la contaminación ambiental y la exposición ocupacional al Cr (VI) debido a su probada toxicidad para los ecosistemas y también porque es un carcinógeno humano conocido (Chromium, 2016).

El Cr (VI) ingresa fácilmente a las células a través de los sistemas de transporte aniónico, ya que, a pH fisiológico, el Cr (VI) existe como un oxianión, con una carga general de menos 2 (CrO_4^{2-}), y de esta forma se asemeja al sulfato y al fosfato. En los sistemas biológicos, el Cr (VI) sufre una serie de reacciones de reducción que producen el Cr (III) termodinámicamente estable (Gupta et al., 2021).

2.2.2. Potencial de Hidrógenos (pH)

La concentración de iones de hidrógeno se expresa más convenientemente como pH, que es el logaritmo del recíproco de la concentración de iones de hidrógeno en moles gramo por litro. Por lo tanto, en una solución neutra, las concentraciones de iones de hidrógeno (H^+) y de iones de hidroxilo (OH^-) son iguales, y cada una es igual a 10^{-7} (Liu, 2017).

Así mismo, Hosseini E., (2021), señala que un pH de 7 es neutro y una disminución del pH por debajo de 7 muestra un aumento de la acidez (iones de hidrógeno), mientras que un aumento del pH por encima de 7 muestra un aumento de la alcalinidad (iones de hidroxilo) y cada unidad de pH representa un cambio de concentración de 10 veces.

El valor del pH del agua no contaminada se determina principalmente por la interrelación entre el dióxido de carbono libre y las cantidades de carbonato y bicarbonato presentes (Carneiro et al., 2016).

Los valores de pH de la mayoría de las aguas naturales están en el rango de 4-9, con aguas ácidas blandas de áreas de páramos que generalmente tienen valores de pH más bajos y aguas duras que se han filtrado a través de creta o piedra caliza generalmente tienen valores de pH más altos (Brandt et al., 2017).

El valor de pH, o concentración de iones de hidrógeno, determina la acidez del agua. Es una de las determinaciones más importantes en la química del agua, ya que muchos de los procesos involucrados en el tratamiento del agua dependen del pH (Gao y Wang, 2021).

2.2.3. Conductividad Eléctrica)

La conductividad eléctrica (CE), σ , es una medida de la capacidad de un material para transportar una corriente eléctrica, su valor oscila entre 10^{-18} y 10^7 S m⁻¹ (Siemen por metro), dependiendo del material (Chaudhuri, 2018).

He y Benson (2017), además, señalan que expresa la capacidad de una sustancia o medio para conducir electricidad. Se emplea para el control de calidad y, además, se utiliza en línea para identificar características de estados de fermentación, por ejemplo, las medidas de conductividad eléctrica permiten distinguir la actividad de ureasa y la actividad de acidificación en fermentaciones de ácido láctico.

La CE se mide más fácilmente aplicando un voltaje de CC conocido a través de un par de electrodos paralelos sumergidos en la muestra, midiendo la corriente producida y calculando la resistencia de la muestra (el volumen delimitado por los electrodos) (Simón et al., 2013).

2.3. Marco Legal Ambiental

- Ley N°30588, es la Ley de Reforma Constitucional que reconoce el derecho al agua como derecho constitucional que incorpora el artículo 7°-A en la Constitución Política del Perú. y es la ley donde el estado reconoce el derecho de toda persona a acceder de forma progresiva y universal al agua potable. El Estado garantiza este derecho priorizando el consumo humano sobre otros usos.
- La Ley n° 31189, ley para fortalecer la prevención, mitigación y atención de la salud afectada por la contaminación con metales pesados y otras sustancias químicas. la presente ley tiene por objeto fortalecer la prevención, mitigación y atención de la salud afectada por la contaminación con metales pesados y otras sustancias químicas.
- Decreto Supremo N° 007-2010-AG, de acuerdo con el MINAGRI, este decreto brinda la protección de la calidad de los recursos hídricos y declaran de interés nacional la protección de la calidad del agua en las fuentes naturales y sus bienes asociados, con el objeto de prevenir el peligro de daño grave o irreversible que amenace a dichas fuentes y la salud de las actuales y futuras generaciones.
- Resolución Jefatural N° 0201-2009-ANA. Establecen disposiciones para la implementación de la Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338, en cuanto se refiere al establecimiento del valor y cobranza de las retribuciones económicas por el uso de agua para el 2009. Que según el artículo 91° de la Ley de Recursos Hídricos, Ley N°29338, señala que la retribución económica por el uso del agua es el pago que en forma

obligatoria deben abonar al estado todos los usuarios de agua como contraprestación por el uso del recurso, y es establecida por la Autoridad Nacional del Agua en función de criterios sociales, ambientales y económicos. Además, se menciona que la retribución económica que pagaran las organizaciones comunales responsables de la prestación de los servicios será de S/ 50.00 nuevos soles y para la cobranza del agua con fines mineros.

- La Ley General de Aguas establece para el Cromo Hexavalente un valor límite de concentración, de 1 mg/l para Aguas destinadas al riego de vegetales de Consumo Crudo y bebida de animales, correspondiente a la clase III.
- Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias. Es el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente.
- La Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva.

III. MÉTODO

3.1. Tipo de investigación

Este estudio presenta un tipo de investigación aplicada, debido a que se basará en la aplicación de la oxidación química que permitirá la recuperación de cromo hexavalente en lodos de galvanizado de la industria galvánica, mediante la aplicación de peróxido de hidrógeno (H₂O₂), para dar solución la problemática planteada.

Además, se presenta un diseño metodológico experimental; ya que se manipulará intencionalmente la variable independiente (Oxidación química con la aplicación de peróxido de hidrógeno (H₂O₂)) para generar posibles resultados sobre la variable dependiente (recuperación de cromo hexavalente); esto permitirá indicar un resultado de causa efecto.

3.2. Ámbito temporal y espacial

Temporal: El ámbito temporal, muestra que el presente estudio de investigación se realizará en los meses de octubre a diciembre del año 2021.

Espacial: En el ámbito espacial la investigación será aplicada y procesada mediante la información obtenida de los lodos de galvanizado de la industria galvánica, donde las muestras se tomarán del mismo punto de generación de las descargas.

3.3. Variables

Las variables a desglosar en dimensiones e indicadores son:

VD: Recuperación de Cromo hexavalente.

VI: Oxidación Química.

Tabla 1*Operacionalización de variables*

Variab les	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
Variable dependiente	La eliminación y la recuperación de los metales son fundamentales para minimizar la práctica de la minería y la toxicidad asociadas, donde, se desarrollan métodos para la recuperación de Cr(VI) para lograr la preservación del recurso de cromo y la prevención de la toxicidad. Para lo cual se han desarrollado tratamientos como la oxidación química (Rangel C. et al., 2015).	Para la recuperación del cromo hexavalente se realiza la caracterización fisicoquímica del muestreo realizado al lodo de galvanizado de la industria galvánica, seguido de ello, se inicia el tratamiento por oxidación química con peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂), empleando diferentes dosis para determinar la eficiencia alcanzada para cada uno de los tratamientos.	Características fisicoquímicas	T°	°C
				CE	uS
Recuperación de cromo hexavalente					Eficiencia
Variable independiente	La oxidación química es el proceso por el cual una sustancia sede electrones por la oxidación a un agente oxidante, el cual es el agente receptor. En este proceso de oxidación se acompaña la adición de oxígeno y en ciertos casos el cloro (Tokada R. y Shankaraiah N., 2021).	Se realizará el tratamiento por oxidación química con peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) realizando 9 ensayos en los que se cambiarán las dosis de 50, 70 y 90 g de H ₂ O ₂ para temperaturas de 40, 50 y 60 °C.	Oxidante químico	Dosis de H ₂ O ₂ /l	g
				Peso de lodo	g
Oxidación química					Metal pesado

Nota: Elaboración propia.

3.4. Población y muestra

- Población: La población es considerada las muestras de lodo de galvanizado tomadas de la industria galvánica.
- Muestra: La muestra a tratar presenta un volumen de 100 ml

La muestra presenta 9 ensayos en la cual se realizan 3 corridas para cada temperatura de 40°C, 50°C y 60°C, donde varía para cada temperatura una dosis de H₂O₂/l, iniciando con 70, 50 y 90 g de peróxido de hidrógeno para 50°C, y así sucesivamente para las siguientes temperaturas, hasta encontrar finalmente la dosis óptima y las eficiencias alcanzadas para cada uno de los tratamientos realizados.

3.5. Instrumentos

La técnica realizada consistió en la aplicación de la matriz, después del análisis y aplicación de la recuperación del cromo hexavalente, para precisar los objetivos propuestos.

Así mismo, se realizó el uso del instrumento de cadena de custodia, para detallar los datos relevantes como valores, características, entre otros de las reacciones presentados en la experimentación.

3.6. Procedimientos

El experimento realizado consistió en 2 etapas, las cuales detallan el procedimiento realizado en el desarrollo del presente trabajo de investigación; como se observa a continuación:

3.6.1. Etapa 1 - Búsqueda, recolección y análisis del diseño metodológico

- Búsqueda de artículos científicos, recolección de información y selección del artículo guía.
- Elaboración del diseño experimental .

3.6.2. Etapa 2 - Etapa experimental

3.6.2.1. Toma y preparación de muestra.

Siguiendo la metodología de la guía del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de Cuerpos Naturales de Agua Superficial. como instrumento::

- Recolección de la muestra, el cual viene a ser el lodo de galvanizado en una visita técnica a la industria galvánica; el cual se realizó siguiendo la guía del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de Cuerpos naturales de Agua Superficial como instrumento.

3.6.2.2. Traslado de muestras

Siguiendo la metodología especificada en la RM 093-2018-VIVIENDA: Protocolo de monitoreo de biosólidos.

- Se trasladó las muestras al Laboratorio de Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo, de la UNFV, las cuales estaban selladas y debidamente etiquetadas con su rótulo respectivo, en una caja de almacenamiento térmica con hielo en gel. Se procuró evitar la exposición al sol durante su transporte. Al llegar al laboratorio se mantuvo las muestras a 4°C para mantener su preservación hasta el análisis.
- Se utilizó la ficha de cadena de custodia y la ficha de registro de campo, para documentar la toma de muestras en mención hasta llegar al laboratorio de destino

3.6.2.3. Caracterización del lodo procedente de actividades mineras

Antes de iniciar el tratamiento por extracción ácida, se realizó la caracterización de los siguientes parámetros físicos y químicos: T°, pH, CE y concentración de Cr+6.

- Para la toma de la temperatura se utiliza un termómetro digital.

- Para determinar el PH y CE de la muestra, nos basamos en el Método de Análisis recomendados para suelos de Chile. INIA 2006, se toma una muestra de 20 gr de lodo, se seca en la estufa a 80°C por 24 horas, se procede retirar la humedad en el desecador por 1 hora, se tritura y se lleva a grano fino con un tamiz nro. 80. Luego se pesa 1 gramo en la balanza analítica, luego se añade 25 ml de agua destilada y se lleva a agitación por 150 RPM por 30 minutos con la ayuda del floculador programable. Y finalmente se deja sedimentar en una probeta por 30 minutos, y por último se procede a medir el PH y CE con el sensor del potenciómetro en el sobrenadante, previamente se tiene que haber calibrado el equipo con un buffer de 4 a 7.
- Para determinar la concentración de metales se utilizó la tecnología normalizada internacionalmente: Método espectrometría de absorción atómica de llama (Método normalizados APHA-AWWA-WPCF.3111 A. 1989). Cuyo principio se basa en la atomización de la muestra para liberar los átomos, a los que se les aplica una energía de una longitud de onda específica que es absorbida e induce al electrón a pasar a un estado excitado. Esta energía absorbida es proporcional a la concentración del elemento en la muestra analizada.

Se detalla los pasos a continuación: lavar los recipientes de muestras con disolución de detergente, enjuagar y dejar remojando toda la noche con ácido nítrico al 10%; digerir en parrilla a 90 °C, 1g de muestra, adicionando 3 ml de HCL y 1 ml de HNO₃ concentrado, hasta medio pastoso. Enfriar y agregar agua destilada para diluir y proceder finalmente a filtrar la muestra en una fiola de 100 ml aforando hasta la marca; encender el equipo y seleccionar la longitud de onda y el ancho de la banda espectral de acuerdo al metal a analizar; aspirar el blanco y ajustar el instrumento, aspirar la disolución estándar para elaborar la curva de calibrado de

Cr+6. con estándares de 0.5, 1.0 y 2.0 ppm; aspirar la muestra a analizar, y obtener los valores de concentración;

3.6.2.4. Paso siguiente, se realizaron 9 corridas (peróxido de hidrogeno 70,50,90 gr)

Después, se realizaron 9 corridas donde variaron las temperaturas 3 veces (40°C, 50°C y 60°C), se emplearon 3 dosis de peróxido de hidrógeno para la oxidación química (70, 50 y 90 g).

Finalmente se realizó la lectura de las dosis óptimas y las eficiencias alcanzadas para cada uno de los tratamientos realizados.

3.7. Análisis de datos

Los datos obtenidos en el laboratorio de los nueve ensayos con tratamientos de mandarina y los tres primeros ensayos con tratamiento de H₂O₂ en diferentes dosis (dosis de 50, 70 y 90 g) serán comparados con el fin de determinar la dosis óptima para la remoción de cromo hexavalente con concentraciones diferentes.

3.8. Consideraciones éticas

El presente trabajo de investigación cumple con el derecho de autoría de los artículos que prestaron aporte al contenido de la investigación, siendo citados debidamente mediante el estilo APA Versión 7; así mismo se detallarán los resultados generados con total veracidad y transparencia.

IV. RESULTADOS

4.1. Caracterización físico química de lodo resultante de la industria Galvanica

De acuerdo al primer objetivo planteado se muestran en la tabla 2 los resultados de la caracterización de los parámetros fisicoquímicos iniciales del lodo de galvanizado antes de iniciar el tratamiento por oxidación química con peróxido de hidrógeno (H₂O₂)

4.1.1. Caracterización del Lodo

A continuación, se muestran los resultados de la caracterización de los parámetros fisicoquímicos iniciales del lodo:

Tabla 2

Caracterización Fisicoquímica del Lodo

MUESTRA	T (°C)	pH	CE (uS/cm)	Pb (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)
M-1	15.3	6.83	2751	19850.16	80.21	10128.25
MUESTRA	T (°C)	pH	CE (uS)	Cr ⁺⁶ (g/L)		
M-1	19.3	6.2	4751	28.23		

Nota: Elaboración propia.

Donde:

- T: Temperatura
- pH: Potencial de Hidrógenos
- CE: Conductividad Eléctrica
- Cr⁺⁶: Ión Cromo Hexavalente

4.2. Resultados con diferentes dosis en los ensayos

4.2.1. Resultados de recuperación de Cromo Hexavalente

- PRIMER ENSAYO: Peso de lodo: 30 g; volumen de solución: 100 ml; Temperatura 40°C.

Tabla 3

Resultados de Cromo Cr⁺⁶ recuperado 40°C y 50g H₂O 2/L

MUESTRA		TRATAMIENTO 1				
Concentración Inicial Cr ⁺⁶ (g/l)		28.23				
H ₂ O ₂ (g/l)		50				
H ₂ O ₂ (ml)		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Concentración Final Cr ⁺⁶ (g/l)		2.63	3.53	4.64	5.36	6.11
REPETICIONES						
1		2.62	3.53	4.64	5.37	6.11
2		2.64	3.54	4.63	5.35	6.13
PROMEDIO		2.63	3.53	4.64	5.36	6.12

Nota: Elaboración propia.

- SEGUNDO ENSAYO: Peso de lodo: 30 g; volumen de solución: 100 ml y Temperatura 40°C.

Tabla 4

Resultados de Cromo Cr⁺⁶ recuperado 40°C y 70g H₂O 2/

MUESTRA		TRATAMIENTO 1				
Concentración Inicial		28.23				
Cr ⁺⁶ (g/l)						
H ₂ O ₂ (g/l)		50				
H ₂ O ₂ (ml)		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Concentración						
Final Cr ⁺⁶ (g/l)	2.63	3.53	4.64	5.36	6.11	
REPETICIONES						
1						
	2.62	3.53	4.64	5.37	6.11	
2						
	2.64	3.54	4.63	5.35	6.13	
PROMEDIO						
	2.63	3.53	4.64	5.36	6.12	

Nota: Elaboración propia.

- TERCER ENSAYO: Peso de lodo: 30 g, volumen de solución: 100 ml y temperatura 40°C

Tabla 5

Resultados de concentración Cromo Cr⁺⁶ recuperado 40°C y 90g H₂O 2/L

MUESTRA		TRATAMIENTO 3				
Concentración		28.23				
Inicial Cr ⁺⁶ (g/l)						
H ₂ O ₂ (g/l)		90				
H ₂ O ₂ (ml)		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Concentración						
Final Cr ⁺⁶ (g/l)	11.53	12.62	13.75	14.38	15.18	
REPETICIONES						

1	11.51	12.63	13.77	14.36	15.17
2	11.52	12.63	13.76	14.37	15.18
PROMEDIO	11.52	12.63	13.76	14.37	15.18

Nota: Elaboración propia.

- CUARTO ENSAYO: Peso de lodo: 30 g, volumen de solución: 100 ml y Temperatura 50°C

Tabla 6

Resultados de concentración Cromo Cr⁺⁶ recuperado 50°C y 50g H2O 2/L

MUESTRA	TRATAMIENTO 4				
Concentración	28.23				
Inicial Cr ⁺⁶ (g/l)					
H ₂ O ₂ (g/l)	50				
H ₂ O ₂ (ml)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Concentración					
Final Cr ⁺⁶ (g/l)	6.33	7.65	8.45	9.18	10.47
REPETICIONES					
1	6.35	7.66	8.44	9.16	10.45
2	6.32	7.68	8.44	9.17	10.46
PROMEDIO	6.34	7.67	8.44	9.17	10.46

Nota: Elaboración propia.

- QUINTO ENSAYO: Peso de lodo: 30 g; volumen de solución: 100 ml y temperatura 50°C.

Tabla 7

Resultados de concentración Cromo Cr⁺⁶ recuperado 50°C y 70g H2O 2/L

MUESTRA	TRATAMIENTO 5				
Concentración	28.23				
Inicial Cr ⁺⁶ (g/l)					
H ₂ O ₂ (g/l)	70				
H ₂ O ₂ (ml)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Concentración					
Final Cr ⁺⁶ (g/l)	8.43	9.32	10.45	11.57	12.88
REPETICIONES					
1	8.43	9.35	10.47	11.56	12.86
2	8.42	9.34	10.46	11.58	12.87
PROMEDIO					
	8.43	9.34	10.46	11.57	12.87

Nota: Elaboración propia.

- SEXTO ENSAYO: Peso de lodo: 30 g , volumen de solución: 100 ml , 50°C .

Tabla 8

Resultados de concentración Cromo Cr⁺⁶ recuperado 50°C y 90g H2O 2/L

MUESTRA	TRATAMIENTO 6				
Concentración	28.23				
Inicial Cr ⁺⁶ (g/l)					
H ₂ O ₂ (g/l)	90				
H ₂ O ₂ (ml)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Concentración					
Final Cr ⁺⁶ (g/l)	14.83	15.42	16.73	17.34	18.64

REPETICIONES					
1	14.82	15.45	16.71	17.33	18.66
2	14.84	15.43	16.74	17.33	18.65
PROMEDIO					
	14.83	15.44	16.73	17.33	18.65

Nota: Elaboración propia.

- SEPTIMO ENSAYO: Peso de lodo: 30 g, volumen de solución: 100 ml ,
Temperatura 60°C

Tabla 9

Resultados de concentración Cromo Cr⁺⁶ recuperado 60°C y 50g H2O 2/L

MUESTRA	TRATAMIENTO 7				
Concentración	28.23				
Inicial Cr ⁺⁶ (g/l)					
H ₂ O ₂ (g/l)	50				
H ₂ O ₂ (ml)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Concentración					
Final Cr ⁺⁶ (g/l)	11.53	12.42	13.53	14.35	15.24
REPETICIONES					
1	11.55	12.41	13.55	14.34	15.23
2	11.54	12.43	13.53	14.36	15.25
PROMEDIO					
	11.54	12.42	13.54	14.35	15.24

Nota: Elaboración propia.

- OCTAVO ENSAYO: Peso de lodo: 30 g, volumen de solución: 100 ml , 60°C

Tabla 10

Resultados de concentración Cromo Cr⁺⁶ recuperado 60°C y 70g H2O 2/L

MUESTRA		TRATAMIENTO 4			
Concentración Inicial, Cd (mg/Kg)		80.21			
Dosis, HCl (%)		50			
Tiempo (min)	60	120	180	240	
Concentración Residual, Cd (mg/Kg)	61.15	60.43	59.26	58.35	
REPETICIONES					
1	60.47	61.59	58.49	57.24	
2	59.28	59.23	60.36	59.42	
PROMEDIO	60.31	60.42	59.37	58.34	

Nota: Elaboración propia.

- NOVENO ENSAYO: Peso de lodo: 30 g, volumen de solución: 100 ml , 60°C

Tabla 11

Resultados de concentración Cromo Cr⁺⁶ recuperado 60°C y 90g H2O 2/L

MUESTRA		TRATAMIENTO 9				
Concentración Inicial Cr ⁺⁶ (g/l)		28.23				
H ₂ O ₂ (g/l)		90				
H ₂ O ₂ (ml)		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Concentración Final Cr ⁺⁶ (g/l)		15.93	18.02	19.83	21.62	23.42
REPETICIONES						
1	15.91	18.01	19.84	21.63	23.43	

2	15.94	18.03	19.83	21.61	23.44
PROMEDIO	15.93	18.02	19.83	21.62	23.43

Nota: Elaboración propia.

4.3. Análisis Estadístico

Con el fin de probar la racionalidad y verificar la validez de la hipótesis propuesta, se desarrolló un diseño completamente aleatorio (DCA) para tal fin. Primero, se verificó la efectividad de los tratamientos propuestos para la remoción de Cromo Hexavalente, por medio de oxidación química (oxidante) para lo cual para realizar este análisis, continuamos calculando el promedio de los tratamientos que tuvimos:

Para el análisis de aplicación de los tratamientos respectivos:

Tabla 12

Agrupación de Datos para el análisis estadístico inferencial de la Recuperación de Cr+6..

Tratamientos	Dosis	Repeticiones	Concentración Cromo VI
t1	d1	r1	2.62
t1	d1	r2	2.64
t1	d2	r1	3.53
t1	d2	r2	3.54
t1	d3	r1	4.64
t1	d3	r2	4.63
t1	d4	r1	5.37
t1	d4	r2	5.35
t1	d5	r1	6.11
t1	d5	r2	6.13
t2	d1	r1	7.62
t2	d1	r2	7.64
t2	d2	r1	8.53
t2	d2	r2	8.54
t2	d3	r1	9.66

t2	d3	r2	9.67
t2	d4	r1	10.35
t2	d4	r2	10.34
t2	d5	r1	11.79
t2	d5	r2	11.79
t3	d1	r1	11.51
t3	d1	r2	11.52
t3	d2	r1	12.63
t3	d2	r2	12.63
t3	d3	r1	13.77
t3	d3	r2	13.76
t3	d4	r1	14.36
t3	d4	r2	14.37
t3	d5	r1	15.17
t3	d5	r2	15.18
t4	d1	r1	6.35
t4	d1	r2	6.32
t4	d2	r1	7.66
t4	d2	r2	7.68
t4	d3	r1	8.44
t4	d3	r2	8.44
t4	d4	r1	9.16
t4	d4	r2	9.17
t4	d5	r1	10.45
t4	d5	r2	10.46
t5	d1	r1	8.43
t5	d1	r2	8.42
t5	d2	r1	9.35
t5	d2	r2	9.34
t5	d3	r1	10.47
t5	d3	r2	10.46
t5	d4	r1	11.56
t5	d4	r2	11.58
t5	d5	r1	12.86
t5	d5	r2	12.87
t6	d1	r1	14.82
t6	d1	r2	14.84
t6	d2	r1	15.45
t6	d2	r2	15.43
t6	d3	r1	16.71
t6	d3	r2	16.74
t6	d4	r1	17.33

t6	d4	r2	17.33
t6	d5	r1	18.66
t6	d5	r2	18.65
t7	d1	r1	11.55
t7	d1	r2	11.54
t7	d2	r1	12.41
t7	d2	r2	12.43
t7	d3	r1	13.55
t7	d3	r2	13.53
t7	d4	r1	14.34
t7	d4	r2	14.36
t7	d5	r1	15.23
t7	d5	r2	15.25
t8	d1	r1	16.61
t8	d1	r2	16.64
t8	d2	r1	17.91
t8	d2	r2	17.93
t8	d3	r1	19.32
t8	d3	r2	19.34
t8	d4	r1	21.72
t8	d4	r2	21.73
t8	d5	r1	13.63
t8	d5	r2	23.64
t9	d1	r1	15.91
t9	d1	r2	15.94
t9	d2	r1	18.01
t9	d2	r2	18.03
t9	d3	r1	19.84
t9	d3	r2	19.83
t9	d4	r1	21.63
t9	d4	r2	21.61
t9	d5	r1	23.43
t9	d5	r2	23.44

Nota: Elaboración en MINITAB versión.

Para determinar el DCA en la tabla 12 que corresponde a la aplicación de los tratamientos por medio de la oxidación de lodos de aguas residuales de procesos de galvanizado para lo cual se aplica:

➤ Prueba de Normalidad para los errores (AD)

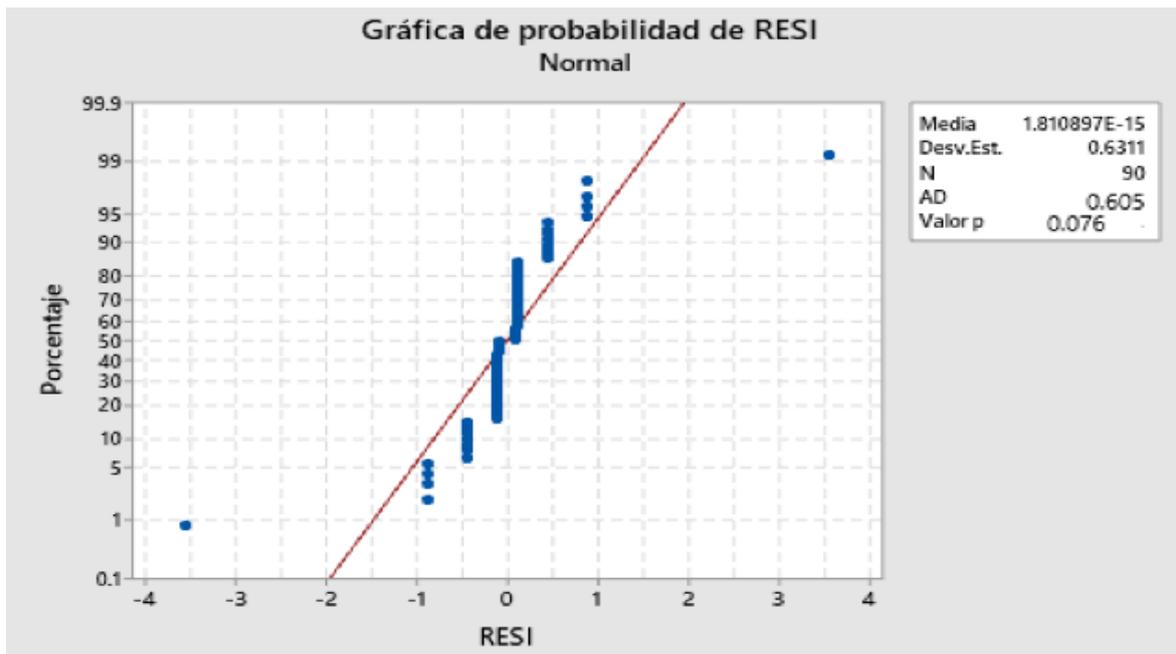
Se aplican los siguientes argumentos:

H0: Los residuos se distribuyen normalmente

Ha: Los residuos no se distribuyen normalmente

Figura 2

Prueba de Normalidad de Residuos Anderson Darling (AD) para la Recuperación de Cromo



Nota: Elaborado en MINITAB versión 2019.

De lo calculado que valor $p > 0.05$ como también el indicador $AD > 0.05$ por consiguiente se acepta la hipótesis nula, argumentando que con una significancia del 5% se acepta el supuesto que los residuos o errores se distribuyen en forma normal.

➤ Homogeneidad de la Varianza

Se plantea

H0 : Las varianzas son iguales

Ha: Al menos una varianza es diferente

Calculando el índice de Barlett = 0.34 y p valor = 0.88 > 0.05, no se rechaza la hipótesis nula por consiguiente existe homogeneidad de Varianzas.

➤ Prueba hipótesis DCA: Al menos un tratamiento es más efectivo que los demás al disminuir cromo hexavalente por oxidación en aguas de proceso de galvanizado.

H0: Los tratamientos no presentan diferencias significativas entre si

Ha: Los tratamientos presentan diferencias significativas entre si

Teniendo en cuenta el coeficiente $F= 230.25$ y un $p\text{-valor} = 0.000$ y sabiendo que $p\text{-valor} < 0.05$ se decide rechazar la hipótesis nula y acepta la hipótesis alterna es decir Los tratamientos presentan diferencias significativas entre si

➤ Prueba de comparación o efectividad de métodos

Prueba Tukey:

H0: $\mu_i = \mu_j$

Ha: $\mu_i \neq \mu_j$

Por lo que se tiene:

Figura 3

Aplicación de la Prueba de comparación estadística Tukey para la Recuperación de cromo.

Comparaciones por parejas de Tukey: Tratamiento			
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%			
Tratamiento	N	Media	Agrupación
t9	10	19.767	A
t8	10	18.847	A
t6	10	16.596	B
t3	10	13.490	C
t7	10	13.419	C
t5	10	10.534	D
t2	10	9.593	D E
t4	10	8.413	E
t1	10	4.456	F

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Nota: Elaborado en MINITAB versión 2019.

De lo que se desprende que el tratamiento 1 al poseer una media menor esto quiero decir que en proceso de remoción de cromo hexavalente el tratamiento 1 disminuye más la concentración de cromo hexavalente

Para las dosis se tiene:

Figura 4

Aplicación de la Prueba de Comparación estadística Tukey para dosis.

Comparaciones por parejas de Tukey: Dosis			
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%			
<u>Dosis</u>	<u>N</u>	<u>Media</u>	<u>Agrupación</u>
d5	18	14.7078	A
d4	18	13.9811	A
d3	18	12.9333	B
d2	18	11.7239	C
d1	18	10.6067	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Nota: Elaborado en MINITAB versión 2019.

De lo que se desprende que el dosis 1 al poseer una media menor esto quiero decir que en proceso de remoción de cromo hexavalente con dosis de 0.5ml de H₂O₂ disminuye más la concentración de cromo hexavalente

4.4. Contrastación de Hipótesis

Para ello se tiene la siguiente tabla:

Tabla 13

Contrastación de hipótesis

HIPOTESIS GENERAL	ARGUMENTACION	CONTRASTACION
La oxidación química presenta recuperación de cromo hexavalente en lodos de galvanizado de la industria galvánica, 2021.	Según el análisis realizado y con $F=230.25$ y $p<0.05$ se puede afirmar que los tratamientos aplicados por oxidación química disminuyen el cromo hexavalente en lodos de la industria de galvanizado.	Verdadera
HIPOTESIS ESPECIFICAS	ARGUMENTACIÓN	CONTRASTACIÓN
Los parámetros fisicoquímicos presentan recuperación de los niveles de cromo hexavalente en los lodos resultantes de la industria de galvanizado.	Según lo demostrado y con características pertinentes los parámetros fisicoquímicos que presenta recuperación son el pH que encuentra estabilidad y el OD	Verdadera
Las concentraciones de Cromo Hexavalente presentan recuperación de	Se demuestra que los tratamientos aplicados que en el tratamiento 1 con dosis de 0.5ml	Verdadera

sus niveles en los lodos resultantes de la industria de galvanizado.	de Peróxido de Hidrogeno remueve a 2.62g/l en comparación a los valores iniciales de 28.23g/l	
La dosis y temperatura óptima presentan recuperación de Cromo Hexavalente en los lodos resultantes de la industria de galvanizado.	La dosis obtenida como base de mejorar la recuperación de cromo hexavalente es de 0.5ml de Peróxido de Hidrogeno como oxidante a una temperatura de 60°C	Verdadera

Nota: Elaboración propia.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La temperatura y dosis óptima para la recuperación de Cromo Hexavalente fue de 60°C con una dosis de 90 g de H₂O₂/l, pudiendo afirmar que la dosis óptima de peróxido de hidrógeno es de 90 g; además es un parámetro esencial para la recuperación eficiente del cromo (VI), ya que, independientemente de la temperatura en concentraciones de 90 g de H₂O₂/l se presentaron mejores recuperaciones del metal pesado. Siendo en promedio la mayor recuperación de cromo en un 15.93, 18.02, 19.83, 21.62 y 23.43 con dosis de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 de H₂O₂ (ml) a una temperatura de 60 °C.

Resultado similar fue la obtenida por Velazques Pena et al., (2012), quien en su estudio para reducir electroquímicamente el cromo hexavalente en aguas residuales de galvanoplastia varió la composición y concentración de electrolitos y el metal del cátodo y se midió el efecto sobre la tasa de reducción. Aunque todos los sistemas electroquímicos estudiados redujeron todo el Cr (VI) en las soluciones, hubo claras tendencias en la velocidad de las reacciones y los 180 mg / L de Cr (VI) en las aguas residuales se redujeron completamente en aproximadamente 15 minutos en condiciones óptimas.

De manera análoga los investigadores Rangel y Maldonado (2014), llegan a la misma conclusión, que, Bajo condiciones reductoras el Cr+6 será reducido a Cr+3 por reacciones de reducción y oxidación (redox) con especies inorgánicas u orgánicas (no húmicas) solubles en agua, como carbohidratos, proteínas o por reducción con sustancias húmicas del suelo. Afirmaciones que apoyan los resultados obtenidos en el presente estudio.

Además, en diversas partes del mundo se han desarrollado diversas tecnologías de reducción y estabilización del Cr hexavalente, basadas en la conversión del Cr de un estado de oxidación al de reducción, como lo muestra Rangel Cordova et al. (2015), en su estudio, además, señala que lo más común en lixiviados es llevar a cabo la reducción mediante iones

ferroso, compuestos de sulfuro o compuestos orgánicos como ácido ascórbico, ácido cítrico, carbohidratos y ácidos húmicos.

Por su parte Chirila (2014), también apoya las afirmaciones anteriores, señalando que la oxidación química como tratamiento para recuperar cromo hexavalente es efectiva, obteniendo en su estudio la reducción del cromo (VI) a cromo (III) utilizando el metabisulfito de sodio como agente oxidante, en segundo lugar, el cromo trivalente se eliminó pasándolo a un $\text{Cr}(\text{OH})_3$ precipitado en un medio alcalino; después de la sedimentación, se eliminó la suspensión, el agua así tratada se puede descargar en cualquier efluente.

Mientras que Ahmad et al., (2021), presenta cierta oposición a lo ya mencionado, afirmando que el carbón químicamente activo sirve como excelente adsorbente de hexavalente Cr (VI), donde la adsorción máxima de Cr (VI) al 98% en condiciones de optimización de PFAC fue de 0,06 g de dosis de adsorbente, tiempo de contacto 6 h, pH 6, a 25 ° C de temperatura y con una velocidad de agitación de 150 rpm.

Así mismo, Gilhotra et al., (2021) presentó similares resultados a los de Velazques Pena et al., (2012), quien empleando la oxidación química, donde los resultados mostraron que se logró una eficiencia de eliminación de cromo hexavalente de la industria galvánica del 97,5% en condiciones de proceso optimizadas, es decir, pH 5, densidad de corriente 68 A / m² tiempo de tratamiento 17 min. Además, la concentración de electrolitos superior a 4 g / L no mejora significativamente la eficiencia de eliminación de cromo y las condiciones de proceso optimizadas de la solución simulada se utilizaron para tratar el agua del baño de cromo real, pero debido a la naturaleza altamente ácida del baño de cromo, se obtuvo una eliminación de cromo insignificante.

Ello es también apoyado por Bachman et al. (2010), quien recuperó el cromo hexavalente de efluentes de galvanoplastia concentrados sintéticos utilizando el proceso de

intercambio iónico líquido aniónico, donde con un pH de 1 a 4 presentó una eficiencia de recuperación del Cr (VI) en un 95%.

VI. CONCLUSIONES

- Los parámetros físico químicos en la muestra 1 de los lodos resultantes de la industria de galvanizado muestran una temperatura de 19.3°C, un pH de 6.2 demostrando esto una característica de concentración de hidrógeno neutra, una CE de 4751 uS y una concentración de ion Cr+6 de 28.23 g/L.
- Las concentraciones de Cromo Hexavalente recuperado en los lodos resultantes de la industria de galvanizado fueron mayores al 50%, siendo con una concentración inicial de 28.23 g/l de Cr+6 peso de lodo de 30g, y un volumen de muestra de 100ml, el promedio de 2 repeticiones 15.93, 18.02, 19.83, 21.62 y 23.43.
- La dosis y temperatura óptima para la recuperación de Cromo Hexavalente presente en los lodos resultantes de la industria de galvanizado fueron de 90 g H₂O₂/l y 70 g H₂O₂/l con 60 °C para ambas. presentando una concentración Final Cr+6 (g/l) para el primer caso en 16.63, 17.92, 19.33, 21.72, 23.63 y en el segundo caso con 15.93, 18.02, 19.83, 21.62, 23.43.
- Por otro lado, se puede concluir que a medida que incrementa la temperatura incrementa la recuperación de cromo hexavalente, siendo ello directamente proporcional a la eficiencia de recuperación del ion metálico.

VII. RECOMENDACIONES

Para la presente investigación se presenta las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda emplear el tiempo como parámetro para determinar su influencia en la recuperación de Cromo Hexavalente presente en los lodos resultantes de la industria de galvanizado.
- Se recomienda también determinar el pH como parámetro en las diferentes corridas ya que se ha visto en diversos estudios que este puede afectar de manera significativa la recuperación del Cr+6.
- Se recomienda extender el número de repeticiones y rango de experimentación para detallar un resultado más amplio y con mayores alcances de exactitud.
- Se recomienda emplear la comparación del peróxido de hidrógeno con otro compuesto químico así se podrá tener una muestra del compuesto más efectivo para la recuperación del cromo hexavalente de los lodos de galvanizado

VIII. REFERENCIAS

- Abubakar, I., Aldridge, R. W., Devakumar, D., Orcutt, M., Burns, R., Barreto, M. L., y Zhou, S. (2018). The UCL–Lancet Commission on Migration and Health: the health of a world on the move. *The Lancet*, 392(10164), pp. 2606-2654.
- Ahmad, A., Al-Swaidan, H. M., Alghamdi, A. H., Alotaibi, K. M., Alswieleh, A. M., Albalwi, A. N., y Bajuayfir, E. (2021). Efficient sequester of hexavalent chromium by chemically active carbon from waste valorization (Phoenix Dactylifera). *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155, 105075.
- Alonso Gutiérrez, B. J. (2016). Desarrollo de un ensayo enzimático para la detección de iones metálicos utilizando la enzima papaína inmovilizada en nanofibras poliméricas electrohiladas (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Arsenovic, M., Radojevic, Z., & Stankovic, S. (2012). Removal of toxic metals from industrial sludge by fixing in brick structure. *Construction and Building Materials*, 37. pp. 7-14.
- Azeez, N. A., Dash, S. S., Gummadi, S. N., & Deepa, V. S. (2021). Nano-remediation of toxic heavy metal contamination: Hexavalent chromium [Cr (VI)]. *Chemosphere*, 266, 129204.
- Bachmann, R. T., Wiemken, D., Tengkiat, A. B., & Wilichowski, M. (2010). Feasibility study on the recovery of hexavalent chromium from a simulated electroplating effluent using Alamine 336 and refined palm oil. *Separation and purification technology*, 75(3), 303-309.
- Brandt, M. J., Johnson, K. M., Elphinston, A. J., & Ratnayaka, D. D. (2017). Chemistry, microbiology and biology of water. *Twort's Water Supply*, 7, 235-321.
- Brasili, E., Bavasso, I., Petruccelli, V., Vilardi, G., Valletta, A., Dal Bosco, C., ... & Di Palma, L. (2020). Remediation of hexavalent chromium contaminated water through zero-

- valent iron nanoparticles and effects on tomato plant growth performance. *Scientific reports*, 10(1), 1-11.
- Carneiro-Neto, E. B., Lopes, M. C., & Pereira, E. C. (2016). Simulation of interfacial pH changes during hydrogen evolution reaction. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 765, 92-99.
- Chaudhuri, B. (2018). Biopolymers-graphene oxide nanoplatelets composites with enhanced conductivity and biocompatibility suitable for tissue engineering applications. *In Fullerenes, Graphenes and Nanotubes* (pp. 457-544).
- Chen, H., Yuan, H., Mao, L., Hashmi, M. Z., Xu, F., & Tang, X. (2020). Stabilization/solidification of chromium-bearing electroplating sludge with alkali-activated slag binders. *Chemosphere*, 240, 124885.
- Chkili, F., Person, M. D., Colbeau-Justin, C., & Abderrabba, M. (2017). The olive mill waste water decontamination with photocatalysis based on TiO₂: effect of operational parameters. *Biosci Biotech Res Asia*, 14(3), 933-944.
- Chirila, N. (2014). Remarks on recent developments in the chemical oxido-reduction reaction used in treat the wastewater. *Procedia Technology*, 12, 621-627.
- Daneshvar, E., Zarrinmehr, MJ, Kousha, M., Hashtjin, AM, Saratale, GD, Maiti, A., ... y Bhatnagar, A. (2019). Eliminación de cromo hexavalente del agua mediante materiales a base de microalgas: estudios de adsorción, desorción y recuperación. *Tecnología de fuentes biológicas*, 293, 122064.
- Elena, G., & Igor, G. (2015). Simultaneous denitrification and nitrification in the lab-scale oxidation ditch with low C/N ratio. *Procedia engineering*, 117, 107-113.
- Farooqi, Z. H., Akram, M. W., Begum, R., Wu, W., & Irfan, A. (2021). Inorganic nanoparticles for reduction of hexavalent chromium: Physicochemical aspects. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123535.

- Gao, G., & Wang, L. W. (2021). A potential and pH inclusive microkinetic model for hydrogen reactions on Pt surface. *Chem Catalysis*.
- García, C. A., & Hodaifa, G. (2017). Real olive oil mill wastewater treatment by photo-Fenton system using artificial ultraviolet light lamps. *Journal of Cleaner Production*, 162, 743-753.
- Gilhotra, V., Yadav, R., Sugha, A., Das, L., Vashisht, A., Bhatti, R., & Bhatti, M. S. (2021). Electrochemical treatment of high strength chrome bathwater: A comparative study for best-operating conditions. *Cleaner Engineering and Technology*, 2, 100093.
- Gupta, A., Wanwari, S., Kumar, M., & Thakur, I. S. (2021). Contamination of water resources with potentially toxic elements and human health risk assessment: Part 2. Academic Press. *In Contamination of Water* (pp. 143-156).
- Haccuria, E., Ning, P., Cao, H., Venkatesan, P., Jin, W., Yang, Y., & Sun, Z. (2017). Effective treatment for electronic waste-Selective recovery of copper by combining electrochemical dissolution and deposition. *Journal of Cleaner Production*, 152, 150-156.
- He, W, Publishing., & Benson, R. (2017). Polymeric biomaterials. *In Applied plastics engineering handbook* (pp. 145-164).
- Hosseini, E. S., Bhattacharjee, M., Manjakkal, L., & Dahiya, R. (2021). Healing and monitoring of chronic wounds: Advances in wearable technologies.. *In Digital Health* (pp. 85-99). Academic Press.
- Innocenzi, V., Cantarini, F., Amato, A., Morico, B., Ippolito, N. M., Beolchini, F., ... & Vegliò, F. (2020). Case study on technical feasibility of galvanic wastewater treatment plant based on life cycle assessment and costing approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104535.

- Jafarinejad, S. (2017). Treatment of Oily Wastewater. *Petroleum Waste Treatment and Pollution Control*, 185–267.
- Javanmard, Z., Kouchaksaraei, M. T., Hosseini, S. M., & Pandey, A. K. (2020). Assessment of anticipated performance index of some deciduous plant species under dust air pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(31), 38987-38994.
- Jia, J., Li, T., Yao, C., Chen, J., Feng, L., Jiang, Z., ... & Lou, J. (2020). Circulating differential miRNAs profiling and expression in hexavalent chromium exposed electroplating workers. *Chemosphere*, 260, 127546.
- Kononova, O. N., Bryuzgina, G. L., Apchitaeva, O. V., & Kononov, Y. S. (2019). Ion exchange recovery of chromium (VI) and manganese (II) from aqueous solutions. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 2713-2720.
- Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J. R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N., ... & Bertollini, R. (2017). La Commission Lancet sur la pollution et la santé. *The Lancet Commissions*, 1-58.
- Li, H., Li, Z., Liu, T., Xiao, X., Peng, Z., & Deng, L. (2008). A novel technology for biosorption and recovery hexavalent chromium in wastewater by bio-functional magnetic beads. *Bioresource Technology*, 99(14), 6271-6279.
- Liu, S. (2017). *How Cells Grow*. Bioprocess Engineering.
- Makisha, N., & Yunchina, M. (2017). Methods and solutions for galvanic waste water treatment. In MATEC Web of Conferences (Vol. 106, p. 07016). EDP Sciences.
- Mane, C. P., Mahamuni, S. V., Kolekar, S. S., Han, S. H., & Anuse, M. A. (2016). Hexavalent chromium recovery by liquid–liquid extraction with 2-octylaminopyridine from acidic chloride media and its sequential separation from other heavy toxic metal ions. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S1420-S1427.

- Mao, L., Wu, Y., Zhang, W., & Huang, Q. (2019). The reuse of waste glass for enhancement of heavy metals immobilization during the introduction of galvanized sludge in brick manufacturing. *Journal of environmental management*, 231, 780-787.
- Mostafa, H., Iqdam, B. M., Abuagela, M., Marshall, M. R., Pullammanappallil, P., & Goodrich-Schneider, R. (2018). Treatment of olive mill wastewater using High Power Ultrasound (HPU) and Electro-Fenton (EF) method. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 131, 131-136.
- Pervov, A. G., Andrianov, A. P., Gorbunova, T. P., & Bagdasaryan, A. S. (2015). Membrane technologies in the solution of environmental problems. *Petroleum chemistry*, 55(10), 879-886.
- Pinto, F. M., Pereira, R. A., Souza, T. M., Saczk, A. A., & Magriotis, Z. M. (2021). Treatment, reuse, leaching characteristics and genotoxicity evaluation of electroplating sludge. *Journal of Environmental Management*, 280, 111706.
- Qian, L., Liu, S., Zhang, W., Chen, Y., Ouyang, D., Han, L., ... & Chen, M. (2019). Enhanced reduction and adsorption of hexavalent chromium by palladium and silicon rich biochar supported nanoscale zero-valent iron. *Journal of colloid and interface science*, 533, 428-436.
- Rangel Cordova, A. A., Isarain Chávez, E., & Maldonado Vega, M. (2015). Caracterización y recuperación de sales de cromo hexavalente de un pasivo ambiental. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 31(4), 427-437.
- Rangel, A. A., & Maldonado, M. (2014). Cromo hexavalente en la industria: Repercusiones a la salud y medidas de control. *REMESAT*, 6, 77-84.
- Sibi, G. (2016). Biosorption of chromium from electroplating and galvanizing industrial effluents under extreme conditions using *Chlorella vulgaris*. *Green Energy & Environment*, 1(2), 172-177.

- Simón, M., Peralta, N. R., & Costa, J. L. (2013). Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes.
- Song, G., Johannesson, B., Hapugoda, S., & StJohn, D. (2004). Galvanic corrosion of magnesium alloy AZ91D in contact with an aluminium alloy, steel and zinc. *Corrosion Science*, 46(4), 955-977.
- Song, G., Zhang, C., Chen, X., & Zheng, D. (2021). Galvanic activity of carbon fiber reinforced polymers and electrochemical behavior of carbon fiber. *Corrosion Communications*.
- Tejada, C., Quiñones, E., Tejada, L., & Marimón, W. (2015). Absorción de Cromo Hexavalente en soluciones acuosas por cascaras de naranja (*Citrus sinensis*). *Producción+ Limpia*, 10(1), 9-21.
- Tokala, R., & Shankaraiah, N. (2021). Microwave-assisted oxidation reactions. In *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science* (pp. 285-313). Elsevier.
- Van Brusselen, D., Kayembe-Kitenge, T., Mbuyi-Musanzayi, S., Kasole, T. L., Ngombe, L. K., Obadia, P. M., ... & Nemery, B. (2020). Metal mining and birth defects: a case-control study in Lubumbashi, Democratic Republic of the Congo. *The Lancet Planetary Health*, 4(4), e158-e167.
- Velazquez-Pena, S., Barrera-Diaz, C., Linares-Hernandez, I., Bilyeu, B., & Martínez-Delgadillo, S. A. (2012). An effective electrochemical Cr (VI) removal contained in electroplating industry wastewater and the chemical characterization of the sludge produced. *Industrial & engineering chemistry research*, 51(17), 5905-5910.
- Villegas, L. G. C., Mashhadi, N., Chen, M., Mukherjee, D., Taylor, K. E., & Biswas, N. (2016). A short review of techniques for phenol removal from wastewater. *Current Pollution Reports*, 2(3), 157-167.

- Wilson-Frank, C. (2019). Proteomics in Biomarkers of Chemical Toxicity. *In Biomarkers in Toxicology* (pp. 1153-1163). Academic Press.
- Xia, M., Muhammad, F., Li, S., Lin, H., Huang, X., Jiao, B., & Li, D. (2020). Solidification of electroplating sludge with alkali-activated fly ash to prepare a non-burnt brick and its risk assessment. *RSC Advances*, *10*(8), 4640-4649.
- Yusta-García, R., Orta-Martínez, M., Mayor, P., González-Crespo, C., & Rosell-Melé, A. (2017). Water contamination from oil extraction activities in Northern Peruvian Amazonian rivers. *Environmental Pollution*, *225*, 370-380.

IX. ANEXO

9.1. Anexo A: Registro fotográfico

Figura 5

Muestra de lodos procedentes de actividades mineras.



Nota: Fotografía propia.

Figura 9

Determinación de concentración de los metales pesados por el método de espectrometría de absorción atómica.



Nota: Fotografía propia.

Figura 10

Dosificación de peróxido en muestras



Nota: Fotografía propia