



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA PARA LA REDUCCIÓN DE CROMO
HEXAVALENTE EN AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA GALVÁNICA,
LIMA 2020

Línea de investigación:

Ecotoxicología y Química Ambiental

Tesis para optar el Grado Académico de Doctor en Ingeniería Ambiental

Autora

Benites Alfaro, Elmer Gonzales

Asesor

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

Jurado

Coayla Coayla, Adalberto Edelina

Jurado Falconi De Trujillo, Eulalia

Zamora Talaverano, Noé Sabino

Lima - Perú

2022

Referencia:

Benites, A. (2022). *Cavitación hidrodinámica para la reducción de cromo hexavalente en aguas residuales de la industria galvánica*, Lima 2020 [Tesis de doctorado en la Universidad Nacional Federico Villarreal]. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/6211>



Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada (CC BY-NC-ND)

El autor sólo permite que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede generar obras derivadas ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA PARA LA REDUCCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA GALVÁNICA, LIMA 2020

**Línea de Investigación:
Ecotoxicología y Química Ambiental**

**Tesis para optar el Grado Académico de
Doctor en Ingeniería Ambiental**

**Autor:
Benites Alfaro, Elmer Gonzales**

**Asesor:
Zambrano Cabanillas, Abel Walter**

**Jurado:
Coayla Coayla, Adalberta Edelina
Jurado Falconi De Trujillo, Eulalia
Zamora Talaverano, Noé Sabino**

Lima – Perú

2022

Dedicatoria

A Dios por la vida,

A mis padres Clorinda y Luis por su amor,

A mis abuelitos Catalina y Pedro por el abrigo
temprano

Agradecimiento:

La Universidad Nacional Federico Villarreal, por ser fuente de formación y cultura científica.

Al Dr. Abel Walter Zambrano Cabanillas por su invaluable apoyo en el desarrollo de la presente investigación.

ÍNDICE

RESUMEN	IX
ABSTRACT.....	X
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2. Descripción del problema	4
1.3 Formulación del problema	5
1.3.1 <i>Problema general</i>	5
1.3.2 <i>Problemas específicos</i>	6
1.4 Antecedentes	6
1.5 Justificación de la investigación	17
1.5.1 <i>Justificación teórica</i>	17
1.5.2 <i>Justificación Práctica</i>	17
1.5.3 <i>Justificación Metodológica</i>	17
1.5.4 <i>Justificación Ambiental</i>	18
1.5.5 <i>Justificación filosófica</i>	18
1.6 Limitaciones de la Investigación	19
1.7 Objetivos de la investigación	19
1.7.1 <i>Objetivo general</i>	19
1.7.2 <i>Objetivos específicos</i>	19
1.8 Hipótesis de la investigación	20
1.8.1 <i>Hipótesis general</i>	20
1.8.2 <i>Hipótesis específicas:</i>	20
II. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 Marco conceptual.....	21

2.1.1 Aguas residuales	21
2.1.2 Aguas residuales de la industria galvánica	21
2.1.3 El cromo	21
2.1.4 Toxicidad del cromo	24
2.1.5 Parámetros físico químicos del agua	24
2.1.6 Cavitación hidrodinámica	31
2.2 Valores Máximos Admisibles (VMA).....	37
III. MÉTODO	39
3.1 Tipo de Investigación.....	39
3.2 Población y Muestra	39
3.3 Operacionalización de Variables:.....	39
3.4 Técnica e Instrumentos	42
3.5 Procedimiento	42
1.1.1 Etapa 1	43
1.1.2 Etapa 2	43
1.1.3 Etapa 3	44
1.1.4 Etapa 4	45
1.1.5 Etapa 5	46
3.6 Análisis de los datos.....	46
3.7 Consideraciones éticas	46
IV. RESULTADOS	48
4.1. Tratamiento la muestra A.....	48
4.1.1. Concentración inicial de Cromo total y otros metales:.....	48
4.1.2 Concentración final de Cromo total y otros metales (después del tratamiento).....	49
4.1.3 Parámetros fisicoquímicos iniciales	51
4.1.4 Parámetros fisicoquímicos finales (después del tratamiento)	52

4.2. Tratamiento de la Muestra B.....	53
4.2.1. Cromo Hexavalente (Cr^{+6})	53
4.2.2. Temperatura	54
4.2.3. Potencial de Hidrógeno (pH).....	55
4.2.4. Conductividad Eléctrica.....	56
4.3. Tratamiento estadístico inferencial de datos.....	56
4.3.1. Eficiencia en reducción de cromo total en muestra A, con los cavitadores: Placa de orificio y Venturi 56	
4.3.2 Reducción del Cromo VI en muestra B con cavitación hidrodinámica	59
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	62
VI. CONCLUSIONES	68
VII. RECOMENDACIONES	70
VIII. REFERENCIAS	71
IX. ANEXOS	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores Típicos de parámetros físico – químicos de aguas residuales industriales....	25
Tabla 2 Valores Máximos Admisibles de parámetros físico/químicos (Anexo II de Norma).	37
Tabla 3 Valores Máximos Admisibles de parámetros físico/químicos con sustancias tóxicas	38
Tabla 4 Matriz de Operacionalización	40
Tabla 5 Concentración inicial de metales en la muestra A de agua residual	48
Tabla 6 Cromo total luego del tratamiento con placa de orificio y Venturi como dispositivos cavitadores (Muestra A).....	49
Tabla 7 Parámetros Ni, Zinc y Boro luego del tratamiento de cavitación en muestra A.....	51
Tabla 8 Parámetros fisicoquímicos iniciales en agua residual de cromado (Muestra A)	52
Tabla 9 Parámetros fisicoquímicos de la Muestra A de agua residual después del tratamiento con venturi como dispositivo cavitador	52
Tabla 10 Porcentaje de reducción de parámetros fisicoquímicos de la Muestra A luego de tratamiento por cavitación hidrodinámica	53
Tabla 11 Concentración de Cr ⁺⁶ luego del tratamiento por cavitación (Muestra B)	54
Tabla 12 Normalidad Placa de orificio y Venturi	57
Tabla 13 Medias de concentración de Cr total luego de tratamiento de cavitación con Placa de orificio y Venturi.....	58
Tabla 14 Prueba T Student comparación de medias (Placa de orificio y Venturi).....	58
Tabla 15 Normalidad Cr después de cavitación hidrodinámica	60
Tabla 16 Cromo VI en agua residual antes y después de tratamiento con Cavitación hidrodinámica	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de presión vs Temperatura de sustancias.....	34
Figura 2 Secuencia del fenómeno de cavitación.....	36
Figura 3 Procedimiento de la investigación.....	42
Figura 4 <i>Diseño de sistema de cavitación hidrodinámica</i>	44
Figura 5 Muestras tratadas para análisis	45
Figura 6 Equipo de Espectrofotometría - UV	45
Figura 7 Medida de la Conductividad eléctrica (a) y pH (b)	46
Figura 8 Tiempo de tratamiento proyectado para alcanzar el VMA del cromo total	50
Figura 9 Temperatura del agua residual en el proceso de tratamiento de cavitación	55
Figura 10 Potencial de hidrógeno (pH) del agua residual en el tratamiento de cavitación	55
Figura 11 Conductividad eléctrica en el agua residual durante el tiempo de tratamiento	56

Resumen

El agua, recurso vital en seres vivos y medio ambiente es cada vez más escasa por la contaminación que sufre principalmente por las actividades antropogénicas. La industria de la galvanotecnia es una de ellas, hace uso del recurso y origina consigo la contaminación del recurso por productos peligrosos que impacta negativamente en el ambiente si son dispuestos sin un debido tratamiento. El objetivo de la investigación fue utilizar tecnología de cavitación hidrodinámica para disminuir Cromo hexavalente (Cr VI o Cr^{+6}) y Cromo Total, en aguas residuales de cromado de la industria galvanotecnia. Se trabajó con dos muestras (A y B) de agua residual obtenida de una planta de cromado ubicada en Villa El Salvador-Lima. El tratamiento de cavitación se hizo por 60 y 100 minutos a una presión de ingreso al sistema cavitador de 3.8 a 4 bar y con un flujo de 38 L/h mediante bomba centrífuga para las muestras en mención, respectivamente. En la muestra "A" se controló el cromo total, obteniendo reducción del 15 % cuando se usó Venturi como elemento cavitador y el 7 % para placa de orificios, paralelamente redujo aceites y grasas el 15 %, DBO 25 %, DQO 23 % y STS 8 %. En la muestra "B" se controló el Cromo Hexavalente y a los 20 minutos se redujo el 11 %. Se establece que la cavitación hidrodinámica permite minimizar la contaminación de cromo en aguas galvánicas con ventajas ambientales al no usar ni generar productos contaminantes en el proceso.

Palabras claves: Cavitación hidrodinámica, aguas industriales, reducción de cromo, cromo hexavalente.

Abstract

Water, a vital resource in living beings and the environment, is increasingly scarce due to the contamination that it suffers mainly from anthropogenic activities. The electroplating industry is one of them, it makes use of the resource and causes the contamination of the resource by dangerous products that have a negative impact on the environment if they are disposed of without proper treatment. The objective of the research was to use hydrodynamic cavitation technology to reduce hexavalent Chromium (Cr VI or Cr⁺⁶) and Total Chromium, in chrome plating wastewater from the electroplating industry. We worked with two samples (A and B) of residual water obtained from a chrome plating plant located in Villa El Salvador-Lima. The cavitation treatment was carried out for 60 and 100 minutes at an input pressure of 3.8 to 4 bar to the cavitating system and with a flow of 38 L/h by means of a centrifugal pump for the samples in question, respectively. In sample "A" the total chromium was controlled, obtaining a reduction of 15 % when Venturi was used as cavitating element and 7% for orifice plate, in parallel it reduced oils and fats by 15 %, BOD 25 %, COD 23 % and STS 8 %. In sample "B" the Hexavalent Chromium was controlled and after 20 minutes it was reduced to 11%. It is established that hydrodynamic cavitation allows minimizing chromium contamination in galvanic waters with environmental advantages by not using or generating polluting products in the process.

Keywords: Hydrodynamic cavitation, industrial waters, chromium reduction, hexavalent chromium.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados es cada vez más preocupante por la peligrosidad que éstos presentan al tener características de bioacumulación y persistencia que muy fácilmente pueden llegar a los seres vivos. Uno de los recursos que se contaminan con mucha facilidad son las aguas por el uso que se hace en diversos procesos industriales. Entre los metales pesados de mucha capacidad de impacto negativo es el cromo y sobre todo en su estado hexavalente (Cr^{+6}) que se presenta en las aguas residuales de la industria de galvanotecnia, curtiembre, vidrio, madera, pinturas, cerámicos, textil entre otras, facilitado por la propiedad de movilidad debido a su gran solubilidad. Llegan a los cuerpos vegetales con impacto negativo para los ecosistemas que entran en contacto debido a propiedades cancerígenas y mutagénicas de este metal. Según información recogida por Pure Earth (2019) en todo el mundo se han identificado más de 100 fuentes potenciales de descarga de Cromo de la industria de curtiembre que ponen en riesgo a más de 1.5 millones de personas a la contaminación por Cr y otros contaminantes

Existen muchos métodos para descontaminar las aguas residuales con presencia de cromo, entre ellas precipitación química, adsorción, filtración, coagulación-floculación, flotación, intercambio iónico, métodos electroquímicos, etc. (Fu y Wang, 2011). Esta remoción por métodos físicos, químicos y electroquímicos requiere muchos insumos y costos de energía, grandes cantidades de reactivos químicos o dificultades de remover productos secundarios generados del proceso; Sin embargo, en los últimos tiempos se busca usar tecnologías que sean amigables con la naturaleza y bajo costo. En este conjunto de métodos se tiene a la cavitación hidrodinámica y uso de la biotecnología como empleo de microorganismos, biomasas de algas, desechos agrícolas o industriales. (Hlihor et al., 2017). Estas últimas tecnologías tienen un futuro prometedor por las ventajas medioambientales al no aportar con más contaminación.

Existen pocas investigaciones en torno al uso de cavitación hidrodinámica para reducción de cromo en aguas residuales industriales por lo que indagar en este aspecto fue el interés de la investigación.

1.1 Planteamiento del problema

Las diversas actividades industriales, comerciales, de servicios y eventos accidentales, causan contaminación en uno de los principales elementos necesarios para la vida, el agua. El vertimiento de efluentes, residuos o cualquier material agresivo conteniendo elementos tóxicos o composición de materiales agresivos alteran el estado natural de las aguas superficiales, subterráneas, marinas, así como del suelo, con impactos ambientales negativos a los ecosistemas entre ellos a los seres humanos.

La presencia en el agua de ciertas concentraciones nocivas de algunos elementos químicos y compuestos constituye una forma de degradación, que en concreto es lo que se llama contaminación. Estos elementos contaminantes pueden estar en concentraciones superiores a los niveles naturales o habituales con efecto adverso en seres vivos y en microorganismos, los mismos que son generalmente de procedencia geogénico o antropogénico, los primeros vienen de la misma naturaleza como por ejemplo los proceden de la estructura terrestre misma y los segundos por actividades del hombre como por ejemplo de los residuos peligrosos mal dispuestos, entre ellos los que contienen metales pesados como el cromo hexavalente con peligrosidad para la salud y medio ambiente.

Existe a nivel global el crecimiento de uso de agua para muchas actividades humanas, luego de ello se generan aguas residuales de tal manera que también existe un crecimiento en volumen acompañado del nivel de contaminación al no ser tratadas y son vertidas directamente al medio ambiente sin tratamiento, ocasionando impactos a los ecosistemas acuáticos y son vía de transmisión de enfermedades a largo plazo con riesgo a no cumplirse con los objetivos que

países y gobiernos se han planteado conforme a la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Este problema no debe verse solo como la búsqueda del tratamiento y eliminación sino como una alternativa de fuente de agua luego de su tratamiento, la reutilización y reciclado será una forma de dar solución a la poca disponibilidad del recurso, conforme se visualiza las aguas residuales pueden ser una fuente de sostenibilidad de energía, nutrientes, materia orgánica como subproductos. Se estima que el mundo más del 80 % de las aguas residuales se vierte sin tratamiento esto debido a la falta de infraestructura, tecnología, instituciones y financiamiento, estimación hecha por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2017).

En el Perú, no se realiza mayoritariamente el tratamiento de las aguas residuales, según la Oficina de evaluación y fiscalización ambiental OEFA (2014), existen 50 empresas prestadoras de este servicio de saneamiento y de alcantarillado solo alcanzan a cubrir el 69.65 % de población urbana. Los a pobladores que no alcanzan el servicio vierten sus aguas residuales sin tratamiento directo al mar, ríos, quebradas, incluso son usadas estas aguas en el riego de cultivos agrícolas de alimentos esenciales contaminándolos; también se indica que en el 2012 la Oficina de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) verificó que Perú generaba 2 217.946 m³ de aguas residuales al día que son arrojados a la red de alcantarillado, se generaba 142 litros por habitante diario de aguas residuales y de ello solo el 32 % se trataban. En el mismo informe se indica que para el 2024 se generará 4 842.579 m³/día de este tipo de aguas.

La OEFA asimismo solo señala como tecnologías más usadas para tratar las aguas residuales son las lagunas de oxidación, lagunas aireadas, lodos activados, Sistemas anaerobios-aerobios, filtros percolados para aguas residuales urbanas, pero no se mencionan metodologías para tratamiento de aguas residuales industriales en específico como por ejemplo aguas con metales pesados como el cromo, plomo, entre otros. En la industria es muy usado

compuestos de cromo en pinturas, industria refractaria, electrogalvanizados, curtido de cuero que en su estado de Cr^{+3} es un micro-elemento esencial pero que ante condiciones como la presencia de materia orgánica y condiciones ligeramente ácidas se transforma a Cr^{+6} volviéndose como causa de daño a la salud propiciando alergias, enfermedades respiratorias agente cancerígeno y mutagénico en humanos, por lo que la exposición a los desechos sólidos así como líquidos que contienen sobre todo cromo hexavalente son de peligrosidad y toxicidad alta (Benitez, 2011).

En la capital del Perú, la empresa de Servicio de Agua y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL, 2021) indica que aproximadamente 51 % de los vertimientos industriales y comerciales incumplen con los Valores Máximos Admisibles (VMA) normados por la legislación peruana en el DS. 010-2019-VIVIENDA, que regula las descargas no domésticas de uso industrial y comercial con la implementación y operación de sistemas de tratamiento; esto definitivamente pone en riesgo no solo las redes públicas de alcantarillado e infraestructura sanitaria sino al cuerpo receptor final como los ríos y el mar.

Ante esta realidad problemática existen varias metodologías tradicionales que se vienen aplicando para el tratamiento y remediación de los cuerpos de agua contaminados; sin embargo, en los últimos años las tecnologías que se viene desarrollando con mucha prosperidad son la nanotecnología, la biotecnología y recientemente la cavitación hidrodinámica. Es mediante la cavitación hidrodinámica que este estudio presenta resultados del tratamiento de aguas residuales específicamente aguas efluentes de la industria galvanotecnia en el proceso de cromado, como alternativa en reducir el impacto negativo de este tipo de aguas industriales.

1.2. Descripción del problema

Existen muchas industrias dedicadas a procesos galvánicos, teniendo entre sus actividades principales al proceso de cromado. Este proceso se usa con el fin proteger a los

metales al fenómeno de destrucción por la corrosión, siendo el cromado que presenta muy buen desempeño en esta función de protección; sin embargo, es un proceso muy cuestionado por el empleo de cromo hexavalente por su característica tóxica y cancerígena (Graeve et al., 2003). En el Perú no se tiene conocimiento de la cantidad de efluentes conteniendo cromo hexavalente que como efluentes gastados son vertidos a la red de alcantarillado que posteriormente impactan negativamente en recursos hídricos, fauna y flora. En este proceso se utiliza gran cantidad de agua que luego es desechada contaminada, por lo que es necesario buscar el método más eficiente para recuperar estas aguas y vuelvan a ser reusadas en otras actividades o si son vertidas a los cuerpos receptores, no constituyan peligro alguno. Las desventajas de no realizar el tratamiento de estos efluentes no son solo socio-ambientales sino también económicas.

Si bien es cierto existen métodos tradicionales usando productos químicos para tratamiento de efluentes con cromo, estos no son amigables con el medio ambiente y a la vez son costosos; ante esta situación en la presente investigación se da cuenta del uso de un método físico denominado “Cavitación hidrodinámica”, en la búsqueda del tratamiento de estos efluentes para reducir la presencia de cromo. La cavitación hidrodinámica se viene utilizando en los últimos tiempos en diferentes procesos de químicos, físicos y biológicos con beneficio de reducir los costos totales de los mismos y también mantiene alta eficiencia energética comparada con otras tecnologías convencionales además con ventajas de escalamiento (Arias y Cardona, citado por Gutiérrez et al., 2019)

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿Qué nivel de reducción de concentración del cromo hexavalente se tiene en aguas residuales de una industria galvánica, sometido al tratamiento de cavitación hidrodinámica?

1.3.2 Problemas específicos

- ¿Qué concentración de cromo total se tiene en aguas residuales de la industria galvánica del proceso de cromado, antes y después del tratamiento de cavitación hidrodinámica?
- ¿Cuál es el nivel de concentración de cromo hexavalente en aguas residuales de la industria galvánica del proceso de cromado, antes y después del tratamiento de cavitación hidrodinámica?
- ¿Qué valores tienen las propiedades fisicoquímicas de aguas residuales de la industria galvánica del proceso de cromado, antes y después del tratamiento de cavitación hidrodinámica?

1.4 Antecedentes

Mukherjee et al., (2020), realizaron el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas con presencia de surfactantes (dodecilsulfato de sodio, SDS) entre 1 y 300 mg/L, mediante cavitación hidrodinámica teniendo en cuenta el diámetro de orificio, el efecto del pH y presión de entrada, la concentración del surfactante; Asimismo complementaron con adición de H₂O₂ y fentón. Encontraron que el orificio óptimo fue de 1.6 mm de diámetro, a un pH de 2 y con una presión de 5 bar para el proceso de cavitación. Para el sistema de cavitación con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) se usó 5 g/L de H₂O₂ y para el caso de cavitación junto a fentón fue de H₂O₂=1:3. El resultado de degradación obtenida fue del 99.46% en 60 minutos.

Raut-Jadhava et al., (2013), mediante cavitación hidrodinámica trataron una solución acuosa para degradar el insecticida imidacloprid, ensayaron el proceso de cavitación con una presión de entrada de 5-20 bar, a un pH entre 2 a 7.5. El tratamiento fue ensayado con la combinación cavitación más H₂O₂ para lograr la degradación completa del insecticida en 45

minutos. Concluyendo que la cavitación hidrodinámica en combinación con H_2O_2 permitió tratar aguas conteniendo este tipo con buena efectividad.

Kumar et al. (2013), a fin de encontrar el efecto de la geometría del dispositivo principal de cavitación hidrodinámica, investigaron la degradación de tinte de naranja-G (OG) usando diferentes dispositivos de cavitación: placa de orificio, venturi circular y venturi hendidura. Para ello tomaron en cuenta la presión de entrada del fluido a los dispositivos mencionados y número de cavitación. Asimismo, observaron el efecto del pH y concentración del contaminante inicial. Encontraron que la geometría del dispositivo de cavitación es un parámetro esencial en el proceso de cavitación por lo que se debe tener en cuenta el área de sección transversal del flujo, perímetro, forma, etc. Encontraron que teniendo en cuenta la degradación del carbono orgánico total (COT) por unidad de energía suministrada, cuando se usó el Venturi de hendidura se obtuvo la mayor degradación y rendimiento de cavitación 50 % por encima de los demás dispositivos para igual energía suministrada.

Ma et al. (2020), realizaron una investigación para tratar lodos de curtiembre con presencia de cromo hicieron uso de la oxidación con agua supercrítica asistido por ultrasonido con el objetivo de eliminar la materia orgánica y liberación del cromo presente. Encontraron que no se elimina el cromo, pero si se libera un 99.6 % al sobrenadante de donde se puede recuperar luego de purificarse, en cambio los contaminantes orgánicos tóxicos se eliminan en un 99.9 %. Indicando que es un método que se puede utilizar para eliminar toxicidad y recuperación de cromo de lodos en curtiembre

Singh (2015), mediante el metanógeno termofílico *Methanothermobacter thermautotrophicus* buscaron reducir el cromo hexavalente en soluciones acuosas a las concentraciones de 0.2, 0.4, 14, 3 y 5 mM presente en forma de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$). Utilizaron el método colorimétrico de 1,5-difenilcarbazida, encontrando que a

concentraciones altas de Cromo (VI) la biorreducción fue más bajo (43.6 %, 13 % y 3.7 % para 1, 3 y 5 mM de Cr^{+6}). Concluyen luego de ensayos de verificación por difracción de electrones y microscopía electrónica de barrido, que las células de *M. thermotrophicus* es una alternativa para reducir cromo hexavalente reduciéndolo a cromo (III), que se presentan por ejemplo en lugares de eliminación de desechos radioactivos subterráneos con alta temperatura (70 °C).

Gheju y Balcu (2011), investigaron la remoción del cromo (VI) en soluciones acuosas empleando la capacidad reductora de chatarra de hierro junto a la precipitación con hidróxido de sodio (NaOH). En el proceso se presentó el problema de pasivación de la chatarra de hierro; sin embargo, lograron una eficiencia a un pH entre 4.6 a 8 para obtener Fe (III) y Cr (III) con un 78.8 % en el tanque clarificador. Este es un proceso a condiciones alcalina. Concluyeron que las aguas contaminadas con Cr (VI) pueden tratarse con chatarra de hierro seguido de una precipitación química con hidróxido de sodio (NaOH).

Boczka et al., (2018) en la investigación de tratamiento de aguas residuales de la industria de betunes ensayaron la tecnología de cavitación hidrodinámica y procesos de oxidación avanzada (POA) utilizando ozono, peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y peroxona (ozono+ H_2O_2), con el objetivo de reducir la carga contaminante orgánica de aguas residuales de la industria de betunes. Obtuvieron mejor eficacia con la aplicación de la cavitación hidrodinámica con ozonificación logrando reducir 40 % de DQO y 50 % el DBO. Para cavitación hidrodinámica - H_2O_2 , cavitación hidrodinámica–peroxona y solo cavitación hidrodinámica sola se logró reducir en 20.25 y 13 % para el DQO y 49.32 y 18 % para el DBO respectivamente. Asimismo, se menciona que se debe observar la formación de subproductos como resultado de estos procesos de los POA; Además verificaron la degradación de los COV.

Rajoriya (2018), efectuaron la investigación para tratar efluentes de la industria del teñido textil mediante la cavitación hidrodinámica en combinación con reactivos de oxidación avanzada: aire, oxígeno, ozono y reactivo fentón, el objetivo fue reducir los contaminantes orgánicos tóxicos (COT), la demanda química de oxígeno (DQO) y el colorante. En el proceso el dispositivo de cavitación que se usó fue el venturi de hendidura. Los parámetros de operación fueron a una presión de entrada de 5 bar y a pH de 6.8. Encontraron una decoloración de 98 % con la combinación cavitación hidrodinámica y reactivo fentón (FeSO de 1:5) y el 48 % y 38 % para el COT y DQO respectivamente. En tiempos de 15 y 120 min respectivamente.

Çalışkan et al. (2017), estudiaron la degradación de soluciones de colorantes azoicos utilizando el proceso de cavitación hidrodinámica con la fotocatalisis en forma conjunta. Se ensayaron los procesos de cavitación sola, fotocatalisis, cavitación-UV y cavitación-fotocatalisis, para decolorar las soluciones con colorante RR180. El proceso que se llevó a cabo a 5 bar de presión de entrada presentó una mejor mineralización en el caso de procesos combinados. Los coeficientes sinérgicos para la eliminación de DQO y COT de 1.48 y 1.17 respectivamente. Los ensayos utilizaron como catalizadores el TiO_2 y ZnO (0.5 a 1.5 g/L), encontrándose que el ZnO ayudó mejor en la reducción del DQO, COT y color con una concentración de 1 g/L como carga óptima. Llegan a concluir que el método resultó eficiente.

Castiblanco y Perilla (2019), realizaron una investigación para reducir el cromo hexavalente de aguas residuales de una industria de procesos de cromado en plásticos mediante tratamiento con el método fisicoquímico de fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO_2). El proceso consistió en agitar e irradiar las muestras con lámparas UV monitoreando la concentración de cromo usando el test kit de cromo VI HI 3846 de HANNA Instruments (basado en la colorimetría). Se obtuvo mejor reducción en la velocidad de degradación del cromo VI cuando se irradió con una lámpara de 24 mW/m^2 que cuando se usó una de 8 mW/m^2

(el tiempo fue de 30 min y un día y medio respectivamente; Asimismo se menciona que el pH es un factor importante a controlar, siendo el pH de 3.3 (ácido) que en 30 min se logró la degradación.

Gutierrez (2019), también realizó ensayos de reducción de cromo hexavalente usando chatarra de aluminio cero-valente a cromo trivalente. Obtuvo una reducción del 59,3 %, sugiriendo usar el método propuesto complementariamente en forma preliminar a otros métodos. Se indica controlar el pH, el término cuadrado de la temperatura, la relación temperatura con tiempo, el tiempo con la reacción y temperatura con pH. Concluye que lo más óptimo se obtuvo a una temperatura de 20 °C con pH de 2 en un tiempo de 120 minutos.

Guastay y Tinoco (2019), investigaron la reducción de Cromo hexavalente en aguas residuales del Estereo Salado en la ciudad de Guayaquil, lugar donde se hacen estas descargas industriales. Para ello utilizaron biofiltros de cascarilla de arroz y zuro de maíz activados con hidróxido de potasio 1 % m/m. Se tuvo control en el pH, el tiempo de residencia, la masa de en la columna de los biofiltros. El monitoreo se hizo con la difenilcarbazida para el caso del cromo hexavalente y de espectrofotometría de absorción atómica para el cromo trivalente. Se encontró que a pH ácido se obtuvo mejor resultado, logrando reducir 93.1 % y 96.2 % el cromo hexavalente a trivalente en dichas aguas contaminadas usando biofiltros de cascarilla de arroz y zuro de maíz respectivamente. Al final el cromo hexavalente fue indetectable.

López (2019), buscó remover Cr^{+6} de aguas contaminadas utilizando biomasa de cáscara de plátano. Ensayó un primer proceso usando 1 g de biomasa con 600 μm , con una residencia de 15 minutos para tratar 20 mg/L de Cr^{+6} a un pH de 3, 3,5, 5 y 7. Repitió el proceso a condiciones de pH de 3 y 3.5 pero usando concentraciones de solución acuosa de Cr^{+6} de 20, 40 y 80 mg/L. Llegó a la conclusión que a mayor pH la remoción se hace ineficiente, obteniendo una remoción de cromo hexavalente de 92 %, cuando aumentó la concentración de

cromo también la capacidad de adsorción aumentó, ajustándose los datos al modelo de Langmuir mejor que al modelo de Freundlich que corresponde a la adsorción en monocapa de una superficie homogénea. El factor de separación R_L correspondió entre 0.809 a 0.383 que indica que el proceso fue favorable en la biomasa del metal pesado. Concluye que la biomasa cáscara de plátano es una metodología con potencial de adsorción para ser usado en bajar el nivel de Cr^{+6} en agua contaminada.

Pacay (2019), ensayó la remover cromo hexavalente en solución sintética de dicromato de potasio utilizando quitosano de exoesqueleto de camarón marino cultivado (*Litopenaeus vannamei*). El método de análisis usado fue espectrometrofotométrico. Se usaron concentraciones de quitosano con ácido acético al 4 % para una matriz con cantidades de 20.40 y 60 mL. La solución de dicromato de potasio 150 ppm se ensayó a 5, 7 y 9 de pH con 25 rpm de agitación en tiempos de 5, 15 y 25 minutos. Luego se evaluó la concentración de cromo hexavalente, color y turbidez. Para comparación de los resultados se ensayó con sulfato de aluminio. Se concluyó con una remoción de 41.95 % del cromo hexavalente a un pH de 9 usando 60 mL de solución de quitosano en un tiempo de 25 minutos. Asimismo, el quitosano resultó ser 45.55 % de efectivo en comparación con el sulfato de aluminio a las mismas condiciones de operación.

Agudelo-Valencia et al. (2019), mediante cavitación hidrodinámica removieron sulfuros de agua residual de curtiembre. Señalan que este proceso de oxidación avanzada, lograron reducir en 32.6 % la concentración inicial de sulfuro sin aplicar reactivos químicos ni catalizador en 90 minutos, evaluando el costo beneficio del tratamiento encontrando una reducción del 198 % de disminución del costo en cuanto a la energía del reactor. Concluyen que la cavitación hidrodinámica es una tecnología sustentable para la industria de curtiembre.

En un estudio usando nanopartículas de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ de 90 a 500 nm recubiertas con carbón activado se buscó eliminar el Cromo hexavalente del agua en un 86 %, adsorbiéndose y precipitándose el $(\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x})(\text{OH})_3$ poco solubles, el pH fue un decisor en la eliminación del Cr VI con ajuste a una cinética de segundo orden (Li et al., 2019).

Zhou et al. (2016), usaron nanopartículas bimetálicas de Fe/Ni en fase líquida con sistema ultrasonido para eliminar cromo hexavalente en un 94 % en 10 minutos en un rango de pH de 3-9. Se indica que este alto rendimiento se debe a la sinergia que se produce entre la catálisis del Ni^0 y la cavitación del sistema de ultrasonido, donde el Ni^0 permite la reducción del Cr (VI) mediante transferencia de electrones e hidrogenación catalítica, esto se hace más eficiente debido a que las nanopartículas se mantuvieron limpias por acción del ultrasonido luego de 26 días de uso.

Kazemi et al. (2018), ensayaron la eliminación de cromo hexavalente de una solución acuosa usando membrana fotocatalítica multicapa de nanopartículas (TFC), se consideró una capa de quitosano como absorbente y se recubrió con una capa de nanopartículas de dióxido de titanio cero valente (nZVI TiO_2) mediante tecnología capa por capa.

Daneshvar et al. (2018), realizaron la comparación del potencial de varios materiales a base de microalgas para eliminar Cr^{+6} del agua, Concluyeron que el biocarbón de microalgas removió el 100 % del Cromo VI. Se hizo la desorción del Cr VI con NaOH 0.1 M y fueron las algas muertas el material más eficiente que las células vivas en la remoción y recuperación del Cromo VI.

El proceso de cavitación hidrodinámica permitió la degradación de residuos líquidos sintéticos de la industria electrónica como el hidróxido de tetrametil amonio (TMAH) ensayando una investigación a una temperatura de 20 °C y 4 bar de presión de ingreso, con pH de 3 y a lo largo del tiempo entre 5 y 20 minutos de tratamiento de una muestra de 2 g/L de

concentración de TMAH. Se logró reducir el 44 % de degradación a pH 3 y en 20 minutos (Innocenzi et al. 2018).

Korpe y Rao (2021), dan cuenta de investigaciones realizadas en tratamiento de aguas residuales de curtiembres con procesos de oxidación avanzada (POA) complementado con cavitación hidrodinámica. Se fijan en los parámetros de pH, temperatura, dosis de los productos químicos presentes, caudal de ozono, concentración de aguas residuales, lámparas UV utilizadas, tiempo de irradiación, etc. Se menciona que el principal mecanismo en el proceso combinado es la generación del radical OH. Concluyen que este método combinado es ventajoso a los tradicionales con mayor eficiencia de degradación, reducción de lodos, químicos utilizados y sobre todo en la reducción del impacto ambiental.

Para la degradación y mineralización del colorante Coomassie Brilliant Blue (CBB) mediante un proceso combinado de cavitación hidrodinámica (CH) y oxidante químico (CH-KPS-H₂O₂) presente en aguas residuales se tuvo presente la presión de entrada en la CH entre 4-8 bar, concentración del peróxido de hidrógeno (H₂O₂) entre 0-1000 mg/L y concentración del persulfato de potasio (KPS) entre 0-1000 mg/L. Se ensayaron combinaciones de los métodos logrando una decoloración del 92 % y mineralización del 73.2 % en 60 minutos con 7.1 bar de presión de entrada, usando 676.1 mg/L y 541.1 mg/L de H₂O₂ y KPS respectivamente para el sistema CH- H₂O₂- KPS, (Baradaran y Sadeghi, 2019)

El método de cavitación hidrodinámica como tecnología ecológica de alta eficiencia ecológica (por el uso mínimo de solventes tóxicos) y energética en la degradación de contaminantes recalcitrantes en el agua, se realizó un estudio de revisión en la reducción de tintes mediante la cavitación o combinado con otros procesos de oxidación (ozono, reactivo fentón, fotocátalisis, peróxido de hidrógeno) comparando resultados a la vez que se estimó los

costos a escala industrial confirmando su viabilidad como una tecnología prometedora mejor que los tratamientos basados en ultrasonidos, (Das et al., 2021).

La cavitación hidrodinámica también se ensayó para la degradación de aguas residuales orgánica con presencia de rodamina (RhB) y también en combinación con cavitación acústica. Se tomó en cuenta la presión de entrada, concentración inicial, la temperatura de la solución y la potencia ultrasónica. Se determinó que en forma combinada fue mejor la conversión con un efecto sinérgico de hasta 119 % con potencia ultrasónica de 220 W en 30 min. Se logró eficiencia energética con potencia ultrasónica más baja (88-176 W). Concluyen que la cavitación hidrodinámica es un método ventajoso para tratar aguas residuales en el futuro, (Yi et al., 2018)

Desde hace tiempo se ha venido ensayando el uso de microorganismo para tratamiento de aguas con metales pesados. Así se investigaron la biosorción del Cd (II) y del Cr (VI) en soluciones mediante las bacterias *Staphylococcus xylosum* y *Pseudomonas* sp., teniendo en cuenta el nivel del pH, la concentración de la biomasa, y el tiempo de contacto. Se tuvo en cuenta modelos de Langmuir y Freundlich en la descripción de la biosorción de metales. Se encontró una capacidad de absorción de 250 y 278 mg/g para el Cadmio y de 143 y 95 mg/g para el Cromo usando las mencionadas bacterias respectivamente; es decir se logró reducir un 66 % usando *Pseudomonas* sp para una concentración de Cr de 200mg/L. Se observó que en una mezcla binaria de Cd y Cr, se produce una biosorción mayor por el metal predominante siendo de 96 % y 89 % (para ambas bacterias) en caso del Cd y de 92 % (con la *Staphylococcus xylosum*) para el caso del Cr (VI) (Ziagova et al., 2007)

Hernández-Peña et al. (2021), utilizaron *Lysinibacillus macroides* 2 (1B) 104A en concentraciones de 50, 100, 200 y 300 mg/L de cromo (VI), para disminuir su concentración de este metal pesado en aguas del lago Chapala (México). Lograron la disminución del 97.508

% para una muestra de 50 mg/L de Cr^{+6} , siendo la ocurrencia extracelularmente y no en la membrana intracelular. Se redujo el Cr (VI) en el caldo. Concluyeron que estos microorganismos tienen la capacidad de disminuir la concentración de este metal pesado convirtiéndolo en una opción para biorremediar aguas contaminadas.

Se han realizado estudios para tratamiento de aguas residuales contaminadas con bifenilos policlorados (PBC) y Cromo hexavalente que se emiten al medio ambiente, recurriendo a los microorganismos que individualmente son más eficientes que cuando existen ambos contaminantes. Se indica que la estrategia consiste en utilizar la técnica de bioaumentación como método más eficaz es decir usando la biorremediación con biorreactores y partículas orgánicas cubiertas con biopelícula se dará doble potencial, para desintoxicar el Cromo (VI) y los PCB, (Yasir et al., 2021).

También un proceso de oxidación-reducción para bioelectroquímica se usó pilas de combustible microbianas (MFC) para generación de bioelectricidad, en donde se redujo el cromo hexavalente en aguas industriales de cromo trivalente. Se llega a establecer que la eliminación de Cr (VI) es más eficiente que para los demás metales en este proceso de generación de electricidad. Concluyen que la generación de electricidad en las MFC junto a la eliminación de Cromo (VI) es una fuente futura de energía sostenible (Uddin et al., 2021).

El tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con nitratos y Cr^{+6} se realizó mediante aceite vegetal emulsionado produciéndose una interacción entre el nitrato y Cr (VI) de tal manera que el nitrato promovió la eliminación del Cr (VI) mientras que el Cr (VI) inhibió la reducción del nitrato. Encontraron que los umbrales para remediación del nitrato y Cr (VI) por separado fueron 1600 mg/L y 10 mg/L respectivamente (aceite vegetal emulsionado= 7 g/L). Cuando el proceso fue combinado estos umbrales de remediación fueron 868.10 mg/L para nitrato y 12.43 mg/L para Cr (VI) (aceite vegetal emulsionado= 7 mg/L) en donde la dosis

del aceite vegetal es factor importante. Se ensayó con dosis de aceite vegetal de 10.8 g/L encontrándose valores umbrales máximos de 1379.79 mg/L para nitrato y 12.67 mg/L para Cr (VI). Encontraron si los contaminantes estaban por debajo del valor umbral, los contaminantes se eliminaban por completo (Ding et al., 2021).

Un estudio de ingeniería genética y de proteínas de enzimas buscaron reducir Cromo (VI) usando flavoproteínas bacterianas solubles electroforéticamente puras de *Pseudomonas putida* (ChR) y *Escherichia coli* (YieF), reduciéndolo a cromo (III). Se concluye que con estudios sugieren que se protege de la toxicidad del cromato por la acción de la reducción del cromato con estudios que se realicen en el futuro (Ackerley et al., 2004).

En una investigación con organismos del género *Bacillus* y el uso aislado bacteriano de *Bacillus sp* G3 (obtenido de aguas de aguas residuales industriales - ARI), se hizo un proceso de biorremediación de Cromo (VI) en aguas residuales de galvanoplastia, encontrando la reducción en un 100 % al cabo de 34 horas a un pH de 5.5. También se ensayó el uso conjunto de aislado bacteriano *Bacillus sp* G3 con la cepa *Aeromonas hydrophila* CrMFC5 obteniendo similar resultado en la reducción de 100 % del Cr (VI) en ARI, concluyendo que el uso de consorcios de microorganismos mejora la biorremediación de ARI contaminado (Mora, 2016).

Pereira et al. (2021) Haciendo uso de una membrana biohíbrida de nanofibras poliméricas y bacterianas de vida libre ensayaron eliminar contaminantes. Asociaron *Bacillus toyonensis* SFC 500-1E y *Acinetobacter guillouiae* SFC 500-1A, alcanzando reducir hasta 2.5 mg/L de cromo hexavalente y hasta 200 mg/L de fenol en 24 horas. También se logró eliminar aproximadamente el 46 % de cromo hexavalente y 100 % de fenol en un efluente de curtiembre que contenía inicialmente 7 mg/L de Cr⁺⁶ y 305 mg/L de fenol. Los microorganismos estuvieron sobre 1.10⁷ UFC/g. Estas membranas biohíbridas fueron resistentes a la hidrólisis, reutilizables con eficiencia hasta 5 veces.

1.5 Justificación de la investigación

1.5.1 Justificación teórica

En la investigación se presenta un reciente uso de la cavitación hidrodinámica en tratamiento de aguas residuales, un fenómeno hidrodinámico que desde hace tiempo se conoce como perjudicial en las bombas hidráulicas centrífugas, (Vargas, 2015); sin embargo este fenómeno en los últimos años se viene estudiando su aplicación en tratamiento de aguas como nueva tecnología con ventaja y potencial para intensificar procesos físicos y/o químicos con eficiencia energética, tan necesario en la industria para reducir costos de los procesos en tratamiento de aguas. En este caso permitió conocer mediante los resultados la eficiencia de tratamiento de aguas contaminadas con cromo usando la cavitación hidrodinámica.

1.5.2 Justificación Práctica

Resulta viable y de manera ventajosa solucionar el problema de contaminación de aguas industriales provenientes de la industria galvánica (proceso de cromado) el empleo de la cavitación hidrodinámica. Así, de esta manera se presenta una metodología para dar solución a la industria respecto a sus aguas residuales y sean vertidas a los cuerpos receptores cumpliendo los valores máximos admisibles, evitando el impacto negativo al ambiente y cumpliendo la normatividad ambiental establecida.

1.5.3 Justificación Metodológica

La investigación aporta una nueva metodología en el tratamiento de aguas residuales, la cavitación hidrodinámica difiere de los tratamientos tradicionales con ventajas en su aplicación, requiere menos espacio para los equipos, menos recursos energéticos permitiendo tratamiento de diversos tipos de aguas industriales y urbanas. Por otro lado, es un método presenta mayor facilidad al escalamiento y funcionamiento a nivel real (Moholkar y Pandit, 2001).

1.5.4 Justificación Ambiental

La preocupación por proteger los cuerpos de aguas de efluentes contaminados fue la propuesta de investigación realizada, de esta manera se puede disminuir la presencia de cromo hexavalente que por su naturaleza es perjudicial a los ecosistemas. La cavitación hidrodinámica resulta ser una posibilidad para tratamiento de aguas conteniendo cromo hexavalente para que éstas tengan la posibilidad de mejorar la biodegradabilidad, mejora de la digestión anaerobia por disgregación de lodo, deshidratación de lodos, entre otras. La cavitación es eficaz en la ruptura celular y desinfección de aguas, eliminación de contaminantes emergentes para su reutilización dentro de una economía circular en un contexto de cada vez menos disponibilidad de agua. Aquí no se usa aditivos químicos por lo que es una propuesta tecnológica limpia.

1.5.5 Justificación filosófica

Thompson y Piso (2019), mencionan que las actividades del ser humano desde su origen siempre impactaron en el medio ambiente donde interactuaba, esto progresivamente se ha incrementado en el afán de aprovechar los recursos naturales en una necesidad de supervivencia y ambición económica, indican que paralelamente también surgieron ideas y visiones de sostenibilidad de algunos que crearon conciencia sobre la duración de recursos aprovechables, siendo filósofos medioambientales como John Dewey que con su pragmatismo ambiental que analizó buscó interpretar la interacción organismo-medio ambiente. Se indica que ante la crisis ambiental se requiere un análisis profundo, ya que la contaminación ambiental con elementos incorporados al ambiente como los metales pesados (cromo, plomo, etc.) requiere inmediata solución, para ello recapacitar y entender el problema es urgente para equilibrar o restaurar un medio ambiente que se deteriora progresivamente. Señalan cambiar el concepto de la “razón” interpretada por Kant, a una nueva, la “razón ambiental”. Recuerdan que la ética ambiental y la injusticia ambiental analizada como vulnerabilidades a los grupos

de bajos recursos como lo plasmado en 1987 en el informe de la comisión Brundtland (ONU) y la noción de “desarrollo sostenible”, es el perfil filosófico para usar los recursos naturales en el presente.

1.6 Limitaciones de la Investigación

La investigación se circunscribe solo al tratamiento de aguas residuales industriales, la tecnología permite disminuir carga orgánica, el metal pesado cromo y otros contaminantes mejorando la calidad de las aguas para volverla útil. El método permite el tratamiento de cualquier efluente residual a un nivel secundario sin limitaciones.

1.7 Objetivos de la investigación

1.7.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia en la reducción de concentración del cromo hexavalente en aguas residuales de la industria galvánica, sometidas al tratamiento por cavitación hidrodinámica.

1.7.2 Objetivos específicos

- Determinar la concentración de cromo total de las aguas residuales (Muestra A) de la industria galvánica del proceso de cromado y evaluar la eficiencia de reducción después del tratamiento por cavitación hidrodinámica.
- Evaluar la concentración de cromo hexavalente en aguas residuales (Muestra B) de la industria galvánica del proceso de cromado y determinar el nivel de eficiencia de reducción después del tratamiento por cavitación hidrodinámica.
- Verificar con análisis en laboratorio la variación de las propiedades físicas químicas de aguas residuales de cromado de la industria galvánica después del tratamiento por cavitación hidrodinámica.

1.8 Hipótesis de la investigación

1.8.1 Hipótesis general

La concentración de cromo hexavalente en las aguas residuales de la industria galvánica se reducirá un 5 % luego de haberse sometido al tratamiento por cavitación hidrodinámica.

1.8.2 Hipótesis específicas:

- La concentración de cromo total de las aguas residuales de cromado de la industria galvánica se reducirá el 5 %, después del tratamiento en un sistema de cavitación hidrodinámica.
- La concentración de cromo hexavalente en las aguas residuales de cromado de la industria galvánica será reducida en 5 % respecto al inicial, después del tratamiento con cavitación hidrodinámica.
- Las propiedades fisicoquímicas de aguas residuales de cromado de la industria galvánica serán reducidas después del tratamiento por cavitación hidrodinámica.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Aguas residuales

Se entiende por aguas residuales a las aguas que por acción del hombre han sufrido modificaciones en sus características originales y son vertidas a un cuerpo receptor natural o ser reusadas y por este motivo tienen que ser tratadas previamente (MINAGRI, 2010). Es decir, son aguas con calidad afectada por antropogénicamente, aguas que no tienen valor inmediato en la actividad que se usó por haber perdido su calidad.

Los tipos de estas aguas residuales pueden ser generalmente: Aguas residuales urbanas, también denominadas domésticas y son aquellas que se generan en las viviendas, también se tiene mezcladas con aguas de escorrentía pluvial y a veces con industriales; y, Aguas residuales industriales que son las que se generan en actividades industriales o comerciales.

2.1.2 Aguas residuales de la industria galvánica

En la industrial galvánica se generan aguas residuales de su proceso con alta carga inorgánica contaminante por la presencia de características tóxicas y corrosivas además de impurezas (Sun, 2004). Pueden existir de diferente naturaleza, concentración y tamaño (La toxicidad es sobre todo por la presencia de metales pesados, así como de acidez o alcalinidad extremas que le da poder corrosivo. Uno de los procesos de galvanotecnia es el cromado cuyas aguas residuales tienen presencia de cromo en sus estados. Por tanto, se puede definir a la contaminación de agua como la alteración química, biológico o físico de la calidad y que impacte negativamente a los organismos vivos o que haga imposible su uso (Todd, 2007)

2.1.3 El cromo

Se encuentra clasificado como elemento 24 de la tabla periódica, su peso atómico promedio es 52, se encuentra en la naturaleza ocupando el lugar 21 más abundante en la corteza

terrestre, puede encontrarse en rocas, suelo, plantas, animales, polvo volcánico y gases. El Cromo (Cr) existe en estados de oxidación que van de -2 a +6. El Cr hexavalente (Cr^{+6}), y el cromo trivalente (Cr (III)) son los estados de oxidación más estables en ambientes naturales: La diferencia entre estos dos estados es que el Cromo (III) es relativamente inerte, químicamente más estables y menos biodisponible (insignificante permeabilidad a las biomembranas), al contrario, el cromo (VI) es tóxico y mutagénico para los organismos induciendo toxicidad aguda y crónica, neurotoxicidad, dermatotoxicidad, genotoxicidad, carcinogenicidad, entre otros debido a su alto potencial oxidante (Mason, 2012).

La Agencia para sustancias Tóxicas y registro de enfermedades (ATSDR) señala que el cromo es un elemento que existe en forma natural en rocas, plantas, suelo y animales, coexistiendo y formando con otros otros compuestos presentándose en tres formas principalmente: Cromo (0), Cromo III y Cromo VI, incluso es necesario cantidades pequeñas de cromo III para una beneficiosa salud. Muy usado en la industria manufacturera como en la galvanometría (ácido crómico), producción de textiles en productos de consumo para tratar madera (dicromato de cobre), en la curtiembre (sulfato crómico), en obtención de acero inoxidable, fabricación de vidrio, pinturas o pigmentos, cerámicos (Adibmehr et al., 2014). Luego de su uso es liberado llegando al aire, suelo y agua, siendo las condiciones que permiten la forma en que más se presente en el ambiente.

El nivel de cromo en agua, para la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2022) indica un nivel máximo de 0.1 mg/L en caso de ser agua potable. La FDA indica que en agua embotellada el nivel no debe ser superior a 0.1 mg/L. Para la agencia de Administración de seguridad y Salud Ocupacional (OSHA-USA) establece como límite de exposición en el aire de Cr^{+6} en áreas de trabajo el nivel de 0.005 mg/m^3 , 0.5 mg/m^3 de Cr^{+3} y 0.1 mg/m^3 para Cr^0 en una jornada de 8 horas; Asimismo el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional

(NIOSH- USA) sugiere la exposición máxima de 0.5 mg/m^3 en presencia de cromo metálico y compuestos de cromo (II) y cromo (III) en el aire para jornada de 8 horas diarias. Además de un límite de $0,001 \text{ mg/m}^3$ para el Cr^{+6} en jornada de 10 horas (ATDSR, 2012).

Sin embargo, se han venido haciendo otros esfuerzos en regular la presencia de cromo hexavalente en agua, el estado de California – USA estableció en el 2016 el nivel máximo de contaminantes de $10 \text{ }\mu\text{g/L}$. Esto fue motivo para que se realicen investigaciones para eliminar el Cr (VI), ensayándose con resinas de intercambio iónico, teniendo en cuenta el tiempo de contacto en lecho vacío (EBCT) y la tasa de carga hidráulica (HLR), encontrando que se puede esperar entre 12,000 y 37,000 volúmenes de lecho de tratamiento antes del umbral de avance de $8 \text{ }\mu\text{g/L}$, que el HLR tiene poco efecto en la eliminación del Cr VI (probado en el rango de 75 a 30 gpm/ pie^2) pero con EBCT más prolongados mejoraron el rendimiento y los aniones del agua cruda (sulfatos y nitrato) si tenían efectos para el cromo en la resina, (Gorman et al., 2016)

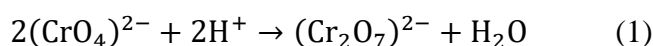
El cromo hexavalente tiene la particularidad de alta toxicidad y movilidad en ambientes del suelo y agua, no forma compuestos insolubles en solución acuosa dificultando la separación. En su forma de oxianiones de Cr (VI) tienen mucha movilidad y toxicidad al ambiente en cambio como cationes de Cr (III) no lo son; por lo tanto, la manera como puede reducirse el Cr (VI) a Cr (III) es una de las formas de reducir la presencia de este elemento peligroso (Barrera et al., 2012). (Barrera-Díaz et al., 2012). El Cr (VI) tiene una alta solubilidad en aguas superficiales y subterráneas que permite ingresar al interior de sistemas vegetales impactando con toxicidad extrema para plantas y animales por sus propiedades cancerígenas y mutagénicas.

Teniendo en cuenta esta peligrosidad, la USEPA en su regulación legal para el monitoreo y descarga conteniendo Cromo en aguas residuales industriales fija como límite

máximo 0.05 mg/L de Cromo (VI) (Dhal et al., 2013), lo mismo se ha reglamentado en muchos países del mundo dentro de ellos Perú

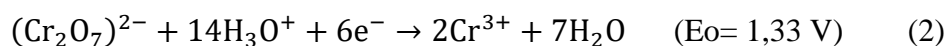
2.1.4 Toxicidad del cromo

El cromo existe en el medio ambiente en diversas formas reactivas de acuerdo a su estado de oxidación (como +6, +5, +4, +3, +2, +1, -1, -2, -4), siendo las formas más estables son Cr (III) y Cr (VI) (Hlihor et al., 2017; Itankar, 2018). El Cromo no es reactivo con el agua y reacciona con la mayoría de los ácidos, a pH bajo y neutro el Cr (VI) es potencial oxidante, siendo las formas más predominantes en equilibrio, ver (1)

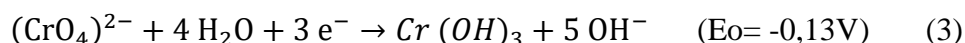


Al variar el pH, permite que los aniones cromato y dicromato cambien sus propiedades oxidativas, siendo muy oxidantes a pH bajo y moderadamente a pH alto, se explica por su potencial eléctrico (Eo), ver (2) y (3).

En medio ácido se produce cationes de Cr^{3+}



En medio básico se produce $\text{Cr}(\text{OH})_3$



La toxicidad del Cromo (III) no se conoce, en cambio el Cromo (VI) es más tóxico que el Cr (III) (Lytras et al., 2017), al ingresar a las plantas dificulta su crecimiento, germinación y actividad fotosintética que terminan en la mutagénesis (Ertani et al., 2017), en los seres humanos causa problemas al aparato respiratorio, a la piel, daños renales y hepáticos, se dice que es un cancerígeno ocupacional (Mishra y Bharagava, 2016).

2.1.5 Parámetros físico químicos del agua

Los parámetros físico/químicos son indicadores esenciales que determina el nivel de calidad y estado del agua, en el Perú mediante el Decreto Supremo 004-2017-MINAM se

norma los estándares de calidad ambiental (ECAS) en agua para las diferentes categorías (Categoría 1: Aguas superficiales para producir aguas potable; Categoría 2: para extracción, cultivo, actividades marinos costeras y continentales; Categoría 3: Para riego de vegetales y bebida de animales; y Categoría 4: Conservación del ambiente acuático). En lo relacionado a las aguas residuales que se vierten a los cuerpos receptores, es preocupación de los gestores controlar el nivel de contaminación para ser dispuestas, en el país se hace teniendo en cuenta los valores máximos admisibles (VMA) debidamente normado.

Según el Centro de investigación de en Geografía Aplicada (CIGA), en el 2017 se indica que las industrias alimentaria, industrial, textil, química, de curtido y lavanderías industriales pueden descargar aguas ácidas o alcalinas, con elevados valores de DBO y DQO, sólidos suspendidos y aceites y grasas. Estos valores típicos de estas aguas residuales señalan, están en los intervalos de la Tabla 1, donde destaca los valores de los parámetros para la industria del curtido.

Tabla 1

Valores Típicos de parámetros físico – químicos de aguas residuales industriales

Tipo de Industria	Consumo de agua (m³/t)	Producción ARI	pH	DBO5 (mg/l)	DQO (mg/l)	S.S.t. (mg/l)	A y G (mg/l)
<i>Industria alimentaria</i>							
Láctea (leche)	0,7-2	0,7-1,7	>9	500-1500	1000-3000	200-1500	40-200
Láctea (queso)	0,7-3	0,7-2	>9	1000-2000	2000-4000	201-1500	100-400
Mataderos (aves y ganado)	3-8	3-8	7-9	500-2000	1000-4000	300-1000	100-400
Grasas y aceites			2-12	2000-4000	4000-6000	1000-2000	1000-2000
Pan y derivados			7-9	200-800	500-2000	500-1000	
Bebidas no alcohólicas gaseosas	3-7	3-7	>4,5 -12	500-1000	1000-2000	50-500	

Cervecera	3-7	3-7	4,5-12	10000-15000	3000-45000	500-5000	50-500
Conservas vegetales	20-30	20-30	7-9	1000-3000-	2000-4000	500-3000	
Conservas de pescado	8-15	4-8	6-9	6000-12000	90000-150000	1000-10000	15000-25000
<i>Industria Textil</i>							
Algodón	100-250	100-250	>9	200-600	500-2000	100-200	100-200
Producción de lana	50-100	50-100	>9	300-2500	500-4000	100-200	100-200
Lavado lana	100-250	100-250	>9	3000-25000	4000-40000	3000-30000	5000-25000
Fibras sintéticas	150-250	150-250	>9	300-2000	600-3000	500-1000	
<i>Industria Química</i>							
Industria del caucho			4,5-9	100-1000	500-2000	100-1000	100-1000
Industria del plástico y produc. Sint.			4,5-10	100-1000	500-2000	100-1000	100-1000
Fab. Detergentes y jabones			>9		15000-90000		1000-80000
<i>Industria del curtido</i>							
Curtido de la piel	20-70	20-70	<4	700-3000	1000-5000	500-8000	1000-2000
Lavandería industrial							
Lavanderías industriales	20-60	20-60	<4	400-500	600-1000	500-1000	

Fuente: Bauer et al., (2017)

Entre los principales parámetros físicos – químicos que se consideraron y evaluaron en esta investigación se tiene a:

Potencial de hidrógeno (pH).

Es el valor que indica la cantidad de iones de hidrógeno (H⁺). La escala de medición es el intervalo de 0 a 14, determina si la sustancia es ácida (valores por debajo de 7), neutra (valor 7) o básica (valores por encima de 7). El nivel neutro significa que el número de iones hidrógeno (H⁺) es igual a los iones oxidrilo (OH⁻). Es un parámetro importante en los procesos de tratamiento de aguas naturales como residuales (neutralización ácida – base, precipitación,

coagulación, etc.). En aguas residuales con pH muy bajo dificulta su tratamiento biológico, así como impacta en los cuerpos receptores. Se recomienda su medida in situ. (DIGESA, s.f.).

Sólidos suspendidos totales (SST).

Son sólidos suspendidos producto de fenómenos de erosión de suelos, detritus orgánico y plancton, no se pueden quitar por medio de deposición. Le dan aspectos visibles al agua como turbidez, olor, color, claridad. Son los elementos residuales de material que quedan luego de efectuarse la evaporación a una muestra seguido del secado en una estufa a temperatura controlada. Se recomienda (SUNASS) el nivel de 25 a 50 mg/L en caso de aguas para consumo humano (DIGESA, s.f.).

La materia suspendida no disuelta se le denomina “sólidos suspendidos” y se evalúan teniendo en cuenta la turbiedad; los sólidos suspendidos mismos y los sólidos suspendidos volátiles se usa en el tema de saber la concentración de residuos domésticos industriales.

Turbidez.

Es un indicador de la presencia de materias en suspensión (de diversos tipos) de tamaño de 0.1 a 1000 nm de diámetro. Es indicador de calidad del agua y de cuan eficiente es un proceso de filtración. Cuando sucede que la materia suspendida presente en el agua absorbe la luz, da aspecto nublado, esto es la turbidez, es la resistencia a la trasmisión de la luz en el agua. Si existe nivel alto de turbidez favorece la proliferación de bacterias, y protege a los microorganismos reduciendo la acción de los desinfectantes. Se miden en UNT (unidades nefelométricas de turbidez). Agua para consumo se recomienda menores a 5 UNT (OMS). En aguas naturales se recomienda 1000 UNT (DIGESA, s.f.).

Conductividad eléctrica (CE).

Se considera una expresión relacionada a la cantidad de iones disueltos a una temperatura de medida. Es el nivel de capacidad de una solución de transportar corriente eléctrica, por la presencia, concentración y movilidad de los iones, de la valencia y temperatura. La CE puede ser indicador de la existencia de sales en el agua se expresa en micro Siemens ($\mu\text{S/L}$). Permite determinar los sólidos disueltos totales al multiplicarse por un factor entre 0.55 y 0.75. La salinidad del agua se determina por la CE. El agua pura la conductividad es baja, si la CE aumenta es indicativo del aumento de sólidos disueltos. Se recomienda valores máximos de 1000 $\mu\text{S/cm}$, (DIGESA). La CE puede expresarse en unidades de Siemens/cm, mhos/cm y sus equivalencias son: $1 \text{ dS/m} = 1 \text{ milimhos/cm} = 1000 \mu\text{S/cm}$.

Potencial Redox.

El potencial de oxidación – reducción es medida química que determina el equilibrio de las cargas eléctricas o no, si es cero habrá un equilibrio perfecto entre aniones y cationes para la reacción química, cuando es negativo quiere decir que hubo una reducción (poder reductor superior o más fuerte que la oxidación), si el potencial es redox es positivo quiere decir que hubo una oxidación (agente oxidante fue más fuerte que el reductor). En otras palabras, el potencial redox señala si en la reacción química habrá una oxidación (perdida de electrones) o una reducción (ganancia de electrones). Se expresa en milivoltios (mV). Este es indicador de calidad del agua y permite saber cuándo realizar el tratamiento para eliminar bacterias y virus utilizando la cantidad debida de compuestos químicos tóxicos. Cuando el potencial redox está en 650 mV la reacción será oxidante, el agua está ácida permitiendo la eliminación de bacterias coliformes en menos de un segundo, si este valor es 500 mV se tarda una hora, más abajo no se eliminan. Cuando está sobre los 650 mV el agua es muy ácida no recomendable al consumo humano. Solo en caso de aguas para otro uso si se acepta (700 mV

agua de piscinas). El potencial redox en matrices ambientales es muy importante en cuanto se refiere a que permite inferir el grado de disponibilidad de electrones en aguas naturales, aguas industriales, sedimentos y suelos (Jardim, 2014).

Temperatura (T).

De importante influencia en la calidad del agua. Permite la vida acuática, reacciones químicas, velocidades de reacciones y en la aptitud del agua en ciertos usos. De influencia en el comportamiento de otros parámetros de calidad del agua (pH, OD, CE, etc.), por ejemplo, en agua fría el oxígeno es menos soluble que en agua caliente, aumenta la velocidad de reacción del oxígeno a más temperatura en la superficie del agua. Las variaciones intempestivas de temperatura pueden llevar a la mortalidad de la fauna acuática sobre todo el aumento de temperatura. Valores mayores de 50 °C debe tenerse cuidado, a 15 °C las bacterias que generan metano dejan de hacerlo. A temperaturas elevadas se pueden presentarse proliferación de hongos y plantas acuáticas. La temperatura recomendada por DIGESA es de 15 °C como máximo para consumo humano, se indica que a temperaturas altas disminuye el OD. El agua de uso recreacional de contacto directo se recomienda esté de 15 a 35 °C (DIGESA, s.f.).

Oxígeno Disuelto (OD).

El oxígeno disuelto es necesario para la vida de los microorganismos aerobios en el agua y otras formas de vida. La presencia depende de su solubilidad que es ligeramente baja en el agua dependiendo la presión parcial en la atmósfera, temperatura, pureza (salinidad, sólidos en suspensión, etc.). El nivel recomendado de OD para la vida acuática es de 4 a 5 mg/L, si es menor puede haber impactos negativos en algunas especies. Si el nivel es de 0 a 4 el agua es de mala calidad, entre 4.1 a 7.9 ppm es aceptable, de 8 a 12 ppm es de buena calidad y si es más de 12 ppm se recomienda repetir el análisis. El OD depende de la altitud, así a 20

°C y a 0 msnm el OD tiene el nivel de 9 mg/L, a 500 msnm alcanza 8 mg/L y a 1.000 msnm es 7.4 mg/L (DIGESA, s.f.).

Demanda química de Oxígeno (DQO).

Es nivel de oxígeno necesario para oxidar químicamente a la materia orgánica e inorgánica en el agua. Se expresa en mg/L. Permite determinar la cantidad de materia orgánica presente en las aguas naturales y residuales (industriales y municipales). En caso de aguas residuales el DQO es mayor que su correspondiente DBO (oxidación química mayor que la biológica). Su método de análisis es usando preferentemente dicromato de potasio (gran capacidad oxidante). Se indica que la concentración aceptable es 50 mg/L, (DIGESA, s.f.).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

El DBO es la cantidad necesaria de oxígeno consumido por microorganismos para degradar biológicamente de la materia orgánica en un ambiente aeróbico, al existir mayor materia orgánica mayor contenido de microorganismos habrá en el agua, por tanto, se recomienda niveles bajos concentraciones. Es un parámetro de contaminación orgánica, es decir determina cantidad aproximada de oxígeno para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente en un periodo de tiempo que generalmente es 5 días (DBO5) a 20 °C (en la oscuridad). Es recomendable un límite de 15 mg/L, (DIGESA, s.f.).

Aceites y grasas (A/G).

Son sustancias producto de la descomposición de vegetales, de residuos alimenticios y procesos industriales, etc., y que son difíciles de metabolizar por las bacterias y por lo tanto flotan. Perjudiciales a la salud al ser absorbidos por la piel, entre otros, (DIGESA, s.f.).

Níquel.

Constituye aproximadamente el 0.008 % de la corteza terrestre, también se encuentra en pequeños niveles en plantas y animales, agua de mar, petróleo y carbón. Es un metal

magnético duro, resistente a la corrosión. Tiene impacto negativo a la salud (cáncer, embolias, asma, alergias, etc.). Legislaciones internacionales como Brasil consideran como estándares de 0.025 mg/L, (DIGESA, s.f.).

Boro.

Tiene una gran reactividad con el oxígeno y nitrógeno a temperaturas altas. Es muy tóxico a niveles de concentración alta para la vegetación. Para los seres humanos puede causar problemas al estómago, hígado, riñones, cerebro en concentraciones altas. En Brasil se indica que el valor de 0.5 mg/L corresponde a agua salobre, (DIGESA, s.f.).

Zinc.

Su alto nivel en el organismo puede ser perjudicial a la salud como úlcera en el estómago, irritación en la piel, dañar el páncreas, desórdenes respiratorios. Los niveles recomendados en agua dulce son de 0.18 a 5 mg/L, aguas salobres de 0.09 mg/L (Brasil), en otros países como Ecuador para efluentes indica el nivel de 5 mg/L (DIGESA, s.f.).

2.1.6 Cavitación hidrodinámica

Es un fenómeno conocido desde muchos años porque se presentaba como problema en los buques torpedos (Mason W.P. and Thurston R.N., citado por Acevedo, 2004). La cavitación hidrodinámica se produce cuando sin mediar la temperatura un líquido, entre ellos el agua, al pasar una región a alta velocidad, la presión disminuye por debajo de su presión de vapor lo que permite que sus moléculas cambien al estado de vapor generándose burbujas llamadas cavidades de vapor en el interior del líquido es decir se presenta un estado bifásico(vapor-líquido), estas al continuar su trayectoria pasan a una zona donde la presión es alta lo que hace que las burbujas de vapor colapsen al ser aplastadas implosionando súbitamente y pasan nuevamente a su estado líquido. En ese instante se genera una turbulencia enérgica, se forman vórtices y pulsaciones de velocidad, presión y temperatura. La cavitación hidrodinámica tiene

un efecto destructivo erosivo en paredes metálicas; sin embargo, también es aprovechado en beneficio para dispersar los líquidos procesados en forma homogénea, así como para destruir microorganismos en líquidos contaminados, (Domínguez, 2018). En otras palabras, la cavitación es la aparición de burbujas de vapor en un medio líquido homogéneo inicial debido a la aparición de una baja presión inferior a la presión de vapor saturado del líquido, esto se da con características físicas propias del líquido (Franc y Michel, 2004).

García y Calvo (2013), indica que la cavitación hidrodinámica es un fenómeno que se presenta cuando se da el cambio de estado de líquido a vapor como causa de la variación brusca de las presiones producidas por efectos hidrodinámicos, acústicos o deposición de energía óptica (someter puntualmente el fluido a fotones de alta intensidad). Las burbujas de vapor forman cavidades en el interior del líquido que van creciendo hasta que se restablezca la presión y velocidad del fluido luego de lo cual implosionan liberando energía en forma de ondas de choque (p. 184)

La cavitación (latín *cavus*=cavidad) significa aparición de cavidades de vapor nucleados en la superficie de la estructura conteniendo líquidos bajo variación de la presión con determinada frecuencia e intensidad. Características del fluido como la viscosidad, propiedades físicas influyen en el fenómeno de cavitación y se presenta en agua, solventes orgánicos, biológicos, helio líquido, metales fundidos incluso (Calderón et al., 2019).

2.1.6.1. Tipos de Cavitación:

Los tipos de cavitación de cavitación según Mason y Thurston, citado por Calderón et al. (2019), se presenta:

- A. De acuerdo al suministro de energía: Óptica y molecular**
- B. De acuerdo a la fuerza de estiramiento: Acústica e hidráulica**
- C. Teniendo en cuenta la forma en que se crean las burbujas de cavitación en el agua, se tiene:**
- a. Burbujas de cavitación de vapor: existe cambios de fase de líquido a vapor y viceversa, en donde la cavitación se da en el vapor saturado en contacto con el líquido precursor, las burbujas crecen por la presión de vapor parcial interna.
 - b. Burbujas de cavitación de gas-vapor: La burbuja es el gas de la evaporación del líquido y la difusión del gas dado en el umbral en la transición de fase. El agua pasa en transición de fases líquido-vapor húmedo saturado-líquido.
 - c. Burbujas de cavitación gaseosa: Se dan las condiciones para liberación de gas en el líquido dándose condiciones de difusión en las regiones de cavitación. La burbuja se da por llenado de gases liberado por el líquido.

También Young (1989), citado por Acevedo (2004) indica que de acuerdo a como se produce la cavitación, pueden ser:

Cavitación hidrodinámica: originada por la variación de presiones en el flujo del líquido conforme a cierta geometría del sistema.

Cavitación acústica: ocasionada por longitudes de onda producto de variaciones de la presión ejercida en un líquido.

Cavitación Óptica: Debido a la acción de fotones de alta intensidad sobre el líquido.

Cavitación de partícula: producido por diferente partícula elemental

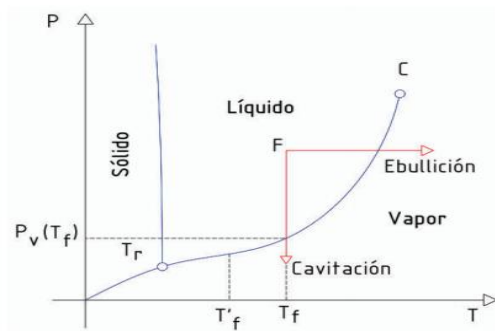
Hay dos formas que se formen burbujas en el líquido: en la ebullición, es decir cuando se eleva la temperatura superando el punto de equilibrio bajo condiciones isobáricas para el cambio de fase (punto de ebullición), la otra manera es disminuyendo la presión por debajo de

la misma condición del punto de equilibrio en condiciones isotérmicas. Ver la figura 1, en donde se aprecia el diagrama de fases del agua, la curva desde el punto triple T_r hasta el punto C es la que separa las fases líquido – vapor, en donde al ocurrir las transiciones bajo condiciones estáticas (o equilibrio) ocurre la evaporación o condensación del fluido en el punto p_v (presión de vapor) que depende de la temperatura (T). Esta curva $p_v(T)$ no es límite absoluto del estado líquido-vapor y puede cambiar ante un cambio drástico de fase.

Entonces la cavitación ocurre a temperatura constante (proceso isotérmico) conforme se aprecia en la Figura 1 a diferencia de la ebullición. La cavitación es un flujo multifásico por cuanto las burbujas de vapor o gas se mueven conjuntamente con la fase líquida en un dispositivo de baja presión donde se presentan las dos fases en un intercambio de fases. Esto se han evaluado por medio de las Ecuaciones 1, 2 y 3 (Hidalgo et al., 2014, citado por Macas, 2018)

Figura 1

Diagrama de presión vs Temperatura de sustancias



Fuente: Franc & Michel (2004)

$$\gamma = \frac{V_l}{V} \dots\dots\dots (Ec. 1)$$

$$\rho = \gamma \rho_l + (1 - \gamma)\rho_v \dots\dots\dots (Ec. 2)$$

$$\mu = \gamma\mu_l + (1 - \gamma)\mu_v \quad \dots\dots\dots (\text{Ec. 3})$$

\forall , volumen total de la mezcla

\forall_l , Volumen de la fase líquida

γ , Fracción de volumen líquido

ρ , densidad de la mezcla

μ , viscosidad molecular de la mezcla

l , fase líquida

v , fase vapor

La presión de vapor es muy importante tener en cuenta en la cavitación, esta presión corresponde al equilibrio dinámico entre los estados líquidos y gaseoso a una cierta temperatura del fluido; es decir la presión de vapor resulta ser directamente proporcional a la temperatura en el fluido (Macas, 2017).

2.1.6.2 Fases de la Cavitación

La cavitación es un proceso dinámico que se inicia con la formación de las burbujas, el crecimiento y luego el colapso al transcurso del fluido en un espacio físico (Macas J., 2017).

La formación: se da cuando en el flujo la presión comienza a bajar por debajo de la presión de vapor a temperatura de trabajo cerca del punto de líquido saturado, (no en el mismo punto debido a la tensión superficial del líquido); sin embargo al superarse esta tensión por los orificios microscópicos en el líquido debido a movimientos térmicos van formándose los núcleos y crecen las burbujas a macroscópicas (nucleación homogénea) dándose la reducción de la tensión superficial del líquido y empezando la cavitación.

Crecimiento: Se forman más burbujas y aumentando el tamaño, dependiendo la velocidad de crecimiento del radio de inicio de la cavidad, la presión estática, etc.

Colapso: aquí se da la implosión de las burbujas o cavidades por la presión estática incrementada a un valor más grande que la presión de vapor del fluido. El colapso es violento

con desprendimiento de gran cantidad de energía que produce turbulencia. Este hecho se produce en nanosegundos con intensidad dependiendo del volumen de la burbuja y gradiente de presión.

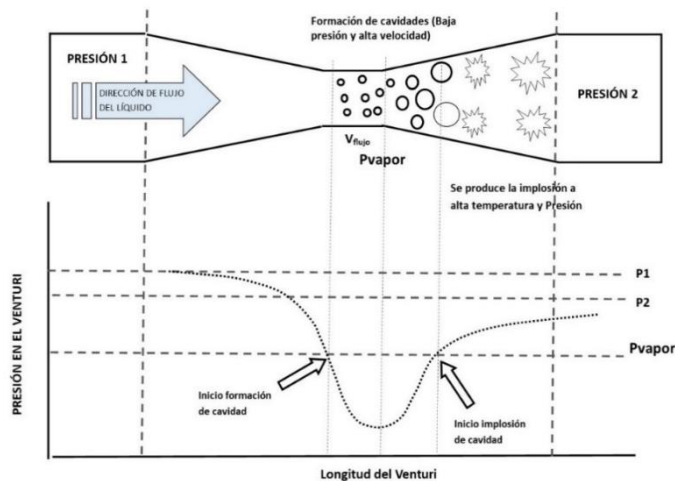
2.1.6.3 Patrones de Cavitación

A. Cavitación de burbujas de viaje

Se presenta en el viaje de fluidos por tuberías, las burbujas o cavidades se van formando y creciendo al presentarse zonas donde la presión cae a niveles inferiores a la presión de vapor y a alta velocidad. Las burbujas crecidas en tamaño llegan a regiones de aumento de presión para sufrir el colapso aguas abajo. Lo más común para este tipo de cavitación se presenta en placas de orificio y tubos de venturi (La Fuente y López, 2018). Ver la Figura 2.

Figura 2

Secuencia del fenómeno de cavitación



Fuente: Adaptado de Monge M. (2018)

B. Cavitación por Vórtice

Se presenta en turbomáquinas, en donde se presentan regiones de vorticidad concentrada donde la presión es menor debido a las fuerzas centrífugas y donde se da la cavitación (caso de las puntas de las hélices de embarcaciones marinas).

2.2 Valores Máximos Admisibles (VMA)

En el Perú, los valores máximos admisibles de los efluentes industriales y comerciales para ser vertidos en los cuerpos receptores están normados en la R.S. 010-2019-VIVIENDA, para descargas no domésticas, conjuntamente con la manera de establecer formas y operación de sistemas de tratamiento, con responsabilidad de los titulares. Si la descarga excede parámetros fisicoquímicos del Anexo I de dicha norma (Tabla 2), se debe efectuar un pago complementario debido a exceso de concentración de contaminantes presentes (Ver Anexo G); Si se excede los niveles de los parámetros señalados en el Anexo II de la norma (Tabla 3), serán sancionados con la suspensión del servicio de alcantarillado.

En el Anexo II de la norma se indica que el valor máximo admisible para descargas al alcantarillado para el parámetro cromo hexavalente (Cr^{+6}) es de 0.5 mg/L,

Tabla 2

Valores Máximos Admisibles de parámetros físico/químicos (Anexo II de Norma)

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para descargas al sistema de alcantarillado
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	DBO5	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	DQO	1000
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	S.S.T.	500
Aceites y Grasas	mg/l	A y G	100

Fuente: El Peruano, (2019)

Tabla 3*Valores Máximos Admisibles de parámetros físico/químicos con sustancias tóxicas*

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para descargas al sistema de alcantarillado
Aluminio	mg/l	Al	10
Arsénico	mg/l	As	0.5
Boro	mg/l	B	4
Cadmio	mg/l	Cd	0.2
Cianuro	mg/l	CN-	1
Cobre	mg/l	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/l	Cr ⁺⁶	0.5
Cromo total	mg/l	Cr	10
Manganeso	mg/l	Mn	4
Mercurio	mg/l	Hg	0.02
Níquel	mg/l	Ni	4
Plomo	mg/l	Pb	0.5
Sulfatos	mg/l	SO ₄ ⁻²	1000
Sulfuros	mg/l	S ⁻²	5
Zinc	mg/l	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	NH ⁺⁴	80
Potencial Hidrógeno	unidad	pH	6-9
Sólidos Sedimentables	ml/l/h	S.S.	8.5
Temperatura	°C	T	<35

Fuente: El Peruano, (2019)

III. MÉTODO

3.1 Tipo de Investigación

De acuerdo a CONCYTEC, la investigación se ajusta al tipo aplicada, en el proceso investigativo desarrollado se tomó en cuenta propósitos de evaluar, comparar, interpretar, estableciendo causalidad e implicancias, como lo establece Lester y Lester, citado por Fernández y Baptista (2018), aplicando los conocimientos y tecnologías para generar conocimiento científico en torno a la cavitación hidrodinámica y microorganismos en tratamiento de aguas contaminadas con cromo.

El diseño de la investigación correspondió al tipo experimental, teniendo un enfoque cuantitativo, se realizaron ensayos manipulando los parámetros de tiempo y concentración de contaminante en las aguas residuales, a fin de evaluar los resultados finales de disminución del contaminante cromo, es decir evaluando un momento antes y después del tratamiento, (Fernández y Baptista, 2018)

3.2 Población y Muestra

Población: Constituido por las aguas residuales del proceso de cromado en dos empresas dedicadas al rubro, donde se genera un volumen aproximado promedio de 10 m³ por día, planta ubicada en el distrito de Villa El Salvador.

Muestra: Se recogió 45 y 20 litros de aguas residuales en dos oportunidades respectivamente de la planta de cromado de Villa El Salvador (Muestra A y Muestra B).

3.3 Operacionalización de Variables:

Se detalla en la Tabla 4. Se tiene:

Variable independiente: Tratamiento agua residual por Cavitación hidrodinámica.

Variable dependiente: Reducción de Cromo hexavalente en agua residual.

Tabla 4*Matriz de Operacionalización*

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala/ Unidades
Cavitación hidrodinámica	Cavitación hidrodinámica fenómeno que se presenta cuando se da el cambio de estado de líquido a vapor como causa de la variación brusca de las presiones producidas por efectos hidrodinámicos. Las burbujas de vapor forman cavidades en el interior del líquido que van creciendo hasta que se restablezca la presión y velocidad del fluido, luego implosionan liberando energía en forma de ondas de choque (García y Calvo, 2013).	La cavitación hidrodinámica fue evaluada teniendo en cuenta las características del equipo cavitador y de las condiciones de operación del proceso de cavitación hidrodinámica.	Características del equipo de tratamiento	Tipo de cavitador (Venturi, Placa de orificio)	nominal
				Bomba (Potencia)	1.5 kW/h
Cromo hexavalente en agua residual	Por tanto, se puede definir a la contaminación de agua como la alteración química, biológico o físico de la calidad y que impacte negativamente a los organismos vivos o que	El cromo hexavalente fue determinado mediante la concentración inicial y final en el agua tratada y las	Concentración de Cromo Total	Capacidad de Tk alimentador	20 L
				Presión de ingreso del agua	bar
				Temperatura de ingreso	°C
				Flujo de ingreso	L/s
			Condiciones de operación del proceso hidrodinámico de cavitación	Tiempo de tratamiento	min
				Concentración inicial y final de Cromo total	mg/mL
				Eficiencia en reducción de cromo total en el tratamiento con cavitación hidrodinámica	%
				Concentración inicial y final de Cromo hexavalente en las muestras	mg/L

<p>haga imposible su uso (Todd, 2007) De acuerdo a lo antes indicado, agua residual contaminada con cromo será aquella que tenga cromo en su contenido.</p>	<p>propiedades fisicoquímicas</p>	<p>Concentración de Cromo Hexavalente</p>	<p>Eficiencia en reducción de cromo hexavalente antes y después del proceso de cavitación pH en el tratamiento de cavitación hidrodinámica</p>	<p>%</p>
			<p>DBO antes y después del tratamiento de cavitación hidrodinámica</p>	<p>mgO/L</p>
		<p>Propiedades fisicoquímicas del agua residual</p>	<p>DQO antes y después del tratamiento de cavitación hidrodinámica</p>	<p>mg/L</p>
			<p>Aceites y Grasas antes y después del tratamiento de cavitación hidrodinámica</p>	<p>mg/L</p>
			<p>SST antes y después del tratamiento hidrodinámica</p>	<p>mg/L</p>
			<p>Otros metales (Ni, Zn, B) antes y después del tratamiento hidrodinámica</p>	<p>mg/L</p>

3.4 Técnica e Instrumentos

Las técnicas e instrumentos empleadas en la investigación fueron:

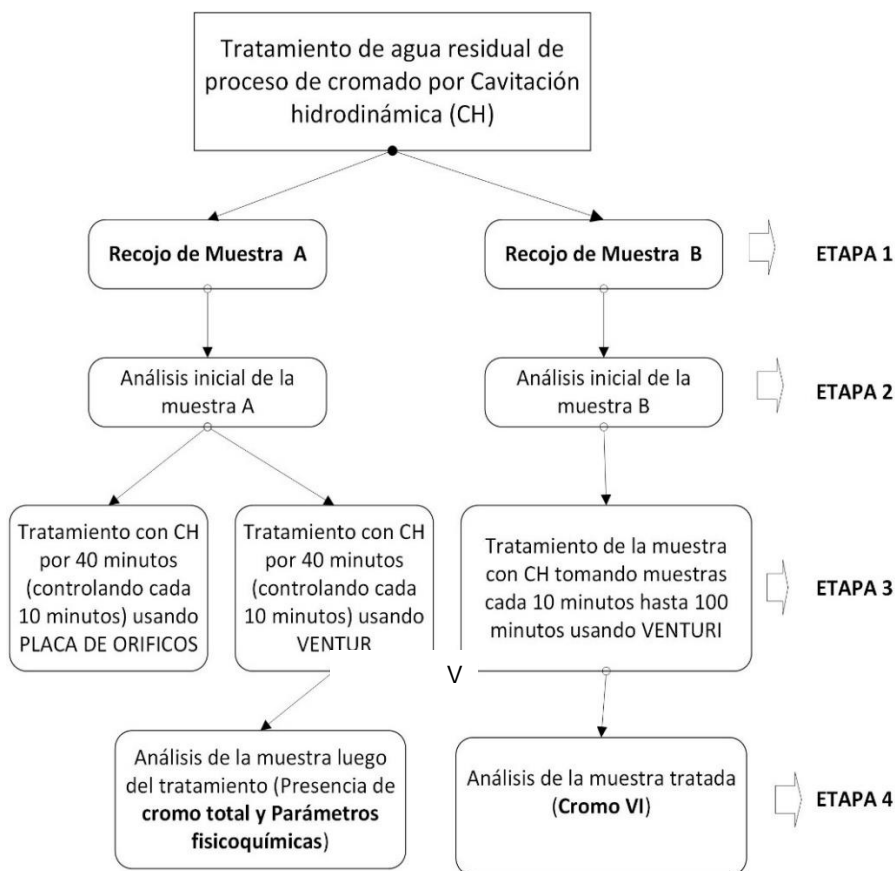
Análisis documental: con la revisión de artículos científicos, tesis, y libros en el recojo de información relacionado a cada variable, dimensiones e indicadores.

Observación: aplicada en la etapa experimental de campo. Aquí se hizo uso de los instrumentos de Fichas de recojo de datos debidamente validados por juicio de expertos y Formatos de custodia que se adjuntan en Anexo A.

3.5 Procedimiento

En el desarrollo de la investigación se realizó las etapas que se observan en el diagrama de procedimiento en la Figura 3.

Figura 3
Procedimiento de la investigación



1.1.1 Etapa 1

Recojo de muestras de aguas residuales de industria de galvanotecnia, específicamente del proceso de cromado, de empresas ubicadas en los distritos de Villa El Salvador a las que se les denominó muestra A y muestra B respectivamente.

1.1.2 Etapa 2

Análisis preliminar de las muestras de aguas residuales para determinar los metales presentes (principalmente Cromo) y características fisicoquímicas principales, con los métodos establecidos y normados correspondientes

En la **Muestra A**, para el cromo total y metales Níquel (Ni), Zinc (Zn) y Boro (B) se tomó en cuenta: al protocolo EPA200.8, Rev 5.4:1994. Determination of Trace Elements in waters and wastes by Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry

Asimismo, para el cromo hexavalente se usó el Espectrofotómetro UV-Visible (λ : 540 nm).

Para los parámetros fisicoquímicos: se realizaron los tipos de ensayo siguientes:

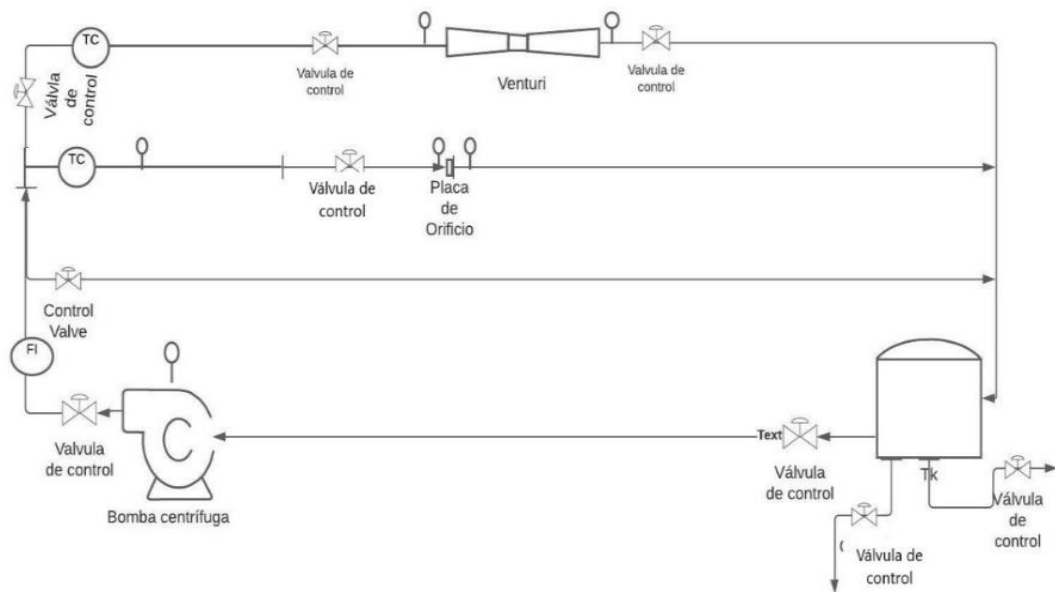
- Aceites y Grasas: siguiendo la Norma SMEWW-ALPHA-AWWA-WEF Part 5520B, 23rd. 2017 (Oil and Gease. Liquid-Liquid, Partition-Gravimetric Method).
- Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW-ALPHA-AWWA-WEF Part 5510B, 23rd. 2017 (Biochemical Oxygen Demand (BOD), 5-Day BOD Test)
- Demanda Química de Oxígeno: SMEWW-ALPHA-AWWA-WEF Part 5520B, 23rd. 2017 (Chemical Oxigen Demand (COD), Closed Reflux, Colorimetric Method).
- Sólidos Totales Suspendidos: SMEWW-ALPHA-AWWA-WEF Part 2540B, 23rd. 2017 (Solids Total Suspended Solids Dried at 103-105 °C).

1.1.3 Etapa 3

Se efectuó el tratamiento de las muestras A y B de aguas residuales del proceso de cromado mediante cavitación hidrodinámica en el sistema diseñado y construido por PROMEC INGENIEROS SAC, dentro del Proyecto de fondos concursables de INOVATE del Ministerio de Producción, en donde el tesista fue investigador principal, el diseño de este sistema de cavitación hidrodinámica se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Diseño de sistema de cavitación hidrodinámica



Para la cavitación hidrodinámica las condiciones de operación del equipo cavitador fueron:

Presión de ingreso al cavitador: entre 3.8 y 4 bar

Flujo en la línea de las aguas residuales por cavitador: Entre 34 y 38 L/min

Cavitador: Venturi y placa de orificios

Potencia de la bomba: 1.5 kW/h

Capacidad del tanque alimentador: 20 L.

1.1.4 Etapa 4

Se realizó el análisis de muestras de aguas residuales luego del tratamiento por cavitación hidrodinámica, para determinar el nivel de concentración de cromo total y cromo hexavalente, así como propiedades fisicoquímicas con los métodos de análisis que se indica en la Etapa 2.

En la **Muestra B**, en el tratamiento del cromo hexavalente: En la muestra inicial se siguió el método SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 3500-Cr-B, 23rd Ed. 2017 (Chromium. Colorimetric Method). En la muestra de agua posterior al tratamiento (ver Figura 5) se hizo mediante espectrofotometría de luz visible, (ver Figura 6, que se basa en el método de Lambert - Beer, midiendo la transmitancia y absorbancia).

Figura 5

Muestras tratadas para análisis



Figura 6

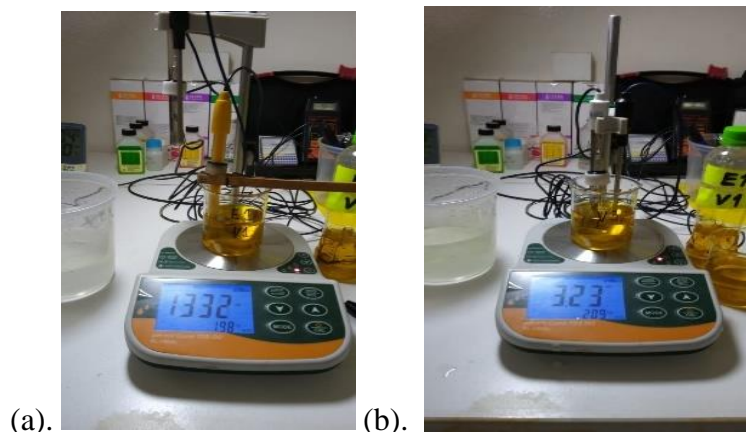
Equipo de Espectrofotometría - UV



En la determinación de los parámetros fisicoquímicos se hizo en laboratorio. Se evaluó la Temperatura, pH, Conductividad eléctrica y Potencial Redox. Se hizo empleando el método potenciométrico, ver Figura 7(a) y 7(b).

Figura 7

Medida de la Conductividad eléctrica (a) y pH (b)



1.1.5 Etapa 5

Trabajo de gabinete se realizó la sistematización y procesamiento de datos y resultados.

3.6 Análisis de los datos

Los datos obtenidos fueron procesados mediante la estadística descriptiva usando el software Excel; Asimismo, se hizo un tratamiento con estadística inferencial con el uso de software SPSS v.25, que se presenta en el capítulo de resultados.

3.7 Consideraciones éticas

Se observaron las buenas prácticas éticas de la investigación, presentando la información sujeta a la verdad, objetividad y honestidad, respetando el derecho de autores y propiedad intelectual. Se observó los lineamientos establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Federico Villarreal (Resolución N° 6436-2019-CU-UNFV) que norma

las buenas prácticas en la realización de los procesos de investigación sobre la base de una voluntad de actuar siempre con principios éticos en concordancia con los principios de la universidad, de bienestar de la sociedad y el medio ambiente. Este documento se sometió a un software anti plagio para verificar el nivel de similitud existente.

IV. RESULTADOS

Se presenta los resultados del tratamiento de aguas residuales de la industria galvanotecnia del proceso de cromado, para dos muestras:

- **Muestra A:** Obtenida de una planta de galvanotecnia en el distrito de Villa El Salvador; luego del tratamiento con cavitación hidrodinámica se analizó y determinó la concentración de cromo total y otros metales, así como los parámetros fisicoquímicos que establece la normatividad peruana respecto a los VMA.
- **Muestra B:** Recolectada del mismo lugar antes mencionado, Se procedió al tratamiento con un sistema de cavitación hidrodinámica para luego analizar y determinar la concentración de Cromo hexavalente y parámetros físico-químicos, comparándolo con los VMA de la norma peruana.

4.1. Tratamiento la muestra A

4.1.1. Concentración inicial de Cromo total y otros metales:

Del análisis inicial en agua residual de la industria de galvanotecnia correspondiente a la Muestra A del proceso de cromado, se encontró que la concentración del cromo total superaba el nivel de los VMA, lo mismo sucede con el Níquel y el Boro, solo el zinc se encontró bajo el nivel del VMA. Ver Tabla 5.

Tabla 5

Concentración inicial de metales en la muestra A de agua residual

Parámetro	Unidades	Valor inicial	VMA
Cromo Total	mg/L	526.7331	10
Níquel	mg/L	31.4404	4
Zinc	mg/L	8.0253	10
Boro	mg/L	4.404	4

4.1.2 Concentración final de Cromo total y otros metales (después del tratamiento)

4.1.2.1. Cromo Total

El tratamiento de cavitación hidrodinámica se ensayó usando dos dispositivos cavitadores, en un primer caso con placa de orificio (5 orificios de 2 mm de diámetro), codificado con Ox (x=1, 2, 3, 4) y en un segundo caso usando el Venturi codificado como Vx (x=1, 2, 3, 4), donde “x” indica el número de muestra luego del tratamiento a diferente tiempo. Ambos ensayos fueron realizados por espacio de 40 minutos y tomando muestra cada 10 minutos. El ensayo se hizo con una presión de entrada de 3.8 a 4 bar y un pH de 5.8. En la Tabla 6, se presenta el resultado obtenido en torno a la concentración de cromo total, en donde se observa que con el dispositivo “Venturi” se obtiene el mayor porcentaje de reducción de cromo total (15%) en el tiempo de 40 minutos, en comparación con el tratamiento usando “placa de orificio” que se alcanzó el 7%.

Tabla 6

Cromo total luego del tratamiento con placa de orificio y Venturi como dispositivos cavitadores (Muestra A)

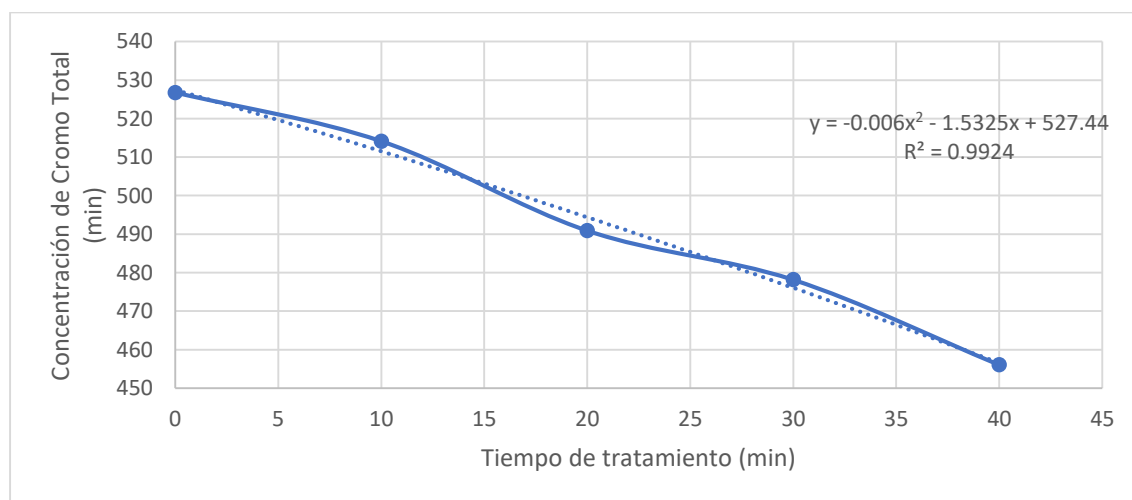
DISPOSITIVO DE CAVITACIÓN	MUESTRA	Tiempo de cavitación (min)	Cromo total (mg/L)	Reducción de Cr Total (%)
	ME	0	526.7331	0
PLACA DE ORIFICIO	O1	10	516.3591	2
	O2	20	514.5095	2
	O3	30	505.1254	4
	O4	40	491.2844	7
VENTURI	V1	10	514.0931	3
	V2	20	490.8831	7
	V3	30	478.1359	10
	V4	40	456.0533	15

Realizando una regresión lineal con los datos para el caso de tratamiento con venturi, se obtiene la ecuación polinómica: $y = -0,006x^2 - 1.5325x + 527.44$ con un coeficiente de

determinación muy significativo, $r^2 = 0.9924$ que infiere un buen ajuste de la curva polinómica (ver Figura 8); Por lo tanto de aquí se puede proyectar la curva buscando el valor de concentración de 10 mg/L, que corresponde al valor máximo admisible de la normativa peruana, así, extrapolando a partir de la ecuación polinómica arriba indicada se encuentra que al valor de 10 mg/L le corresponde un valor de tiempo de 193 minutos. Es decir que para alcanzar el VMA deberá transcurrir 193 minutos de tratamiento, este es un valor teórico que requiere ser verificado experimentalmente, por lo que solo es una aproximación como referencia.

Figura 8

Tiempo de tratamiento proyectado para alcanzar el VMA del cromo total



4.1.2.2. Otros metales

Evaluated otros parámetros metálicos presentes en la Muestra A de agua residual de cromado tratada con cavitación hidrodinámica, se obtuvo resultados de reducción de Níquel hasta el 12 %, de Zinc hasta el 4 % y del Boro hasta el 7 %, empleando cavitadores de placa de orificio y Venturi. Ver Tabla 7.

Tabla 7*Parámetros Ni, Zinc y Boro luego del tratamiento de cavitación en muestra A*

DISPOSITIVO CAVITADOR	MUES TRA	Tiempo (min)	Níquel		Zinc		Boro	
			Valor final(mg/L)	% Reducción	Valor final(mg/L)	% Reducción	Valor final (mg/L)	% Reducción
PLACA DE ORIFICIO	ME	0	31.4404	0	8.0253	0	4.404	0
	O1	10	28.3194	10	7.9226	1	4.223	4
	O2	20	27.902	12	8.0905	-1	4.34	1
	O3	30	28.9666	9	7.82526	2	4.179	5
	O4	40	28.7482	9	7.8833	2	4.074	7
VENTURI	ME	0	31.4404	0	8.0253	0	4.404	0
	V1	10	27.9997	11	7.6741	4	4.12	6
	V2	20	27.7232	12	7.7033	4	4.328	2
	V3	30	28.3176	10	7.8482	2	.163	5
	V4	40	29.0032	8	7.7222	4	4.161	6

4.1.3 Parámetros fisicoquímicos iniciales

Para la muestra A, los valores iniciales obtenidos se muestran en la Tabla 8. Se aprecia que la aceites y grasa, así como los sólidos totales suspendidos se encontraron dentro del nivel de los valores máximo admisibles (VMA) que establece la norma peruana para descargas de efluentes en la red de alcantarillado (Resolución de Consejo Directivo No 044-2012-SUNASS-CD); sin embargo, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) exceden los VMA.

Tabla 8*Parámetros fisicoquímicos iniciales en agua residual de cromado (Muestra A)*

Parámetro	Unidades	Valor inicial	Valores Máximos Admisibles (VMA)
Aceites y grasas	mg/L	9.2	100
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	6048	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	20019	1000
Solidos Totales Suspendidos	mg/L	71	500

4.1.4 Parámetros fisicoquímicos finales (después del tratamiento)

El tratamiento de agua residual de la industria de cromado correspondiente a la Muestra A, mediante cavitación hidrodinámica y usando dispositivo Venturi como cavitador en el tiempo de 40 minutos, presentó valores finales de los parámetros fisicoquímicos que se muestran en la Tabla 9, en donde se comparan con los VMA.

Tabla 9*Parámetros fisicoquímicos de la Muestra A de agua residual después del tratamiento con venturi como dispositivo cavitador*

Parámetro	Unidades	Valor final	Valores Máximos Admisibles (VMA)
Aceites y grasas	mg/L	7.8	100
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	4525	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	15370	1000
Solidos Totales Suspendidos	mg/L	65	500

Se encontró que la variación en los parámetros DQO y DBO en el agua residual luego del tratamiento, fueron los más significativos, en porcentajes que se aprecia en la Tabla 10, pero no llegan a los niveles inferiores que establece dentro de los VMA; en cuanto a la concentración de aceites y grasas, así como los sólidos totales suspendidos también se reducen cierto porcentaje y se encuentran dentro de los VMA de la normatividad peruana.

Tabla 10

Porcentaje de reducción de parámetros fisicoquímicos de la Muestra A luego de tratamiento por cavitación hidrodinámica

Parámetros	Valor inicial (mg/L)	Valor final (mg/L)	Reducción (%)
Aceites y grasas	9.2	7.8	15
Demanda Bioquímica de Oxígeno	6048	4525	25
Demanda Química de Oxígeno	20019	15370	23
Sólidos Totales Suspendidos	71	65	8

4.2. Tratamiento de la Muestra B

4.2.1. Cromo Hexavalente (Cr^{+6})

Con la **muestra B** se realizó el tratamiento con cavitación hidrodinámica utilizando Venturi como cavitador por 100 minutos y se tomó muestras cada 10 minutos. La concentración inicial de Cromo hexavalente en la muestra fue de 1,189.5 mg/L. Luego del tratamiento se determinó el Cr^{+6} presente mediante el método de espectrometría UV-visible (Longitud de onda de 540 nm), obteniéndose el resultado que se muestra en la Tabla 11. El análisis se hizo partiendo de una concentración de 500 mg de Cr^{+6} de una dilución teórica de la muestra inicial. Se puede observar en los resultados que la mayor reducción de Cr^{+6} es como máximo del 11 % y se obtiene a partir de los 20 minutos de tratamiento.

Tabla 11*Concentración de Cr⁺⁶ luego del tratamiento por cavitación (Muestra B)*

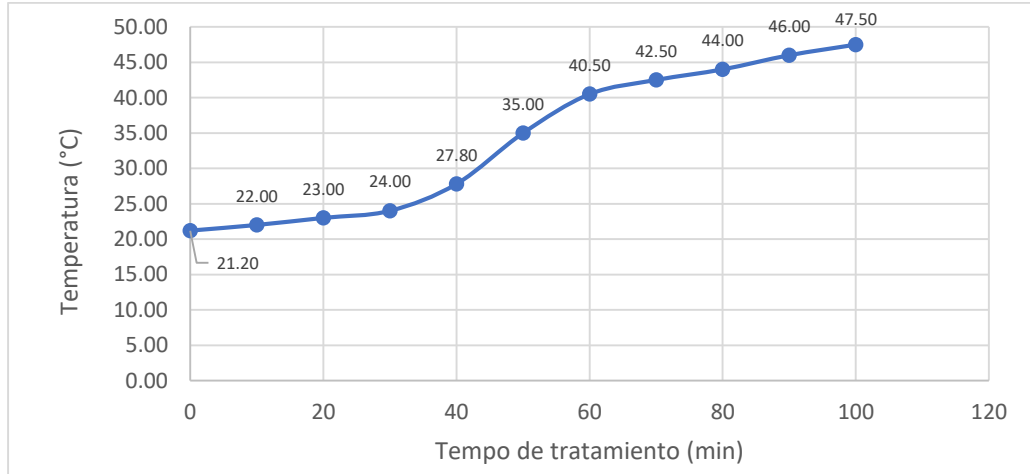
Muestra	Tiempo de tratamiento (min)	Tramitancia (%)	Absorbancia	Concentración (C)	Concentración final (mg Cr ⁺⁶ /L)	Concentración inicial (mg Cr ⁺⁶ /L)	Reducción (%)
V1	10	69.3	0.1592	0.2263	452.6	500.0	9
V2	20	69.6	0.1574	0.2237	447.4	500.0	11
V3	30	69.5	0.158	0.2245	449.0	500.0	10
V4	40	69.4	0.1586	0.2254	450.8	500.0	10
V5	50	69.4	0.1586	0.2254	450.8	500.0	10
V6	60	69.7	0.1567	0.2227	445.4	500.0	11
V7	70	69.5	0.158	0.2245	449.0	500.0	10
V8	80	69.4	0.1586	0.2254	450.9	500.0	10
V9	90	69.4	0.1586	0.2254	450.8	500.0	10
V10	100	69.8	0.1561	0.2218	443.6	500.0	11

4.2.2. Temperatura

Se observó en el trabajo de campo que conforme transcurría el tiempo de tratamiento, la temperatura en el agua residual tratada por el proceso de cavitación hidrodinámica se elevó en su valor, conforme se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Temperatura del agua residual en el proceso de tratamiento de cavitación

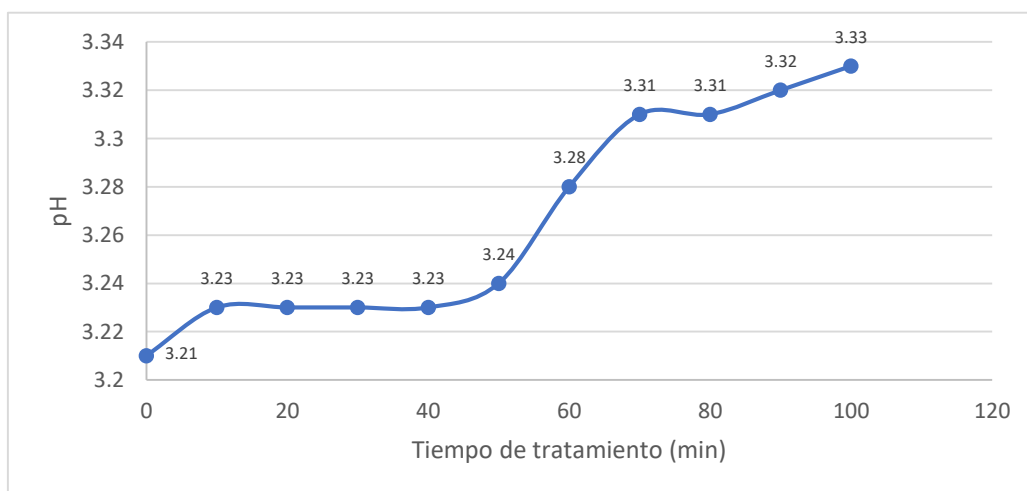


4.2.3. Potencial de Hidrógeno (pH)

Mediciones en el laboratorio del potencial de hidrógeno (pH) en el agua residual tratada con cavitación hidrodinámica, se determinó que las muestras con a más tiempo de tratamiento por cavitación el valor aumentaba, conforme se aprecia en la Figura 10.

Figura 10

Potencial de hidrógeno (pH) del agua residual en el tratamiento de cavitación



4.2.4. Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica en el trabajo de campo en un inicio aumenta aproximadamente duplicando su valor para luego mantenerse casi constante en fluctuaciones de valores cercanos conforme se aprecia en la Figura 11.

Figura 11

Conductividad eléctrica en el agua residual durante el tiempo de tratamiento



4.3. Tratamiento estadístico inferencial de datos

4.3.1. Eficiencia en reducción de cromo total en muestra A, con los cavitadores: Placa de orificio y Venturi

Se buscó determinar la igualdad o diferencia entre el uso de placa de orificio y Venturi para reducir el cromo total.

A. Normalidad de los datos de tratamiento con placa de orificio y venturi.

Planteamiento de Hipótesis:

Ho: Los datos siguen una distribución normal

H1: Los datos no siguen una distribución normal

Para un alfa= 0.05, es decir con 95 % de confianza

Si p valor es ≥ 0.05 se acepta H_0

Si p valor es ≤ 0.05 se acepta H1

El número de datos son menores a 25;

Por lo tanto, se somete los datos a la prueba de Shapiro-Wilk, con el software SPSS

(v.25)

Tabla 12

Normalidad Placa de orificio y Venturi

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Trat_placa orificio	.970	5	.875
Trat_Venturi	.976	5	.913

En la Tabla 12, se aprecia que los niveles de significancia son 0.875 y 0.913 mayor a p valor=0.05 por lo tanto, se acepta H_0 ; es decir los datos provienen de una distribución normal.

B. Igualdad de varianza

Prueba de Levene

P valor \geq Alfa (0.05) \rightarrow acepto H_0 : Las varianzas son iguales

P valor \leq Alfa (0.05) \rightarrow acepto H1: Existe diferencia significativa entre las varianzas

Luego, aplicando SPSS, se obtiene Tabla 13

Tabla 13

Medias de concentración de Cr total luego de tratamiento de cavitación con Placa de orificio y Venturi

Estadísticas de grupo					
	Cavitador	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Concentración cromo	Placa de orificio	5	510.80	13.33	5.96
	Venturi	5	493.17	28.16	12.59

Se procede a establecer si existe diferencia de medias para la concentración del cromo total con los datos obtenidos para la placa de orificio y para el Venturi. El resultado del software SPSS se observa en la tabla 14.

Tabla 14

Prueba T Student comparación de medias (Placa de orificio y Venturi)

Prueba de muestras independientes										
		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Concentración cromo total	Se asumen varianzas iguales	2.73	.137	1.26	8	.242	17.62	13.93	-14.51	49.76
	No se asumen varianzas iguales			1.26	5.7	.255	17.62	13.93	-16.90	52.15

En la Tabla 14, se tiene un p valor de 0.137 mayor que 0.05, por lo tanto, estadísticamente indica que las varianzas son iguales.

Comparación de medias

Prueba estadística: T Student

Prueba de hipótesis:

Para $\alpha = 0.05$. se plantea que si:

El p valor $\geq 0.05 \rightarrow H_0$: No Existe una diferencia significativa entre la reducción de Cr total mediante cavitadores Placa de orificio y Venturi, y si

El p valor $\leq 0.05 \rightarrow H_0$: Existe una diferencia significativa entre la reducción de Cr total mediante cavitadores Placa de orificio y venturi.

De los resultados (Tabla 14) se encontró que el nivel de significancia sig. o p valor=0.137 ≥ 0.05 , entonces, se concluye **estadísticamente que no existe una diferencia significativa entre la reducción del cromo con placa de orificio y venturi.**

4.3.2 Reducción del Cromo VI en muestra B con cavitación hidrodinámica

Verificando la normalidad de los datos obtenidos, planteando la hipótesis pertinente que se indican de la siguiente manera:

H_0 : Los datos siguen una distribución normal

H_1 : Los datos no siguen una distribución normal

Para un $\alpha = 0.05$, es decir con 95% de confianza

Si p valor es ≥ 0.05 , se acepta H_0

Si p valor es ≤ 0.05 , se acepta H_1

Como el número de datos que se dispone es menor a 25, se tomó en cuenta la prueba de Shapiro-Wilk para la normalidad

Con el software SPSS (v.25) se obtiene el resultado en Tabla 15.

Tabla 15

Normalidad Cr después de cavitación hidrodinámica

Shapiro-Wilk			
	Estadístico	gl	Sig.
Cr Final	.900	10	.219

Del resultado en la Tabla 15, tenemos que el nivel de significancia es 0.219 mayor a p valor=0.05; Por lo tanto, se acepta H_0 , es decir:

Los datos de concentración de Cromo VI después del tratamiento con CH, provienen de una distribución normal.

Luego se hace el Planteamiento de Hipótesis:

Si $\mu_0 = \mu_1$; (Las medias son iguales)

H_0 : No hay diferencia significativa de la concentración de Cr^{+6} en el agua residual entre antes y después del tratamiento con Cavitación hidrodinámica

$\mu_0 \neq \mu_1$; (Las medias son diferentes)

H_1 : Hay diferencia significativa de la concentración de Cr^{+6} en el agua residual entre antes y después del tratamiento con Cavitación hidrodinámica

Asumiendo el nivel de significancia:

95 %, entonces $\alpha=0.05$.

Se asume la prueba estadística:

Prueba T para 2 muestras relacionadas

Se plantea los criterios de decisión de acuerdo a:

Si p valor $\geq 0.05 \rightarrow$ Se acepta H_0

Si p valor $\leq 0.05 \rightarrow$ Se rechaza H_0 y acepta H_1

Resultados y conclusión, se aprecia en la Tabla 16.

En la Tabla 16, el p valor es en $0.00 \leq 0.05$, entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1 , es decir: Hay diferencia significativa de la concentración de Cr^{+6} en el agua residual antes y después del tratamiento con Cavitación hidrodinámica. En otras palabras, se existe reducción de la concentración del Cr^{+6} en las aguas residuales de cromado luego del tratamiento por cavitación hidrodinámica.

Tabla 16

Cromo VI en agua residual antes y después de tratamiento con Cavitación hidrodinámica

		Prueba de muestras emparejadas							
		Desv. Media	Desv. Desvia ción	Diferencias emparejadas		t	gl	Sig. (bilate ral)	
				Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior				
Par 1	Cr VI inicial - Cr VI Final	0.97	2.80	.88	48.96	52.98	57.45	9	.000

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El cromo en aguas residuales de la industria de galvanotecnia específicamente del proceso de cromado, representa una alta peligrosidad sobre todo en su estado hexavalente, siendo muy dañino al medio ambiente y salud de los seres vivos, por lo que buscar una alternativa de solución es muy necesario, Mishra y Bharagava (2016) señalan que la presencia de cromo es un contaminante principal en el ambiente, a la vez Benitez (2011) agrega que es perjudicial a la salud. En ese contexto la investigación consistió en el tratamiento de efluentes industriales conteniendo cromo total que se realizó mediante la tecnología emergente de cavitación hidrodinámica (CH) usando una primera muestra (Muestra A) y posteriormente repitiendo el uso de cavitación hidrodinámica en una segunda muestra (Muestra B) determinando la concentración del Cromo hexavalente. Existen investigaciones en torno al tratamiento de aguas residuales contaminadas con cromo y otros contaminantes provenientes de procesos industriales entre ellos de curtiembre utilizando CH, pero realizadas generalmente a nivel laboratorio; de tal manera que en la investigación que se da cuenta se usó aguas residuales reales de la industria de la galvanotecnia (proceso de cromado) existiendo escasa literatura científica y usando un prototipo de cavitación hidrodinámica diseñado y construido a nivel piloto.

La muestra A de agua residual del proceso de cromado inicialmente presentó alta concentración de cromo total (526.7331 mg/L) nivel que está por encima de lo que la normatividad peruana estipula como los valore máximo admisible (VMA) que es de 10 mg/L para cromo total (Resolución de Consejo Directivo No 044-2012-SUNASS-CD). La muestra también presentó algunos valores de parámetros fisicoquímicos (DBO de 6048 mg/L y DQO de 20019 mg/L), en niveles fuera de los VMA permitidos para ser vertidas en los cuerpos receptores. La carga contaminante respecto al cromo se debe a que en el proceso de cromado

no se agotó suficientemente el metal disuelto en la solución de trabajo; por otra parte, los valores altos de DQO y DBO significa presencia de materia orgánica (en rango muy contaminada) y que proviene del uso de algunos compuestos y aditivos en el proceso de cromado o deficiente enjuague en la etapa del decapado. Bauer et al. (2017) indica que los valores típicos en aguas residuales en la industria de curtido de piel donde se usa cromo, el DBO está en el rango de 700 a 3000 mg/L, el DQO entre 1,000 a 5,000 mg/L, los SST entre 500 a 8,000 mg/L y los aceites y grasas (A y G) entre 1,000 a 2,000 mg/L, los valores anteriores comparados con los determinados en las aguas residuales de la muestra A provenientes de cromado, los últimos mencionados tienen valores superiores debido al tipo de industria y proceso exclusivamente donde se usa cromo en gran porcentaje. Asimismo, encontrando la relación DBO/DQO se encuentra el valor de 0.3 que resulta ser inferior a 0.5 y mayor a 0.2 lo que establece que la muestra A del estudio puede biodegradarse, pero muy lentamente (Aznar Jiménez, 2000).

La concentración de cromo total en la muestra de agua residual "A", después de tratada con Cavitación Hidrodinámica, se redujo hasta el 15 % en un tiempo de 40 minutos cuando se empleó un "Venturi" de hendidura como dispositivo cavitador, en comparación al 7 % de reducción para el mismo tiempo cuando se utilizó "placa de orificio" de 2 mm de diámetro; entonces, cuando se usa como dispositivo cavitador el Venturi se obtiene mejores resultados en la disminución del contaminante en comparación cuando se usó placa de orificio, esto verifica los similares resultados encontrados por Kumar et al. (2013) que indican lo importante tener en cuenta el dispositivo cavitador y las características del mismo; en este mismo sentido Saharan et al. (2013) verificaron los efectos de los parámetros geométricos y operativos de dispositivos cavitadores placa de orificio, Venturi circular y Venturi de hendidura en la degradación del tinte naranja-G, encontrando que con Venturi con rendijas obtuvieron

degradación de 50 % más alta que con los otros dispositivos; otros trabajos en el mismo sentido lo realizaron (Randhavane y Khambete, 2017) y (Zupanc et al., 2020). En la investigación estadísticamente no se encontró así, pero esto se debe por ser los valores de reducción muy cercanos y que estadísticamente se considera que son iguales, pero en realidad no lo son.

Los parámetros fisicoquímicos de la muestra "A" de agua residual contaminada con cromo luego del tratamiento presentan una variación del 15 % de disminución para aceites y grasas, 25 % de disminución para la Demanda bioquímica de oxígeno (DBO), 23 % de disminución para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y 8 % de disminución de sólido torales suspendidos. Se aprecia que los aceites y grasas, así como los sólidos totales se encontraron dentro de los VMA, en cuanto a la DBO y la DQO se logra reducir porcentajes importantes, pero no hasta valores dentro de los VMA, por lo que requiere un tratamiento complementario. Otros investigadores en muestras de aguas de procesos diferentes a la industria de cromado, en torno al DQO y DBO usando cavitación con ozonificación redujeron 40 % y 50 % respectivamente (Boczka et al., 2018), en otro caso se logró reducir el 38 % para el DQO (Rajoriya, 2018) mediante la combinación cavitación hidrodinámica y reactivo fentón en tiempos de 120 minutos, por su parte Caliskan et al. (2017) indican que obtuvieron resultados eficientes para eliminar el DQO y COT mediante cavitación hidrodinámica de aguas con colorantes azoicos. Estos diferentes valores obtenidos se deben a las condiciones de tratamiento, en el caso de la cavitación hidrodinámica es la presión de entrada y el pH factores importantes conforme lo señalan Monge (2018) y Khajeh et al. (2020).

El tratamiento de cavitación hidrodinámica disminuyó otros metales que se encontraban en la muestra A, para el Níquel el 12 %, el Zinc el 4 % y para el Boro 7 %; sin embargo, en el tratamiento se encontró el aumento de la conductividad eléctrica, que concuerda con el efecto del fenómeno de cavitación en la disminución del tamaño de las macromoléculas mencionado

por Doulah (1977), que puede llegar a la formación de iones metálicos y homogenización. La cavitación hidrodinámica fue ensayada para tratamiento de aguas residuales municipales e industriales teniendo una buena efectividad en la disminución de carga contaminante orgánica y microbiológica; Además se ha verificado que para mayor eficiencia en el tratamiento se puede realizar procesos híbridos, es decir cavitación más otro proceso complementario como ozonificación (Korpe y Rao, 2021), oxidación avanzada (Mukherjee et al., 2020; Raut-Jadhava et al., 2013; Boczkaj et al., 2018; Baradaran y Sadeghi, 2019), fentón (Rajoriya, 2018), fotocátalisis (Das et al., 2021), cavitación acústica (Yi et al., 2018). También el uso de microorganismos eficientes se vienen obteniendo muy buenos resultados en forma individual y combinada con otros métodos (Ackerley et al., 2004; Collazos, 2016; Ding et al., 2021; Hernández-Peña et al., 2021; Mora et al., 2021; Uddin et al., 2021; Yasir et al., 2021; Ziagova et al., 2007). Asimismo, el método de cavitación hidrodinámica es considerado un método con ventaja ambiental y bajo consumo de energía para tratamiento de aguas residuales contaminadas con diferentes elementos orgánicos e inorgánicos, como son colorantes en aguas textiles (Nieto et al., 2021; Caliskan et al., 2017), efluentes con desechos radiactivos (Singh, 2015), aguas con insecticidas (Raut-Jadhava et al., 2013), entre otros.

El resultado del tratamiento de cavitación hidrodinámica para el caso de estudio en la reducción del cromo hexavalente en la muestra B de agua residual fue de 10 % a 11 % al cabo de 20 minutos, permaneciendo en ese nivel durante 100 minutos de tratamiento, porcentaje relativamente bajo aún. Este resultado no se pudo contrastar con alguna investigación similar al no encontrar en la literatura científica aplicación de cavitación hidrodinámica en aguas industriales de la galvanotecnia (proceso de cromado); por tanto, con la realización de la investigación se verifica el comportamiento de la cavitación hidrodinámica con este tipo de aguas residuales industriales, considerándose una alternativa viable conforme indica Tao et al.,

(2016) quién indica que este método es una aplicación prometedora para tratamiento de aguas residuales debido al diseño simple del reactor con capacidad de operación a gran escala.

El proceso de cavitación hidrodinámica degrada los contaminantes por efectos físicos y químicos inducidos por el colapso de la burbuja (Tao et al., 2016), es decir sucede transformaciones inducidas por cavitación atribuido a efectos mecánicos (p. Ej. Esfuerzo cortante), químico (p. Ej. Radicales libres) y térmicos (p. Ej., Puntos calientes) al colapsar las burbujas que pueden romper el enlace carbono-carbono para tener descomposición de las macromoléculas de compuestos orgánicos (Doulah, 1977), además los puntos calientes locales se generan al momento de reducirse violentamente el radio de la burbuja generándose altas temperaturas del gas dentro de la burbuja e interfaz gas-líquido, de tal modo que los contaminantes orgánicos se pueden descomponer directamente a otros compuestos orgánicos e inorgánicos de bajo peso molecular en el colapso de la burbuja, a la vez que el agua atrapada en la burbuja se descompone en radicales libres que participan en la oxidación en la interfaz gas-líquido y fase líquida (Storey y Szeri, 2000). Esto justifica que para la investigación la temperatura en el líquido se elevó desde 21.20 °C hasta 47.50 °C.

Las condiciones de operación en la cavitación hidrodinámica fue a presión de ingreso del efluente contaminado entre 3.8 a 4.2 bar y con pH inicial de 2.57 en equipo cavitador (en campo); estas condiciones fueron similares al trabajo de Mukherjee et al. (2020) que realizó la cavitación a 5 bar para la entrada y a pH 2 para tratamiento de aguas industriales con presencia de surfactantes, también a la investigación de Raut-Jadhava et al. (2013) que trabajó entre 5-20 bar de presión de entrada con pH de muestra entre 2 a 7.5 para tratamiento de solución acuosa con insecticida imidacloprid; Asimismo Rajoriya (2018) en el ensayo de cavitación hidrodinámica para tratar efluentes de la industria textil trabajó a 5 bar y a pH 6.8; por su parte Caliskan et al. (2017) degradaron soluciones de colorantes azoicos a una presión de entrada de

5 bar indicando que a ese nivel lograron una mejor mineralización de los contaminantes; algo similar Innocenze (2018) trabajó a 4 bar de presión a pH 3 para degradar líquidos sintéticos de la industria electrónica; con presión de entrada entre 4 y 8 bar se alcanzó degradar aguas residuales con colorante Coomassie brilliant blue (Baradaran y Sadeghi, 2019) . De lo mencionado se desprende que las condiciones de presión de entrada del efluente al dispositivo cavitador es un parámetro muy importante a tomar en cuenta en este tipo de proceso, ya que de ello dependerá el fenómeno físico de formación de las cavidades o burbujas al bajar la presión al pasar el fluido por el cavitador (Monge, 2018). Otro parámetro a controlar es el pH por su intervención en las reacciones químicas que se produzcan debido a la presencia de los radicales oxidrilos (OH^\cdot) por la cavitación y que pueden formar otros compuestos con iones presentes en el medio (Khajeh et al. 2020; Kumar et al., 2013).

El cromo hexavalente presente en aguas residuales también puede reducirse mediante otras metodologías, entre ellas se tiene usando ultrasonido (Ma et al., 2020), por método fisicoquímico o fotocatalisis (Castiblanco y Perilla, 2019; Kazemi et al., 2018), usando chatarra de hierro- NaOH (Gheju y Balcu, 2011), Chatarra de aluminio cero-covalente (Gutierrez, 2019), con empleo de biomasa cáscara de plátano (López, 2019), usando quitosano obtenido de exosqueleto de camarón (Pacay, 2019), con nanopartículas de hierro o bimetálicas (Li, et al., 2019; Zhou et al., 2016), usando biocarbón de microalgas (Daneshvar et al., 2018); empleando aceite vegetal emulsionado (Ding et al., 2020). Un método con ventaja ambiental usado en los últimos tiempos es el empleo de microorganismos para tratamiento de aguas residuales, esta biorremediación se puede dar por adsorción, absorción, transformación, redox y precipitación (Ziagova et al., 2007; Jiaming et al., 2021; Zhang et al., 2021; Pérez, 2013; Lytras et al., 2017; Sengupta et al, 2017; Yasir et al., 2017; Uddin et al., 2021; Jobby et al., 2019).

VI. CONCLUSIONES

- 6.1 Las aguas residuales de cromado de la industria galvánica (muestra A) presentó inicialmente la concentración de 526.33 mg/L de cromo total, valor fuera de los valores máximos admisibles (10 mg/L) que indica la normatividad peruana. Luego del tratamiento con cavitación hidrodinámica se logró reducir dicha concentración hasta 456 mg/L, es decir se tuvo una eficiencia de 15 % en la reducción del contaminante usando dispositivo cavitador tuvo Venturi que resultó ser el dispositivo más eficiente en comparación del dispositivo placa de orificio; en ambos casos la reducción no alcanzó el nivel de los VMA de la legislación peruana para cromo, esto puede tener como causas a las condiciones de los parámetros de operación, como presión de ingreso del agua residual, así como a dimensiones y diseño del equipo cavitador.
- 6.2 Evaluado la concentración de cromo hexavalente en las aguas residuales de los procesos de cromado de la industria galvánica (muestra B), a partir de una dilución inicial de 500 mg/L (muestra madre 2,189.5 mg/L) de cromo hexavalente, para ser sometido a tratamiento por cavitación hidrodinámica, se determinó que luego de 20 minutos de este proceso se encontró 447.4 mg/L de dicho contaminante, que equivale a una eficiencia de reducción del 11 %. Este hecho también se verificó estadísticamente.
- 6.3 Luego de someterse a cavitación hidrodinámica la muestra A de agua de cromado de la industria galvánica, varía los parámetros fisicoquímicos de la muestra tratada, el pH aumenta para mantenerse cerca la valor neutro, aumenta la conductividad eléctrica, la presencia de Aceites y grasas disminuye, los sólidos totales suspendidos disminuye permaneciendo dentro de los VMA, el DBO y DQO disminuye, por otro lado las concentraciones de los metales Níquel, zinc y Boro también disminuyen alcanzando solo el Níquel a estar dentro de los VMA.

6.4 Por los resultados obtenidos, la cavitación hidrodinámica no ofreció una alta reducción del cromo hexavalente; sin embargo, se debe seguir evaluando en cuanto a otras condiciones y formas complementarias de operación del proceso de tratamiento (procesos híbridos con otros métodos), el tiempo y las características de las aguas residuales, entre otros parámetros, teniendo en cuenta que esta metodología es amigable con el medio ambiente al no usar sustancias químicas ni generar otros contaminantes tóxicos y perjudiciales a los seres humanos, flora y fauna; Asimismo, tiene bajo uso de energía en comparación a otros métodos y lo más importante, se obtiene la recuperación de calidad de aguas para reúso u otras actividades.

VII. RECOMENDACIONES

- 7.1 El tratamiento híbrido de cavitación hidrodinámica con biorremediación usando microorganismos (diferentes), puede ser una manera de reducir el cromo hexavalente de las aguas residuales con mayor eficiencia.
- 7.2 Realizar el tratamiento de Cavitación hidrodinámica de las aguas residuales con contaminante Cromo VI utilizando catalizadores en el proceso.
- 7.3 Realizar el proceso de cavitación ensayando tiempos más amplios de tratamiento.
- 7.4 Buscar la eficiencia del método de cavitación hidrodinámica para reducir el Cromo VI, empleando diversas concentraciones iniciales del contaminante en el agua residual de la industria galvánica.
- 7.5 Realizar el control de parámetros de pH, temperatura y presión de ingreso del efluente industrial, buscando las condiciones favorables al proceso.
- 7.6 Evaluar el sistema de cavitación hidrodinámica para hacerlo más eficiente teniendo en cuenta que últimos estudios indican que los efectos mecánicos que se dan como los microchorros, los grandes esfuerzos cortantes, y los gradientes de presión son fundamentales en el tratamiento.

VIII. REFERENCIAS

- Acevedo, A. P., (2004). *Inactivación Microbiana Combinando Ultrasonido de Baja Frecuencia con Ultravioleta de Onda Corta*. [Tesis Licenciatura. Ingeniería de Alimentos, Universidad de las Américas Puebla]. Repositorio Tesis digitales. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lia/acevedo_1_ap/.
- Ackerley, D. F., Gonzalez, C. F., Park, C. H., Blake II, R., Keyhan, M. & Matin, A., (2004). Chromate-Reducing Properties of Soluble Flavoproteins from *Pseudomonas putida* and *Escherichia coli*. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(2), 873-882. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.2.873-882.2004>.
- Adibmehr, M., Bagheri Sadeghi, H. & Dehghan Abkenar, S., (2014). Preconcentration and Speciation of Chromium Using Dispersive Liquid-Liquid Microextraction; Application to Milk and Different Water Samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry Research*, 1(1), 20-28. <https://doi.org/10.22036/abcr.2014.4784>
- Agudelo-Valencia, R., Ovalle-Gonzales, D., Rodriguez-Rodriguez, L., Camargo-Vargas, G. y Almonacid-Jiménez, L., (2019). Remoción de sulfuros presentes en agua residual del proceso de curtido mediante cavitación hidrodinámica. *Revista ION*, 32(1). <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v32n1-2019002>
- ATDSR - Division of Toxicology and Human Health Sciences, (2012). *Resumen de salud pública Cromo*. (Informe Setiembre). https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.pdf
- Aznar, A., (2000). Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. *Gestión Ambiental*, 20(23), 12-19.
- Randhavane, B. & Khambete AK., (2017). Hydrodynamic Cavitation: A Novel Treatment Approach. *Materialtoday: Proceedings*, 4(9), 9680 – 9684. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.246>

- Banerjee, S., Kamila, B., Barman, S., Joshi, S. R., Mandal, T. & Halder, G., (2019). Interlining Cr(VI) remediation mechanism by a novel bacterium *Pseudomonas brenneri* isolated from coalmine wastewater. *Journal of Environmental Management*, 233, 271-282. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.048>
- Baradaran, S., & Sadeghi, M. T., (2019). Coomassie Brilliant Blue (CBB) degradation using hydrodynamic cavitation, hydrogen peroxide and activated persulfate (HC-H₂O₂-KPS) combined process. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 145(107674). <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107674>
- Barrera-Díaz, C. E., Lugo-Lugo, V. & Bilyeu, B., (2012). A review of chemical, electrochemical and biological methods for aqueous Cr (VI) reduction. *Journal of Hazardous Materials*, 223-224, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.054>
- Bauer, J. L., Castro, J. C., y Chung, B., (2017). Calidad del agua. En Centro de Investigación en Geografía Aplicada PUCP - CIGA (Ed.), *El Agua en el Perú: Situación y Perspectivas*. (pp. 64-106). <https://ciga.pucp.edu.pe/wp-content/uploads/2017/09/4.-CAP%C3%8DTULO-4.pdf>
- Benitez, (2011). Producción limpia y biorremediación para disminución de la contaminación por cromo en la industria de curtiembres. *Revista Ambiente y Sostenibilidad del Doctorado Interinstitucional en Ciencias Ambientales, Universidad del Valle, Cali, Colombia*, 1, 25-31. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/8248/produccion%20limpia.pdf;jsessionid=F994A2B796CD942CD6EF9B4F8F37C9EE?sequence=1>.
- Boczka, G., Gągola, M., Klein, M. & Przyjazny, A., (2018). Effective method of treatment of effluents from production of bitumens under basic pH conditions using hydrodynamic

- cavitation aided by external oxidants. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 969-979.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.032>
- Calderon, J., Marroquin, A., Luviano L., Maqueda, V., Marín, E. & Calderón, A., (2019).
Sonido, Ultrasonido y Cavitación. *Latin-American Journal of Physics Education*, 13
(4). http://www.lajpe.org/dec19/13_4_11.pdf
- Çalışkan, Y., Yatmaz, H.C., Bektaş, N., (2017). Photocatalytic oxidation of high concentrated
dye solutions enhanced by hydrodynamic cavitation in a pilot reactor. *Process Safety
and Environmental Protection*, 11, 428-438.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.003>
- Canepa, L., Perez, J. & Richter, C., (1984). *Evaluación de Plantas de Tratamiento de Aguas*.
Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Manual
DTIAPA N° C-5, tomo I, Lima -Perú, 1984.
- Castiblanco, Y.T. & Perilla, A.B. (2019). *Remoción de cromo hexavalente en aguas residuales
proveniente de procesos de cromado de plásticos en empresas de Bogotá* [Tesis de
grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio UCC.
[https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/15550/1/2019-
Remocion_Cromo_Hexavalente.pdf](https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/15550/1/2019-Remocion_Cromo_Hexavalente.pdf)
- Clarke, P. H., (1982). The metabolic versatility of pseudomonads. *Antonie Van Leeuwenhoek*,
48, 105-130. <https://doi.org/10.1007/BF00405197>
- Daneshvar, E., Zarrinmehr, M., Hashtjin, A., Bhatnagar, A., Kousha, M., Saratale, G., Maiti,
A. & Vithanage M., (2019). Hexavalent chromium removal from water by microalgal-
based materials: Adsorption, desorption and recovery studies. *Bioresource Technology*,
293 (122064). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122064>

- Das, S., Bhat, A. P. & Gogate, P. R., (2021). Degradation of dyes using hydrodynamic cavitation: Process overview and cost estimation. *Journal of Water Process Engineering*, 42(102126). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102126>
- Dhal, B., Thatoi, H. N., Das, N. N., & Pandey, B. D., (2013). Chemical and microbial remediation of hexavalent chromium from contaminated soil and mining/metallurgical solid waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 250-251, 272-291. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.01.048>
- Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), (s.f.). *Fichas Técnicas: Parámetros Organolépticos, Fisicoquímicos, Inorgánicos, Orgánicos, Microbiológicos*. Grupo De Estudio Técnico Ambiental - GESTA AGUA. http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%201.pdf
- Ding, L., Song, J., Huang, D., Lei, J., Li, X., & Sun, J. (2021). Simultaneous removal of nitrate and hexavalent chromium in groundwater using indigenous microorganisms enhanced by emulsified vegetable oil: Interactions and remediation threshold values. *Journal of Hazardous Materials*, 406(124708). doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124708.
- Dominguez, J.A. (2018). La cavitación hidrodinámica Parte II. *Anuario Ciencia en la UNAH*, 16(1). <https://rcta.unah.edu.cu/index.php/ACUNAH/article/view/1022/0>.
- Dopazo, C., (2008). *¿Cavitar o no cavitar? la inevitable ubicuidad de las burbujas*. Real Academia de Ingeniería, España. ISBN 84-95662-51-5. <https://docplayer.es/79215748-Cavitar-o-no-cavitar-la-inevitable-ubicuidad-de-las-burbujas.html>.

- Doulah, MS., (2013). Mechanismo of disintegration of biological cell in ultrasonic cavitation. *Biotechnonology and Bioengineering*, 19(5), 649-660. DOI: 10.1002/bit.260190504.
- Environmental Protection Agency - EPA (26 de enero 2022). *National Primary Drinking Water Regulations*. <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations#one>.
- Ertani, A., Mietto, A., Borin, M., & Nardi, S., (2017). Chromium in Agricultural Soils and Crops: A Review. *Water, Air & Soil Pollution*, 228(5), 190. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3356-y>.
- Franc J. y Michel J. (Ed.). (2004). *Fundamentals of cavitation*. Kluwer Academic Publishers.
- Franquet, A., Terryn, H., Vereecken, J., (2003). Composition and thickness of non-functional organosilane films coated on aluminium studied by means of infra-red spectroscopic ellipsometry. *Thin Solid Films*, 441(1-2), 76-84. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00886-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00886-1)
- Fu, F. & Wang, Q. (2011) Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: A Review. *Journal of Environmental Management*, 92, 407-418. [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1999947](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1999947)
- García, J.A. & Calvo, E., (2013). *Teoría de máquinas e instalaciones de fluidos*. Prensas de la Universidad de Zaragoza, ISBN-978-15770-26-8. <https://puz.unizar.es/1411-teoria-de-maquinas-e-instalaciones-de-fluidos.html>
- Gheju, M. & Balcu, I., (2011). Removal of chromium from Cr(VI) polluted wastewaters by reduction with scrap iron and subsequent precipitation of resulted cations. *Journal of Hazardous Materials*, 196(30), 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.09.002>

- Gorman, C., Seidel, C., Henrie, T., Huang, L., & Thompson, R., (2016). Pilot Testing Strong Base Anion Exchange for CrVI Removal. *Journal AWWA*, 108(4), E240-E246. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2016.108.0028>
- Guastay, L. I. & Tinoco E. A., (2019). Evaluación de la bioreducción del cromo hexavalente (VI) en aguas de estero salado con filtros de zuro de maíz (*Zea mays*) y cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) [Tesis de grado, Universidad de Guayaquil]. Repositorio Institucional UG. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/43621>
- Gutiérrez C., (2019). Reducción de la concentración de cromo hexavalente en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio Institucional digital de la UNC. <http://hdl.handle.net/20.500.12952/4431>
- Gutiérrez, LF., Arias, S. y Cardona, DF., (2019). Cavitación Hidrodinámica: un Enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria. *Scientia et Technica*, 24(2), 283-304. <https://doi.org/10.22517/23447214.19921>
- Hernández, R., Fernández C. & Baptista P., (2018). *Metodología de la investigación*. Editorial McGRAW-HILL / Interamericana Editores S.A. DE C.V. Sexta Edición. ISBN: 978-1-4562-2396-0.
- Hernández-Peña, C. C., Lares-Villa, F., De los Santos-Villalobos, S., Estrada-Alvarado, M. I., Cruz-Soto, A., Flores-Tavizón, E., & Soto-Padilla, M. Y., (2021). Reduction in concentration of chromium (VI) by *lysini bacillus macroides* isolated from sediments of the chapala lake, mexico. *Anais Da Academia Brasileira De Ciencias*, 93(2). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190144>

- Hidalgo, V.H., Luo, X., Ji, B., & Aguinaga A., (2014). Numerical study of unsteady cavitation on 2D NACA0015 hydrofoil using free/open source software. *Chinese Science Bulletin*, 59(26) 3276-3282. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0485-1>.
- Hlihor, R. M., Figueiredo, H., Tavares, T., & Gavrilescu, M. (2017). Biosorption potential of dead and living *Arthro bacter* viscous biomass in the removal of Cr(VI): Batch and column studies. *Process Safety and Environmental Protection*, 108, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.016>.
- Innocenzi, V. Prisciandaro, M.,y Veglio, F., (2018). Effect of the Hydrodynamic Cavitation for the Treatment of Industrial Wastewater. *Chemical Engineering Transactions*, 67, 529-534. <https://doi.org/10.3303/CET1867089>
- Itankar, N., (2018). *Development of Eco Friendly Sorption process for the Removal and Recovery of Hexavalent Chromium from Industrial Effluents*. [Tesis de posgrado, Symbiosis International University]. Repositorio de tesis indias. <http://hdl.handle.net/10603/224087>
- Jadeja, R. N., Ren W. and Zhou Q., (2012). Bioremediation with marine algae: A case study of the soda ash Industry. En A. Mason (Ed.), *Bioremediation: Biotechnology, Engineering and Environmental Management* (pp. 448-456). Nova. https://www.researchgate.net/profile/Wenjie-Ren-2/publication/286211964_Bioremediation_with_marine_algae_A_case_study_of_the_soda_ash_industry/links/5c34a968458515a4c71590ff/Bioremediation-with-marine-algae-A-case-study-of-the-soda-ash-industry.pdf

- Jardim, W. F., (2014). Medição e interpretação de valores do potencial redox (E H) em matrizes ambientais. *Química Nova*, 37, 1233-1235. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140207>
- Jiaming, Q., Biguang, J., Xiaolong, N., Rui, X., Youyu, H., Guoqing, J., Jinning, Q., Yongbin, Y., & Qian, L., (15-17 de enero de 2021). Study on microbial remediation of heavy metal contaminated soil [Conferencia]. 3.^a Conferencia internacional sobre tecnologías de control de la contaminación y prevención ambiental, Zhuhai, China, 687(12041). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/687/1/012041>
- Jobby, R., Jha, P., Yadav, A. K., & Desai, N., (2018). Biosorption and biotransformation of hexavalent chromium [Cr (VI)]: A comprehensive review. *Chemosphere*, 207, 255-266. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.050>
- Kahlon, R., (2016). *Pseudomonas: Molecular and applied biology*. Springer International Publishing.
<https://books.google.com.pe/books?id=2phPDAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=pseudomona+putida&hl=qu&sa=X&ved=0ahUKEwj12pTL5ujdAhVPqlkKHc-4DosQ6AEILDAC#v=onepage&q=pseudomona%20putida&f=false>
- Kazemi, M., Jahanshahi, M. & Peyravi, M., (2018). Hexavalent chromium removal by multilayer membrane assisted by photocatalytic couple nanoparticle from both permeate and retentate. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.059>
- Khajeh, M., Amin, M.M., Taheri, E., Fatehizadeh, A. & McKay, G. (2020). Influence of co-existing cations and anions on removal of direct red 89 dye from synthetic wastewater by hydrodynamic cavitation process: An empirical modeling. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67(105133). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105133>.

- Kivisaar, M., (2020). Narrative of a versatile and adept species *Pseudomonas putida*. *Journal of Medical Microbiology*, 69, 324–338. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.001137>.
- Korpe, S., & Rao, P. V., (2021). Application of advanced oxidation processes and cavitation techniques for treatment of tannery wastewater—A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105234. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105234>
- La Fuente, E. y López, H. (2018). Diseño y construcción de un banco de pruebas de cavitación hidrodinámica para la empresa Abaxfem [Tesis de título de Ingeniero Mecánico, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí Ecuador]. <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/14435/T-ESPE-057737.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Ley 29338, Ley de los recursos hídricos. MINAGRI, (31 de marzo de 2009/2019). <https://leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/29338.pdf>
- Li, B., Tan, X., Li., P, Gu., J, Chiang, P., Wu, J., Yin, W., Xu, M., (2019). Facile modification of activated carbon with highly dispersed nano-sized A-Fe₂O₃ for enhanced removal of hexavalent chromium from aqueous solutions. *Chemosphere*, Vol. 224, 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.121>
- López M., (2019). Remoción de cromo hexavalente en aguas contaminadas utilizando cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) como adsorbente. *Revista Torreón Universitario, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua*, 8(23). <https://doi.org/10.5377/torreon.v8i23.9534>
- Lytras, G., Lytras, C., Argyropoulou, D., Dimopoulos, N., Malavetas, G., & Lyberatos, G. (2017). A novel two-phase bioreactor for microbial hexavalent chromium removal from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 336, 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.04.049>

- Ma, H., Li, X., Zhu, Ch., Chen, F., Yang, Y. & Chen, X., (2020), Liberation and recovery of Cr from real tannery sludge by ultrasound-assisted supercritical water oxidation treatment. *Journal of Cleaner Production*, 267(122064).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122064>
- Macas, J., (2017). Estudio y simulación numérica de la cavitación inducida por los álabes directores de una turbina francis con características similares a las de la central hidroeléctrica San Francisco. [Tesis de título profesional de Ingeniero Mecánico, Escuela Politécnica Nacional, Quito].
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18840/3/CD-8231.pdf>
- Mason, W. & Thurston, R., (1981). *Physical Acoustics Quality Technology Handbook*. Book of Academic Press, London.
- Mishra, S., & Bharagava, R. N., (2016). Toxic and genotoxic effects of hexavalent chromium in environment and its bioremediation strategies. *Journal of Environmental Science and Health. Part C, Environmental Carcinogenesis & Ecotoxicology Reviews*, 34(1), 1-32.
<https://doi.org/10.1080/10590501.2015.1096883>
- Moholkar, V. S., & Pandit, A. B., (2001). Modeling of hydrodynamic cavitation reactors: a unified approach. *Chemical engineering science*, 56(21-22), 6295-6302.
[https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00253-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00253-6)
- Mora, A., (2016). Bacillus sp. G3 un microorganismo promisorio en la biorremediación de aguas industriales contaminadas con cromo hexavalente. *Nova scientia*, 8(17), 361-378.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/ns/v8n17/2007-0705-ns-8-17-00361.pdf>
- Monge, M., (2018). *Diseño agrónomo e hidráulico de riegos agrícolas a presión*. Editorial agrícola española, Madrid. <https://www.casadellibro.com/libro-diseno-agronomico-e-hidraulico-de-riegos-agricolas-a-presion-2-ed/9788417884147/12964295>

- Mukherjee, A., Mullick, A., Vadthya, P., Moulik, S., & Roya, A., (2020). Surfactant degradation using hydrodynamic cavitation-based hybrid advanced oxidation technology: A techno economic feasibility study. *Chemical Engineering Journal*, 398(125599). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125599>
- Pacay, H., (2019). Evaluación del rendimiento de remoción de cromo hexavalente en muestra de agua utilizando quitosano obtenidos del exoesqueleto del camarón marino cultivado (*Litopenaeus vannamei*) a nivel laboratorio [Tesis de grado de Licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional USAC. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/13993/1/Harvey%20Estuardo%20Pacay%20Mancio.pdf>
- Oficina de evaluación y fiscalización ambiental - OEFA (24 de junio de 2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. http://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- Pereira, P. P., Fernandez, M., Cimadoro, J., González, P. S., Morales, G. M., Goyanes, S., & Agostini, E., (2021). Biohybrid membranes for effective bacterial vehiculation and simultaneous removal of hexavalent chromium (CrVI) and phenol. *Applied microbiology and biotechnology*, 105(2), 827–838. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-11031-x>
- Pérez, M. A., García S., Koop S., Daniele A., Gonzáles C. & Roccia P., (2013). *Biología celular: En las ciencias agropecuarias*. http://web.a.ebscohost.com/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fNzAxODg3X19BTg2?sid=4d1b3fa2-6b1e-4e54-97ba-b22e7f9385ac@sessionmgr4007&vid=4&format=EB&lpid=lp_115&rid=0
- Pure Earth. (febrero de 2020). *Toxic Sites Identification Program*. <https://www.pureearth.org/our-projects/toxic-site-identification-program-tsip/>

- Rajoriya, S., Bargole, S., George, S., Kumar, V., (2018). Treatment of textile dyeing industry effluent using hydrodynamic cavitation in combination with advanced oxidation reagents. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 1109-1115. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.12.005>
- Randhavane Shrikant, B., & Khambete, A. K., (2017). Hydrodynamic Cavitation: A Novel Treatment Approach. *Materials Today: Proceedings*, 4(9), 9680-9684. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.246>
- Raut-Jadhava, S., Kumar, V., Pinjari, D., Sonawane, S., Saini, D. & Pandit, A., (2015) Synergetic effect of combination of AOP's (hydrodynamic cavitation and H₂O₂) on the degradation of neonicotinoid class of insecticide. *Journal of Hazardous Materials*, 261, 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.012>
- Servicio de agua potable y alcantarillado de Lima - SEDAPAL (31 de marzo de 2021). *SEDAPAL: el 51% de las descargas industriales y comerciales incumple los Valores Máximos Admisibles*. <https://www.sedapal.com.pe/notas-de-prensa/sedapal-el-51-de-las-descargas-industriales-y-comerciales-incumple-los-valores-maximos-admisibles#:~:text=En%20febrero%20de%202021%2C%20el,redes%20p%C3%BAbl icas%20de%20alcantarillado%20y>
- Saharan, V. K., Rizwani, M. A., Malani, A. A., & Pandit, A. B., (2013). Effect of geometry of hydrodynamically cavitating device on degradation of orange-G. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.08.011>
- Sengupta, S., Das, Papita, Mukhopadhyay, A., & Datta, S., (2017). Microbial Biosorption and Improved/Genetically Modified Biosorbents. *Handbook of Metal-Microbe Interactions and Bioremediation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315153353-19>

- Silby, MW., Winstanley, C., Godfrey, S.A., Levy, S.B. & Jackson, R. W., (2011). Pseudomonas genomes: diverse and adaptable. *FEMS Microbiol Reviews*, 35(4), 652-680. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2011.00269.x>
- Singh, R., Dong, H., Zhao, L., Marts, A., Farquhar, E., Tierney, D., Almquist, C. & Briggs B., (2015). Reducción del cromo hexavalente por el metanógeno termofílico *Methanothermobacter thermautotrophicus*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 148, 442-4561. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.10.012>
- Singh, P., Itankar, N., & Patil, Y., (2021). Biomanagement of hexavalent chromium: Current trends and promising perspectives. *Journal of Environmental Management*, 279(111547). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111547>
- Storey, B. & Szeri, A., (2000). Water vapour, sonoluminescence and sonochemistry. *Proceedings of the royal society a-mathematical physical and engineering sciences*, 456(199), 1685-1709, <https://doi.org/10.1098/rspa.2000.0582>
- Sun, M., (2004). Procesos para tratamiento de las aguas residuales en plantas galvánicas y metalúrgicas. *Pontificia Universidad Católica del Perú*. <https://estrucplan.com.ar/procesos-para-el-tratamiento-de-las-aguas-residuales-en-plantas-galvanicas-y-metalurgicas/>
- Tao, Y., Cai, J., Huai, X., Liu, B., & Guo, Z., (2016). Application of Hydrodynamic Cavitation to Wastewater Treatment. *Chemical Engineering & Technology*, 39(8), 1363-1376. <https://doi.org/10.1002/ceat.201500362>
- Thompson, P. & Piso Z., (2019). Dewey and Environmental Philosophy. En S. Fesmire (Ed.), *The Oxford Handbook of Dewey*. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190491192.013.26>

- Timmis, K. N., (2002). *Pseudomonas putida*: a cosmopolitan opportunist par excellence. *Environmental Microbiol*, 4(12), 779-781. <https://doi.org/10.1046/j.1462-2920.2002.00365.x>
- Todd, J., (2007). Recursos Acuáticos Y Contaminación Del Agua. In T. Miller (Ed.), *Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, Un enfoque integral*, (8th ed., pp. 171-200). Cengage Learning.
<https://link.gale.com/apps/doc/CX3003300021/GVRL?u=univcv&sid=bookmark-GVRL&xid=d2e2d906>
- Uddin, Md. J., Jeong, Y.-K., & Lee, W., (2021). Microbial fuel cells for bioelectricity generation through reduction of hexavalent chromium in wastewater: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(20), 11458-11481. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.134>
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), (2019). *Aguas Residuales, el recurso desaprovechado*. (Informe). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>
- Vargas, S. F., (2015). Estudio del fenómeno de la cavitación en una bomba centrífuga de 1 hp y su influencia en los parámetros de rendimiento energético en la Facultad De Ingeniería Civil y Mecánica. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio institucional de la UTA. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/9352/1/Tesis%20I.%20M.%20236%20-%20Vargas%20Badillo%20Santiago%20Fabi%C3%A1n.pdf>
- Yasir, M. W., Siddique, M. B. A., Shabbir, Z., Ullah, H., Riaz, L., Nisa, W.-U.-, Shafeeq-urrahman, & Shah, A. A., (2021). Biotreatment potential of co-contaminants hexavalent chromium and polychlorinated biphenyls in industrial wastewater: Individual and

- simultaneous prospects. *The Science of the Total Environment*, 779(1), 146345
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146345>
- Yi, C., Lu, Q., Wang, Y., Wang, Y., & Yang, B., (2018). Degradation of organic wastewater by hydrodynamic cavitation combined with acoustic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 43, 156-165. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.01.013>
- Young F.R., (1999). *Cavitation*. Universidad de Watford, Hertfordshire) Ed. Científica mundial, pp. 444,. <https://doi.org/10.1142/p172>
- Zhang, Y., Zhu, Z., Liao, Y., Dang, Z., & Guo, C., (2021). Effects of Fe (II) source on the formation and reduction rate of biosynthetic mackinawite: Biosynthesis process and removal of Cr(VI). *Chemical Engineering Journal*, 421, 129723.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129723>
- Zhou, X., Jing, G., Lv, B., Zhou, Z. & Zhu, R., (2016). Highly efficient removal of chromium (VI) by Fe/Ni bimetallic nanoparticles in an ultrasound-assisted system. *Chemosphere*, 160, 332-341. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.06.103>
- Ziagova, M., Dimitriadis, G., Aslanidou, D., Papaioannou, X., Litopoulou Tzannetaki, E., & Liakopoulou-Kyriakides, M., (2007). Comparative study of Cd(II) and Cr(VI) biosorption on *Staphylococcus xylosus* and *Pseudomonas* sp. In single and binary mixtures. *Bioresource Technology*, 98(15), 2859-2865.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.043>
- Zupanc, M., Petkovšek, M., Zevnik, J., Kozmus, G., Šmid, A., & Dular, M., (2020). Anomalies detected during hydrodynamic cavitation when using salicylic acid dosimetry to measure radical production. *Chemical Engineering Journal*, 396(125389).
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125389>

IX. ANEXOS

Anexo A. Instrumentos de recojo de datos



SOLICITUD: Validación de instrumento de recojo de datos

Sr.: Dr. Carlos Cabrera Carranza

Yo Elmer Benites Alfaro identificadas con DNI N° 70867259, doctorante de la Escuela de Pos grado de la Universidad Nacional Federico Villarreal- Doctorado de Ingeniería Ambiental a Ud., con el debido respeto me presento y digo:

Que siendo requisito indispensable el recojo de datos necesarios contar con los instrumentos de recojo de datos debidamente validados para el trabajo de tesis con título "CAVITACIÓN HIDRÓDINÁMICA Y Pseudomona putida PARA LA REDUCCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA GALVÁNICA, LIMA 2020", solicito a Ud. se sirva validar el instrumento que adjunto bajo los criterios académicos correspondientes. Para este efecto adjunto los siguientes documentos:

- Matriz de operacionalización de variables
- Ficha de validación de instrumentos
- Fichas de Instrumentos

Por tanto:

A usted, agradezco de antemano su gentil apoyo por acceder a mi petición

Lima, 21 de junio del 2020

Elmer Benites Alfaro



FICHA 1												
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA RESIDUAL EN EL TRATAMIENTO POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA (Muestra A)												
Título		CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA Y <i>Pseudomona putida</i> PARA LA REDUCCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA GALVÁNICA, LIMA 2020										
Institución		Escuela de Pos grado UNFV										
Responsables		Elmer Benites Alfaro										
Asesor		Dr. Walter Zambrano Cabanillas										
Indicadores		Tiempo	pH	C.E.	Aceites y grasas (AyG)	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	DBO	DQO	Cromo total	Ni	Pb	Zn
		(min)	(1-14)	(μ S/m)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Muestras	Sin tratar	0										
	Placa de orificio (Ox)	1										
		2										
		3										
		4										
	Venturi (Vx)	1										
		2										
		3										
		4										

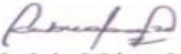

 Dr. Carlos F. Cabrera Carranza
 CIP. 46573
 DNI.17402784



 Dr. Jorge Leonardo Jave Nakayo
 DNI 01066653 – CIP 43444



Universidad Nacional
Federico Villarreal

FICHA 2 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA RESIDUAL EN EL TRATAMIENTO POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA (Muestra B)										
Título		CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA Y <i>Pseudomona putida</i> PARA LA REDUCCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA GALVÁNICA, LIMA 2020								
Institución		Escuela de Pos grado UNFV								
Responsables		Elmer Benites Alfaro								
Asesor		Dr. Walter Zambrano Cabanillas								
Indicadores (Unidades)		Tiempo	Temperatura	Potencial de Hidrógeno pH	C.E.	Potencial Redox)	Tramitancia	Absorbancia	Concentración	Cromo Hexavalente
		(min)	°C	µS/m	mg/L	(mV)	mg/L			Mg Cr ⁺⁶ /L
Muestras	Sin tratar	E1								
	Venturi (Vx))	V1								
		V2								
		V3								
		V4								
		V5								
		V6								
		V7								
		V8								
		V9								
		V10								


 Dr. Carlos F. Cabrera Carranza
 CIP. 46572
 DNI.17402784


 Dr. Jorge Leonardo Jave Nakayo
 DNI 01066653 – CIP 43444

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

I. DATOS GENERALES

1. Apellidos y Nombres: Dr. CABRERA CARRANZA CARLOS
2. Cargo e institución donde labora: Docente Investigador
3. Especialidad o línea de investigación: Calidad y Gestión de los Recursos Naturales
4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: Ficha 1
5. Autores del instrumento: Benites Alfaro Elmer

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN


CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE						MÍNIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulada con lenguaje comprensible.												X	
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.												X	
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y a las necesidades reales de la Investigación.												X	
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.												X	
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales.												X	
6. INTERNACIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la hipótesis.												X	
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.												X	
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas, objetivos hipótesis, variables e indicadores.												X	
9. METODOLOGÍA	Las estrategias responden una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.												X	
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la Investigación y su adecuación al Método científico.												X	

III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

1. El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
2. El instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

Lima, 21 de junio de 2020



Dr. Carlos F. Cabrera Carranza
 CIP. 48972
 DNI.17402784


VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO
I DATOS GENERALES

6. Apellidos y Nombres: Dr. CABRERA CARRANZA CARLOS
7. Cargo e institución donde labora: Docente Investigador
8. Especialidad o línea de investigación: Calidad y Gestión de los Recursos Naturales
9. Nombre del instrumento motivo de evaluación: Ficha 2
10. Autores del instrumento: Benites Alfaro Elmer

II ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE						MÍNIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulada con lenguaje comprensible.											X		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.											X		
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y a las necesidades reales de la investigación.											X		
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.											X		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales.											X		
6. INTERNACIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la hipótesis.											X		
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X		
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas, objetivos hipótesis, variables e indicadores.											X		
9. METODOLOGÍA	Las estrategias responden una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método científico.											X		

III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

3. El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
4. El instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

Lima, 21 de junio de 2020

Dr. Carlos F. Cabrera Carranza
 CIP. 46572
 DNI. 1.740.2784



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

I. DATOS GENERALES

1. Apellidos y Nombres: Dr. JAVE NAKAYO JORGE LEONARDO
2. Cargo e institución donde labora: Docente Investigador
3. Especialidad o línea de investigación: Calidad y Gestión de los Recursos Naturales
4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: Ficha 1
5. Autores del instrumento: Benites Alfaro Elmer

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE						MÍNIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulada con lenguaje comprensible.												X	
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.												X	
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y a las necesidades reales de la investigación.												X	
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.												X	
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales.												X	
6. INTERNACIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la hipótesis.												X	
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.												X	
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas, objetivos hipótesis, variables e indicadores.												X	
9. METODOLOGÍA	Las estrategias responden una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.												X	
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método científico.												X	

III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

1. El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
2. El instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

Lima, 21 de junio de 2020

Dr. Jorge Leonardo Jave Nakayo
DNI 01066653 – CIP 43444

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

I DATOS GENERALES

6. Apellidos y Nombres: Dr. JAVE NAKAYO JORGE LEONARDO
7. Cargo e institución donde labora: Docente Investigador
8. Especialidad o línea de investigación: Calidad y Gestión de los Recursos Naturales
9. Nombre del instrumento motivo de evaluación: Ficha 2
10. Autores del instrumento: Benites Alfaro Elmer

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE					MÍNIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE				
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulada con lenguaje comprensible.												X	
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.												X	
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y a las necesidades reales de la investigación.												X	
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.												X	
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales.												X	
6. INTERNACIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la hipótesis.												X	
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.												X	
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas, objetivos hipótesis, variables e indicadores.												X	
9. METODOLOGÍA	Las estrategias responden una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.												X	
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método científico.												X	

III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

3. El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
4. El instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN



Dr. Jorge Leonardo Jave Nakayo
DNI 01066653 – CIP 43444

Lima, 21 de junio de 2020

Anexo C. Resultados de análisis Cromo total (Muestra A), tratadas con cavitación hidrodinámica

SGS

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA2016039 Rev. 0**

PROMEC INGENIEROS S.A.C.

JR. LA VERONICA NRO. 482 URB. SANTA ISABEL

ENV / LB-347157-001

PROCEDENCIA : Cruce Av. Izaguirre con Av. y Santa Callao

Fecha de Recepción SGS : 17-09-2020
 Fecha de Ejecución : Del 17-09-2020 al 22-09-2020
 Muestreo Realizado Por : CLIENTE
 Observación : Proyecto: Aguas Residuales

Estación de Muestreo
E1
O1
O2
O3
O4
V1
V2
V3
V4

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 22/09/2020

Frank M. Julcamoro Quispe
 C.Q.P. 1033
 Coordinador de Laboratorio



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



Registro N° LE - 002

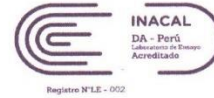
**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA2016039 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					E1	O1	O2
FECHA DE MUESTREO					17/09/2020	17/09/2020	17/09/2020
HORA DE MUESTREO					11:35:00	11:58:00	12:08:00
CATEGORIA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUB CATEGORIA					INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Aluminio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	0.808	0.760	0.852
Antimonio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0004	0.0013	0.02240	0.02001	0.01996
Arsénico Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0003	0.0010	0.00634	0.00592	0.00546
Bario Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0132	0.0125	0.0135
Berilio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.002	0.006	4.404	4.223	4.340
Cadmio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.00923	0.00850	0.00940
Calcio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.003	0.009	17.877	18.798	18.968
Cerio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00008	0.00024	0.00048	0.00046	0.00043
Cesio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0018	0.0018	0.0018
Cobalto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.00610	0.00708	0.00832
Cobre Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	31.81705	29.52698	28.67551
Cromo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	526.7331	516.3691	514.5095
Estaño Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0003	0.0010	0.03480	0.04997	0.03637
Estroncio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.1457	0.1382	0.1379
Fósforo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.015	0.047	1.833	1.743	1.753
Galio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00004	0.00012	0.00056	0.00056	0.00049
Germanio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0009	0.0011	0.0012
Hafnio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0004	0.0013	8.8815	8.4075	8.1862
Lantano Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0161	0.0151	0.0153
Lutecio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	1.475	1.602	1.556
Manganeso Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	0.16289	0.15828	0.13166
Mercurio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00121	0.00089	0.00145
Niobio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	31.4404	28.3194	27.9020
Plata Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0226	0.0218	0.0208
Potasio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.04	0.13	1.15	0.93	0.87
Rubidio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0003	0.0009	0.0034	0.0033	0.0035
Selenio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0004	0.0013	0.0050	0.0083	0.0102
Silicio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.09	0.27	2.16 *	1.95 *	2.37 *
Silicio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.04	0.13	1.01	0.91	1.11
Sodio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.006	0.019	13.978	12.898	12.483
Talio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0377	0.0347	0.0315
Uranio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	0.000153	0.000218	0.000131
Vanadio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0225	0.0203	0.0154
Wolframio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0008	0.0026	8.0253	7.9226	8.0905
Zirconio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00015	0.00045	0.00101	0.00106	0.00100

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					O3	O4	V1
FECHA DE MUESTREO					17/09/2020	17/09/2020	17/09/2020
HORA DE MUESTREO					12:18:00	12:28:00	13:03:00
CATEGORIA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUB CATEGORIA					INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Aluminio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	0.650	0.754	0.723
Antimonio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0004	0.0013	0.01954	0.01796	0.02311
Arsénico Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0003	0.0010	0.00107	0.00105	0.00627
Bario Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0122	0.0123	0.0120
Berilio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.002	0.006	4.179	4.074	4.120
Cadmio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.00899	0.00880	0.00849
Calcio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.003	0.009	17.072	16.900	15.370
Cerio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00008	0.00024	0.00044	0.00045	0.00035
Cesio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0018	0.0017	0.0019
Cobalto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.00953	0.00934	0.00530
Cobre Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	29.85010	29.35076	29.90662
Cromo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	505.1254	491.2844	514.0931
Estaño Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0003	0.0010	0.06743	0.03326	0.04206



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL MA2016039 Rev. 0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					O3	O4	V1
FECHA DE MUESTREO					17/09/2020	17/09/2020	17/09/2020
HORA DE MUESTREO					12:18:00	12:28:00	13:03:00
CATEGORIA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
SUB CATEGORIA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Estroncio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	0.1402	0.1369	0.1324
Fósforo Total	EW EPA200 8	mg/L	0.015	0.047	1.758	1.690	1.758
Galio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00004	0.00012	0.00057	0.00048	0.00054
Germanio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0012	0.0015	0.0014
Hafnio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0004	0.0013	8.6764	8.5989	8.5989
Lantano Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0150	0.0147	0.0151
Lutecio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.001	0.003	1.422	1.888	1.421
Manganeso Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00003	0.00010	0.14822	0.15819	0.11890
Mercurio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00141	0.00154	0.00167
Niobio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	28.9666	28.7482	27.9987
Plata Total	EW EPA200 8	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0215	0.0221	0.0255
Potasio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.04	0.13	1.02	1.07	1.02
Rubidio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0003	0.0009	0.0038	0.0038	0.0040
Selenio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0004	0.0013	0.0131	0.0114	0.0143
Silice Total	EW EPA200 8	mg/L	0.09	0.27	2.89 *	2.98 *	2.96 *
Silicio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.04	0.13	1.35	1.39	1.38
Sodio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.006	0.019	12.796	12.680	13.000
Talio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalo Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0290	0.0301	0.0405
Uranio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.000003	0.000010	0.000123	0.000113	0.000068
Vanadio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0249	0.0207	0.0205
Wolframio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0008	0.0026	8.2526	7.8533	7.6741
Zirconio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00015	0.00045	0.00102	0.00114	0.00109

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					V2	V3	V4
FECHA DE MUESTREO					17/09/2020	17/09/2020	17/09/2020
HORA DE MUESTREO					13:13:00	13:23:00	13:33:00
CATEGORIA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
SUB CATEGORIA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Aluminio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.001	0.003	0.883	0.764	0.822
Antimonio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00004	0.00013	0.02195	0.02164	0.02124
Arsénico Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00003	0.00010	0.01110	0.00695	0.01140
Bario Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0112	0.0106	0.0119
Berilio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8	mg/L	0.002	0.006	4.328	4.161	4.161
Cadmio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00001	0.00003	0.00828	0.00820	0.00874
Calcio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.005	0.009	15.450	15.504	15.671
Cerio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00008	0.00024	0.00039	0.00045	0.00041
Cesio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0020	0.0019	0.0019
Cobalto Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00001	0.00003	0.00827	0.00755	0.00756
Cobre Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00003	0.00009	29.35110	30.34640	30.26998
Cromo Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0001	0.0003	490.8831	478.1359	456.0533
Estaño Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00003	0.00010	0.03212	0.04561	0.03325
Estroncio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	0.1318	0.1308	0.1347
Fósforo Total	EW EPA200 8	mg/L	0.015	0.047	1.733	1.808	1.808
Galio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00004	0.00012	0.00046	0.00050	0.00057
Germanio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0013	0.0016	0.0015
Hafnio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0004	0.0013	8.3934	8.5746	8.7300
Lantano Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0156	0.0151	0.0157
Lutecio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.001	0.003	1.428	1.556	1.568
Manganeso Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00003	0.00010	0.13575	0.14076	0.14626
Mercurio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00095	0.00163	0.00178
Niobio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	27.7232	28.3176	28.0032



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



Registro N° LE - 002

INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA2016039 Rev. 0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					V2	V3	V4
FECHA DE MUESTREO					17/09/2020	17/09/2020	17/09/2020
HORA DE MUESTREO					13:13:00	13:23:00	13:33:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
SUB CATEGORÍA							
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Plata Total	EW EPA200 8	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0270	0.0268	0.0255
Potasio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.04	0.13	0.93	0.95	0.97
Rubidio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0003	0.0009	0.0039	0.0039	0.0041
Selenio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0004	0.0013	0.0140	0.0136	0.0157
Silice Total	EW EPA200 8	mg/L	0.09	0.27	1.92 *	2.15 *	2.91 *
Sodio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.006	0.019	12.566	12.652	13.124
Talio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalo Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Torio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0350	0.0364	0.0317
Uranio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.000003	0.000010	0.000048	0.000091	0.000082
Vanadio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0178	0.0196	0.0214
Wolframio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0008	0.0026	7.7035	7.8482	7.7222
Zirconio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00015	0.00045	0.00119	0.00114	0.00124

Notas:

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL-DA.



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



Registro N° LE - 002

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA2016039 Rev. 0**

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
 MB: Blanco del proceso.
 LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
 MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
 MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
 Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Aluminio Total	mg/L	0.003	<0.003	7%	92 - 99%	97%	1%
Antimonio Total	mg/L	0.00013	<0.00013	4%	97 - 102%	93%	0%
Arsénico Total	mg/L	0.00010	<0.00010	2%	96 - 101%	101%	0%
Bario Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0%	97 - 102%	101%	0%
Berilio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	95 - 104%	105%	0%
Bismuto Total	mg/L	0.00003	<0.00003	0%	97 - 101%	102%	0%
Boro Total	mg/L	0.006	<0.006	1%	105 - 109%	94%	4%
Cadmio Total	mg/L	0.00003	<0.00003	4%	97 - 102%	94%	1%
Calcio Total	mg/L	0.009	<0.009	1%	95 - 101%	99%	1%
Cerio Total	mg/L	0.00024	<0.00024	1%	100 - 115%	102%	0%
Cesio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	2%	100 - 103%	95%	0%
Cobalto Total	mg/L	0.00003	<0.00003	6%	95 - 107%	97%	0%
Cobre Total	mg/L	0.00009	<0.00009	2%	101 - 103%	94%	5%
Cromo Total	mg/L	0.0003	<0.0003	1%	94 - 97%	95%	0%
Estaño Total	mg/L	0.00010	<0.00010	0%	103 - 108%	102%	0%
Estroncio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	1%	93 - 105%	98%	1%
Fósforo Total	mg/L	0.047	<0.047	3%	99 - 102%	98%	2%
Galio Total	mg/L	0.00012	<0.00012	0%	104 - 107%	100%	0%
Germanio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	6%	95 - 102%	98%	0%
Hafnio Total	mg/L	0.00015	<0.00015	0%	98 - 104%	105%	0%
Hierro Total	mg/L	0.0013	<0.0013	2%	98 - 107%	94%	5%
Lantano Total	mg/L	0.0015	<0.0015	0%	98 - 99%	102%	0%
Litio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	1%	97 - 105%	93%	0%
Lutecio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	99 - 107%	107%	0%
Magnesio Total	mg/L	0.003	<0.003	2%	99 - 101%	93%	5%
Manganeso Total	mg/L	0.00010	<0.00010	4%	97 - 101%	97%	1%
Mercurio Total	mg/L	0.00009	<0.00009	0%	100 - 105%	101%	0%
Molibdeno Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	102 - 105%	97%	0%
Niobio Total	mg/L	0.0015	<0.0015	0%	102 - 106%	103%	0%
Niquel Total	mg/L	0.0006	<0.0006	3%	94 - 101%	104%	1%
Plata Total	mg/L	0.00010	<0.00010	0%	98 - 98%	102%	0%
Plomo Total	mg/L	0.0006	<0.0006	8%	104%	103%	0%
Potasio Total	mg/L	0.13	<0.13	7%	93 - 102%	96%	1%
Rubidio Total	mg/L	0.0009	<0.0009	1%	108 - 109%	98%	0%
Selenio Total	mg/L	0.0013	<0.0013	5%	101 - 102%	98%	4%
Silice Total	mg/L	0.27	<0.27	3%	91%	109%	0%
Silicio Total	mg/L	0.13	<0.13	3%	91 - 99%	109%	0%
Sodio Total	mg/L	0.019	<0.019	1%	100 - 104%	101%	2%
Talio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	98 - 99%	104%	0%
Tantalo Total	mg/L	0.0021	<0.0021	0%	95 - 100%	103%	0%
Teluro Total	mg/L	0.003	<0.003	0%	102 - 104%	106%	0%
Thorio Total	mg/L	0.00019	<0.00019	0%	100 - 103%	99%	0%
Titanio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	5%	100 - 108%	91%	0%
Uranio Total	mg/L	0.000010	<0.000010	1%	100 - 103%	102%	1%
Vanadio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	4%	98 - 104%	94%	0%
Wolframio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0%	98 - 101%	101%	0%
Yterbio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	102 - 103%	103%	0%
Zinc Total	mg/L	0.0029	<0.0029	1%	98 - 99%	93%	1%
Zirconio Total	mg/L	0.00045	<0.00045	1%	105%	103%	0%



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA2016039 Rev. 0**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_EPA200_8	Callao	Metales Totales	EPA 200.8, Rev 5.4: 1994. Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry.

Este documento es emitido por la Compañía bajo sus Condiciones Generales de Servicio, que pueden encontrarse en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de SGS de Perú S.A.C.
Los resultados del Informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s) y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas.

Última Revisión Julio 2015

Anexo D. Resultado de análisis de Propiedades fisicoquímicas (Muestra A)



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO
PERUANO DE ACREDITACION INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE-056



INFORME DE ENSAYO N° 203191 CON VALOR OFICIAL

Razón Social : **BENITES ALFARO ELMER**
 Domicilio Legal : Av. Alfredo Mendiola 6232- Los Olivos
 Solicitado Por : **BENITES ALFARO ELMER**
 Referencia : Cotización N° 1943-20R02
 Proyecto : Reservado por el cliente
 Procedencia : Reservado por el cliente
 Muestreo Realizado Por : **EL CLIENTE**
 Cantidad de Muestra : 2
 Producto : Agua residual / Agua residual tratada
 Fecha de Recepción : 17/09/2020
 Fecha de Ensayo : 17/09/2020 al 30/09/2020
 Fecha de Emisión : 30/09/2020

I. Resultados

Código de Laboratorio	203191-01
Código de Cliente	E1
Fecha de Muestreo	17/09/2020
Hora de Muestreo (h)	08.00
Tipo de Producto	Agua Residual

Lugar de ensayo (Laboratorio Inorgánico)			
Tipo Ensayo	Unidad	L.C.M.	Resultados
Fisicoquímicos			
Acetes y Grasas	mg/L	0.2 ND	9.2
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	2.0	6048
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5.0	20019
Sólidos Totales Suspendidos	mg/L	6	71

Legenda: L.C.M. = Limite de cuantificación del método. L.D.M. = Limite de detección del método. "ND" = Menor que el L.C.M. o L.D.M. indicado. "ND" = Resolución cuantificable. "ND" = Limite de Detección de Método. "ND" = No Analizado.

Código de Laboratorio	203191-02
Código de Cliente	V1
Fecha de Muestreo	17/09/2020
Hora de Muestreo (h)	14.00
Tipo de Producto	Agua Residual Tratada

Lugar de ensayo (Laboratorio Inorgánico)			
Tipo Ensayo	Unidad	L.C.M.	Resultados
Fisicoquímicos *			
Acetes y Grasas	mg/L	0.2 ND	7.8
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	2.0	4525
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5.0	15370
Sólidos Totales Suspendidos	mg/L	6	65

Legenda: L.C.M. = Limite de cuantificación del método. L.D.M. = Limite de detección del método. "ND" = Menor que el L.C.M. o L.D.M. indicado. "ND" = Resolución cuantificable. "ND" = Limite de Detección de Método. "ND" = No Analizado.


* Los métodos indicados no han sido acreditados por INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO N° 203191 CON VALOR OFICIAL

II. Métodos y Referencias

Tipo Ensayo	Norma Referencia	Título
Fisicoquímicos		
Aceites y Grasas	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5520 B, 23rd Ed. 2017	Oil and Grease Liquid-Liquid Partition-Gravimetric Method
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 23rd Ed. 2017	Biochemical Oxygen Demand (BOD), 5-Day BOD Test
Demanda Química de oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand (COD) Closed Reflux, Colorimetric Method
Sólidos Totales Suspendidos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 23rd Ed. 2017	Solids Total Suspended Solids Dried at 103-105 °C

SIGLAS: *SM*: Standard methods for the examination of Water and Wastewater APHA, AWWA, WEF 23rd. Ed. 2017



Laura Pino O.
 Supervisora de Laboratorio
 Fisicoquímico



Ing. Jessica Tapia C.
 Gerente de Calidad, Seguridad, Salud
 y Ambiente
 C.I.P. N° 238897

Los resultados presentados corresponden solo a la muestra indicada, según la cadena de custodia correspondiente. Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto. El tiempo de custodia de la muestra es de un mes calendario desde el ingreso de la muestra al Laboratorio. El tiempo de custodia del informe de ensayo, tanto en digital como en físico es de 4 años. El tiempo de perentoriedad de la muestra está en función a lo declarado en los métodos normalizados de ensayo y rige desde la toma de muestra. Está prohibida la reproducción parcial del presente documento salvo autorización de Envirotest S.A.C. Los resultados se relacionan únicamente con las formas de ensayo bajo las condiciones de las muestras como se recibieron. Para verificar la autenticidad del presente informe de ensayo solicitar información al correo info@envirotest.com.pe

** FIN DEL INFORME **

Anexo E. Resultado de análisis de Cromo hexavalente (Muestra B)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica

Laboratorio de Espectrometría

Análisis de Agua con Cromo Hexavalente

Muestra	Tramitancia %	Absorbancia	Concentración C	Concentración mgCr ⁺⁶ /L
E1 – V1	69.3	0.1592	0.2263	452.6
V2	69.6	0.1574	0.2237	447.4
V3	69.5	0.1580	0.2245	449.0
V4	69.4	0.1586	0.2254	450.8
V5	69.4	0.1586	0.2254	450.8
V6	69.7	0.1567	0.2227	445.4
V7	69.5	0.1580	0.2245	449.0
V8	69.4	0.1586	0.2254	450.8
V9	69.4	0.1586	0.2254	450.8
V10	69.8	0.1561	0.2218	443.6

Método: Espectrofotómetro UV-VISIBLE

Lima 22 de octubre del 2020


 MSc. Atilio Menéndez A.
 Jefe Lab. Espectrometría

Av. Túpac Amará N° 210, Lima 25, Apartado 1301-Perú
 Teléfono: (511) 4824427, Central Telefónica (511) 4811070, Anexo 4245
 e-mail: labespectro@uni.edu.pe

Anexo F. Resultado de análisis de Propiedades fisicoquímicas (Muestra B)



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica

Laboratorio de Espectrometría

SOLICITADO POR: BENITES ALFARO, ELMER GONZALES

Procedencia de muestra: Taller de cromado de piezas – villa el salvador - Lima

Recepción de muestras: 14 de Octubre del 2020

Análisis de Agua con Cromo Hexavalente

Muestra	Temperatura °C	Potencial de hidrogeno Acido /base	Conductividad eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$	Potencial redox mV
E1 – V1	21.00	3.28	1332	400
V2	21.00	3.23	1333	430
V3	21.00	3.23	1296	445
V4	21.00	3.23	1302	452
V5	21.00	3.24	1280	458
V6	21.00	3.28	1254	455
V7	21.00	3.31	1238	461
V8	21.00	3.31	1237	459
V9	21.00	3.32	1239	460
V10	21.00	3.33	1210	438

Método: Potenciométrico (multiparámetro Scientific Measuring Instruments)

MSc. Atilio Mendoza A.
Jefe Lab. Espectrometría

Av. Túpac Amará N° 210, Lima 25, Apartado 1301-Perú
Teléfono: (511) 4824427, Central Telefónica (511) 4811070, Anexo 4245
e-mail: labespectro@uni.edu.pe

Anexo G. Valores Máximos Admisibles (VMA)

1748339-2

VIVIENDA, CONSTRUCCION Y SANEAMIENTO

Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario

**DECRETO SUPREMO
N° 010-2019-VIVIENDA**

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

CONSIDERANDO:

Que, el artículo 6 de la Ley N° 30156, Ley de Organización y Funciones del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, en concordancia con el artículo 5 del Decreto Legislativo N° 1280, Decreto Legislativo que aprueba la Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento, establece que este Ministerio es el Ente rector de las políticas nacionales y sectoriales dentro de su ámbito de competencia, las cuales son de obligatorio cumplimiento por los tres niveles de gobierno en el marco del proceso de descentralización, y en todo el territorio nacional;

Que, el artículo 25 del citado Decreto Legislativo, establece la prohibición de descargar en las redes de alcantarillado sanitario, sustancias o elementos extraños que contravengan las normas vigentes sobre la calidad de los efluentes; para ello, los usuarios del servicio de

ANEXO N° 1

PARÁMETRO	UNIDAD	SIMBOLOGÍA	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	DBO ₅	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	DQO	1000
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	S.S.T.	500
Aceites y Grasas	mg/l	A y G	100

ANEXO N° 2

PARÁMETRO	UNIDAD	SIMBOLOGÍA	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Aluminio	mg/l	Al	10
Arsénico	mg/l	As	0.5
Boro	mg/l	B	4
Cadmio	mg/l	Cd	0.2
Cianuro	mg/l	CN-	1
Cobre	mg/l	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/l	Cr ⁶⁺	0.5
Cromo total	mg/l	Cr	10
Manganeso	mg/l	Mn	4
Mercurio	mg/l	Hg	0.02
Níquel	mg/l	Ni	4
Plomo	mg/l	Pb	0.5
Sulfatos	mg/l	SO ₄ ²⁻	1000
Sulfuros	mg/l	S ²⁻	5
Zinc	mg/l	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	NH ⁴⁺	80
Potencial Hidrógeno	unidad	pH	6-9
Sólidos Sedimentables	ml/lh	S.S.	8.5
Temperatura	°C	T	<35

(1) La aplicación de estos parámetros a cada actividad económica por procesos productivos, es la precisada en el presente Reglamento tomando como referencia el código CIIU. Aquellas actividades que no estén incluidas en este código, deben cumplir con los parámetros indicados en el presente Anexo. Los parámetros establecidos en los Anexos N° 1 y N° 2 del presente Reglamento, son determinados a partir del análisis de muestras puntuales.

(2) Las concentraciones de los parámetros establecidos en los Anexos N° 1 y N° 2 deben ser determinadas a partir del análisis de muestras puntuales.

Anexo H. Paneaux fotográfico



Sistema de cavitación hidrodinámica



Medidor de presión de entrada
al sistema cavitador



Medidor de flujo
del sistema de
cavitador



Multiparámetro para pH



Preparación de muestra para
tratamiento por CH



Muestra A de agua residual



Muestras A después de tratamiento
por CH



Muestra B después del tratamiento con
Cavitación hidrodinámica



Muestra B después de tratamiento
con Cavitación Hidrodinámica



Preparación muestra B para análisis
espectrofotómetro UV-Visible