



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica
Unidad de Posgrado

**Cavitación hidrodinámica controlada para reducción
de metales en efluentes residuales metalúrgicos**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias
Ambientales

AUTOR

Harold Robinson MATOS MALDONADO

ASESOR

Dr. Elmer Gonzales BENITES ALFARO

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Matos, H. (2024). *Cavitación hidrodinámica controlada para reducción de metales en efluentes residuales metalúrgicos*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Harold Robinson Matos Maldonado
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	21299613
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-2406-3420
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Elmer Gonzales Benites Alfaro
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07867259
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-1504-2089
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08608364
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Carlos Alberto Castañeda Olivera
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	42922258
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Giuliana Patricia Becerra Celis
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	40745335
Datos de investigación	

Línea de investigación	N 58 . Gestión del Medio Ambiente y Ecología
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Santiago de Surco Urbanización: Honor y lealtad Calle: Rafael Aedo cuadra 1 Este: 283632 Norte: 8654250
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2021 - 2023
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería ambiental, Geociencias: http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01 Geociencias, Multidisciplinar: http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
VICEDECANO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO – UNIDAD DE POSGRADO

**Acta de Sustentación de Tesis para Optar el Grado Académico de
DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Siendo las diez horas del día veintidós de octubre de dos mil veinticuatro en la sala grados, el Jurado de Tesis conformado por los siguientes docentes:

Presidente	:	DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Miembro	:	DR. CARLOS ALBERTO CASTAÑEDA OLIVERA
Miembro	:	DRA. GIULIANA PATRICIA BECERRA CELIS
Asesor	:	DR. ELMER GONZALES BENITES ALFARO

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada: **«CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA CONTROLADA PARA REDUCCIÓN DE METALES EN EFLUENTES RESIDUALES METALÚRGICOS»** presentado por el Mg. **HAROLD ROBINSON MATOS MALDONADO** egresado del programa de posgrado: **DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES** desarrollado en la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica.

Concluida la sustentación, los miembros del Jurado de Tesis procedieron a formular sus preguntas las que fueron absueltas por el graduando; acto seguido se procedió con la evaluación correspondiente, en forma colegiada, el jurado asignó el calificativo de: *Aprobado por logro* (...17...)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Jurado Evaluador recomienda al Consejo de Facultad apruebe el otorgamiento del **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES** a don **HAROLD ROBINSON MATOS MALDONADO**.

Siendo las 11 horas, se levantó la sesión, firmando para mayor constancia la presente Acta:


Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Presidente


Dr. CARLOS ALBERTO CASTAÑEDA OLIVERA
Miembro


Dra. GIULIANA PATRICIA BECERRA CELIS
Miembro


Dr. ELMER GONZALES BENITES ALFARO
Asesor



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo DR. ELMER GONZALES BENITES ALFARO en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N° 000255-2022-UPG-VDIP-FIGMMG-UNMSM de la tesis, cuyo título es **«CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA CONTROLADA PARA REDUCCIÓN DE METALES EN EFLUENTES RESIDUALES METALÚRGICOS»**, presentado por el Magister HAROLD ROBINSON MATOS MALDONADO para optar el Grado Académico de DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **16 %** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado correspondiente.

Lima, 07 de agosto de 2024

Firma del Asesor:

Nombres y apellidos del asesor:

DNI:


.....
CIP 71998
Investigador CONCYTEC. Código Renacyt: P0034858

...Elmer Gonzales BENITES ALFARO.

...07867259..

Índice general

Página de aceptación o veredicto de la Tesis por los miembros del Jurado	
Examinador	¡Error! Marcador no definido.
Índice general	iii
Lista de tablas.....	vii
Lista de figuras	ix
Resumen	xi
Summary.....	xii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación problemática	1
1.2. Formulación del problema.....	4
1.2.1 Problema general	4
1.2.2 Problemas específicos	4
1.3. Justificación teórica	5
1.4. Justificación practica	6
1.5. Objetivos	7
1.5.1 Objetivo general	7
1.5.2 Objetivos específicos.....	7
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	8
2.1. Marco filosófico o epistemológico de la investigación.....	8
2.2. Antecedentes de investigación	11
2.2.1 Fuentes nacionales	12
2.2.2 Fuentes internacionales.....	14
2.3. Bases teóricas	19
2.3.1 Aguas residuales	19
2.3.2 Calidad agua residual tratada con fines de reúso para riego.....	19
2.3.3 Límites Máximo Permisible (LMP)	20
2.3.4 Los Estándares de Calidad (ECA).....	23
2.3.5 Remoción de metales pesados	25
2.3.6 Propiedades físico químicas de efluentes residuales.....	26
2.3.6.1 Potencial de Oxígeno.....	26
2.3.6.2 Temperatura.....	27
2.3.6.3 Conductividad	27

2.3.6.4	Solidos Suspendidos Totales (SST)	28
2.3.6.5	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	28
2.3.6.6	Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)	29
2.3.6.7	Sulfatos (SO ₄)	29
2.3.7	<i>Principios Ambientales Derecho Internacional</i>	29
2.3.8	<i>Proceso de flotación diferencial en plantas metalúrgicas</i>	30
2.3.8.1	Proceso de Chancado	30
2.3.8.2	Proceso de Molienda	30
2.3.8.3	Proceso de Flotación	31
2.3.9	<i>Reactivos empleados en la flotación diferencial</i>	31
2.3.10	<i>Relaves de Flotación</i>	35
2.3.11	<i>Fuentes contaminantes sector minero</i>	36
2.3.12	<i>Fundamentos de la cavitación hidrodinámica</i>	37
2.3.13	<i>Tipos de cavitación</i>	43
2.3.14	<i>Equipos para Procesamiento de Cavitación Hidrodinámica</i>	45
2.3.14.1	Dispositivo de platos perforados	45
2.3.14.2	Reactor basado en garganta tipo Venturi	46
2.3.14.3	Otros tipos de reactores	48
2.3.15	<i>Parámetros de operación en cavitación hidrodinámica</i>	48
2.3.15.1	Velocidad de flujo	48
2.3.15.2	Presión	49
2.3.15.3	Tiempo	52
2.3.16	<i>Dinámica de las cavidades</i>	52
2.3.17	<i>Aplicaciones de la cavitación hidrodinámica</i>	54
2.3.17.1	Utilización cavitación hidrodinámica en procesos químicos	54
2.3.17.2	Aplicación cavitación hidrodinámica en procesos físicos	56
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA		60
3.1.	Tipo y diseño de investigación	60
3.2.	Unidad de análisis	61
3.3.	Población de estudio	61
3.4.	Tamaño de muestra	61
3.5.	Selección de muestra	61
3.6.	Técnicas de recolección de datos	61
3.7.	Análisis e interpretación de la información	63

3.7.1	<i>Materiales y equipos</i>	63
3.7.2	<i>Métodos de ensayo</i>	64
3.7.3	<i>Parámetros de operación</i>	66
3.8.	Variables de investigación.....	67
3.8.1	<i>Variable Independiente</i>	67
3.8.2	<i>Variable dependiente</i>	67
3.9.	Operacionalización de variables.....	68
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		70
4.1.	Análisis, interpretación y discusión de resultados.....	70
4.1.1	<i>Concentración inicial de metales</i>	70
4.1.2	<i>Concentración final de metales</i>	73
4.2	Interpretación de resultados.....	75
4.2.1	<i>Solidos Suspendidos Totales (SST)</i>	75
4.2.2	<i>Potencial de Oxígeno (pH)</i>	77
4.2.3	<i>Demanda Biológica Oxígeno (DBO) y Demanda Química Oxígeno (DQO)</i>	78
4.2.4	<i>Sulfatos (SO₄)</i>	79
4.2.5	<i>Eficiencias de Remoción en metales</i>	80
4.3	Pruebas de hipótesis	89
4.3.1	<i>Hipótesis Especifica 1</i>	89
4.3.2	<i>Hipótesis Especifica 2</i>	91
4.3.3	<i>Hipótesis Especifica 3</i>	93
4.3.4	<i>Hipótesis Especifica 4</i>	95
4.4	Discusión de resultados	97
CONCLUSIONES		108
RECOMENDACIONES		110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		112
ANEXOS		125
Anexo 1: Efectos fisicoquímicos producidos durante el proceso de cavitación ..		125
Anexo 2: Concentración inicial de metales: prueba de entrada 1		126
Anexo 3: Concentración inicial de metales: prueba de entrada 2		127
Anexo 4: Concentración final de metales: prueba de salida 1 (5 bares)		128
Anexo 5: Concentración final de metales: prueba de salida 2 (9 bares)		129
Anexo 6: Informe de ensayo composito		130

Anexo 7. Operacionalización de Variables	132
Anexo 8. Matriz de Consistencia.....	133
Anexo 9: Conflictos Socio Ambientales	134
Anexo 10. Volumen anual vertimiento aguas residuales industriales autorizadas por actividad económica 2020 (m3).	140

Lista de tablas

Tabla 1	Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas	20
Tabla 2	<i>LMP para los efluentes de PTAR a un cuerpo de agua</i>	21
Tabla 3	<i>Comparación de los LMP para efluentes de PTAR y ECA-Agua</i>	21
Tabla 4	<i>Valores máximos admisibles (VMA) para descargas industriales a alcantarillado</i>	21
Tabla 5	<i>Parámetros y Valores Consolidados ECA – Agua: Categoría 3</i>	24
Tabla 6	<i>Principales actividades industriales generadoras de metales pesados ..</i>	25
Tabla 7	<i>Zonas De Reacción Involucradas En El Proceso De Cavitación Hidrodinámica</i>	40
Tabla 8	<i>Referencias de métodos de ensayo</i>	65
Tabla 9	<i>Concentración inicial de metales: prueba a 5 bares</i>	71
Tabla 10	<i>Concentración inicial de metales: prueba a 9 bares</i>	72
Tabla 11	<i>Pruebas de salida y evolución de tratamiento a 5 Bares de Presión.....</i>	73
Tabla 12	<i>Pruebas de salida y evolución de tratamiento a 9 Bares de Presión.....</i>	74
Tabla 13	<i>Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades mineros metalúrgicas</i>	90
Tabla 14	<i>Concentraciones encontradas antes de pruebas de Cavitación Hidrodinámica</i>	90
Tabla 15	<i>Prueba de Shapiro-Wilk sobre la concentración de los metales tóxicos, según antes (0 minutos) y después (90 minutos) del tratamiento.</i>	91
Tabla 16	<i>Prueba de T de Student de muestras independientes para comparar las concentraciones de los metales tóxicos antes (0 minutos) y después (90 minutos) del tratamiento.</i>	92
Tabla 17	<i>Prueba de Shapiro-Wilk sobre los porcentajes de eficiencia de remoción de metales pesados según las presiones utilizadas en el tratamiento.....</i>	94
Tabla 18	<i>Prueba de U de Mann-Whitney para comparar los porcentajes de eficiencia de remoción de metales entre las presiones utilizadas en el tratamiento.</i>	95
Tabla 19	<i>Prueba de Shapiro-Wilk sobre la concentración de los SST y sulfatos, según antes (0 minutos) y después (90 minutos) del tratamiento.</i>	96

Tabla 20	<i>Prueba de Levene sobre SST y SO₄ entre las concentraciones de los registros de antes (0 minutos) y después (90 minutos) del tratamiento..</i>	96
Tabla 21	<i>Prueba de T de Student de muestras independientes sobre SST y sulfatos para comparar las concentraciones registradas antes (0 minutos) y después (90 minutos) del tratamiento</i>	97
Tabla 22	<i>Concentración de metales en partes por millón (PPM).....</i>	104

Lista de figuras

Figura 1	Estándares de calidad Ambiental (ECA).....	23
Figura 2	Rangos de pH en Soluciones Acuosas.....	27
Figura 3	Proceso de flotación para producción de concentrados de Pb, Cu, Zn, Mo	33
Figura 4	Principio de Cavitación Hidrodinámica	38
Figura 5	Principio de la Cavitación Generalizado en un Tubo Venturi	38
Figura 6	Variación de la Presión como Función de la Geometría y Posición en un Dispositivo por CH.....	39
Figura 7	Proceso de Cavitación Hidrodinámica	43
Figura 8	Desarrollo e Implosión de una Burbuja Formada por la Propagación de una Onda Acústica en un Medio Líquido	44
Figura 9	Platos de Múltiples Orificios, con Diferentes Combinaciones de Número y Diámetro de Perforaciones	45
Figura 10	Representación General de un Dispositivo Venturi.	47
Figura 11	Velocidad del Flujo	48
Figura 12	Caudal o Razón del Fluido	49
Figura 13	Principio de Presión vs Área	50
Figura 14	Prototipo de Cavitación Hidrodinámica Promec & Innovate Perú.	64
Figura 15	Evolución de temperatura a 5 y 9 bar.....	67
Figura 16	Evolución concentración SST (min) y Eficiencia remoción SST (bar) ...	77
Figura 17	Evolución concentración SO ₄ y Eficiencia remoción SO ₄	80
Figura 18	Evolución concentración Al y Eficiencia remoción Al.....	81
Figura 19	Evolución concentración As y Eficiencia remoción As.....	81
Figura 20	Evolución concentración Cd y Eficiencia remoción Cd	82
Figura 21	Evolución concentración Co y Eficiencia remoción Co	83
Figura 22	Evolución concentración Cu y Eficiencia remoción Cu	83
Figura 23	Evolución concentración Cr y Eficiencia remoción Cr	84
Figura 24	Evolución concentración Hierro y Eficiencia remoción Fe.....	85
Figura 25	Evolución concentración Mn y eficiencia remoción Mn.....	85
Figura 26	Evolución concentración Hg y Eficiencia remoción Hg.....	86
Figura 27	Evolución concentración Ni y Eficiencia remoción Ni	86
Figura 28	Evolución concentración Ag y Eficiencia remoción Ag.....	87

Figura 29	<i>Evolución concentración Pb y Eficiencia remoción Pb.....</i>	88
Figura 30	<i>Evolución concentración Si y eficiencia remoción Si</i>	88
Figura 31	<i>Evolución concentración Zn y eficiencia remoción Zn.....</i>	89
Figura 32	<i>Eficiencia remoción metales pesados según presiones utilizadas en el tratamiento</i>	94
Figura 33	<i>Mecanismo de recuperación de presión a través de una restricción de orificio</i>	105

Resumen

La presente investigación experimental se enfoca en los efectos que causa la cavitación hidrodinámica controlada (CH) en la eliminación o reducción de concentraciones de metales pesados, sólidos en suspensión y sulfatos en efluentes residuales de la industria metalúrgica, particularmente en relaves polimetálicos. Se utilizó un prototipo de CH que controlaba el tiempo y la presión, con presiones de 5 y 9 bares y temperaturas entre 22 y 64 °C. El estudio se realizó con efluentes polimetálicos de tratamiento (flotación diferencial) en la región central del Perú, con especies como argentita (Ag_2S), calcopirita (Cu Fe S_2), galena (PbS) y esfalerita (ZnS), que son procesados para la obtención de concentrados comerciales de zinc, cobre y plomo. Los resultados mostraron una progresiva eliminación, con un promedio de 73.6% en metales pesados, 52.1% de sólidos en suspensión y 3.9% de sulfatos en 60-90 minutos a 9 bares de presión, sin la necesidad del empleo de ningún tipo de catalizador ni inducciones de ozonización. La CH descompone el agua, el propio vapor de agua es el que genera los radicales libres que oxidan y destruyen directamente compuestos no deseados, este proceso involucra la formación, expansión y colapso e implosión de burbujas en períodos de milisegundos o microsegundos, lo que libera gran cantidad de energía. Esta tecnología no compleja, combinado con procesos de oxidación se presenta como una estrategia de tratamiento eficaz, de menores costos de operación y aplicable a diversas áreas industriales. Los resultados sugieren que la CH puede ser una solución innovadora y eficiente para abordar los desafíos de las aguas residuales de la industria metalúrgica, reduciendo los costos y promoviendo la economía circular en la minería. Además, la CH ha demostrado ser versátil en otros campos, como la mejora de parámetros fisicoquímicos en la industria del curtido de cuero sin la necesidad de reactivos químicos adicionales.

Palabras Claves: Cavitación hidrodinámica controlada, remoción metales pesados, efluentes residuales polimetálicos

Summary

The present experimental investigation focuses on the effects of controlled hydrodynamic cavitation (CH) on the removal or reduction of heavy metal concentrations, suspended solids and sulphates in residual effluents from the metallurgical industry, particularly in polymetallic tailings. A CH prototype was used that controlled time and pressure, with pressures of 5 and 9 bars and temperatures between 22 and 64 °C. The study was carried out with polymetallic treatment effluents (differential flotation) in the central region of Peru, with species such as argentite (Ag_2S), chalcopyrite (Cu Fe S_2), galena (PbS) and sphalerite (ZnS), which are processed to obtain commercial concentrates of zinc, copper and lead. The results showed a progressive removal, with an average of 73.6% of heavy metals, 52.1% of suspended solids and 3.9% of sulphates in 60-90 minutes at 9 bars of pressure, without the need to use any type of catalyst or ozonation inductions. CH decomposes water, the water vapor itself is what generates the free radicals that directly oxidize and destroy unwanted compounds, this process involves the formation, expansion and collapse and implosion of bubbles in periods of milliseconds or microseconds, which releases a large amount of energy. This non-complex technology, combined with oxidation processes, is presented as an effective treatment strategy, with lower operating costs and applicable to various industrial areas. The results suggest that CH can be an innovative and efficient solution to address the wastewater challenges of the metallurgical industry, reducing costs and promoting the circular economy in mining. Furthermore, CH has proven to be versatile in other fields, such as the improvement of physicochemical parameters in the leather tanning industry without the need for additional chemical reagents.

Keywords: Controlled hydrodynamic cavitation, heavy metal removal, polymetallic residual effluents

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación problemática

De acuerdo a cifras de tratamiento de aguas residuales a nivel global, la ONU proyecta que para el año 2030 la demanda mundial de agua superará en un 40% a los recursos naturales disponibles. En paralelo, el Informe del Desarrollo de Recursos Hídricos (Unesco, 2019) señala que más del 80% de los efluentes generados por actividades humanas son liberados nuevamente en los ecosistemas sin haber sido sometidos a procesos de tratamiento ni reciclaje. Ante este escenario, se hace ineludible replantear el método convencional para la gestión de aguas residuales, evolucionando desde el mero "tratar y desechar" hacia un enfoque integral de "reducir, reutilizar, reciclar y recuperar", tal como lo promueve Irina Bokova, directora general de la UNESCO. Esta perspectiva emerge como una alternativa sólida para abordar la problemática global relacionado a efluentes residuales.

En virtud de lo expuesto, resulta innegable que se requiere tomar medidas concretas para atenuar la presión sobre los recursos hídricos. Una vía esencial consiste en aumentar significativamente el porcentaje de tratamiento de aguas residuales tanto domésticas como industriales a nivel mundial, este enfoque es viable para enfrentar el desafío que representa la escasez hídrica. Tomando en consideración estas premisas, se torna apremiante actuar con determinación en la dirección de un manejo más responsable y eficiente de las aguas residuales, no solo como una respuesta directa a la necesidad imperante, sino como un compromiso con las generaciones presentes y futuras, asegurando así la sostenibilidad de nuestros ecosistemas y la seguridad hídrica a nivel global.

La organización mundial World Resources Institute (WRI) encargada de hacer estudios sobre la situación ambiental en el mundo, advirtió que Perú enfrentara estrés

hídrico severo para el año 2040 (Luo et al., 2015), en concordancia con ello, el estudio de Nature Conservancy, de entre veinte ciudades identifica a Lima con un índice alto de estrés hídrico (Aquino, 2018), mientras que las estadísticas de la Autoridad Nacional del Agua, sobre vertimientos de aguas residuales industriales autorizadas por sectores, indica que se alcanzaron un total de 624,001, 728 m³ (Bonett & Aguilar, 2021) de vertimientos de aguas residuales, de las cuales el 24 % correspondió al sector minero, no especificándose cuanto de estas aguas proceden de drenajes de pasivos mineros antiguos, drenajes de mina, plantas de flotación, cianuración, fundición – refinación, etc. El volumen descrito tiene una tendencia ascendente, pues para el año 2024, según el Ministerio de Energía y Minas (MEM), se tiene en curso 51 proyectos ubicados en 17 regiones del país y comprende una inversión de US\$ 54,556 millones (Mucho et al., 2024).

El desarrollo de técnicas de tratamiento de aguas residuales producto del beneficio de metales polimetálicos (Cu, Zn, Pb y derivados) en plantas metalúrgicas, constituye uno de los procesos de mayor criticidad operativa, ambiental y económica para una empresa minera (Carrillo & Guillen, 2018). Su objetivo principal es reducir al máximo la huella ecológica generada (Lamana & Aja, 2010), optimizando la relación entre agua y energía (Golam & Sharma, 2016), fomentando la reutilización de efluentes industriales que contienen elementos recuperables descargados en las relaveras (Rodríguez et al., 2020), así como asegurar una gestión eficiente del abastecimiento de agua (Araya et al., 2021), todo ello encaminado hacia una minería sostenible desde el punto de vista medioambiental (Sparn & Hunsberger, 2015), sin dejar de lado el tejido social, referido a las interacciones y relaciones entre trabajadores, comunidades, instituciones y grupos de interés, mitigando de esta manera los permanentes conflictos socioambientales en los entornos de influencia de operación directa e indirecta de las empresas mineras.

En la literatura científica, se han documentado diversas técnicas de cavitación, que incluyen enfoques como la cavitación hidrodinámica, ultrasónica, óptica, acústica y de partículas (Gutiérrez et al., 2019). De todas estas técnicas, la aplicación de la cavitación hidrodinámica se destaca como una importante alternativa para abordar la problemática de la contaminación en la industria minera, específicamente en el proceso de concentración de minerales. Un indicador fundamental para evaluar la eficiencia de

estos procesos es la cantidad de agua utilizada, medida en metros cúbicos por tonelada de mineral procesado (Lewinsohn, 2020). En el contexto peruano, se identifica una notable falta de investigación relacionada con el uso controlado de la CH en aguas residuales de efluentes metalúrgicos, lo que confiere a esta investigación un interés particular y relevante, ya que tiene el potencial de contribuir a la evaluación del desempeño de la CH para la eliminación o reducción de contaminantes metálicos derivados de los procesos de tratamiento de minerales polimetálicos, una vez obtenidos los concentrados de plomo, cobre, zinc y otros minerales con fines comerciales.

La cavitación hidrodinámica (CH) se ha convertido, por tanto, en una nueva y prometedora tecnología no convencional para tratar diversos subproductos, productos, residuos agro-industriales y la eliminación de metales pesados en aguas residuales (Baowei et al., 2021; Pugazhenthiran et al., 2016; Sun et al., 2021; Wan et al., 2021; Yuequn et al., 2016).

Esta tecnología se basa en la generación de un gran número de burbujas en los fluidos, lo que favorece la modificación química y/o física en el sistema. Además, la CH tiene un potencial de escalamiento adecuado y cuenta con un alto grado de desarrollo tecnológico asociado (Agarkoti et al., 2021). Esto ha sido validado mediante experimentos que comparan la eficacia de la cavitación acústica e hidrodinámica en esquemas de tratamiento combinado para la degradación de aguas residuales de tintes, llevados a cabo por Gogate y Bhosale (2013). También se ha demostrado una mayor eficiencia energética en el tratamiento de diversos contaminantes biorrefractarios y metálicos presentes en efluentes acuosos (Carpenter et al., 2017).

De manera complementaria, se ha observado que los eventos de cavitación hidrodinámica crean condiciones extremas en una región localizada conocida como "colapso de burbujas". Esto provoca la descomposición del agua y la liberación de radicales libres de hidroxilo (OH) e hidrógeno (H) (Dular et al., 2016), que son muy reactivos por la disociación de moléculas. Estos radicales libres son capaces de descomponer sustancias sólidas, como metales pesados, a través de ondas de choque y chorros microscópicos de alta velocidad. En otras palabras, el proceso de CH implica la formación, crecimiento, implosión y colapso de la cavidad en un corto período de tiempo, liberando una gran cantidad de energía (Mancuso et al., 2020).

El rendimiento de la CH está influenciado por diversos parámetros, como las propiedades físico-químicas del agua (Dindar, 2016), como el pH y la concentración inicial de metales, así como la presión de entrada de la bomba (Patil & Gogate, 2012), el caudal y el tiempo de tratamiento (Benito y Arrojo, 2006), y el diseño del sistema de cavitación para lograr una alta eficiencia energética y una operación adecuada, así como instalaciones escalables para su aplicación industrial (Tao et al., 2016).

Ante esta perspectiva, el objetivo de esta investigación es utilizar la cavitación hidrodinámica (CH) para reducir concentraciones de metales en aguas residuales de la minería polimetálica, así como los sólidos en suspensión que generan los lodos en los procesos de flotación. Se busca convertir los residuos industriales en recursos utilizables, ya que contienen elementos recuperables como agua, energía y materiales limpios (García et al., 2020), que proporcionen beneficios económicos, financieros y proporcionar un entorno limpio, resistente y sostenible, alineado a los objetivos de desarrollo sostenible. En consecuencia, se espera lograr una minería ambientalmente sostenible que cumpla con las normas ambientales establecidas en el D.S. 010-MINAM, Límites Máximos Permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de las Actividades Minero-Metalúrgicas, es necesario resaltar, que estas normas son rigurosamente auditadas por el Organismo de Evaluación y Regulación Ambiental - OEFA (Cerna, 2021).

1.2. Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿En qué nivel la cavitación hidrodinámica controlada es eficiente para la reducción de metales tóxicos en efluentes metalúrgicos?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuánto es la concentración de metales tóxicos en el efluente residual industrial metalúrgico antes del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica?
- ¿Cuánto es la concentración de metales tóxicos en el efluente residual industrial metalúrgico después del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada?

- ¿Qué nivel de eficiencia de remoción de metales pesados en el efluente residual industrial metalúrgico se tiene después del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada?
- ¿Qué características fisicoquímicas presenta el efluente residual industrial metalúrgico antes y después del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada?

1.3. Justificación teórica

Los efluentes productos del tratamiento metalúrgico (relaves) son vertidos y acumulados en las relaveras, donde se sedimentan por capas variando su concentración y composición mineralógica en función al tipo de mineral tratado, motivo por el cual, se hace necesario realizar investigaciones para aplicar tecnologías recientes con fines de eliminar los efectos tóxicos de los contaminantes o mitigar estos impactos (Pugazhenthiran et al., 2016) a fin de mitigar el impacto en el medio ambiente, reducir la cantidad de agua empleada por tonelada de mineral procesado, reducir costos de operación en el manejo de relaveras, minimizar consumos de agua por procesos de reutilización, recuperar materiales o recursos bajo un contexto de economía circular.

En las tecnologías y procesos con efluentes residuales metalúrgicos, lidiar contra diversas y grandes concentraciones de contaminantes (drenajes ácidos, botaderos de desmonte, metales pesados, productos químicos, erosión, sedimentación, residuos orgánicos, etc.) y los impactos devastadores que estos generan a su entorno, exigen que los tratamientos para su reducción y control sean; cada vez más eficientes, eficaces e innovadores. Un manejo incorrecto del contenido de agua en los relaves de la mina puede convertirse en una amenaza para su estabilidad y, en consecuencia, su seguridad ambiental (Araya, et al. 2021).

Estos problemas motivan investigar nuevas tecnologías y lograr la mejora de la calidad de sistemas con fluidos, bajo este contexto, el presente estudio investigara de manera experimental, el tratamiento de efluentes residuales polimetálicos en plantas metalúrgicas por la técnica de Cavitación Hidrodinámica (CH), esta actividad hace que el agua se descomponga y surjan radicales libres de Hidroxilos (OH) e Hidrogeno (H)

muy reactivos por disociación de la molécula descomponiendo así las sustancias solidas (metales pesados) y en consecuencia; su efecto sea positivo y útil para ayudar a reducir, degradar las concentraciones de contaminantes existentes de las sustancias particularmente dañinas para los seres humanos y su entorno inmediato (Ozonek, 2012).

Los resultados experimentales efectuados por esta metodología, ojalá motiven y permitan en el ámbito académico mejoras continuas y perfeccionamiento de investigaciones futuras de CH. (Diagrama de fase, 2022) con aplicación a aguas industriales de plantas concentradoras de metales polimetálicos.

1.4. Justificación practica

Desde la década de 1990, las diferentes administraciones gubernamentales peruanas han implementado progresivamente reformas, solicitudes y estrategias, para promover insertar inversión, orientada a explotar recursos no renovables y mitigar el impacto ambiental negativo de su aprovechamiento, sin embargo; estas reformas, no evitan que siga multiplicándose por todo el país, los conflictos sociales ambientales en el ámbito minero metalúrgica.

Consideramos que el desarrollo de la Investigación en tecnologías de CH ayudara a mitigar los problemas socio ambientales, debido a que es un método sencillo y de fácil implementación, la problemática; está relacionado a la gestión de la calidad de los efluentes metalúrgicos, mejora del ambiente, mejora de los ecosistemas que están vinculados a fuentes contaminantes y por lo mismo, con la degradación de sustancias particularmente dañinas para las personas y su entorno inmediato.

Desde el punto de vista económico, el conocimiento, desarrollo y aplicación de CH para tratamiento de efluentes metalúrgicos puede suministrar suficientes elementos de juicio sobre los costos y beneficios de esta tecnología, su evaluación económica puede establecer la conveniencia de su aplicabilidad a diferentes escalas de producción, costos de operación, mantenimiento y condiciones de reúso.

Los procesos de cavitación hidrodinámica, no requiere ningún tipo de catalizador (reactivos que induzcan a acelerar o disminuir la velocidad de reacción), ya que es el propio vapor de agua el que genera los radicales, siendo en consecuencia una tecnología no compleja y de menores costos de operación (Benito & Arrojo, 2006). Estando entre sus principales beneficios la disminución de la concentración de metales pesados de las aguas residuales, a menor costo de operación que las tecnologías convencionales, no utilizar químicos adicionales, no ayuda de generadores de ozono y por lo mismo; optimiza recursos en tratamientos de aguas residuales, ambientalmente permitirá evaluar el nivel de eficiencia de un sistema de cavitación hidrodinámica controlada para la reducción de metales tóxicos en efluentes metalúrgicos.

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Aplicar la tecnología de cavitación hidrodinámica controlada para la reducción de metales tóxicos en efluentes metalúrgicos de la industria minera.

1.5.2 Objetivos específicos

- Evaluar la concentración de metales tóxicos en el efluente residual industrial metalúrgico antes del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada.
- Evaluar la concentración de metales tóxicos en el efluente residual industrial metalúrgico después del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada.
- Determinar la eficiencia de remoción de metales pesados en el efluente residual industrial metalúrgico después del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada.
- Analizar las características fisicoquímicas en el efluente residual industrial metalúrgico antes y después del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco filosófico o epistemológico de la investigación

La gestión de aguas residuales de procesos minero metalúrgicos, plantea desafíos éticos y filosóficos significativos debido a las complejas implicaciones ambientales y sociales que involucra (Anexo 9). Para abordar estas cuestiones, es posible recurrir a perspectivas filosóficas que destacan la importancia de la responsabilidad ambiental, la equidad en la explotación de recursos naturales no renovables y la consideración de las generaciones futuras que explore cuestiones éticas y morales relacionadas con este tema crítico.

En la actividad minera, el agua desempeña un papel decisivo, su mayor empleo ocurre en los procesos metalúrgicos, donde se aprovecha la tecnología y la ciencia para obtener metales y minerales industriales en beneficio del desarrollo y bienestar de la humanidad, vivir sin minería, es un mito, Marine Resources (2019). Indiscutiblemente, la evolución del hombre y la civilización desde sus primeros años, está relacionada a la explotación minera que aparece señalada en el conocido sistema de las tres edades (Piedra, Hierro y Bronce), elaborado en 1820 por Christian Jürgensen Thomsen, la minería es una actividad necesaria, todo lo que nos rodea en nuestra vida cotidiana tiene componentes que proceden de la minería, ya sea directamente o como resultado de algún proceso de transformación metalúrgica.

El agua es esencial para todas las formas de vida, ya Tales de Mileto (filósofo presocrático del siglo VI a.C., advertía que la tierra flota sobre el agua y por ello, lo consideraba el origen de todas las cosas. Aunque su enfoque podría parecer simplista en comparación con la ciencia moderna, su propuesta sentó las bases para el

pensamiento científico al buscar explicaciones naturales en lugar de recurrir a mitos y dio inicio al estudio sistemático de la naturaleza.

El filósofo **Aldo Leopold** (1949), conocido por su trabajo en ética ambiental, enfatiza la necesidad de considerar la comunidad biótica en su conjunto y argumenta que los humanos tienen la responsabilidad de ser "ciudadanos en un mundo biótico". Esta perspectiva podría aplicarse al sector minero al recordarnos la importancia de minimizar los impactos negativos de la actividad minera en los ecosistemas acuáticos afectados por las aguas residuales.

John Rawls (1971), por otro lado, plantea la teoría de la justicia como equidad, que se centra en la distribución justa de recursos y beneficios en la sociedad. Aplicar esta teoría al sector minero implica considerar si la explotación de minerales y la gestión de aguas residuales son equitativas para todas las partes interesadas, incluidas las comunidades locales y los ecosistemas acuáticos.

Naess (1973) en su obra *Hacia una ética ecológicamente virtuosa*, destaca contundentemente la noción de "ecología superficial" como una perspectiva ambientalista, que tiende a centrarse en cuestiones periféricas o superficiales del problema ecológico, sin profundizar en las causas políticas, sociales, económicas y culturales que subyacen en dicha crisis. Esto significa que, en lugar de desafiar y cuestionar los sistemas políticos y económicos existentes, así como los aspectos fundamentales del egoísmo y el consumismo que a menudo impulsan la degradación ambiental, la ecología superficial a menudo se convierte en una herramienta que respalda inadvertidamente a las industrias y modelos establecidos, aboga por una transformación profunda y fundamental en la forma en que la sociedad se relaciona con la naturaleza y con los demás seres humanos. Esto implica un cambio radical en los valores culturales y en las estructuras políticas y económicas, así como un reexamen de los valores de consumismo y egoísmo que a menudo impulsan el deterioro ambiental.

El filósofo **Peter Singer** (1975) en su libro *Animal Liberation* argumenta a favor de la consideración moral de los seres sintientes, lo que ha llevado a debates sobre la ética de la contaminación y la degradación ambiental que afecta a la vida

acuática. Esto puede relacionarse con la necesidad de tratar las aguas residuales industriales de manera responsable para evitar daños innecesarios a la fauna acuática.

El filósofo **Hans Jonas** (1979) en su obra "El Principio de Responsabilidad" subraya la importancia de la responsabilidad hacia las generaciones futuras y destaca que nuestras acciones deben ser guiadas por un sentido de cuidado y precaución hacia el medio ambiente. Esto se relaciona directamente con la gestión de aguas residuales en el sector minero, ya que las decisiones actuales pueden tener impactos significativos en el futuro.

Tratar las aguas residuales se realiza mediante procesos químicos físicos y biológicos para lograr eliminar contaminantes que se encuentran en el efluente ya que estas aguas pueden servir para el uso industrial y de los seres humanos.

De acuerdo a los informes del Banco Mundial (2020), las aguas residuales que se vierten al medio ambiente (80% en el mundo) no reciben un tratamiento idóneo, pese a que disponen de elementos recuperables como la energía, nutrientes y agua limpia por lo tanto invertir en efluentes y en otras instalaciones de sanidad es fundamental para la mejora de la salud de la población, sostenimiento de las economías en el largo corto, la calidad de vida de la población y la mejora del entorno ambiental.

En este contexto, las aguas residuales deben considerarse un recurso valioso, un enfoque clave en la economía circular, diseñada para maximizar el uso de los recursos y minimizar los desperdicios. Según Rodríguez et al. (2020), será esencial implementar estrategias de desarrollo ciudadano para reducir el consumo de recursos y enfocarse en la recuperación a medida que las ciudades crecen, alineándose con los principios de la economía circular. La aplicación de este principio a las aguas residuales presenta una ventaja significativa, ya que podría transformar los servicios de saneamiento en autosustentables y generar un valor añadido para la economía. Este método podría ayudar a las naciones a superar los obstáculos financieros relacionados con el saneamiento y alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible.

Bajo esta perspectiva, es de esperarse que la actividad minera se realice cumpliendo con mecanismos de protección y responsabilidad social y ambiental, que

permitan desarrollar actividades sostenibles sin perder en su evaluación su rigor; tratando de buscar que esta actividad sea un aliado del desarrollo sustentante del país y de su entorno directo, por lo mismo, el desarrollo de nuevas tecnologías a fin de eliminar o mitigar contaminantes urbanos e industriales es necesario y fundamental para el bienestar y desarrollo humano.

2.2. Antecedentes de investigación

Bajo la importancia de las consecuencias operativas asociadas a la CH se ha procedido a investigar publicaciones existentes, consultando fuentes de información primaria y secundaria, que fundamentan el desarrollo de metodologías que para el autor tienen interés científico y técnico que se detalla a continuación.

En las últimas dos décadas, se han intentado diferentes procesos avanzados de oxidación (AOP) tales como fenton, ozonización, electroquímica, ultravioleta de vacío etc., como tratamientos adecuados para aguas residuales industriales y mineralizar tales moléculas complejas (Monge et al., 2008); de la misma manera, la literatura reporta técnicas de cavitación: tales como acústica o ultrasónica, hidrodinámica, óptica y por partícula (Gutiérrez et al., 2019). Entre estos procesos, la cavitación hidrodinámica (CH) se ha convertido en una nueva tecnología no tradicional, porque produce burbujas en el fluido, en gran cantidad, lo que favorece modificaciones físicas y/o químicas durante cada proceso. También tienen un buen potencial de escalamiento y alto nivel en desarrollo de tecnología asociada. (Thanekar & Gogate, 2019; Gogate & Bhosale, 2013), por su parte (Carpenter et al., 2017), afirma mayor eficiencia energética para el tratamiento de diversos contaminantes biorefractarios y metálicos presentes en los efluentes acuosos.

Existen antecedentes científicos que confirman que la cavitación hidrodinámica (CH) acompañada de procesos avanzados de oxidación (AOP) se ha convertido en una de las tecnologías de mayor potencial para el tratamiento de aguas residuales a escala industrial (Agarkoti et al., 2021; Dutta et al., 2021; Sun et al., 2021; Wang et al., 2021).

La cavitación hidrodinámica (CH) se destaca como una tecnología emergente y prometedora para el tratamiento de aguas residuales industriales, especialmente

cuando se combina con procesos de oxidación avanzados (AOP). Su eficiencia, potencial de escalamiento y desarrollo tecnológico asociado la posicionan como una alternativa viable y eficiente para enfrentar los desafíos del tratamiento de aguas residuales a escala industrial.

2.2.1 Fuentes nacionales

Castañeda y Vargas (2020) examinaron la efectividad de tratar aguas industriales resultantes de materiales de construcción (UNICOM) mediante el proceso de cavitación hidrodinámica. Se evaluaron dos enfoques: uno con enfriamiento y otro sin enfriamiento. En esta investigación, se utilizaron 160 litros de muestra a los que se les añadió un catalizador de Dióxido de Titanio (TiO_2) a una concentración de 2 gr/L. Los resultados revelaron que la cavitación hidrodinámica presentó un mayor rendimiento en la reducción de los niveles de Sólidos Totales Suspendedos (STS) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) cuando se aplicó sin el sistema de enfriamiento. En contraste, para la eliminación de Aceites y Grasas, se observó una mayor eficacia al emplear el método de cavitación hidrodinámica en conjunto con el Dióxido de Titanio (TiO_2) y el sistema de enfriamiento.

Yachachin (2021), empleo procesos de oxidación avanzada (OP) con cavitación hidrodinámica (CH) utilizando dos dispositivos: un tubo venturi y una placa orificio, para tratar aguas residuales provenientes de la industria de curtiembre. Las concentraciones utilizadas fueron del 15%, 30% y 45%, y se llevaron a cabo pruebas durante un período de 60 minutos. Se realizaron comparaciones entre ambos dispositivos, y se llegó a la conclusión que se obtuvo resultados mayores en la placa orificio y los parámetros de caudal, temperatura y presión de salida. No obstante, el tubo Venturi obtuvo mejores resultados en términos presión de entrada y de bomba. La investigación determinó que al combinar la oxidación avanzada y cavitación hidrodinámica se obtuvo los siguientes resultados, las concentraciones llegaron a 15%, 30% y 45%, lo que se demostró eficiencia. Por otro lado, las concentraciones del 30% y 45% resultó en la reducción del parámetro de pH, de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y de los Sólidos Suspendedos Totales (SST). Sin embargo, los valores de conductividad eléctrica y salinidad aumentaron de manera positiva en sus resultados.

Gonzales y Mayta (2021) en su estudio sobre el mejoramiento de la calidad del agua residual proveniente de la industria láctea artesanal a través del proceso de implosión de cavidades con CH, el investigador realizó este proceso a tres niveles de presión diferentes y analizó parámetros tanto físicos como químicos. Se tomaron muestras en intervalos de tiempo iniciales, intermedios y finales para evaluar el impacto de este tratamiento en la concentración de sólidos disueltos, aceites y grasas, dureza total y conductividad del agua residual. Los resultados obtenidos indicaron que la reducción más significativa en la concentración de sólidos disueltos (SD) se logró a una presión de 8 bar, con una disminución del 16.23%. La conductividad del agua disminuyó en un 15.82% a una presión de 6 bar, mientras que la dureza total también se redujo en un 8.33% a la misma presión de 6 bar. En cuanto a los aceites y grasas, se observó reducción del 32.65% (máx.) a una presión de 4 bar.

Lozano (2020) investigó la eficacia de la cavitación hidrodinámica, el oxígeno atmosférico y el ozono en la reducción de carga orgánica y la presencia de metales totales, específicamente cromo, en las aguas residuales de la industria de curtiembre. Para ello, se realizaron tratamientos específicos con cada uno de estos métodos, tomando muestras iniciales y finales para evaluar la reducción en parámetros como Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Totales Disueltos (STD), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sulfuros, aceites y grasas, y metales totales (cromo). Los resultados mostraron que la combinación de cavitación hidrodinámica con ozono fue la más efectiva, logrando una disminución del 96.94% en DBO en aguas residuales del proceso de pelambre, una reducción del 64.28% en DQO en el proceso de remojo, una disminución del 83.33% en SST también en el proceso de remojo, una reducción del 14.52% en STD en el proceso de pelambre, una disminución del 71.83% en metales totales (cromo) en el proceso de pelambre, una reducción del 93.17% en aceites y grasas en el proceso de remojo, y una disminución del 12.28% en sulfuro en el proceso de curtido sin enfriamiento.

2.2.2 Fuentes internacionales

Mancuso et al., (2020) indican que los procedimientos de cavitación hidrodinámica (CH) están siendo cada vez más empleados en la depuración de aguas residuales. La CH posee una capacidad oxidativa que resulta útil para tratar efluentes líquidos contaminados por elementos orgánicos, tóxicos y difíciles de descomponer. Además, sus efectos mecánicos y químicos han demostrado su utilidad en la desintegración de microorganismos en aplicaciones biológicas. Dadas sus características geométricas, los procesos de CH se detectan en ciertos reactores, donde se introducen variaciones en parámetros hidráulicos del fluido, como la presión y la velocidad de flujo. El procedimiento de CH involucra la generación, ampliación, colapso e implosión de cavidades en un lapso de tiempo muy breve, liberando considerables cantidades de energía en el proceso.

Repinc et al., (2022) mencionan que las plantas de tratamiento de aguas residuales, producen enormes cantidades de subproductos semisólidos no deseado (lodos residuales activados). Con este fin, se realizaron ensayos de eficiencia de un novedoso generador rotacional de cavitación hidrodinámica con discos fijos. Los resultados de la evaluación física y química mostraron una reducción del tamaño medio de partícula de hasta un 88%, un aumento de la superficie específica hasta un 300% y un aumento de la DQO soluble, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ hasta 155.8, 126.3, 250 y 29.7%, respectivamente. El tratamiento con cavitación también redujo las concentraciones totales de Pb en un 70%, lo que se atribuyó a las reacciones desencadenadas por los efectos químicos de la cavitación.

Pandit et al. (2021), indican que la cavitación y las simulaciones llevadas a cabo en una escala piloto confirmaron las temperaturas de colapso que habían sido previamente reportadas, alrededor de aproximadamente 5,000 Kelvin (K), y presiones de colapso significativamente mayores que alrededor de 1,000 bares, en una variedad de situaciones operativas. Esto estableció que el criterio de la presión umbral de Blake es adecuado para detectar el comienzo de la cavitación. La eficiencia de la CH está influida por factores como las propiedades fisicoquímicas, la presión de entrada, el pH, la temperatura y la concentración inicial de la muestra a la que se somete (Dutta et al., 2021).

En su estudio titulado "Nuevas estrategias para potenciar la cavitación hidrodinámica en un Venturi circular mediante simulaciones numéricas RANS", el autor confirma que el aumento en la intensidad de la cavitación hidrodinámica ha sido un área de investigación en constante evolución. Este fenómeno, ampliamente aplicado en la oxidación avanzada, ha encontrado un amplio espectro de usos, desde el tratamiento de aguas residuales hasta la producción de nano partículas. En este contexto, el estudio propone tres enfoques diferentes para incrementar la intensidad de la cavitación en un Venturi circular: a) Introducción de rugosidad en la superficie de la pared. b) Implementación de barreras circulares individuales o múltiples en la sección divergente. C) Modificación de la forma de la sección divergente a una estructura en forma de trompeta. Para lograr esto, se llevaron a cabo simulaciones numéricas basadas en RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) y se presentó una extensa validación tanto numérica como experimental, en concordancia con literatura previa, para garantizar la confiabilidad y precisión del estudio. Los resultados detallados abarcan campos de velocidad, fracción de volumen local y promedio, coeficientes de pérdida de presión, número de cavitación, coeficiente de descarga y distribución de presión, todos reportados en función de parámetros adimensionales.

Wang et al., (2021) en el artículo titulado "La cavitación hidrodinámica como una vía prometedora para el tratamiento de aguas residuales", llega a la conclusión de que los métodos de oxidación y cavitación hidrodinámica (CH) han emergido como tecnologías altamente prometedoras para el tratamiento de desechos industriales. Esto se debe a sus ventajas en términos de economía, eficiencia energética mejorada y viabilidad a gran escala. Se destaca que la formación de burbujas y cavidades es un resultado directo de caídas de presión localizadas que se generan a través de diversos constrictores o mediante la rotación mecánica de dispositivos como el diodo de vórtice y otros sistemas rotatorios similares. En este contexto, se llevaron a cabo evaluaciones de varios tipos de reactores de cavitación hidrodinámica, que incluyeron dispositivos como venturis, placas de orificio y mecanismos de cavitación hidrodinámica de tipo giratorio, como el diodo de vórtice. Estas evaluaciones se realizaron para comprender su eficacia en la generación de burbujas y cavidades.

Patil et al. (2021) en la investigación de tratamiento de aguas residuales e intensificación de procesos para la degradación de disolventes mediante cavitación

hidrodinámica (CH), obtuvo mejoras significativas en la remoción de nitrógeno amoniacal, en efluentes residuales industriales (tintes y pigmentos, destilerías y pesquerías). Con este propósito evaluó dos geometrías de reactor para una mayor eficiencia en el orificio de eliminación y el diodo de vórtice del prototipo de cavitación. Encontró que presenta un impacto la concentración inicial en la extensión de la remoción: $\sim 5 \text{ g} / \text{m}^3$, remoción para concentración inicial de $100 \text{ mg} / \text{L}$, hasta $12 \text{ g} / \text{m}^3$ remoción en una alta concentración de $500 \text{ mg} / \text{L}$. Concluye que podría obtener una mejora significativa del orden de magnitud (hasta 8 veces) en eliminar el nitrógeno amoniacal mediante burbujeo de aire u oxígeno en CH, con eficiencia muy alta por encima del 80% y 75% para efluentes diferentes de la industria de la destilería con un tiempo de tratamiento más prolongado en comparación con el de las aguas residuales sintéticas. Menciona que la metodología CH es efectiva y útil para la eliminación de nitrógeno amoniacal.

Agudelo et al. (2019) demostraron la viabilidad de eliminar el sulfuro en la industria de curtidos mediante la tecnología de cavitación hidrodinámica combinada con procesos de oxidación avanzada. En este proceso, se ajustaron diversos parámetros operativos, como el pH inicial del agua residual y la presión de entrada, manteniendo un tiempo de reacción constante de 90 minutos. También se realizaron modificaciones en el número y diámetro de los orificios en el punto de estrangulamiento en dos prototipos diferentes. El objetivo de estas modificaciones era identificar las condiciones óptimas del reactor para tratar el contaminante presente en las aguas residuales. Estas investigaciones lograron reducir la concentración inicial de sulfuro en un máximo del 32.6% sin agregar ningún reactivo químico adicional. Además, se realizó un análisis de costo-beneficio que evaluó la eficacia de la tecnología en relación con la energía consumida por el reactor. En comparación con los métodos de tratamiento actuales, este análisis mostró una disminución significativa del 198% en el costo total del tratamiento.

Bolne et al., (2021) menciona que la producción de membranas de emulsión líquida (LEM) para la extracción de iones de cromo (VI) de aguas residuales, por procesos de CH es viable. Para esta marcha, empleo como agente portador Aliquat 336, Diesel como diluyente y Span 80 como agente emulsionante; hidróxido de sodio (NaOH) como agente decapante en la preparación de la emulsión con el uso de

cavitación hidrodinámica basada en orificios (1 mm de diámetro). Bolne concluye la eliminación de cromo (VI) del agua que contiene metales pesados con la influencia de la producción de LEM, bajo parámetros de tiempo, cantidad, concentración de tensioactivo, relación de tratamiento (que es la relación entre la fase de alimentación y la fase de la membrana de emulsión) y tipo de diluyente. El LEM sintetizado mediante un proceso de cavitación hidrodinámica mostró la posibilidad de una eliminación completa de cromo (VI) de la fase de alimentación que contiene metales pesados, es decir, cromo (VI). Se observaron las condiciones óptimas para 2 min de tiempo de emulsificación, 1,00% de concentración de portador, 3% de concentración de tensioactivo y una proporción de tratamiento de 1:05. Por lo tanto, La aplicación de cavitación hidrodinámica para la producción de LEM con excelente estabilidad puede considerarse como una novedad.

Singh et al., (2020) menciona en su artículo Economía Circular y Residuos Mineros, que se requiere un cambio transformador para pensar en la dirección de utilizar los desechos de la mina para mejores campos sociales, geos ambientales, geo-metalúrgicos, de ingeniería, económicos y legales / regulatorios. Bajo este contexto, es posible separar la materia prima en otras producciones de línea, como en productos químicos, imprimaciones, tintes y pinturas, cerámica, caucho, esmaltes de alfarería, tecnologías de remediación de suelos, medios de filtración absorbente y las industrias de recubrimientos puede por lo mismo conectar con las industrias mineras con el fin de usarlos.

Agarkoti et al., (2021) describen, que tanto la cavitación acústica (CA) y la cavitación hidrodinámica (CH) junto con los procesos avanzados de oxidación (AOP) son técnicas destacadas utilizadas para tratar aguas residuales industriales, aunque muchas investigaciones se centraron en efluentes simulados. Las investigaciones realizadas se focalizan en el análisis de estudios relacionados con el tratamiento real de efluentes industriales mediante cavitación acústica e hidrodinámica operadas individualmente y tratadas con peróxido de oxígeno (H_2O_2), ozono, ultravioleta, Fenton, persulfato y peroximonosulfato, y otros AOP emergentes. Se ha demostrado la necesidad de utilizar cargas óptimas de oxidantes en los distintos AOP para obtener la máxima reducción de contaminantes en efluentes industriales. También se ha discutido el impacto de las condiciones operativas tales como dilución, presión de

entrada, potencia ultrasónica, pH y temperatura operativa. Se han analizado los aspectos económicos del tratamiento de efluentes industriales. La CH se puede considerar como un enfoque rentable en comparación con la CA sobre la base de los costos operativos más bajos y las mejores eficiencias de transferencia. En general, la CH combinada con AOP parece ser una estrategia de tratamiento eficaz que puede implementarse con éxito a escala industrial.

Karamah y Nurcahyani (2019) analizaron la degradación de 100 ppm de Blue KN-R mediante cavitación hidrodinámica, ozonización y la combinación de ambos métodos durante 60 minutos, observando la eliminación de diversas variedades de contaminantes. Los principales resultados de decoloración fueron del 70.16% para ozonización, 79.39% para cavitación hidrodinámica y 92.63% para la combinación de ambos métodos. Concluyeron que, en comparación con los métodos individuales, la combinación de ambos produjo un efecto sinérgico.

Carpenter et al. (2017) en su artículo sobre cavitación hidrodinámica, describen varios dispositivos de cavitación y el impacto de los parámetros geométricos y operativos en las condiciones de cavitación. Discuten la optimización de diferentes dispositivos de cavitación y han desarrollado estrategias para diversas aplicaciones como el tratamiento de aguas residuales, preparación de nano emulsiones, síntesis de biodiesel, desinfección de agua y síntesis de nanopartículas..

Kinnunen et al. (2021) en las investigaciones y revisión de circuitos de agua cerrados con clasificación de minerales y valorización de relaves para una industria minera más sostenible, evaluaron el progreso realizado hacia un nuevo cambio de paradigma en las actividades mineras para reciclar el agua y valorizar los relaves para un mejor resultado ambiental y económico, y para una mayor aceptación social de las operaciones mineras. Cuando se restringen los recursos hidrológicos en la industria minera, se requieren nuevos métodos para el control de la calidad del agua y la optimización en cada paso del proceso, lo que también facilita la recuperación de elementos valiosos adicionales.

En el tratamiento de aguas residuales, Dular et al. (2016a) demostraron que la cavitación hidrodinámica puede utilizarse para eliminar sustancias farmacéuticas como el naproxeno, cianobacterias, ibuprofeno y microalgas verdes. Además, la

cavitación hidrodinámica se manifiesta en varios mecanismos y formas para la eliminación de estos contaminantes.

2.3. Bases teóricas

A continuación, se describirán las Teorías o enfoques teóricos directamente relacionados con la presente investigación, a fin de dar soporte o conceptualizar mejor los fenómenos involucrados con la CH.

2.3.1 Aguas residuales

Es un tipo de agua que presenta afectación negativa ocasionadas por causas humanas o antrópicas. Ya que, por su calidad debilitada, cantidad o el momento en que se dispone de ella, no contiene un valor para el propósito que se requiere, ni para el que se produjo. (Agua, 2019).

La Resolución Jefatural 224-2013 - ANA, el D.S. 006-2017-AG y el TUPA del ANA establecen los requisitos y procedimientos para otorgar autorizaciones de vertimiento y reuso de aguas residuales tratadas. Para ello, es necesario contar con un instrumento de gestión ambiental (IGA) aprobado por la autoridad ambiental sectorial. La Organización Mundial de la Salud (OMS) define los estándares técnicos para el reuso en riego, cuyo objetivo es ayudar al sistema de tratamiento a cumplir con los LMP y los ECA-Agua de manera gradual tanto en áreas rurales como urbanas.

2.3.2 Calidad agua residual tratada con fines de reúso para riego

Actualmente, es la Autoridad Nacional del Agua la que verifica, valida y exige que se cumpla con los valores de las guías que acepta la Organización Mundial de la Salud (OMS) para evaluar solicitudes de autorización para el reúso de efluentes tratados. Estos valores bajos de DBO y DQO indican que la presencia de nutrientes en materia orgánica estabilizada podría ser perjudicial para el riego. La Dirección General de Asuntos Ambientales del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (DGAA-MVCS) supervisa el reúso para riego de parques y áreas verdes de uso público.

2.3.3 Límites Máximo Permisible (LMP)

De acuerdo al Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM de la legislación minera peruana (Cerna, 2021), los LMP evalúan las características biológicas, físicas y/o químicas, sustancias presentes las emisiones, efluentes o descargas producidas por una actividad específica, ya que, a través de ellos, se afecta el aire, agua o suelo. Los LMP establecen límites para emisiones, efluentes o descargas ambientales según la actividad productiva. Por lo tanto, los LMP son legales y deben cumplirse por todas las personas o empresas de todos los sectores, la Tabla 1, muestra los LMP para efluentes metalúrgicos con límites de medición en cualquier momento o como promedio anual..

Tabla 1

Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas

Parámetro	Unidad	Límite en Cualquier Momento	Límite para el promedio anual
pH	mg/L	6 - 9	6 - 9
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0.8
Arsénico Total	mg/L	0.1	0.08
Cadmio Total	mg/L	0.05	0.04
Cromo Hexavalente (*)	mg/L	0.1	0.08
Cobre Total	mg/L	0.5	0.4
Hierro (disuelto)	mg/L	2	1.6
Plomo Total	mg/L	0.2	0.16
Mercurio Total	mg/L	0.002	0.0016
Zinc Total	mg/L	1.5	1.2

Nota. Datos expresados en miligramos por litro (mg/L). Reproducida de LMP, D.S. N°010-2010-MINAM

Por lo tanto, todas las personas o empresas deben tomar las medidas necesarias para asegurarse de que sus acciones no impliquen sobrepasar los LMP establecidos. Los LMP se han establecido en varios sectores, como el transporte y las comunicaciones, la minería, los hidrocarburos, la electricidad, la industria pesquera, de la construcción, las curtiembres y las papeleras.

Por otro lado, los LMP son obligatorios para las PTAR sin tomar en cuenta su

tamaño, ni el nivel de tratamiento. En la tabla 2, en la tabla 3 se muestran los LMP vigentes para efluentes de PTAR y ECA-Agua.

Tabla 2

LMP para los efluentes de PTAR a un cuerpo de agua

Parámetro	Unidad	Valor
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes termo tolerantes	NMP/100	10000
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	mg/l	100
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	200
pH		6.5 - 8.5
Sólidos totales en suspensión	mg/l	150
Temperatura	°C	< 35

Nota. Tabla de afluentes de PTAR. Del Decreto Supremo 003-2010-MINAM, por Sunass.

Tabla 3

Comparación de los LMP para efluentes de PTAR y ECA-Agua

ECA Y Factor de Dilución (FD) del LMP necesario en un cuerpo natural libre de contaminación para el cumplimiento del ECA			Parámetros LMP											
			Categoría		Categoría 1A2		Categoría		Categoría		Categoría		Categoría	
			ECA	FD	ECA	FD	ECA	FD	ECA	FD	ECA	FD	ECA	FD
DBO5	mg/l	100	5	20	10	10	5	20	10	10	15	7		
DQO	mg/l	200	20	10	30	7					40	5		
SST	mg/l	150												
Coliformes Termo tolerantes	NMP/100 ml	10,000	2000	5	20,000	1	200	50	1000	10	2000	5		
Aceites y Grasas	mg/l	20	1	20	1	20	-	4	2	10	2	12		
Nitrógeno amoniacal	mg/l	45	2	23	3.7	12			0.21					
Fosforo (fosfato total)	mg/l	14	0.15	93	0.15	83			0.1		1			

Nota. Tabla de comparación de los LMP. De: Decreto Supremo 004-2017-MINAM, por Sunass

- 1) FD = Factor de dilución calculado para garantizar que el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) cumpla con los Límites Máximos Permisibles (LMP) y los Estándares de Calidad Ambiental para el Agua (ECA-Agua).

2) Categoría 1 = Uso poblacional y recreacional:

Subcategoría a2 = Aguas superficiales que pueden ser potabilizadas mediante tratamiento convencional.

Subcategoría a3 = Aguas superficiales que pueden ser potabilizadas mediante tratamiento avanzado.

Subcategoría b1 = Aguas superficiales destinadas para recreación con contacto primario.

Categoría 2 = Actividades marino-costeras:

Subcategoría c3 = Otras actividades.

Categoría 3 = Riego de vegetales y bebida de animales; riego de vegetales de tallo alto.

- 3) La calidad del efluente de una PTAR con lagunas facultativas se evalúa con una concentración en el afluente para la carga per cápita según la norma OS.090, considerando un caudal per cápita de 150 litros/día, una remoción del fósforo del 30% y una remoción del nitrógeno total del 40%.

Tabla 4

Valores máximos admisibles (VMA) para descargas industriales a alcantarillado

Parámetro	Unidad	Valor
DEO5	mg/l	500
DQO	mg/l	1000
SST	mg/l	500
Aceites y Grasas	mg/l	100
ANEXO		
pH	mg/l	6 - 9
Temperatura	mg/l	< 35
Solidos sedimentables	mg/l	8.5
Nitrógeno amoniacal	mg/l	80
Sulfatos	mg/l	1000
Cromo total	mg/l	10
Arsénico	mg/l	1
Boro	mg/l	4
Plomo	mg/l	0.5

Nota. Adaptado del Decreto Supremo 010-2019-VIVIENDA.

Dado que las altas concentraciones de sulfatos exigen un tratamiento previo antes de la descarga al sistema de alcantarillado, cumplir con este parámetro resulta complicado en los efluentes generados por la industria alimentaria.

2.3.4 Los Estándares de Calidad (ECA)

Según la legislación peruana son señales de calidad del medio ambiente (Figura 1). Su finalidad es establecer objetivos que representan el nivel a partir del cual se puede tener un impacto significativo en el medio ambiente y la salud humana. No se requieren legalmente, pero se utilizan para establecer políticas ambientales gubernamentales.

Figura 1

Estándares de calidad Ambiental (ECA)



Nota. Gráfico que representa los 5 estándares de calidad. De: Ministerio del ambiente Perú, 2020.

Los ECA entonces calculan la concentración de sustancias, y parámetros biológicos, físicos y químicos presentes en el agua, aire o suelo, pero no presenta riesgos para la salud humana ni el medio ambiente. Las mediciones se realizan directamente en los cuerpos receptores y tienen como objetivo establecer nivel aceptable de la calidad de las emisiones hechas por factores antrópicos; en este sentido, la Tabla 5 muestra los estándares de calidad ambiental para el agua categoría 3, que dispone de parámetros para riego de vegetales y bebida de animales, no siendo

considerados los ECA de aire , suelo, ruido y radiaciones ionizantes, porque el estudio, está relacionado a efluentes metalúrgicos a nivel piloto sin intervención de los ECA restantes.

Tabla 5

Parámetros y Valores Consolidados ECA – Agua: Categoría 3

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FÍSICOS- QUÍMICOS				
Asínea y Grasas	mg/L	5		10
Bicarbonatos	mg/L	518		**
Cianuro Wad	mg/L	0,1		0,1
Cloruros	mg/L	500		**
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/ Co	100 (a)		100 (a)
Conductividad	(µS/cm)	2 500		5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	15		15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40		40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,2		0,5
Fenoles	mg/L	0,002		0,01
Fluoruros	mg/L	1		**
Nitrosos (NO ₂ -N) + Nitrosos (NO ₃ -N)	mg/L	100		100
Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	10		10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4		≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5		6,5 – 8,4
Sulfatos	mg/L	1 000		1 000
Temperatura	°C	Δ 3		Δ 3
INORGÁNICOS				
Aluminio	mg/L	5		5

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
Arsénico	mg/L	0,1		0,2
Bario	mg/L	0,7		**
Berilio	mg/L	0,1		0,1
Boro	mg/L	1		5
Cadmio	mg/L	0,01		0,06
Cobre	mg/L	0,2		0,5
Cobalto	mg/L	0,06		1
Cromo Total	mg/L	0,1		1
Hierro	mg/L	5		**
Litio	mg/L	2,5		2,5
Magnesio	mg/L	**		250
Manganeso	mg/L	0,2		0,2
Mercurio	mg/L	0,001		0,01
Níquel	mg/L	0,2		1
Plomo	mg/L	0,06		0,06
Selenio	mg/L	0,02		0,06
Zinc	mg/L	2		24
ORGÁNICO				
Bifenilos Policlorados				
Bifenilos Policlorados (PCB)	µg/L	0,04		0,045
PLAGUICIDAS				
Paratión	µg/L	35		35
Organoclorados				
Aldrin	µg/L	0,004		0,1
Clordano	µg/L	0,008		7
Dieldro Ciclo Tricloroetano (DDE)	µg/L	0,001		30
Dieldrin	µg/L	0,5		0,5
Endosulfén	µg/L	0,01		0,01
Endrin	µg/L	0,004		0,2
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L	0,01		0,03
Lindano	µg/L	4		4
Carbamato				
Aldicarb	µg/L	1		11
MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICO				
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1 000	2 000	1 000
Escherichia coli	NMP/100 ml	1 000	**	**
Huevos de Helminthes	Huevo/L	1	1	**

Nota: Tomado de Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, De: diario El Peruano

2.3.5 Remoción de metales pesados

La movilidad de los metales pesados en el medio determina su toxicidad, lo que depende de su especiación química, persistencia y tendencia a acumulación o bioacumulación. La clasificación de las técnicas de tratamiento de metales pesados en las aguas residuales se basa en una variedad de factores. Hay técnicas convencionales que se utilizan con frecuencia para eliminar los contaminantes, con procesos innovadores de eliminación de metales en aguas de origen industriales. Por lo tanto, es crucial investigar formas de eliminar y neutralizar los metales pesados presentes en aguas ácidas de pasivos ambientales mediante el uso de tecnologías accesibles y fáciles de manejar (Caviedes et al., 2015).

En este sentido, destaca el tratamiento y la eficacia de la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) para eliminar metales y neutralizar el pH. Entre sus ventajas es que es un método alternativo para reparar el drenaje ácido de la mina en pasivos ambientales mineros. Su principio es la precipitación de metales, obteniéndose la purificación de estos, lo que resulta en la neutralización y reducción de las concentraciones de iones metálicos como Fe, Cu, Pb, Zn, entre otros. En eficiencias mayores a 90% (Colque et al., 2022).

Tabla 6

Principales actividades industriales generadoras de metales pesados

Industria	Metales	Contaminación derivada
Minería de metales ferrosos	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Zn	Drenaje ácido de mina, relaves, escombros
Extracción de minerales	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Presencia en las menas como en los subproductos
Fundición	As, Cd, Pb, Ti	Procesado de mineral para obtención de metales
Metalurgia	Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn	Procesado térmico de metales
Aleaciones y aceros	Pb, Mo, Ni, Cu, Cd, As, Te, U, Zn	Fabricación, eliminación y reciclaje de metales, relaves y escoriales
Gestión de residuos	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, Mn	Incineración de residuos o en lixiviados
Corrosión metálica	Fe, Cr, Pb, Ni, Co, Zn	Inestabilidad de los metales expuestos al medio ambiente
Galvanoplastia	Cr, Ni, Zn, Cu	Los efluentes líquidos de procesos de recubrimiento
Pinturas y pigmentos	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn	Residuos acuosos procedentes de la fabricación y el deterioro de la pintura vieja
Baterías	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	Fluido de la pila de residuos, la contaminación del suelo y las aguas subterráneas
Electrónica	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn	Residuos metálicos acuosa y sólida desde el proceso de fabricación y reciclaje
Agricultura y Ganadería	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn, As, Mn, Cu	Contaminación de escorrentía, aguas superficiales y subterráneas

Nota. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Caviedes et al., 2015.

2.3.6 *Propiedades físico químicas de efluentes residuales*

La caracterización de efluentes residuales metalúrgicos, se identifican las propiedades físicas, químicas y en algunos casos orgánicos. Su principal propósito es: Medir el impacto ambiental de los efluentes, Determinar si los efluentes residuales cumplen las normas de vertimientos, Identificar y cuantificar los contaminantes para propósitos de diseñar un sistema de tratamiento, Conocer el impacto sobre la calidad del efluente final, Evaluar la potencial posibilidad de segregación.

Los efluentes industriales, frecuentemente concentran sustancias metálicas tóxicas que no se pueden eliminar mediante tratamientos convencionales, debido a sus concentraciones elevadas o a su naturaleza química en comparación a las aguas residuales domésticas.

Los parámetros físicoquímicos que se analizarán de las muestras son los siguientes:

2.3.6.1 *Potencial de Oxígeno*

De acuerdo a lo establecido por acuerdo internacional (Covington et al., 2009), el nivel de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa se conoce como pH. La concentración de iones de hidrógeno en disoluciones específicas se muestra por el pH. El término se refiere al potencial de hidrógeno o hidrogeniones.

La escala de pH de una disolución acuosa generalmente oscila entre 0 y 14. Las disoluciones con $\text{pH} < 7$ son ácidas (el valor del exponente de concentración es mayor porque hay más iones hidrógeno en la disolución). Por otro lado, el pH de las disoluciones alcalinas es más alto que 7. Cuando el pH de una disolución, como el agua, es igual a 7, se considera neutra.

Figura 2*Rangos de pH en Soluciones Acuosas*

Efectos en el medio ambiente	Valores del PH	Ejemplos
Ácido	pH = 0	Ácido de baterías
	pH = 1	Ácido sulfúrico
	pH = 2	Jugo de limón, vinagre
	pH = 3	Jugo de naranja, bebida gaseosa
	pH = 4	Lluvia ácida (4.2-4.4)
Mueren todos los peces (4.2)	pH = 5	Lago ácido (4.5)
Mueren los huevos de rana, renacuajos, cangrejos de río y efímeras (5.5)	pH = 6	Bananas (5.0-5.3)
Neutro	pH = 7	Lluvia limpia (5.6)
	pH = 8	Lago saludable (6.5)
	pH = 9	Leche (6.5-6.8)
	pH = 10	Agua pura
	pH = 11	Agua de mar, huevos
Básico	pH = 12	Bicarbonato de soda
	pH = 13	Leche de magnesia
	pH = 14	Amoníaco
		Agua jabonosa
		Blanqueador
		Limpiador líquido para desagües

Nota. Tomado de nueva guía microbiológico de aguas y alimentos – III parte

2.3.6.2 Temperatura

Determinar la temperatura para iniciar procesos de tratamiento y análisis de laboratorio, dependiendo de la ubicación geográfica y la época del año, las temperaturas del efluente pueden situarse por encima o por debajo de las del afluente, la temperatura también está relacionado al grado de saturación del oxígeno disuelto, a la actividad biológica y al valor de la saturación con el carbonato de calcio entre otros (Romero, 2010). Se expresa generalmente en grados centígrados (°C).

2.3.6.3 Conductividad

La conductividad de una solución acuosa, también conocida como conductividad específica (Kolb et al., 2000), mide la capacidad de conducción de la electricidad y se incrementa cuando la solución presenta electrolitos (sales que se disocian al disolverse). La conductividad generalmente se expresa en siemens por centímetro, lo que equivale a 1×10^6 microsiemens (μS). La conductividad del agua permite evaluar el desempeño de los equipos de desmineralización utilizando técnicas como la ósmosis inversa, resinas de intercambio iónico, destilación y electrodeionización. La conductancia de la solución es proporcional a su concentración cuando la mayoría de los sólidos disueltos del agua son electrolitos (es decir, disociados). Existen sales inorgánicas que no se disocian al disolverse en agua.

En el mercado se pueden encontrar medidores de sólidos disueltos totales que miden la conductividad del agua y reportan los resultados en términos de sólidos disueltos totales (en mg/l). Esto se basa en la relación entre el cloruro de sodio y la conductividad: una conductividad de 0.6 mg/l de NaCl equivale a 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El agua de alta calidad ionizada tiene una conductividad de aproximadamente 5.5 $\mu\text{S}/\text{m}$. El agua de mar tiene una conductividad cercana a 5 S/m (5,000,000 $\mu\text{S}/\text{m}$), mientras que el agua potable normal varía entre 3,000 y 15,000 $\mu\text{S}/\text{m}$. (¿Qué es la conductividad en el agua?, s. f.).

2.3.6.4 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los SST son pequeñas partículas sólidas suspendidas en el agua, de acuerdo a su cantidad se puede determinar la calidad del agua (qué tan turbia está su estado) APHA et al.,(2012), se emplean como indicador para aplicación en aguas residuales y como parte del sistema de carga de efluentes comerciales. De acuerdo al D.S. N.º 010-019, Vivienda, los SST de acuerdo al reglamento de valores máximos admisibles en las descargas de los efluentes en alcantarillados no debe ser mayor de 500 mg/l; los sólidos sedimentables y los SST no deben confundirse; estos últimos son responsables del bloqueo de las tuberías de desagüe. Sin embargo, la medición de los sólidos disueltos totales se refiere a los sólidos que se forman después de que el agua se ha evaporado.

2.3.6.5 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La cantidad de oxígeno para la oxidación de la materia orgánica mediante procesos químicos y convertirla en CO_2 y H_2O se conoce como DQO. La contaminación del agua aumenta con la DQO. La prueba de la demanda bioquímica de oxígeno toma solamente tres horas, y pueden obtener los resultados en menor tiempo necesario requerido para una prueba de DQO. El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2019), indicó que la DQO en aguas industriales se sitúan entre 50 y 2.000 mgO_2/l , pudiendo llegar a 5.000 de acuerdo al tipo de industria. D.S. N.º 010-019; la DQO de acuerdo al reglamento de valores máximos admisibles en las descargas de los efluentes en alcantarillados no debe ser mayor de 1000 mg/l.

2.3.6.6 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es la cantidad de oxígeno que los microorganismos, como bacterias (aeróbicas o anaeróbicas), hongos y plancton, utilizan para descomponer las sustancias orgánicas presentes en una muestra. Se emplea para medir el nivel de contaminación. Dado que es un proceso biológico, la DBO es sensible y requiere tiempo para realizarse. La descomposición depende de la temperatura y se realiza durante cinco días a 20 °C, conocido como DBO5. Según el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2019), en el D.S. N° 010-019, la DBO no debe exceder los 500 mg/l en descargas de efluentes a alcantarillados. En el caso de esta investigación, dado que se trata de efluentes metalúrgicos que involucran minerales metálicos y reactivos para mejorar las reacciones químicas, no se encuentra presencia de microorganismos o bacterias.

2.3.6.7 Sulfatos (SO₄)

A excepción de algunos, como el sulfato de calcio, estas sales comparten la presencia del ion sulfato y se encuentran en muchas rocas comunes en la naturaleza. Los sulfatos se disuelven fácilmente en disolventes polares como el agua. La extracción de pirita en minas aumenta la concentración del ion sulfato en el agua, ya que el mineral se oxida durante su extracción en los drenajes perforados. Los sulfatos pueden corroer metales y afectar el sabor del agua cuando se encuentran en concentraciones superiores a 200 mg/L, aunque su impacto es menor en comparación con el cloruro y el carbonato (Bolaños et al., 2017).

2.3.7 Principios Ambientales Derecho Internacional

Según Vera (2022), en los últimos veinte años, los instrumentos internacionales han integrado y reiterado seis principios ambientales. Estos incluyen el desarrollo sostenible, la soberanía sobre los recursos naturales, los principios de prevención y precaución, la buena vecindad y cooperación internacional, las responsabilidades compartidas pero diferenciadas, y el desarrollo sostenible..

Se debe dar prioridad al reúso de aguas residuales industriales en la actividad minera en relación con buenas prácticas empresariales y mecanismos de producción más limpia. Los principios de desarrollo sostenible o sustentable, así como el principio de prevención, se encuentran también regulados en la Ley N. 28611, Ley General del

Ambiente. En cuanto a la calidad ambiental, la gestión ambiental tiene como objetivos, según el numeral 113.2 del artículo 113°, conservar, mejorar y restaurar, según corresponda, la calidad del aire, el agua, el suelo y otros elementos ambientales, identificando y controlando los factores de riesgo que los afectan.

2.3.8 Proceso de flotación diferencial en plantas metalúrgicas

La flotación diferencial flota una o más especies de sulfuros polimetálicos (Cu, Pb, Zn) dejando en relaves especies de otro tipo que generalmente no son económicas, estas son deprimidas por reactivos específicos, el flujograma del proceso se muestra en la Fig. 3. Dado que en el proceso de flotación se originan las aguas residuales metalúrgicas materia de la presente investigación, describiremos de modo sucinto el proceso para mejor entendimiento.

2.3.8.1 Proceso de Chancado

La fuerza de compresión que se crea entre dos superficies duras a través de las chancadoras provoca la fragmentación. Durante la primera etapa, el chancador primario reduce los fragmentos a ocho pulgadas de diámetro; durante la segunda etapa, se reduce a tres pulgadas; y la tercera etapa se reduce a media pulgada (Rumbo Minero, s. f.).

2.3.8.2 Proceso de Molienda

A diferencia del chancado, la molienda ocurre cuando el material está en una pulpa con agua y los chancadores primarios, secundarios y terciarios dejan partículas relativamente gruesas. Esto debe reducirse al tamaño óptimo para la concentración, lo que implica factores técnicos y económicos, evitando entre muchos aspectos la remolienda del material que ya tiene el tamaño apropiado. Los molinos de la planta concentradora son de tipo barras y de bolas, a fin de mejorar el performance del proceso de molienda; la carga está compuesta por bolas de acero de diversas dimensiones, desde tamaños grandes reemplazables, a tamaños descargados con el producto, las bolas de acero de gran diámetro son necesarias para productos gruesos, mientras que las bolas de acero más pequeñas son necesarias para productos finos o alimenticios.

La operación de molienda resulta más eficiente y económica cuando se utiliza un medio de molienda más pequeño, ya que este ofrece una mayor superficie de contacto para la molienda. Por lo tanto, el tamaño máximo de la bola debe ser únicamente lo suficiente para romper la partícula más grande de la alimentación. Al seleccionar bolas más pequeñas, se debe considerar que se desgastan más rápidamente.

2.3.8.3 Proceso de Flotación

La planta utiliza la flotación diferencial por espumas, un método fisicoquímico que permite concentrar minerales finamente molidos de sulfuros polimetálicos de cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn). Este proceso implica el tratamiento adecuado de una mezcla de sólidos y líquidos, conocida como pulpa, para generar condiciones que faciliten la adhesión de partículas minerales a las burbujas de aire. Los minerales seleccionados son llevados a la superficie de la pulpa por las burbujas de aire, formando una espuma estabilizada que se recoge. Los minerales no deseados permanecen en la pulpa (Mular et al., 2002). El objetivo principal de esta etapa es separar adecuadamente una cabeza (pulpa de molienda) en las celdas de flotación para obtener un concentrado y un relave. Las celdas reciben pulpa de la sección de molienda secundaria y tercera clasificación. En esta etapa, dado que los tres componentes principales (mineral, reactivos y aire) ya han sido preparados previamente, entrarán en contacto íntimo (King, 1982).

El tubo lateral suministra el material a estas celdas y descarga el relave a través de otro tubo en un nivel inferior. Mientras tanto, el concentrado se extrae de la parte superior de las celdas mediante lavado con agua. Tras la molienda, se recibe un alimento compuesto por finos o overflow del hidrociclón D10B, con una granulometría menor a malla 200 (74 μm) y una densidad de pulpa de 1250 g/l. Esta densidad de pulpa es alta en comparación con la baja densidad de pulpa. Las celdas Rougher, que reciben el mineral de cabeza, se instalarán en la sección de flotación.

2.3.9 Reactivos empleados en la flotación diferencial

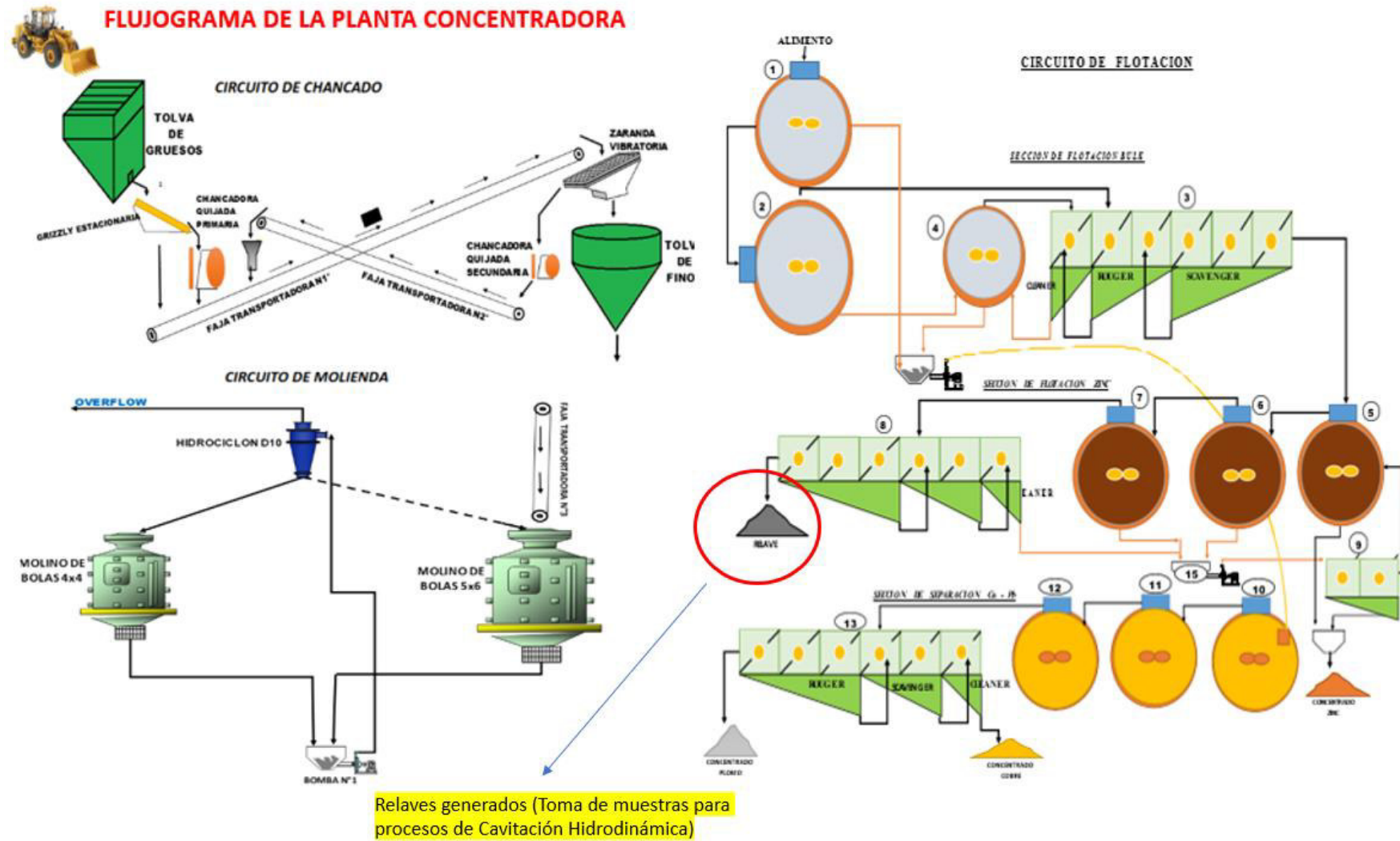
Los insumos que se detallan a continuación, se tomaron de: Clasificación de los reactivos de flotación y Concentración de minerales de la consultora, científica independiente, PhD. Natalia Petrovskaya, (2020).

a. Colectores

Un compuesto orgánico heteropolar, que se absorbe selectivamente en las partículas, las hace hidrófilas (o aerófilas). Los xantatos y los aerofloats son colectores de uso común. Sin estos colectores, los sulfuros no podrían unirse a las burbujas y, en consecuencia, subirían a la superficie, llevando a que los sulfuros valiosos se desperdicien en las colas junto con materiales no deseados como la pirita y las rocas, o sulfuros que deberían flotar en los circuitos debido a una cantidad excesiva de colector (Reactivos y colectores de flotación, s. f.).

Figura 3

Proceso de flotación para producción de concentrados de Pb, Cu, Zn



b. Activadores

Sustancia inorgánica que altera la superficie de las partículas, facilitando la absorción de sulfato de cobre del colector. Esto reactiva la esfalerita en una solución saturada y también se aplica a la antimonita, así como al sulfato de sodio, que se utiliza para activar materiales con superficies oxidadas.

c. Depresores

En general, se trata de un compuesto inorgánico que modifica la superficie de las partículas, haciéndolas hidrófilas o evitando que el colector las absorba. El sulfato de zinc es el principal depresor para la esfalerita y/o la marmatita. Los sulfuros de hierro y zinc se deprimen con bisulfito o sulfito de sodio. El cianuro de sodio actúa como depresor para diversos tipos de sulfuros, en especial la esfalerita, pirita, sulfuros de cobre y arsénico, y en mayores concentraciones deprime los sulfuros de plata. También tiene efectos disolventes sobre el oro libre y metálico. El depresor para la galena en la separación de plomo/cobre es el bicromato de sodio o potasio.

d. Regulador de pH

Cada sulfuro tiene un pH específico que optimiza su flotación, y esta característica varía según el mineral y su origen. Los reguladores de pH se encargan de ajustar el pH de cada pulpa para lograr una flotación óptima. La cal, al deprimir las gangas y precipitar las sales disueltas en el agua, es un reactivo efectivo para el control del pH. Puede añadirse cal en la entrada del molino de bolas. La cal, el carbonato de sodio y la soda cáustica son los reguladores de alcalinidad más frecuentes. Por otro lado, el ácido sulfúrico, que mantiene un pH ácido, es el modificador de acidez más común para minerales como la pirita flotante o la arsenopirita.

e. Espumantes

Los espumantes son reactivos tensioactivos que alteran la tensión superficial del agua y generan espuma estable. Entre los espumantes más utilizados se encuentran el ácido cresílico, el aceite de pino, alcoholes sintéticos como el Dowfroth 250 y el Metil Iso Butil Carbinol (MIBC), entre otros. La flotación de minerales sulfurosos generalmente requiere el uso de al menos dos espumantes y varios colectores. Los espumantes se eligen para darle a la espuma las propiedades físicas adecuadas, mientras que el segundo espumante trabaja junto con los colectores para ajustar la

dinámica de la flotación. El aceite de pino, por ejemplo, tiene propiedades colectoras y produce una espuma dura y duradera que impide la flotación de la ganga. El Dowfroth 200 y el Dowfroth 250, que son líquidos de baja viscosidad totalmente solubles en agua, son apropiados para cualquier tipo de flotación. Aunque el ácido clorhídrico es bastante común, no es muy selectivo.

f. Modificadores Sulfizantes y Dispersantes

Preparan la pulpa para la flotación y crean las condiciones adecuadas para que las sustancias floten de la manera deseada. Entre ellos se encuentran: El sulfuro de sodio, que recubre la superficie de minerales o metales oxidado con una capa de sulfuro, mejorando así la efectividad de la acción colectora. El silicato de sodio, que se usa frecuentemente como dispersante para materiales de arcilla ácida y sus carbonatos con lamas básicas. Los carbonatos y silicatos neutralizan las cargas de las partículas de lama. Además, la dispersión de estos reactivos previene el arrastre mecánico de lamas floculantes en la espuma y la formación de capas de lama que interfieren con los minerales recuperados..

2.3.10 Relaves de Flotación

Los relaves son un subproducto común del proceso de recuperación de los metales y los minerales, son desechos que resultan del procesamiento metalúrgico y consisten en lodos líquidos compuestos de agua y partículas finas de metales y minerales, transportados a los depósitos de relaves en forma de pulpa. Generalmente no tienen interés económico o valor comercial. Estos residuos se producen después que el mineral polimetálico se procesa en una planta de flotación. Después de varios procesos, se obtienen concentrados, con unas 30 veces más concentrados de especies metálicos que del mineral procesado (Carhuamaca, 2018). Sin embargo, en el relave, estas cantidades no son significativos.

El Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera, adoptado por el programa medioambiental de la ONU en 2020, tiene como objetivo final eliminar los daños a las personas y al medio ambiente, incluyendo la prevención de muertes humanas. Las empresas deben continuar siendo responsables y priorizar la seguridad de sus instalaciones de relaves durante todas las etapas del ciclo de vida del proyecto, incluso después del cierre. Además, el estándar exige la divulgación de

información relevante para respaldar la responsabilidad pública. Sus principios fundamentales son:

Asegurar una participación significativa de las partes interesadas a lo largo de la vida útil de la instalación de relaves mineros.

Aumentar la atención a la protección ambiental, como la restauración y la gestión de los efectos del cambio climático en las instalaciones de relaves, con una mayor consideración por los derechos humanos.

Aplicar un método estructurado y riguroso para clasificar los riesgos de las instalaciones en operación y las que están en construcción.

Establecer un sistema de gestión para las instalaciones de relaves y asignar una responsabilidad de alto nivel para cumplir con el Estándar, en comunicación directa con la Junta.

Garantizar la transparencia y la divulgación pública de la información sobre las instalaciones de relaves mineros a los interesados.

Finalmente, los protocolos de implementación, que proporcionan instrucciones detalladas para la certificación o garantía, y para la equivalencia con otros estándares, respaldan el Estándar, que abarca seis áreas temáticas, quince principios y setenta y siete requisitos auditables (*global-industry-standard_ES.pdf*, s.f.). Para la presente investigación, los efluentes vertidos a los depósitos de relaves durante el mes de Noviembre del año 2022, luego de haber sido procesados por métodos de flotación diferencial arrojaron leyes promedio en los relaves de 0.308 Oz Ag, 0.1% Pb y 0.09% de Zn, con relación de pulpa de 35% sólidos y 65% de agua, esta caracterización siempre va asociado a sulfatos y metales, cuyos tenores se obtendrán con exactitud en los laboratorios certificados de SGS; antes y después de su sometimiento a los procesos de Cavitación Hidrodinámica que se detallaran más adelante.

2.3.11 Fuentes contaminantes sector minero

De acuerdo a inventarios y diagnóstico del MEM los principales contaminantes están relacionados a las siguientes fuentes:

- a) **El desmonte de mina**, se genera cuando se forman escombreras como resultado de las actividades de preparación, desarrollo y exploración. Estas escombreras están compuestas por minerales de baja ley o roca y se utilizan para rellenar cavidades dejadas por la explotación o para depositar taludes alrededor de las

bocaminas.

- b) **Los relaves**, que son generados por las plantas concentradoras, se dividen en gruesos y finos y se destinan a canchas o depósitos preparados para este fin.
- c) **El drenaje de minas**, es un problema importante, con el agua ácida siendo el principal contaminante. Esta agua proviene de las bocaminas y se produce cuando la lluvia se infiltra en el interior a través de chimeneas y tajos abiertos conectados a la superficie, así como a lo largo de fracturas rellenas con soluciones mineralizantes. Este proceso resulta en aguas ácidas con un pH que varía entre 2,5 y 3,0 y una conductividad superior a 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los efluentes mineros se descargan a cuerpos de agua o afluentes.
- d) **Los efluentes líquidos de las plantas concentradoras**, incluyen reboses de espesadores y lodos concentrados con metales como cromo, plomo y zinc. Estos efluentes contienen sólidos en suspensión y contaminantes extraídos del agua de los concentrados.
- e) **Los efluentes de las canchas de relave**, se envían a depósitos en forma de pulpa. Las partículas se dispersan y el agua limpia se descarga en ríos, lo que resulta en efluentes que contienen metales pesados en suspensión y que a menudo superan los límites permitidos.
- f) **Los residuos domésticos**, son los desechos generados por las diversas unidades mineras, relacionados con la cantidad de personas que residen en ellas, con una producción estimada de aproximadamente 0,4 kg/día por habitante.
- g) **Las aguas servidas del campamento**, utilizadas en baños, cocinas y duchas, a menudo se descargan sin tratamiento y sin pozos sépticos en muchas unidades mineras. Los estándares de producción de estas aguas varían entre 123 L/día por habitante y 190 L/día por habitante en diferentes campamentos mineros.

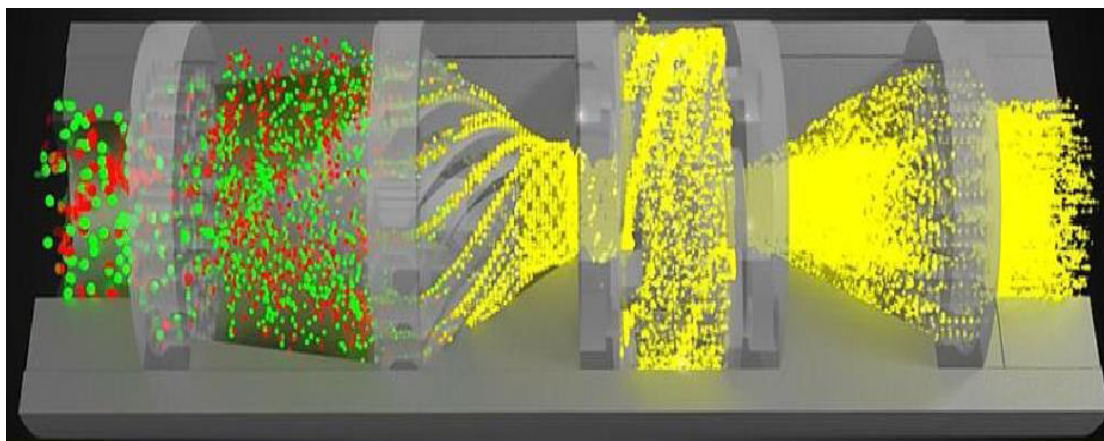
2.3.12 Fundamentos de la cavitación hidrodinámica

La formación, desarrollo, crecimiento e implosión de cavidades, o burbujas, en

un medio líquido se conoce como cavitación hidrodinámica (Figura 4). Esto es el resultado de un cambio repentino en la geometría y/o área de sección transversal del conducto de transporte, que provoca una variación de presión en un fluido a medida que incrementa su velocidad (Figura 5). (Gutiérrez et al., 2019a).

Figura 4

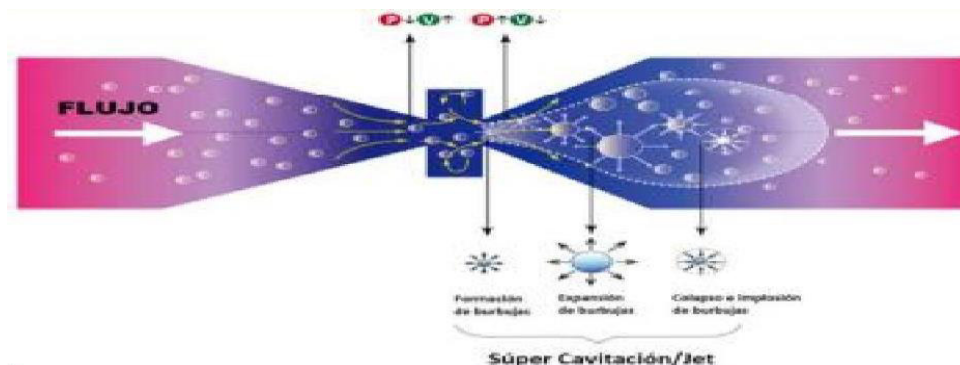
Principio de Cavitación Hidrodinámica



Nota. Reproducida de figura nano cavitador hidrodinámico, De: Técnicos, Sistemas y Procesos, 2015

Figura 5

Principio de la Cavitación Generalizado en un Tubo Venturi



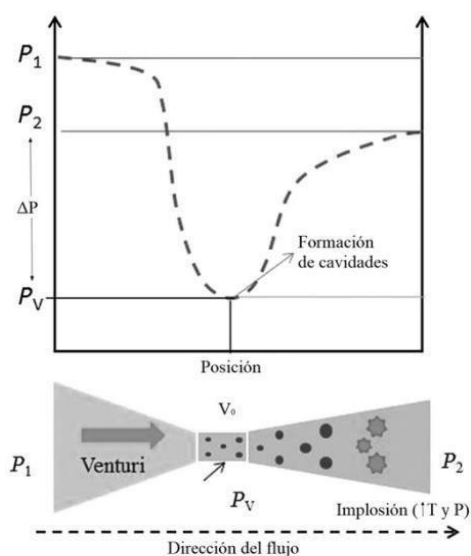
Nota. Proceso de formación, expansión de burbujas y colapso e implosión. Reproducida de figura cavitación hidrodinámica, De: UNAM Dirección General de Bibliotecas, 2012.

La energía cinética del líquido aumenta debido a la presión durante el proceso de constricción. Un estrangulamiento efectivo reduce la presión del sistema al alcanzar la presión de vapor, lo que lleva a la evaporación del medio continuo en el líquido y a la migración de algunos gases disueltos hacia la nueva fase gaseosa. Las cavidades formadas después crecen a lo largo del dispositivo o garganta hasta alcanzar su tamaño

máximo. A medida que el perímetro se expande, la velocidad disminuye y la presión se recupera en la sección aguas abajo, lo que provoca un colapso extremadamente violento de las cavidades (Raso et al., 2013). En la Fig. 6 se muestra el comportamiento típico de la presión en la cavitación hidrodinámica.

Figura 6

Variación de la Presión como Función de la Geometría y Posición en un Dispositivo por CH



Nota. Tomado de cavitación hidrodinámica: un Enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria, De: Universidad Tecnológica de Pereira, 2019

Donde: P_1 : presión inicial o, de entrada, P_2 : presión de descarga o recuperación, P_v : presión de vapor del líquido a la temperatura del sistema, ΔP : caída de presión, V_0 : velocidad media del fluido en la garganta (Carpenter et al., 2017a).

Tabla 7*Zonas De Reacción Involucradas En El Proceso De Cavitación Hidrodinámica*

Zona de reacción	Descripción
a) Elevación de T° entre 5000 y 10000 K. Pirolisis de las moléculas que se encuentran al interior de las burbujas	
1. Centro de la cavidad (punto caliente)	
2. Interfaz gas - líquido	
3. Región del Líquido	
b) Pico de presión de hasta 1000 atm	
c) Disociación del agua, como medio continuo, en radicales OH y H altamente reactivos	
a) T° cercana a 2000 K restablecimiento de la presión	
b) Aparición de turbulencia, remolinos y micro chorros, por oscilación de las cavidades y su subsecuente colapso	
c) Reducción de la tensión interfacial entre fases inmiscibles	
d) Mejora del transporte de masa y calor a través de la frontera, gracias a la convección generada por la turbulencia local	
e) Transferencia de los radicales producidos en el centro de la cavidad (interfaz gas - líquido).	
f) Descomposición térmica de moléculas cercanas a la interfaz	
g) Reacción química de los radicales libres con moléculas vecinas	
h) Ocurrencia de reacciones de recombinación entre radicales.	
a) T° y presión cercana a la atmosférica (300 K y 1 atm).	
b) Difusión molecular de los radicales hacia el líquido, únicamente llegan hasta esta zona los que no hayan reaccionado	
c) Reacción adicional de los radicales, con algunas moléculas no volátiles en el seno del líquido	

Nota. Tabla adaptada de Tecnología para el procesamiento con cavitación hidrodinámica, por: Martynenko et al., 2015a; Carpenter et al., 2017b.

Mientras que el proceso de oxidación avanzada (POA) genera radicales hidroxilos ($^{\circ}\text{OH}$) con un potencial de oxidación de 2.8 V, en mayor volumen que otros oxidantes tradicionales como el ozono (2.07 V), el peróxido de hidrógeno (1.78 V), el dióxido de cloro (1.57 V) y el cloro (1.36 V). Estos radicales son capaces de oxidar compuestos orgánicos principalmente mediante la abstracción de hidrógeno o la adición de agentes electrofílicos a enlaces dobles. Los radicales orgánicos libres (R°) se forman y reaccionan con moléculas de oxígeno para crear peroxirradicales, lo que desencadena una serie de reacciones de degradación oxidativa capaces de mineralizar completamente los contaminantes (Procesos de oxidación avanzada, 2021).

Según Gogate y Pandit (2005), la cavitación hidrodinámica ocurre cuando un líquido pasa a través de una constricción, como una válvula de estrangulación, un

venturi o una placa de orificio. Al atravesar la constricción, la energía cinética y la velocidad del líquido aumentan a expensas de la presión. Si la estrangulación es suficiente para reducir la presión alrededor del punto de la vena contracta por debajo del umbral necesario para la cavitación (la presión de vapor del medio a la temperatura de operación), se generan millones de cavidades.

Luego, las cavidades se colapsan a medida que el chorro de líquido se expande y la presión se recupera. La separación de la capa límite ocurre cuando el líquido pasa por la constricción, y la caída de presión constante representa una significativa pérdida de energía. Esto da lugar a una turbulencia de fluido extremadamente intensa aguas abajo de la constricción. La intensidad de la turbulencia está relacionada con la magnitud de la caída de presión, que depende de la geometría de la constricción y de las condiciones del flujo del líquido, es decir, de la escala de la turbulencia. Los procesos de cavitación hidrodinámica no requieren catalizadores, ya que el vapor de agua genera los radicales necesarios, lo que hace que esta tecnología sea relativamente simple y con menores costos operativos (Benito & Arrojo, 2006).

Además, Rajoriya et al. (2015) indican que la cavitación hidrodinámica se produce cuando el líquido se desplaza a través de un tubo Venturi. En este proceso, el fluido incrementa su velocidad cinética al fluir entre las geometrías del tubo.

La presión en la vena contracta es menor o igual a la presión de vapor del fluido, lo que causa la vaporización del fluido y la formación de cavidades de vapor que luego colapsan. Este colapso genera puntos calientes, donde la descomposición térmica de las moléculas y el aumento en las tasas de transferencia de masa liberan radicales altamente reactivos. El principio de Bernoulli, descrito en la Ecuación 1, también ayuda a explicar este fenómeno. Este principio sostiene que la energía de una sustancia se conserva en condiciones ideales de fluido, y se define como la suma de la constante de Bernoulli, la presión y la energía potencial gravitatoria.

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + P + \rho gh = \text{cte}$$

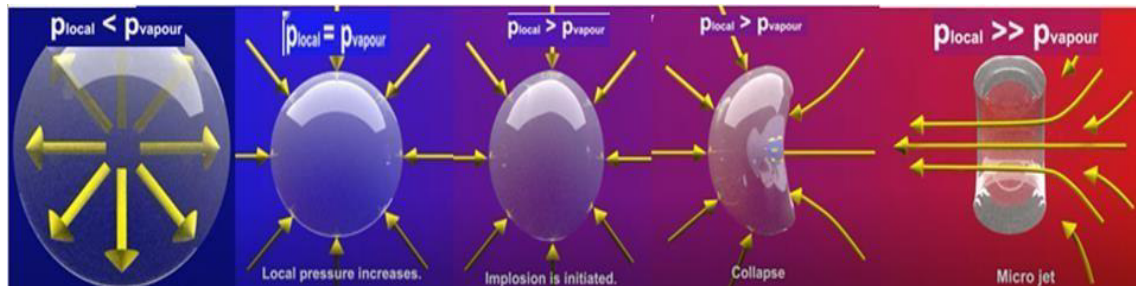
Zabala (2014) sugiere que cuando un Venturi es horizontal, un fluido incrementa su velocidad, la presión debe disminuir para mantener la constante, lo que

resulta en que la presión disminuye y el fluido se vaporiza localmente. Se puede utilizar un tubo Venturi para esto.

Dong et al. (2019) estudiaron cómo los componentes hidráulicos relacionados con la cavitación hidrodinámica en un tubo Venturi afectan la degradación de contaminantes hidrofóbicos refractarios y determinaron la longitud ideal de la garganta para lograr la mayor degradación. Sus resultados mostraron que al aumentar la velocidad de flujo en la garganta, se incrementaba la degradación de los contaminantes hidrofóbicos y la tasa de degradación de los contaminantes hidrofílicos, especialmente cuando se utilizaban placas triangulares múltiples. Por otro lado, Burzio et al. (2020) identificaron parámetros no dimensionales que regulaban la desinfección en reactores de cavitación hidrodinámica convencional, como las placas de orificio. Evaluaron los principales resultados y brechas en este contexto, y encontraron que la desinfección con placas de orificio era más efectiva cuando se reducía la cantidad de cavitación. En resumen, la cavitación hidrodinámica es una técnica prometedora que puede ser adaptada y combinada con otras tecnologías.

En el pre-tratamiento de agua potable, varios investigadores emplearon cavitación hidrodinámica y descarga de plasma frío para eliminar la biomasa cianobacteriana y bacteriana. Los parámetros se ajustaron utilizando circuitos de prueba cerrados. Los principales resultados mostraron que las cianobacterias no mostraron signos de revitalización y que una mayor presión de descarga, junto con niveles de desinfección del 99,5%, resultó en una mayor eficiencia (Lafuente & López, 2018a; Marsálek et al., 2020).

La Figura 7 muestra el proceso de cavitación hidrodinámica (CH), que implica la creación, expansión, colapso e implosión de burbujas que ocurren en milisegundos o microsegundos y liberan una gran cantidad de energía en un corto período de tiempo. El punto caliente y los chorros de líquido a presión como resultado mecánico de la implosión producen altas temperaturas y presiones (Gutiérrez et al, 2019), destruyen directamente algunos contaminantes (Dindar, 2016). En la figura se puede apreciar a partir de la formación de burbujas al disminuir la presión, la ruptura de la burbuja en el punto más débil, la entrada de agua en el espacio ocupado por el vapor y el posterior microchorro que rompe los restos de la burbuja.

Figura 7*Proceso de Cavitación Hidrodinámica*

Nota. Gráfico del proceso de cavitación. De: Graphic Adapted Cavitation - Easily explained, IET Institute for Energy Technology, por: Schmid y Friedl, 2016

2.3.13 Tipos de cavitación

Entre los tipos de cavitación, se pueden mencionar las siguientes:

- 1.- Cavitación hidrodinámica: se produce por variaciones de la presión de un fluido debido a la geometría del sistema.
- 2.- Cavitación acústica / ultrasónica: por la propagación de longitudes de onda que producen variaciones de la presión de un fluido.
- 3.- Cavitación óptica: se produce por fotones de luz de alta intensidad que atraviesa un fluido.
- 4.- Cavitación de partícula: se produce por una partícula elemental de alta energía, que, al ser lanzada a través de un líquido, deja un rastro de ionización tras su paso.

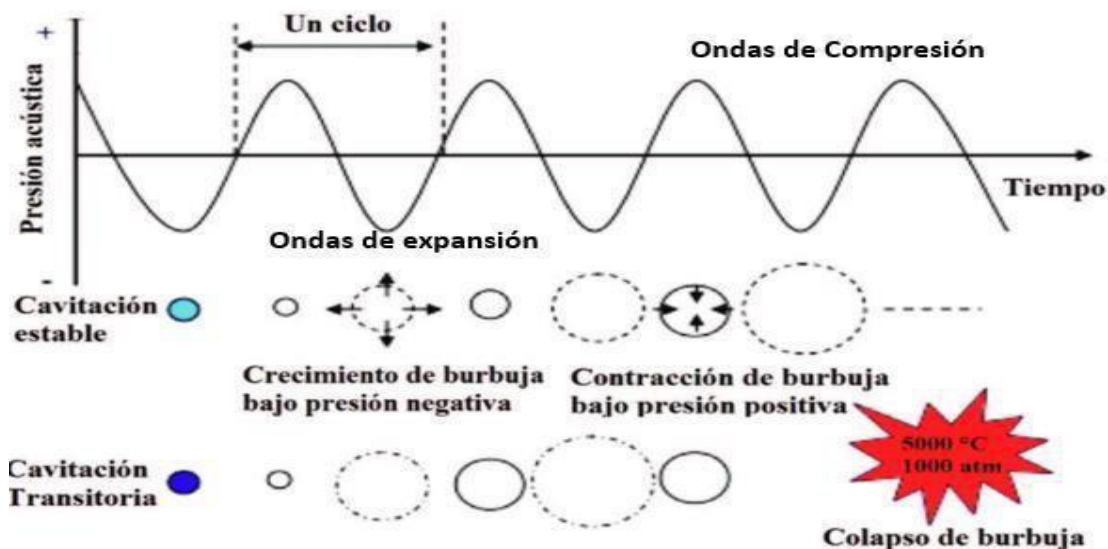
De estos 4 tipos de cavitación, Solo la cavitación acústica (ultrasonidos) y la cavitación hidrodinámica pueden causar cambios químicos y físicos en los procesos, por lo que se detallará brevemente los conceptos y principios de la cavitación acústica.

De acuerdo con los conceptos de Cavitación ultrasónica en líquidos (s.f.), cuando se aplican ondas sonoras de alta intensidad a un líquido, estas ondas generan ciclos alternantes de alta presión (compresión) y baja presión (expansión), y la frecuencia de estos ciclos dependerá de la intensidad de las ondas. Un ciclo de alta presión puede causar el colapso violento de burbujas que se han expandido hasta el punto en que no pueden absorber más energía. Este fenómeno se conoce como cavitación. Durante la implosión, se alcanzan temperaturas muy altas (alrededor de

5000 K) y presiones extremas (alrededor de 2000 atm) en un punto específico (Figura 7). Además, la implosión de burbujas de cavitación puede generar corrientes de líquidos que alcanzan velocidades de hasta 280 m/s.

Figura 8

Desarrollo e Implosión de una Burbuja Formada por la Propagación de una Onda Acústica en un Medio Líquido



Nota. Adaptada de grafico Sonido, Ultrasonido y Cavitación. De: Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México. Por Calderón et al, s.f.

De acuerdo a Calderón et al. (2019) en sus Investigaciones en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada de Sonido, Ultrasonido y Cavitación, en la propagación de una onda acústica en un medio líquido, la presión total está dada por:

$$P = P_h \pm P_a,$$

donde P_a es la presión acústica y P_h es la presión hidrostática. Los ciclos de compresión y expansión ocurren en el área donde se propaga la onda porque una onda acústica se compone de variaciones de presión constantes. La distancia promedio entre las moléculas disminuye durante un ciclo de compresión, lo que da como resultado la presión

$$P = P_h + P_a.$$

Durante el ciclo de expansión la distancia promedio entre las moléculas se incrementa y la presión es:

$$P = P_h - P_a.$$

El líquido se romperá, creando vacíos o cavidades, o burbujas de cavitación, si la distancia promedio entre las moléculas excede la distancia molecular crucial necesaria para mantener el líquido inalterado. Las burbujas aumentarán de tamaño mientras continúan los ciclos de compresión y expansión hasta que se implosionarán.

2.3.14 Equipos para Procesamiento de Cavitación Hidrodinámica

La tecnología básica de equipos, para este proceso está relacionada a dispositivos como tubos Venturi, platos perforados, rotores de alta velocidad, homogeneizadoras, entre otros. Los parámetros de operación (presión, temperatura, flujo, ozono, tiempo) pueden variar de un equipo a otro, pero el principio de generar cavidades se mantiene.

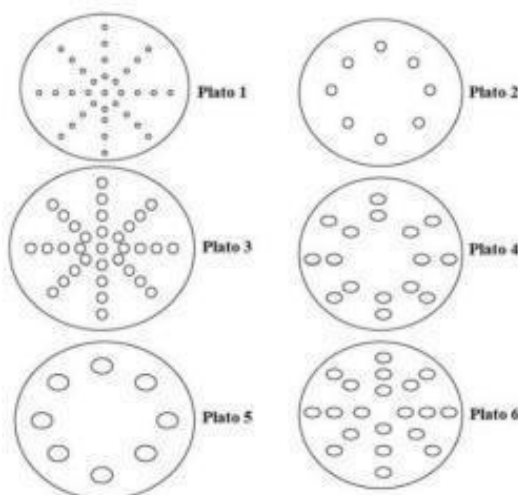
De acuerdo a investigaciones desarrolladas por Gutiérrez et al. (2019a), en un enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria, los equipos basados en plato – orificio y Venturi son eficientes para crear y controlar las condiciones intensas de formación y colapso de burbujas.

2.3.14.1 Dispositivo de platos perforados

El flujo que fluye a través de la línea principal atraviesa una constricción, que puede ser uno o varios orificios alojados en un plato perforado. (Fig. 9).

Figura 9

Platos de Múltiples Orificios, con Diferentes Combinaciones de Número y Diámetro de Perforaciones



Nota. Reproducida de Gogate, 2010.

Gogate y Patil (2015) sostienen que la optimización del diámetro y la cantidad de aberturas en este tipo de dispositivos depende de los parámetros geométricos de operación. La configuración brinda libertad de diseño y control del proceso al permitir la utilización de diversos tamaños y geometrías (circulares, triangulares, rectangulares, etc.) ya sea para el plato o los orificios que lo componen.

La intensidad del colapso de la cavidad depende de la forma, el tamaño y la cantidad de orificios en el plato, así como del área de la garganta (superficie de la abertura). En este caso, ocurre una cavitación simétrica y transitoria que se utiliza principalmente en reacciones y transformaciones químicas.

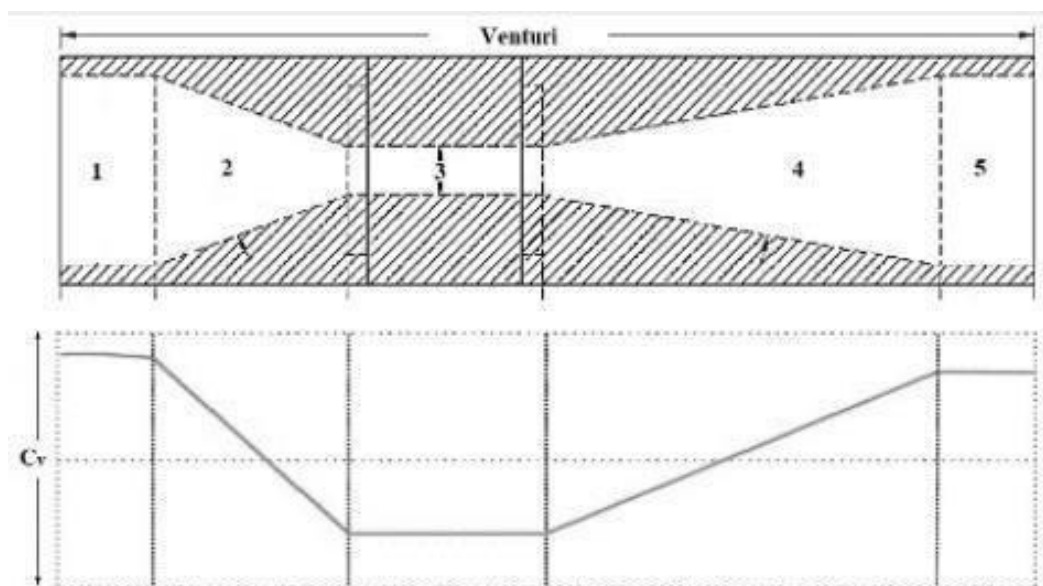
Sharma et al. (2008) afirman que las cavidades solo se desarrollan y forman en los anillos o bordes de la constricción, lo que reduce la cantidad de núcleos de gas. Las configuraciones con múltiples aberturas permiten crear un mayor perímetro mojado dado a un área transversal de flujo definido, lo que abre más espacio para la formación de burbujas.

2.3.14.2 Reactor basado en garganta tipo Venturi

Es un diseño que incluye una sección de convergencia, una constricción o garganta, y una sección de divergencia; estos elementos modifican la dinámica del flujo (Fig. 9). A diferencia de un reactor de plato perforado, en este diseño no se producen contracciones y expansiones inesperadas. La geometría del Venturi puede ser rectangular, circular o elíptica. En estos equipos, las formas y tamaños son factores clave para lograr distintas intensidades de cavitación, ya que influyen en la cantidad de eventos de cavitación, la magnitud de la presión de colapso y el tiempo que la burbuja permanece en la zona de baja presión (Carpenter et al., 2017b).

Figura 10

Representación General de un Dispositivo Venturi.



Nota. 1. Ingreso del fluido. 2. Zona de convergencia. 3. Garganta o constricción. 4. Etapa de expansión y recuperación de presión. 5. Descarga. Cv. Número de cavitación, (Navarrete & Vargas, s. f.)

El área interna de la garganta debe ser adecuada para ofrecer la máxima expansión de las burbujas, permitiendo controlar el nivel de crecimiento de las cavidades. Esto hace que la presión de implosión aumente. El parámetro gamma, que es la razón entre altura o diámetro de la garganta (de acuerdo a su geometría circular, elíptica o rectangular) y su longitud, se usa en la medición del área interna de la zona de constricción.

Por lo tanto, γ tiene un impacto directo en el tiempo de residencia de las cavidades (Bashir et al., 2011).

Abbasi et al. (2020), en sus investigaciones sobre la optimización de las dimensiones de la hendidura Venturi mediante simulación CFD y diseño RSM, concluyen que cuando la longitud del estrechamiento es mayor que el diámetro o la altura, se generan nubes de cavidades que interactúan entre sí. Esto da lugar a la formación de chorros de vapor que se dispersan en el líquido circundante sin llegar a colapsar.

2.3.14.3 Otros tipos de reactores

La cavitación hidrodinámica (CH) se puede generar en equipos rotatorios, siendo los más comunes: 1) el de onda de choque y 2) el de doble rotor. El primero está compuesto por dos cilindros concéntricos, donde uno es fijo y externo, y el otro es interno y gira. El líquido fluye a través del espacio anular y pasa por diversas hendiduras en la superficie del cilindro central. La alta velocidad de rotación y el impacto del fluido al atravesar las hendiduras generan altas temperaturas, lo que resulta en una cavitación intensa (Carpenter et al., 2017b).

El generador de cavitación con doble rotor cuenta con dos rotores que giran en direcciones opuestas y están dispuestos uno frente al otro. Cada impulsor tiene una geometría diferente, lo que produce una caída de presión repetitiva. Se recomienda una frecuencia de rotación de aproximadamente 2800 rpm, lo que permite alcanzar velocidades locales de hasta 26 m/s. La cavitación que ocurre en este equipo, cuando las cavidades se generan debido al movimiento opuesto de las dos capas de cizallamiento, se denomina cavitación de corte. Este mecanismo se utiliza en el tratamiento fisicoquímico del agua, especialmente para eliminar contaminantes no deseados (Petkovšek et al., 2013).

Los equipos rotatorios suelen requerir más energía que los dispositivos de plato-orificio y venturi, y ofrecen menos flexibilidad en la determinación y control de los parámetros de diseño (Gogate & Kabadi, 2009).

2.3.15 Parámetros de operación en cavitación hidrodinámica

El tipo y diseño de la cámara de cavitación, las presiones de operación (de entrada, mínima y de descarga) y la velocidad del fluido y las escalas de tiempo de descenso, mantenimiento y recuperación de la presión son los cuatro parámetros específicos que se debe tener en cuenta.

2.3.15.1 Velocidad de flujo

El fluido, impulsado por una bomba, se acelera en la cámara de cavitación. Según la ley de Bernoulli, cuando la velocidad del flujo aumenta, la presión disminuye (Fig. 11). Luego, la presión externa a la burbuja aumenta debido a la

expansión del área transversal del dispositivo, lo que provoca la implosión de la burbuja y el pulso de presión resultante. Es importante elegir una velocidad que permita alcanzar el valor de C_v óptimo, evitando al mismo tiempo el efecto de supercavitación.

Figura 11

Velocidad del Flujo

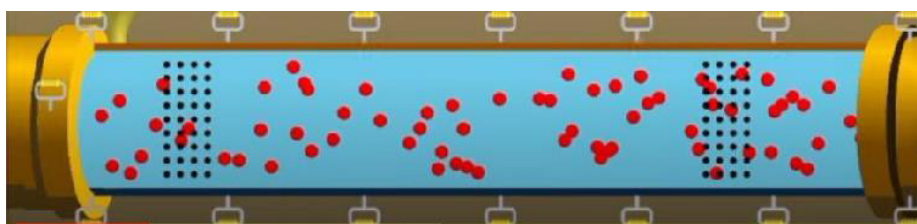


Nota. Adaptado de grafico física – hidrodinámica – relación entre presión, velocidad y área – caudal – razón de flujo – laminar por: PROFE JN El canal del ingeniero, 2021

El Caudal o Razón del flujo del fluido: Es directamente proporcional a la velocidad (a mayor caudal más velocidad).

Figura 12

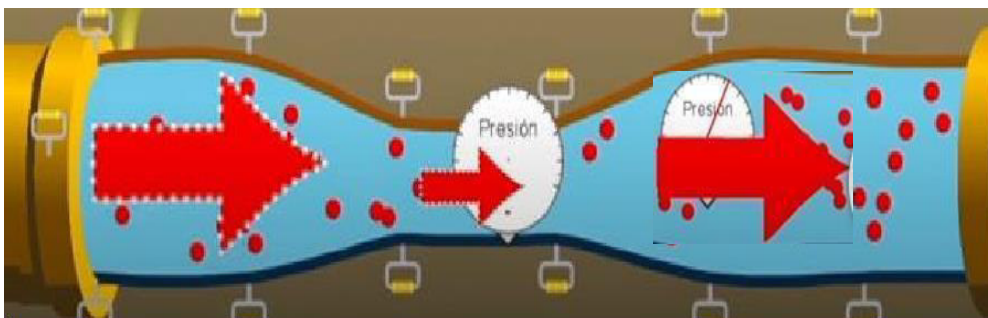
Caudal o Razón del Fluido



Nota. Adaptado de grafico física hidrodinámica relación entre presión, velocidad y área caudal razón de flujo laminar, por: PROFE JN, El canal del ingeniero, 2021

2.3.15.2 Presión

El comportamiento de la presión está en función de su área (fig.12), donde hay menor área, hay mayor velocidad y menor presión, consecuentemente, donde hay mayor área, hay menor velocidad y mayor presión.

Figura 13*Principio de Presión vs Área*

Nota. Adaptado de grafico fisica – hidrodinámica – relación entre presión, velocidad y área – caudal – razón de flujo – laminar, por: PROFE JN El canal del ingeniero, 2021.

La presión de entrada del fluido en el sistema (P_1) es frecuentemente considerada un factor crucial en la cavitación hidrodinámica cuando se habla de la presión de operación. Se ha observado que la presión de entrada influye en el colapso de las cavidades; una mayor magnitud de P_1 provoca colapsos más intensos, generando pulsos de presión más fuertes y aumentando la disociación de las moléculas de agua, lo que intensifica los efectos químicos y oxidativos del proceso (Patil & Gogate, 2012). La principal razón por la que la presión de entrada se utiliza como variable clave en la cavitación hidrodinámica es su facilidad de medición, manipulación y control.

La presión mínima (P_{min}) es crucial en el proceso de cavitación, ya que actúa como la fuerza impulsora para la formación y expansión de las burbujas. La siguiente ecuación puede emplearse para determinar la presión mínima (2):

$$P_{min} = P_1 - \frac{1}{2} \rho (v_{max}^2 - v_1^2) - k_{(2)}$$

Donde:

P_{min} es la presión mínima (Pa), P_1 es la presión de entrada (Pa), ρ simboliza

la densidad del líquido (kg/m³), v_{max} es la máxima velocidad alcanzada por el fluido (m/s), v₁ representa la rapidez de salida (m/s) y k muestra las pérdidas de presión a lo largo de la cámara de cavitación (Pa).

La magnitud de la caída de presión (ΔP) se determina por la presión de recuperación (P₂), que es la principal responsable del colapso de las cavidades. En muchos casos, esta es igual a la presión atmosférica. Sin embargo, después de la cámara de cavitación, se puede modificar colocando dispositivos de estrangulamiento o estancamiento, lo que permite un mayor control sobre el crecimiento excesivo de las burbujas y genera implosiones más violentas en las cavidades. La ecuación 3 se puede utilizar para calcular la presión de colapso (P₂) en un reactor de plato-orificios, según Gogate & Pandit (2005).

$$P_2 = 7527(F)^{-2.55}[(P_1)^{2.46}(R_o)^{-0.90}(d_o)^{2.37}] \quad (3)$$

donde P₁ representa la presión de entrada (atm), F es el porcentaje del área libre ocupada por las perforaciones, P₂ es la presión de colapso (usualmente igual a la de recuperación), d_o es el diámetro de los orificios y R_o indica el tamaño inicial de la cavidad (0.01 mm – 0.1 mm).

La presión mínima puede calcularse a partir de la Ec. 2:

$$P_{min} = P_1 - \frac{1}{2}\rho(v_{max}^2 - v_1^2) - k \quad (2)$$

donde P_{min} es la presión mínima (Pa), P₁ es la presión de entrada (Pa), ρ representa la densidad del líquido (kg/m³), v_{max} es la velocidad máxima alcanzada por el fluido (m/s), v₁ es la velocidad de salida (m/s) y k representa las pérdidas de presión a lo largo de la cámara de cavitación (Pa).

La presión de recuperación (P₂), que es la principal responsable del colapso de las cavidades, define la magnitud de la caída de presión (P). En la mayoría de los casos, es equivalente a la presión atmosférica. Sin embargo, después de la cámara de cavitación, se puede ajustar mediante la colocación de dispositivos de estrangulamiento o estancamiento. Esto provoca implosiones más violentas en las

cavidades y permite un mayor control sobre el crecimiento excesivo de las burbujas. Según Gogate y Pandit (2005), la ecuación 3 se puede utilizar para determinar la presión de colapso (P2) en un reactor de plato-orificios.

$$P_2 = 7527(F)^{-2.55}[(P_1)^{2.46}(R_0)^{-0.80}(d_o)^{2.37}](3)$$

Donde P1 es la presión de entrada (atm), F es el porcentaje de área libre ocupada por las perforaciones, P2 es la presión de colapso (normalmente igual a la de recuperación) y do es el diámetro de los orificios.

2.3.15.3 *Tiempo*

Las burbujas deben expandirse el tiempo suficiente para alcanzar un radio que asegure una implosión de intensidad adecuada. El pequeño núcleo de gas debe superar la tensión superficial del líquido en unos pocos milisegundos (Ozonek, 2012). Para una cavitación eficaz, el radio máximo de la cavidad (Rmax) debe ser al menos el doble del radio inicial o de equilibrio (R0) (Flynn, 1966).

La rápida recuperación de la presión es crucial para el colapso veloz de las cavidades una vez que cada burbuja ha alcanzado su diámetro máximo. Arrojo y Benito (2008) demostraron que, en un reactor de plato y orificios, el tiempo de restablecimiento de la presión se redujo en un 25% y la degradación del p-nitrofenol en agua se duplicó.

Los radicales de óxido de hidrógeno formados tras el colapso de las cavidades son extremadamente inestables y, mientras se desplazan del centro de la burbuja hacia la fase líquida, compiten con diversas reacciones simultáneas, incluida la recombinación con otros radicales de óxido de hidrógeno. Las escalas de tiempo están directamente relacionadas con la mejora de la difusión molecular. Las implosiones rápidas inducen convección a través de las paredes de las burbujas, facilitando la transferencia de masa al líquido circundante (Goel et al., 2004).

2.3.16 *Dinámica de las cavidades*

El proceso dinámico de la cavitación depende de los constantes cambios en la

forma y el volumen de las burbujas a lo largo del tiempo. En general, las condiciones operativas y la geometría de la constricción mecánica influyen en el comportamiento de la cavidad y en el rendimiento del pulso de presión generado durante su colapso (Gogate & Pandit, 2005).

Teóricamente, la cavitación hidrodinámica se describe a menudo utilizando el modelo dinámico de la ecuación de Rayleigh-Plesset. Se considera que mientras la superficie de la burbuja se mueve a través de un líquido viscoso newtoniano, ocurren cambios politrópicos dentro de la cavidad. La ecuación 4 toma en cuenta la viscosidad del líquido y es la siguiente (Ozonek, 2012).

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho} \left(P_{go} + \frac{2\sigma}{R_0} - P_v \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\alpha} + P_v - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\eta}{R} \frac{dR}{dt} - P_{co} - P_a(t) \quad (4)$$

donde R es el radio de burbuja (m), P_{go} representa la presión estática inicial del gas en la cavidad (Pa), σ es la tensión superficial del líquido (N/m), R_0 , el radio inicial de la burbuja (m), P_v : presión de vapor del líquido (Pa), α exponente politrópico, simboliza la viscosidad dinámica (Pa.s), P_{co} es la presión dentro de la cavidad (Pa), P_a es la presión externa de la burbuja (Pa).

Cuando ocurre una disminución de la presión externa, la forma de las burbujas cambia lentamente y el exponente politrópico se aproxima a 1. Esto indica un proceso isotérmico, ya que el sistema se equilibra durante el cambio de fase de líquido a vapor. Además, los cambios en la geometría de la burbuja se intensifican en las áreas donde la presión externa aumenta, especialmente antes de la implosión (Ozonek, 2012). Este fenómeno se aproxima a una transformación adiabática, ya que no hay transferencia de calor entre la burbuja y el entorno a la misma temperatura. Cabe destacar que la presión interna durante la vida útil de la cavidad depende de la suma de sus presiones parciales:

$$P = P_{g(R)} + P_{v(T)} \quad (5)$$

$$P_g = \left(P_{go} + \frac{2\sigma}{R_0} - P_v \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\alpha} \quad (6)$$

Debido a que el proceso es isotérmico en la Ec. 5, la temperatura permanece

constante. La presión estática del gas en la burbuja (P_g) también depende del radio de la esfera Ec. 6.

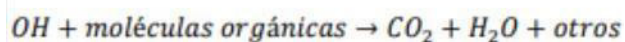
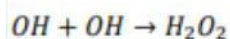
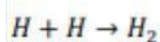
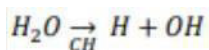
Según Ozonk (2012), las cavidades no están en equilibrio mecánico dinámico debido al incremento de la fuerza de cohesión de una burbuja a medida que su diámetro aumenta. El tamaño de las cavidades creadas por la cavitación está directamente relacionado con su tamaño. Si el radio de la burbuja es menor que un cierto límite, desaparecerá debido al aumento de la tensión superficial. Sin embargo, si la presión del líquido, la temperatura externa o la presión del vapor no cambian, la burbuja se expandirá a un diámetro macroscópico siempre y cuando el tamaño de la cavidad sea mayor que el valor crítico.

2.3.17 Aplicaciones de la cavitación hidrodinámica

Según Gogate & Kabadi (2009), cuando ocurre la circulación de un fluido líquido a través del dispositivo de constricción, se producen puntos calientes, radicales libres muy reactivos y de fuertes turbulencias. Esto se relaciona directamente con los resultados de la cavitación hidrodinámica, de forma individual o conjunta, estos fenómenos mejoran la eficiencia, el rendimiento y el desempeño de los procesos agroindustriales, clasificados como físicos o químicos, según las transformaciones ocurridas en la matriz objetivo.

2.3.17.1 Utilización cavitación hidrodinámica en procesos químicos

La cavitación hidrodinámica puede inducir reacciones químicas que son utilizadas en procesos agroindustriales, como la oxidación, la ruptura de compuestos de alto peso molecular, la hidrólisis de aceites y las reacciones de transesterificación. Estos procesos incluyen: 1) Fraccionamiento de biopolímeros, 2) Hidrólisis de aceites, 3) Producción de biodiésel, 4) Tratamiento previo de biomasa y 5) Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales. En este último, la cavitación hidrodinámica puede ayudar a eliminar diversas sustancias presentes en las aguas residuales, generando radicales libres (hidroxilo) que oxidan los compuestos no deseados. El punto caliente produce altas temperaturas y presiones, y los chorros de líquido generados por la implosión eliminan directamente ciertos contaminantes orgánicos (Dular et al., 2016b).



Los radicales hidroxilos presentan gran potencial de oxidación ya que se forman fragmentando una molécula de agua en condiciones supercríticas de cavitación hidrodinámica (CH).

Las moléculas volátiles e hidrofóbicas se oxidan fácilmente durante el fenómeno hidrodinámico, lo que les permite entrar en las cavidades y soportar altas temperaturas, presiones y concentraciones de radicales OH. La degradación de sustancias hidrofílicas depende de la tasa de difusión de los radicales hacia la interfaz o los alrededores de las burbujas. Sin embargo, la implosión drástica de las cavidades genera efectos mecánicos de turbulencia que aceleran la transferencia de materia y aumentan significativamente el área de intercambio (Carpenter et al., 2017a).

Se han realizado estudios sobre la cavitación hidrodinámica y diversas técnicas avanzadas de oxidación. El efecto sinérgico de estas prácticas, conocidas como procedimientos híbridos, mejora la eficiencia de cada método individual. Algunos procesos asociados con la cavitación hidrodinámica incluyen: aplicación de peróxido de hidrógeno (Saharan et al., 2011), método Fenton – ion Fe^{2+} – (Chakinala et al., 2008), combinación con ozono (Ranade & Bhandari, 2014) y fotocátalisis (Raut-Jadhav et al., 2013).

La cavitación hidrodinámica es una técnica respetuosa con el medio ambiente y sostenible porque permite la degradación de contaminantes orgánicos persistentes en las aguas residuales (POP). Estos compuestos son resistentes y bioacumulativos, lo que los hace tóxicos y difíciles de destruir mediante técnicas convencionales. Algunos ejemplos son pesticidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, tintes y colorantes, clorofenoles y dioxinas, entre otras sustancias orgánicas de alto peso molecular. El uso de la cavitación hidrodinámica es eficaz y eficiente, ya que reduce la necesidad de

grandes cantidades de reactivos químicos y no genera vertimientos secundarios contaminantes (Dindar, 2016).

2.3.17.2 Aplicación cavitación hidrodinámica en procesos físicos

Los efectos físicos, como la formación de ondas de choque, la alta turbulencia interfacial y los chorros líquidos de alta velocidad, han promovido el uso de la cavitación hidrodinámica en diversos procesos. Aunque estos efectos contribuyen a las transformaciones químicas, son especialmente importantes en aplicaciones físicas como la emulsificación, la cristalización, la reducción del tamaño de partículas sólidas en suspensión, la disrupción celular, la esterilización y la desinfección.

a. Síntesis de nano-materiales y nano-emulsiones: La producción de partículas a nanoescala, como fibras, catalizadores, emulsiones y compuestos biológicamente activos, es beneficiosa para las industrias biomédica, farmacéutica, química y alimentaria. A menudo se utiliza para microencapsular materiales bioactivos que son extremadamente sensibles al deterioro por factores ambientales (Carpenter et al., 2017b).

En sistemas sólido-líquido (suspensiones), las ondas de choque y los chorros generados por el colapso asimétrico de las burbujas ayudan a romper y fragmentar el sólido en miles de partículas más pequeñas, con diámetros menores a 100 nm, ya que la fuerza de fricción supera la fuerza de cohesión del sólido. En un sistema líquido-líquido (emulsión), la intensa turbulencia reduce la tensión interfacial, creando nanogotas en la fase dispersa de la emulsión.

Esto aumenta el área de contacto entre ambas fases en equilibrio (Sivakumar et al., 2014; Gutiérrez et al., 2019b). Se ha descubierto que la cavitación hidrodinámica requiere un 96% menos de energía que la cavitación ultrasónica (Pinjari & Pandit, 2010) para reducir el tamaño de partícula de un material celulósico a escala nanométrica (300 nanómetros).

b. Desinfección de aguas: Las colonias de microorganismos y esporas que se agrupan en formaciones esféricas no pueden ser destruidas por los métodos físico-químicos convencionales para el tratamiento de aguas, ya que estos solo afectan a los

microorganismos superficiales, dejando a los demás intactos (Gogate & Kabadi, 2009). Además, la adición de reactivos como ClO_2 , NaClO , H_2O_2 , O_3 , entre otros, genera coproductos indeseables que pueden ser tóxicos o peligrosos. Los procedimientos químicos son costosos y requieren la eliminación de desechos peligrosos para el medio ambiente (Abdala et al., 2014).

En la cavitación hidrodinámica, una técnica alternativa de desinfección, las ondas de presión y las altas temperaturas en los puntos calientes matan directamente a los microorganismos. La implosión asimétrica de las cavidades cercanas a la superficie del microorganismo fractura su pared celular, impidiendo su crecimiento y reproducción. El estrés producido por el colapso de la burbuja debe superar la fuerza necesaria para romper la pared celular. Además, la producción de radicales OH y su recombinación para formar H_2O_2 desinfectan el líquido donde estas moléculas se difunden (Gogate, 2011).

Según Arroyo et al. (2008), los reactores tipo venturi son más efectivos que los platos perforados para inactivar *Escherichia coli* debido a su mayor flujo volumétrico para una misma caída de presión. Indican que la muerte de microorganismos ocurre en condiciones de cavitación suave o intermedia, por lo que no es necesario alcanzar niveles de cavitación muy bajos.

La desinfección microbiana puede realizarse con números de cavitación mayores a 0.6, a diferencia de otros procesos como la emulsificación, la hidrólisis de aceites y la mejora de reacciones de oxidación. Los mejores rendimientos en la inactivación de microorganismos se logran con valores de β mayores a 0.3. Valores amplios de β (0.36) se utilizan específicamente para la eliminación de algas, lo que promueve grandes áreas de flujo y produce eventos de cavitación en líquidos con alta viscosidad (Wu et al., 2012).

c. Disrupción celular: La disrupción celular es crucial en la producción industrial de productos biotecnológicos, ya que permite la liberación de metabolitos intracelulares, como enzimas, proteínas y lípidos. La pared externa del microorganismo se rompe debido a los efectos mecánicos de la cavitación hidrodinámica, facilitando la liberación

y extracción del compuesto deseado (Gogate & Kabadi, 2009).

Una ventaja de este tipo de tratamiento es que los efectos de la cavitación hidrodinámica ocurren localmente y en un tiempo breve, lo que evita el deterioro significativo de los productos extraídos de la pared celular de los microorganismos. Sin embargo, Balasundaram y Harrison (2011) sugieren que es crucial controlar la intensidad de la cavitación durante el proceso, ya que la presión de entrada, el tiempo de tratamiento excesivo y/o la magnitud del pulso de presión pueden afectar la actividad enzimática y las características específicas del producto biotecnológico.

Save et al. (1994) encontraron que, en términos de la operación de disrupción celular, la cavitación hidrodinámica consume menos energía que la técnica ultrasónica y el método tradicional de batido, mezclado y homogeneización.

d. Procesamiento y transformación de alimentos: En la actualidad, la ingeniería alimentaria se centra en desarrollar tecnologías de procesamiento alternativas que optimicen la estabilidad y la vida útil de los productos, mejoren sus características de calidad (sensorial, microbiológica y nutricional), reduzcan el uso de conservantes químicos (promoviendo la cultura orgánica) y mantengan los costos operativos bajos. Para mitigar los efectos negativos de las técnicas térmicas tradicionales, que conllevan la pérdida de nutrientes y características organolépticas, se han propuesto alternativas que no requieren el uso directo de calor en las materias primas. La cavitación hidrodinámica es una de estas alternativas (Martynenko et al., 2015b).

La cavitación hidrodinámica suele ocurrir en condiciones ambientales sin necesidad de calor externo. Las ondas de choque, el estrés físico derivado de la caída de presión y las altas temperaturas locales en los puntos de cavitación eliminan de manera efectiva levaduras, bacterias y esporas presentes en los alimentos.

Carpenter et al. (2017b) indican que, cuando se aplica a la conservación de productos alimenticios líquidos como leches, jugos de fruta y pulpas, la cavitación hidrodinámica posee un gran potencial para su uso a nivel industrial. Los autores sugieren que esta tecnología también puede ser útil en otras áreas importantes, como

la extracción de compuestos bioactivos (antioxidantes), la separación de grasas y proteínas de la leche, la encapsulación de compuestos termolábiles y la modificación física del almidón, entre otras.

La cavitación hidrodinámica, un proceso altamente eficiente y avanzado, tiene el potencial de mejorar o sustituir los métodos tradicionales de agregación de valor que son menos efectivos. Gracias a los efectos físicos y mecánicos generados por el pulso de presión, esta técnica se presenta como un área de interés para diversas disciplinas científicas, tecnológicas e innovadoras.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

Cuando un líquido fluye a velocidades suficientemente altas para crear zonas de baja presión, se forman y colapsan burbujas, esto se conoce como cavitación hidrodinámica o cavitaciones. Este proceso es beneficioso en algunas aplicaciones industriales, como en el tratamiento de relaves en efluentes metalúrgicos, por lo mismo; la investigación aplicada en cavitación hidrodinámica controlada busca entender, predecir y optimizar este fenómeno para aprovechar sus beneficios y minimizar sus efectos negativos, bajo este contexto, la presente investigación se desarrolló siguiendo la siguiente metodología.

3.1. Tipo y diseño de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, al hacer uso del concepto de cavitación hidrodinámica (Nieto, 2018), con diseño experimental, donde se manipularon las condiciones de operación del proceso de CH como tiempo, presión, caudal y temperatura, para obtener respuesta en las variables de concentración de metales pesados presentes en las aguas residuales del proceso metalúrgico; por la naturaleza de los datos tuvo un enfoque cuantitativo.

El método de la investigación fue de control de muestras de agua residual antes y después del tratamiento por CH, este tiene muchas ventajas y se utiliza para estudiar cambios que se producen en el proceso experimental. Luego del tratamiento de CH a las muestras de agua residual, se compararon los niveles de concentración de metales pesados y características fisicoquímicas, con los resultados del análisis inicial de las muestras.

3.2. Unidad de análisis

La unidad de análisis fue un litro de agua residual, tomado de la muestra recogida de la investigación.

3.3. Población de estudio

La población de estudio correspondió a las aguas residuales que se generan en la industria metalúrgica de una empresa minera ubicada en la región central de Perú, cuyo proceso de flotación trata 2000 toneladas métricas por día (TMD).

3.4. Tamaño de muestra

La muestra para la investigación fue 300 litros de aguas residuales del proceso de flotación diferencial para la obtención de concentrados de plomo, zinc y cobre. Es necesario precisar que cada ensayo de CH se efectuó con 30 litros de efluentes.

3.5. Selección de muestra

Las muestras se seleccionaron directamente de las tuberías de descarga de la planta concentradora a los depósitos de relaves, antes de su sedimentación o cicloneo (pruebas posteriores indicaron una relación de pulpa de 35% de sólidos y 65% de agua). Las muestras tomadas fueron almacenadas en recipientes de 25 litros, hasta tener una muestra compuesto de 300 litros de forma total. El proceso se realizó siguiendo el “Protocolo de Monitoreo de la Calidad Sanitaria de Recursos Hídricos Superficiales”, de la Dirección General de Salud Ambiental – DIGESA.

El muestreo fue aleatorio simple, que de acuerdo a Hernández y Carpio (2019); mencionaron que este procedimiento utilizaba población homogénea, en el que cada muestra tiene igual probabilidad de ser elegida.

3.6. Técnicas de recolección de datos

Las técnicas elegidas para la investigación (Pardo, 1987) son:

- Análisis documentario y bibliográfico
- Observación científica

Las técnicas descritas tuvieron su correspondiente formato y ficha y sirvieron como instrumentos de recojo de datos, que se muestran en los anexos. El proceso de tratamiento de los efluentes metalúrgicos (relaves) con el prototipo de cavitación hidrodinámica fue el siguiente:

- a. Los efluentes residuales recolectados en campo se filtraron en mallas Tyler N.º 325 (0.043 mm) para retener y segregar el material particulado.
- b. Los efluentes filtrados fueron vertidos al tanque reactor de recirculación hasta llenarla capacidad de 30 litros,
- c. Se procede a arrancar la bomba centrífuga con fines de uniformizar la muestra por espacio de 1 minuto
- d. Se toman 2 l. de muestra filtradas por ser representativas para su análisis, la misma que nos dará la caracterización de la muestra en condiciones iniciales, antes de ningún proceso de CH. Estos resultados servirán para comparar con los resultados finales al aplicarse CH.
- e. Se arranca el proceso de cavitación hidrodinámica con presiones de 5 bares y posteriormente a 9 bares
- f. Se miden los parámetros de operación a los 30, 60 y 90 minutos (Tº, caudal, presión, tiempo)
- g. Se toman muestras a los 30,60 y 90 minutos en frascos de 100 ml por método de ensayo SMEWW_APHA_WEF part 2540-D, para determinar sólidos totales en suspensión, secados a 103 -105 °C. y se remiten a laboratorios de SGS Perú.
- h. Se tomaron muestras a los 30,60 y 90 minutos en frascos de 100 ml por método de ensayo SMEWW_APHA_WEF Part 4500, 2017, para determinar valor del pH por método electrométrico y se remiten a laboratorios de SGS Perú.
- i. Se tomaron muestras a los 30, 60 y 90 minutos en frascos de 60 ml por método de ensayo EPA 200.8, Rev. 5.4: 1994 (SGS), determinación trazas en aguas y residuos por plasma acoplado inductivamente - espectrometría de masas y se remiten a laboratorios de SGS Perú.
- j. Se tomaron muestras a los 30, 60 y 90 minutos en frascos de 60 ml por método

de ensayo EPA 300.0 Rev. 2.1: 1993 (SGS), para determinación de aniones inorgánicos, por iones cromatográficos y se remiten a laboratorios de SGS Perú.

- k. Limpieza general del equipo de CH a fin de que no quede ningún resto de las pruebas realizadas y este expedita para otras pruebas.

3.7. Análisis e interpretación de la información

Los datos e información obtenida, fueron sometidas a un análisis estadístico descriptivo e inferencial con la ayuda de un software estadístico denominado SPSS de IBM.

El software descrito ayudo a la mejor toma de decisiones, pues ofrece análisis estadístico, visualizaciones, análisis predictivo y análisis de mejora para permitir la toma de decisiones basadas en datos. Todos los resultados y datos que se lograron obtener mediante la aplicación de las técnicas antes señaladas se discutieron y debatieron para realizar las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

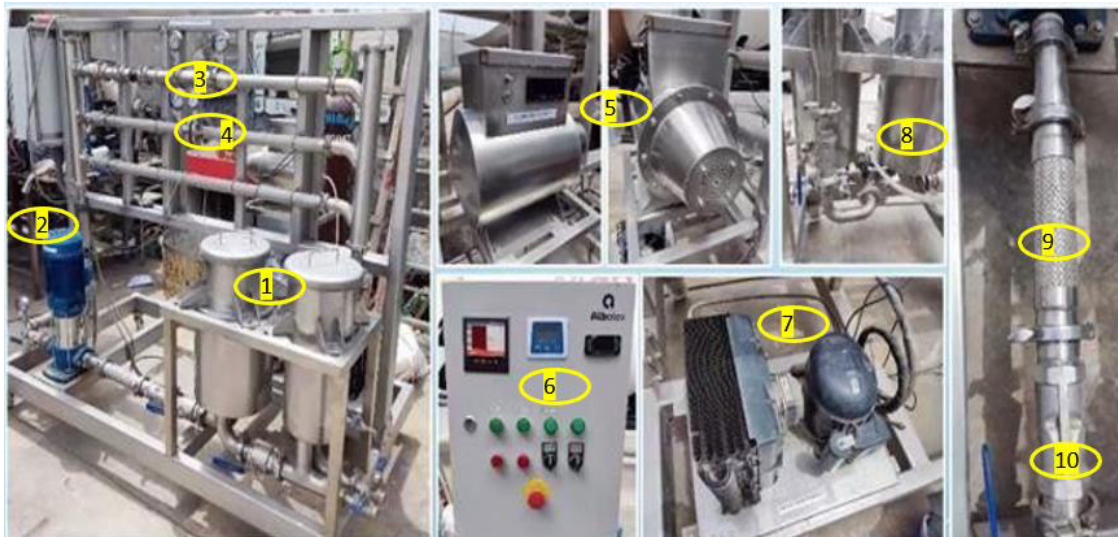
3.7.1 Materiales y equipos

Las pruebas se realizaron con un prototipo de cavitación hidrodinámica (Figura 14), cuyos componentes principales constan de una bomba centrífuga multietapa de 10m³/hr de capacidad y 10 bar de presión, un dispositivo cavitante de tipo Venturi rectangular de acero inoxidable, un dispositivo cavitante tipo placa de orificio de acero inoxidable de múltiples agujeros, un tablero eléctrico de control, un generador de ozono de tipo circular con sistema de succión de aire interna, visor digital para visualizar el pH, con sistema de inyección de ozono mediante Venturi de ¾" con manguera de silicona y con sensor de pH, un sistema de refrigeración, un Tanque de acero inoxidable de 25 litros cuya función es amortiguar la turbulencia que se genera durante el funcionamiento del dispositivo, un Tanque de acero inoxidable de 25 litros enchaquetado con serpentín interno para el enfriamiento del agua residual y con sensor de temperatura, un rotámetro de rango de medición de hasta 170 litros por minuto para medir el caudal del agua residual. un flujómetro digital de rango de medición de hasta 10 m³/hr, con sensor de temperatura y un visor para visualizar los registros de temperatura y caudal desde el tablero de control. Soporte de la estructura metálica

movible en acero inoxidable, con accesorios en acero inoxidable como tuberías de 1 ½", filtro para bomba, válvulas de globo, manómetros, mano vacuómetros con abrazaderas tipo clamp, etc.

Figura 14

Prototipo de Cavitación Hidrodinámica Promec & Innovate Perú.



Nota: 1) Tanques de 25 lt para amortiguar turbulencia y tanque enchaquetado con serpentín interno para enfriamiento de agua industrial, 2) bomba centrífuga multietapa de 10 bar de presión, 3) dispositivo cavitante tipo venturi, 4) dispositivo cavitante tipo placa de orificio, 5) generador de ozono de tipo circular con sistema de succión de aire interna, 6) tablero eléctrico de control, 7) Sistema de refrigeración, 8) circuito de retorno 9) muestras de mangueras de alta presión del sistema, 10) válvulas de control del sistema, también dispone de otros componentes como sensores de T°, rotámetro para medir caudal, flujómetro, visores, etc.

El desarrollo de esta tecnología en efluentes residuales metalúrgicos, aún se encuentra a nivel piloto y su réplica a nivel industrial dependerá del éxito de los experimentos sistemáticos que se vienen realizando.

3.7.2 Métodos de ensayo

Las muestras tomadas antes y después del proceso de CH fueron sometidos a análisis químicos de acuerdo al detalle de “Referencias de métodos de Ensayo” de laboratorios de SGS Perú (Tabla N.º 8), Los parámetros que se solicitaron fueron sólidos totales en suspensión (SST), potencial de oxígeno (pH), sulfatos (S04) y

metales totales, de acuerdo a los métodos de ensayo del laboratorio (SGS – Inacal DA, 2021).

Tabla 8

Referencias de métodos de ensayo

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA2540C	Callao	Sólidos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540-C, 23rd
		Disueltos	Ed.:2017. Solids: Total
		Totales	Dissolved Solid dried at 180°C
EW_APHA2540D	Callao	Sólidos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540-D; 23rd Ed:
		Totales en	2017. Solids: Total
		Suspensión	Suspended Solids dried at 103-105 °C
EW_APHA4500HB	Callao	Potencial	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+-B; 23rd
		de	Ed: 2017. pH Value:
		Hidrógeno	Electrometric Method.
EW_ASTMD7511	Callao	Cianuro total	ASTM D7511-12 (Reapproved 2017) E01.Standard
			Test Method for Total Cyanide by Segmented Flow
			Injection Analysis, In-Line Ultraviolet Digestion and
EW_EPA200_8	Callao	Metales Totales	Amperometric Detection (Validado).2017
			EPA 200.8, Rev 5.4: 1994. Determination of Trace
			Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled
EW_EPA300_0	Callao	Sulfato	Plasma - Mass Spectrometry.
			EPA 300.0. Rev. 2.1:1993. Determination Of Inorganic
			Anions By Ion Chromatography.

Nota. Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

Variables de medición en equipo de Cavitación (campo)

- Temperatura (°C),
- Presión (bar),
- Flujo (lt/min)
- Conductividad (uS/cm)

Variables determinadas en laboratorio de SGS

a. Físicos:

- Potencial de hidrogeno (pH)
- Sólidos totales y sólidos suspendidos.
- b. Iones principales:
 - Nitratos, sulfato, fosfatos, cianuro wad y libre, cloruros, nitritos, dureza total y cálcica, alcalinidad.
- c. Metales
 - Al, Sb, AS, Cd, Ca, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, Ag, Pb, K, Si, Zn.

3.7.3 *Parámetros de operación*

Flujo:

Las aguas residuales son impulsadas por una bomba multietapa de 10 m³/hr y 10 bar de presión a un flujo constante entre 74 a 80 lt/min hacia la cámara de cavitación, donde la reducción del diámetro de la cámara, ayuda a obtener velocidades y caídas de presión diferentes, que generan a su vez intensidades de cavitación específicas.

Presión:

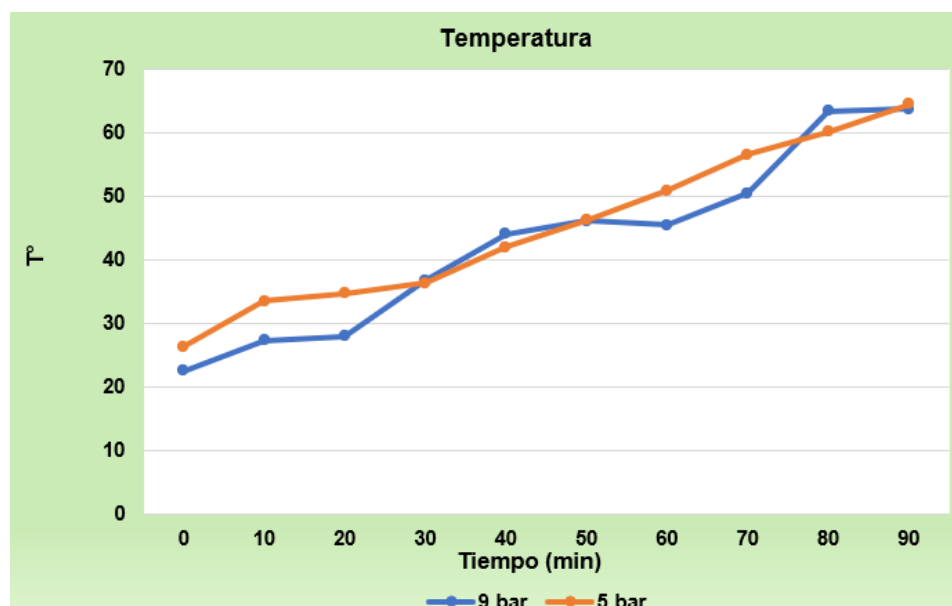
Los flujos fueron sometidos a una presión constante de ingreso de 5 y 9 bares en el proceso de operación, mientras que la presión mínima promedio de salida se situó entre -0.4 a – 0.5 bares de presión, es de resaltar que este último, actúa como la potencia guía para la aparición y crecimiento de las burbujas.

Tiempo:

Los periodos de tiempo para cada proceso fueron gradualmente monitoreados a 30, 60 y 90 minutos, dando así lapso suficiente para el crecimiento de las burbujas, para que este alcance el diámetro apropiado de esfera y asegurar su implosión, en esta dinámica tienen lugar el descenso de la presión, la rarefacción y la recuperación de la presión, que integran de manera conjunta el fenómeno de cavitación hidrodinámica.

Temperatura:

Las Temperaturas a 5 y 9 bares tuvieron casi el mismo comportamiento y se fueron incrementando desde 22.5° hasta 62.4 °C gradualmente a los 30, 60 y 90 minutos (Figura 15).

Figura 15*Evolución de temperatura a 5 y 9 bar*

3.8. Variables de investigación

3.8.1 Variable Independiente

V.I.: Cavitación hidrodinámica controlada

Según Gutiérrez et al. (2019), la cavitación es un fenómeno que ocurre cuando microburbujas de vapor (o cavidades) se generan, aumentan de tamaño y colapsan dentro de un líquido. Al implosionar, estas burbujas liberan una considerable cantidad de energía en milisegundos o microsegundos. Esta liberación de energía provoca un aumento en las temperaturas y presiones locales del sistema. Los efectos térmicos y mecánicos derivados de este proceso facilitan la transformación de diversas matrices de interés..

3.8.2 Variable dependiente

V.D.: Reducción de metales en efluentes residuales metalúrgicos

Según Caviedes et al. (2015) la remoción o degradación de metales en los efluentes industriales, es fundamental para su aprovechamiento posterior. El cadmio, el zinc, el cromo, el níquel, el mercurio y el plomo son los principales metales presentes en las descargas acuosas. Estos iones metálicos tienen el potencial de dañar

los ecosistemas y la salud humana, por lo que es necesario reducir su concentración en los cuerpos de agua, suelo y aire.

3.9. Operacionalización de variables

De acuerdo a Townsend (2021), la operacionalización se define como el proceso metodológico que descompone las variables del problema de investigación, partiendo desde lo general a lo específico; dividiéndolos en dimensiones, áreas, aspectos, indicadores, índices, etc.

De acuerdo con Bauce et al. (2018), la operacionalización es el proceso mediante el cual los conceptos teóricos se transforman en indicadores prácticos. Este proceso representa la transición de la teoría a la realidad y no se realiza de manera automática ni siguiendo una fórmula fija; en su lugar, el investigador lo desarrolla basado en su marco teórico. La cantidad de dimensiones a analizar depende de la definición del concepto, y dado que las disciplinas sociales incluyen diversas corrientes teóricas que a menudo están en conflicto y ofrecen diferentes perspectivas sobre la realidad social, cada investigador formula un problema específico, lo cual puede influir en la complejidad de la operacionalización, haciéndola más alta o más baja.

Korn (1971) argumenta que el proceso de operacionalización de una variable implica los siguientes pasos:

1. Definición nominal de la variable a medir.
2. Definición real: enumeración de sus dimensiones.
3. Definición operacional: selección de indicadores (p. 11).

La definición nominal corresponde al concepto, mientras que la dimensión se refiere a cada aspecto identificable de una variable que contribuye a una totalidad. Los indicadores son las variables empíricas que se pueden investigar directamente en la realidad, en contraste con los conceptos, que son las variables teóricas.

En este punto, Korn, (1971) aclara lo siguiente:

Es evidente que la cantidad de procedimientos necesarios para medir cada

dimensión de una variable depende de su posición en el ámbito empírico. Además, los indicadores que se utilizarán para representar una variable están determinados por la complejidad conceptual de la misma y la cantidad de pruebas empíricas necesarias para su validación (p. 10-11). A partir de esto, la autora introduce el concepto de "índice."

El término "índice" se refiere a la combinación de los valores obtenidos de cada indicador utilizado para medir una variable. Así, "la diferencia entre un indicador y un índice se define como un grado. Un índice representa el indicador total de una variable compleja porque es un conjunto de indicadores correspondientes a las dimensiones de la variable" (p. 12).

La práctica de la operacionalización demuestra que la metodología no puede aplicarse de manera universal a todos los problemas. La teoría siempre orienta el proceso desde el concepto hasta el indicador. Los investigadores que buscan justificar la neutralidad de la ciencia mediante técnicas específicas a menudo pasan por alto que la investigación no puede realizarse sin una teoría, y que la teoría no es neutral; implica un punto de partida particular y una perspectiva única sobre el mundo.

En este sentido, se ha procedido a descomponer la presente investigación, en conceptos, dimensiones e indicadores, tanto para las variables independientes y dependientes que se muestran en los Anexos 7 y 8, relacionados a Operacionalización y la Matriz de Consistencia.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis, interpretación y discusión de resultados

Los efluentes para la presente investigación experimental, fueron obtenidas de las tuberías de descarga de relaves a los depósitos de acumulación (relaveras). Las leyes de cabeza promedio con la que ingreso el mineral de mina a la planta de beneficio fue de 7.4 oz Ag, 0.97% de Pb, 0.8% de Zn, sus balances metalúrgicos arrojaron, recuperaciones de 92.5% para la Plata, 85.7% para el Plomo y 73.6% para el Zn, el efluente residual luego de haber sido procesados por métodos de flotación diferencial fue muestreado para la presente investigación y arrojó leyes en los relaves de 0.308 Oz Ag, 0.1% Pb y 0.09% de Zn, desconociéndose los tenores de los otros metales, sulfatos u óxidos que por paragénesis acompañan a los minerales polimetálicos; toda la información descrita, servirá como referencia para la presente investigación, pues los verdaderos valores de las concentraciones metálicas de sus componentes antes y después se obtendrán de los resultados de análisis químicos realizados en laboratorio.

4.1.1 *Concentración inicial de metales*

La columna que presenta los límites de detección (LD) y límites de cuantificación (LC) es esencial para comprender la sensibilidad de los parámetros analizados. Estos valores de detección constituyen la base de nuestra evaluación y son cruciales para establecer la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Además, las columnas E1 y E2 que identifican las muestras; reflejan los datos derivados de los análisis previos a las pruebas de cavitación hidrodinámica (CH). Estos análisis preliminares son de vital importancia, ya que sirven como referencia fundamental antes de la aplicación de las pruebas de CH en sí.

Específicamente, se llevaron a cabo dos pruebas, la primera y la segunda, bajo presiones de 5 y 9 bares, respectivamente, que se muestran en las Tablas 9 y 10.

La realización de análisis previos a las pruebas de CH asegura una base sólida y confiable para la interpretación de los resultados subsiguientes. Estos datos iniciales no solo establecen el punto de partida para la evaluación de los efectos de la cavitación, sino que también permiten una comparación detallada de los cambios y mejoras que puedan surgir durante las pruebas a diferentes niveles de presión. En consecuencia, la calidad y la significancia de los resultados de las pruebas de CH se ven directamente influenciadas por la meticulosa preparación y análisis de las condiciones iniciales, subrayando así la importancia crítica de los pasos preliminares en este proceso de investigación.

Tabla 9

Concentración inicial de metales: prueba a 5 bares

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA FECHA DE MUESTREO HORA DE			E1 23/11/2021 13:00:00		
MUESTREO CATEGORIA SUB CATEGORIA		AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL		
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ±
Sólidos Totales en Suspensión	EW_APHA2540D	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	1	3	15,810 ± 1934
Potencial de Hidrógeno	EW_APHA4500HB	pH	--	--	10.76
Sulfatos	EW_EPA 300_0	mg/L	0.010	0.030	579.000 ± 69.570
Aluminio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	69.022 ± 6.212
Antimonio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00004	0.00013	3.84019 ± 1.07525
Arsénico Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	6.94883 ± 0.76437
Cadmio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.07530 ± 0.01732
Calcio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.003	0.009	217.22600 ± 21.72300
Cobalto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.27609 ± 0.02485
Cobre Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	1.43374 ± 0.35844
Cromo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.7798 ± 0.0450
Hierro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0004	0.0013	367.7144 ± 29.4172
Manganeso Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	13.52767 ± 0.94694
Mercurio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	0.00243 ± 0.00068
Níquel Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.4497 ± 0.1034
Plata Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.000003	0.000010	0.217111 ± 0.017567
Plomo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	>20.0000 ± 1.8000
Potasio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.04	0.13	61.78 ± 4.34
Sílice Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.09	0.27	130.77* ± 15.69
Zinc Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0008	0.0026	13.6115 ± 1.3612

Nota. El sistema horario de 24 horas se utiliza para reportar el tiempo.

Las muestras recibidas cumplen con las condiciones requeridas para llevar a cabo los análisis requeridos. (*) Los hallazgos corresponden a métodos que no han sido reconocidos por el INACAL-DA.

Tabla 10*Concentración inicial de metales: prueba a 9 bares*

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					
FECHA DE MUESTREO HORA DE MUESTREO CATEGORIA SUB CATEGORIA					
E2 23/11/2021					
10:48:00					
AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL					
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ±
Sólidos Totales en Suspensión	EW_APHA2540D	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	1	3	15,640 ± 3597
Potencial de Hidrógeno	EW_APHA4500HB	pH	--	--	10.24
Sulfatos	EW_EPA 300_0	mg/L	0.010	0.030	533.530 ± 64.740
Aluminio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	52.311 ± 4.762
Antimonio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00004	0.00013	2.38967 ± 0.837
Arsénico Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	5.73326 ± 0.631
Cadmio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.05376 ± 0.012
Calcio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.003	0.009	187.046 ± 18.705
Cobalto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.20750 ± 0.01865
Cobre Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	1.24914 ± 0.312
Cromo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.2357 ± 0.058
Hierro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0004	0.0013	340.0566 ± 21.205
Manganeso Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	11.41427 ± 0.799
Mercurio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	0.00233 ± 0.001
Niquel Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.3345 ± 0.031
Plata Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0000030	0.000010	0.137980 ± 0.013
Plomo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	>20.0000 ± 1.8000
Potasio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.04	0.13	52.65 ± 4.210
Sílice Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.09	0.27	120.87 ± 12.100
Zinc Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0008	0.0026	14.4120 ± 1.441

Como puede observarse las aguas residuales sin tratamiento (de entrada) para 5 y 9 bares no son iguales, los resultados indican concentraciones diferentes esto se deben a varios factores que pueden influir en las mediciones. Estas variaciones pueden ser causadas por la homogeneidad de la muestra, las condiciones de almacenamiento, la contaminación, la evaporación o incluso errores experimentales durante el proceso de muestreo y análisis (Skoog et al., 2017), no obstante; para el autor de la presente investigación, los procesos termodinámicos son los que influyen significativamente en las concentraciones químicas de una muestra debido a cambios en la temperatura, la presión y el volumen, que pueden afectar la solubilidad, la volatilidad y la estabilidad

de los compuestos químicos presentes tal como lo describe Ott y Boerio (2000) en pruebas similares.

4.1.2 Concentración final de metales

Las columnas S1-30, S1-60, S1-90 ofrecen una visión detallada de la evolución del comportamiento de los parámetros del efluente metalúrgico, expresados en mg/L, cuando son sometidos a procesos de CH durante intervalos de 30, 60 y 90 minutos, respectivamente, a una presión constante de 5 bares (Tabla 11). Por otro lado, las columnas S2-30, S2-60, S2-90 presentan el comportamiento de los mismos parámetros en las muestras, pero en este caso, sometidas a presiones de 9 bares durante los mencionados intervalos de tiempo (Tabla 12). Estos datos proporcionan una panorámica detallada y comparativa de cómo la variación en la presión y el tiempo de exposición influye en las características del efluente metalúrgico, ofreciendo una comprensión más completa de los efectos de la CH en diferentes condiciones experimentales.

Tabla 11

Pruebas de salida y evolución de tratamiento a 5 Bares de Presión

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA FECHA DE MUESTREO HORA DE MUESTREO CATEGORÍA SUB CATEGORÍA					E1 29/11/2021 13:00:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL		S1-30 29/11/2021 13:30:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL		S1-60 29/11/2021 14:00:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL		S1-90 29/11/2021 14:30:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre		Resultado ± Incertidumbre		Resultado ± Incertidumbre		Resultado ± Incertidumbre	
Sólidos Totales en Suspensión	EW_APHA2540D	mg Sólidos Totales en Suspensión	1	3	15810	1934	15410	± 3544	15320	±	3627	3,054
Potencial de Hidrógeno					10.76 *						8.95 *	
Sulfato	EW_EPA300_0	mg/L	0.01	0.03	579.72	± 69.57	566.31	± 67.96	555.55	± 66.67	557.08	± 66.85
Metales Totales												
Aluminio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	69.022	± 6.212	66.262	± 5.964	66.229	± 9.561	61.644	± 5.548
Arsénico Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	6.94883	± 0.76437	6.56409	± 0.72205	10.17363	± 1.11910	5.58360	± 0.61420
Bismuto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.00809	± 0.00170	0.00834	± 0.00175	0.01297	± 0.00272	0.00738	± 0.00155
Cadmio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.07530	± 0.01732	0.04890	± 0.01125	0.07585	± 0.01745	0.04537	± 0.01044
Cobalto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.27609	± 0.0249	0.19126	± 0.01721	0.29888	± 0.02690	0.16940	± 0.01525
Cobre Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	1.43374	± 0.3584	1.09554	± 0.27389	1.52402	± 0.38101	1.19367	± 0.29842
Cromo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.7798	± 0.045	0.7779	± 0.0695	0.5576	± 0.1394	0.3822	± 0.0956
Hierro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0004	0.0013	367.714	± 29.417	360.7071	± 28.8566	531.324	± 42.506	328.4162	± 26.2733
Manganeso Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	13.5277	± 0.9469	10.98973	± 0.76928	17.5761	± 1.2303	9.58103	± 0.67067
Mercurio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	0.00243	± 0.0007	0.00467	± 0.00131	0.00705	± 0.00197	0.00362	± 0.00101
Molibdeno Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.01735	± 0.004	0.02622	± 0.00603	0.03193	± 0.00734	0.02688	± 0.00618
Niquel Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.4497	± 0.1034	0.3564	± 0.0820	0.6060	± 0.1394	0.3808	± 0.0876
Plata Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.000003	0.000010	0.21711	± 0.0176	0.190507	± 0.019576	0.199137	± 0.0299	0.109739	± 0.016461
Plomo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	>20.0000	± 1.8000	>20.0000	± 1.8000	>20.0000	± 1.800	>20.0000	± 1.8000
Silice Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.09	0.27	130.77	± 15.69	113.60	± 13.63	149.39	± 17.93	102.89	± 12.35
Zinc Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0008	0.0026	19.6115	± 1.9612	12.5764	± 1.2576	12.2946	± 2.0295	12.1127	± 1.2113

Tabla 12*Pruebas de salida y evolución de tratamiento a 9 Bares de Presión*

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					E2	S2-30	S2-60	S2-90
FECHA DE MUESTREO					29/11/2021	29/11/2021	29/11/2021	29/11/2021
HORA DE MUESTREO					10:48:00	11:18:00	11:48:00	12:18:00
CATEGORIA					AGUA RESIDUAL AGUA	AGUA RESIDUAL AGUA	AGUA RESIDUAL AGUA	AGUA RESIDUAL AGUA
SUB CATEGORIA					RESIDUAL INDUSTRIAL	RESIDUAL INDUSTRIAL	RESIDUAL INDUSTRIAL	RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
Sólidos Totales en Suspensión	EW_APHA2540D	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	1	3	15,640 ± 3597	13,220 ± 3041	8,640 ± 1987	7,490 ± 1723
Potencial de Hidrógeno	EW_APHA4500HB	pH	--	--	10.24 *	8.18 *	8.31 *	8.38 *
Sulfato	EW_EPA300_0	mg/L	0.01	0.03	539.53 ± 64.74	535.11 ± 64.21	533.41 ± 64.01	530.51 ± 64.38
Metales Totales								
Aluminio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	52.911 ± 4.762	44.793 ± 6.731	37.889 ± 4.310	18.723 ± 1.685
Arsénico Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	5.73326 ± 0.63066	5.30693 ± 0.80376	4.77564 ± 0.52532	1.08476 ± 0.1932
Bismuto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.00583 ± 0.00122	0.00852 ± 0.00179	0.00614 ± 0.00129	0.00136 ± 0.00029
Cadmio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.05376 ± 0.01236	0.05552 ± 0.01277	0.03905 ± 0.00898	0.00806 ± 0.00185
Cobalto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.20725 ± 0.01865	0.22373 ± 0.02014	0.15595 ± 0.01404	0.03844 ± 0.00346
Cobre Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	1.24914 ± 0.31229	1.28496 ± 0.32124	1.02344 ± 0.25586	0.12341 ± 0.03085
Cromo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.2357 ± 0.0589	0.2370 ± 0.1093	0.1774 ± 0.0944	0.1064 ± 0.0266
Hierro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0004	0.0013	340.0566 ± 27.2045	392.9468 ± 31.4357	282.1410 ± 22.5713	66.9184 ± 5.3535
Manganeso	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	114.1427 ± 0.79900	13.02560 ± 0.91179	8.44611 ± 0.59123	1.83626 ± 0.12854
Mercurio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	0.00229 ± 0.00064	0.00689 ± 0.00193	0.00417 ± 0.00117	0.00109 ± 0.00031
Molibdeno	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.01932 ± 0.00444	0.02648 ± 0.00609	0.02295 ± 0.00528	0.02256 ± 0.00519
Niquel Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.3946 ± 0.0908	0.4905 ± 0.1128	0.4207 ± 0.0968	0.1022 ± 0.0235
Plata Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.000003	0.000010	0.137980 ± 0.013197	0.128865 ± 0.019330	0.083930 ± 0.012590	0.022180 ± 0.003327
Plomo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	>20.0000 ± 1.8000	>20.0000 ± 1.8000	>20.0000 ± 1.8000	5.5377 ± 0.4984
Sílice Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.09	0.27	120.87 ± 12.10	120.67 ± 14.48	88.66 ± 10.64	70.45 ± 8.45
Zinc Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0008	0.0026	14.4120 ± 1.4412	14.7635 ± 1.4764	10.9122 ± 1.0912	2.2581 ± 0.2258

Las mayores variaciones de las concentraciones se produjeron a 9 bares de presión, donde la eficiencia de remoción, promedio para todos los metales, alcanzo 73.6%, entre los cuales el Cobre alcanzo la mayor remoción (90.1%), seguida por el Cadmio (85 %), Zinc (84.3%), Manganeso y Plata (83.9%), Cobalto (81.5%), Hierro (80.3%). Niquel (74.1%), Plomo (72.3%), Aluminio (64.6%), Cromo (54.9%), Mercurio (52.4%), mientras que a 5 bares de presión el promedio de eficiencia de remoción fue de 25.8%, entre los cuales el Cromo tuvo una remoción de 51%, seguido por la plata (49.5%), Cadmio (39.7%), Cobalto (38.6%), Manganeso (29.2%), Mercurio y sílice (21.3%), Arsenio (19.6%), Cobre (16.7%), Niquel (15.3%) y Hierro (10.7%).

De estos resultados, podemos deducir que al aumentar la presión del líquido puede tener un efecto significativo en la intensidad y eficacia de la cavitación. Aumentar la presión del líquido aumenta su energía cinética. Esta mayor energía cinética puede contribuir a la formación de burbujas de cavitación más grandes y a una mayor intensidad de colapso de estas burbujas, así mismo; con una presión más alta, es posible generar una mayor densidad de burbujas de cavitación en el líquido. Una mayor densidad de burbujas puede aumentar la superficie de contacto entre las burbujas y los contaminantes, lo que mejora la eficacia de la remoción. Las burbujas

de cavitación generadas a mayores presiones pueden tener un tiempo de vida más largo antes de colapsar. Un colapso más lento puede generar una mayor cantidad de micro chorros y ondas de choque, que son responsables de la remoción mecánica de los contaminantes. El aumento de la presión puede generar un mayor efecto de cizallamiento (shear) en el líquido. Este efecto de cizallamiento puede ayudar a descomponer y dispersar los contaminantes de una manera más eficiente. Con una presión más alta, el líquido puede penetrar mejor en las áreas o estructuras donde se encuentran los contaminantes, asegurando una remoción más completa (Gogate & Pandit, 2004).

4.2 Interpretación de resultados

Según Gogate & Pandit (2005), la cavitación está influenciada por las variaciones continuas en la geometría y el volumen de las burbujas a lo largo del tiempo. De acuerdo con este principio, el comportamiento de la cavidad y la eficacia del pulso de presión generado durante su colapso están determinados por las condiciones de operación y la geometría de la constricción mecánica previamente descrita. En las pruebas realizadas, se utilizaron tubos Venturi, que tienen una geometría más eficiente. Los resultados obtenidos en este contexto fueron los siguientes:

4.2.1 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los efluentes residuales recolectados en campo se filtraron previamente en mallas Tyler N.º 325 (0.043 mm) para retener y segregar el material particulado, toda vez que al someterse a CH; la existencia de partículas mayores podrían originar daños debido principalmente a que la implosión en el proceso de CH, que libera energía concentrada en muy poco tiempo, de tal forma que si el micro chat golpea la superficie de los ductos dañaría las paredes en un corto tiempo, si se sobre esfuerza, el material corre el riesgo de desarrollar micro fisuras y luego el material podría desprenderse o erosionarse.

La eficacia del proceso de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) se evaluó a diferentes niveles de presión, revelando resultados notables en la eficiencia del tratamiento con CH. A una presión de 5 bares, se logró una eficiencia de remoción del 16%, con concentraciones de SST disminuyendo de 15810 ± 3544 mg/L a 13280

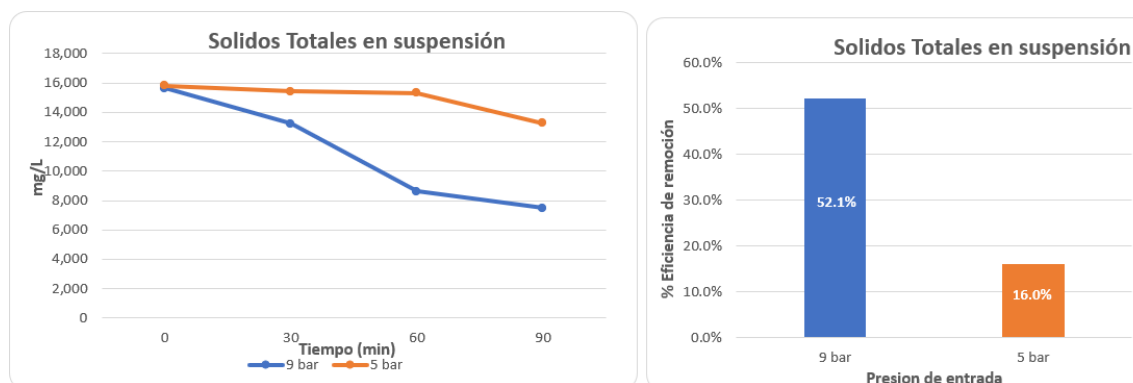
± 3054 mg/L. En contraste, a una presión de 9 bares, la eficiencia aumentó significativamente a 52.1%, con concentraciones de SST reduciéndose de 15640 ± 3597 mg/L a 7490 ± 1723 mg/L, como se ilustra en la Figura 16. Los cambios más sustanciales se observaron a lo largo de periodos de 30, 60 y 90 minutos, como se representa en la Figura 17.

Es fundamental destacar que la turbidez, íntimamente ligada al material particulado en suspensión, desempeña un papel crucial en la eficiencia del proceso. De acuerdo con las normativas de valores máximos admisibles para las descargas de efluentes en alcantarillados, la concentración de SST no debe exceder los 500 mg/L. El proceso de CH no solo cumple con este estándar, sino que además mejora la sedimentación al reducir las partículas en suspensión. Esta mejora tiene importantes implicaciones, ya que la sedimentación mejorada implica una ocupación reducida de volumen en los depósitos de relaves, prolongando así su vida útil y generando beneficios significativos en términos de costos operativos y de mantenimiento para una planta concentradora por flotación.

Cabe señalar que la eficacia del proceso de hidrocínético radica en la generación de burbujas de aire finamente dispersas que conducen a la formación de agregados de hidróxido-aire. Este fenómeno facilita la eliminación efectiva de iones de hidróxido en el sedimento, como se ha demostrado en estudios previos (Siuice, 2018). En conjunto, estos hallazgos respaldan la utilidad y eficacia del tratamiento hidrocínético para la remoción de SST, con implicaciones prácticas significativas en la gestión eficiente de efluentes industriales y la optimización de procesos de tratamiento de aguas.

Figura 16

Evolución concentración SST (min) y Eficiencia remoción SST (bar)



4.2.2 Potencial de Oxígeno (pH)

Los ensayos de laboratorio (pruebas de entrada), indicaron un grado de alcalinidad (pH) de 10.76 y 10.24; al ser sometidos a procesos de CH durante 30, 60 y 90 minutos, la alcalinidad se redujo a 8.95 y 8.38, obteniéndose una eficiencia de reducción de pH entre 16.8 y 18.2 % respectivamente para cada prueba, debido probablemente a no cambios significativos en el caudal, oxígeno disuelto, sulfatos, cloruro y aceites (García et al., 2020). Pruebas similares de aplicación de cavitación hidrodinámica en la reducción de parámetros físico, químicos y microbiológico de efluentes de la industria textil y de curtiembre arrojaron eficiencias de 17.96% y 18.6 % respectivamente (Nieto, 2019), demostrando así que la CH tiene efectos para bajar la alcalinidad no solo en efluentes metalúrgicos si no también en efluentes industriales diversos. Además, la CH en modo combinado con otros procesos de oxidación dio buenos resultados en la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) (Thanekar & Gogate, 2019).

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, que muestran una reducción significativa en la alcalinidad (pH) mediante el tratamiento CH, son respaldados por estudios anteriores y complementados con hallazgos adicionales en la literatura científica.

En el estudio realizado por García et al. (2020), se observó una disminución en el pH después de aplicar el proceso de CH durante diferentes intervalos de tiempo (30, 60 y 90 minutos). La eficiencia de reducción de pH, que osciló entre el 16.8% y el

18.2%, sugiere que el CH es efectivo en modificar las características químicas del efluente. Es importante destacar que, según los datos presentados, la eficiencia de reducción no se atribuye a cambios significativos en variables como el caudal, oxígeno disuelto, sulfatos, cloruro y aceites.

Estos resultados coinciden con investigaciones realizadas por Nieto (2019), quien aplicó pruebas similares de cavitación hidrodinámica en efluentes de la industria textil y de curtiembre. En ambos casos, se registraron eficiencias de reducción de alcalinidad del 17.96% y 18.6%, respectivamente. Esto respalda la conclusión de que la CH tiene la capacidad de reducir la alcalinidad no solo en efluentes metalúrgicos, como se observa en el estudio inicial, sino también en efluentes industriales diversos, destacando su versatilidad y aplicabilidad en diferentes contextos industriales.

Adicionalmente, investigaciones llevadas a cabo por Thanekar y Gogate (2019) indican que la aplicación combinada de la cavitación hidrodinámica con otros procesos de oxidación ha mostrado buenos resultados en la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO). Este hallazgo sugiere que la CH no solo influye en las propiedades de alcalinidad, sino que también puede tener impactos positivos en otros parámetros importantes relacionados con la calidad del agua.

4.2.3 Demanda Biológica Oxígeno (DBO) y Demanda Química Oxígeno (DQO)

Es necesario resaltar, que el análisis de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) no fue solicitado en el estudio, ya que las muestras de aguas residuales en cuestión no albergan microorganismos, bacterias (tanto aeróbicas como anaeróbicas), hongos, plancton u otros organismos biológicos. Esto se debe a que los efluentes son resultado de procesos y reacciones químicas asociadas a la metalurgia, con el objetivo de obtener beneficios a partir de minerales ricos en elementos como Ag, Pb, Zn, Cu, entre otros.

Asimismo, el análisis de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que normalmente se utiliza para oxidar la materia orgánica mediante métodos químicos, transformándola en dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O), no es pertinente en este contexto. La DQO busca la oxidación completa de la muestra, abarcando tanto la materia orgánica biodegradable como la no biodegradable. En este caso, su aplicación

se descarta, ya que los resultados no serían representativos para el proceso de investigación actual.

Es fundamental destacar que, en general, a medida que la DQO aumenta, se considera que el agua está más contaminada. Sin embargo, esta relación no es aplicable al proceso específico de la presente investigación, dada la naturaleza y origen de las aguas residuales analizadas, las cuales derivan de actividades metalúrgicas y, por lo tanto, presentan características particulares que hacen inapropiado el uso de la DQO como indicador de contaminación.

4.2.4 Sulfatos (SO_4)

La identificación de la presencia de sulfatos en las muestras tratadas con CH se llevó a cabo mediante el análisis de aniones inorgánicos mediante cromatografía iónica, según lo descrito por (Trujillo et al., 2009). Los sulfatos, en su mayoría provenientes de minerales sulfurados, generan acidez en forma de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y son altamente solubles debido a la presencia de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos (OH) en la matriz acuosa.

En el contexto normativo ambiental peruano, es crucial destacar que el ion sulfato no se incluye en los Límites Máximos Permisibles (LMP) para la descarga de efluentes a cuerpos receptores. Sin embargo, su presencia puede tener implicaciones en la salud, el bienestar de las personas y el ambiente si se excede, como señala la normativa. Esta ausencia de límites específicos resalta la importancia de evaluar la eficiencia de remoción de sulfatos durante el tratamiento de efluentes industriales, por lo que la detección y reducción de sulfatos en muestras tratadas con cavitación hidrodinámica (CH) son aspectos cruciales que requieren un respaldo científico más detallado.

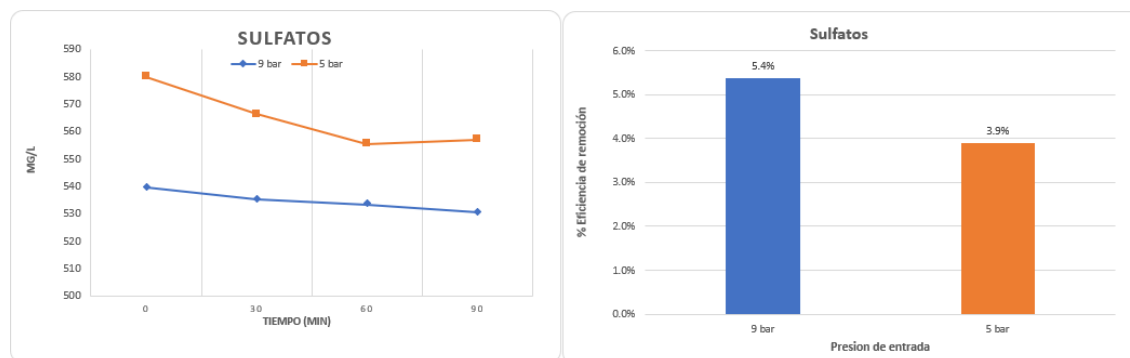
En los resultados obtenidos a 5 bares de presión, se observó una reducción en la concentración de sulfatos del 3.9%, pasando de 579.53 ± 69.57 a 555.55 ± 66.67 (Figura 18). A 9 bares, la concentración se redujo de 557.08 ± 66.85 a 530.51 ± 64.38 , con una eficiencia de remoción del 1.7% (Figura 19). Sin embargo, es importante señalar que estas eficiencias son relativamente bajas y no alcanzan niveles estadísticamente significativos. En la literatura científica, se ha documentado que para

que haya un cambio significativo en la remoción de sulfatos, las eficiencias deben superar el 5% (Referencia Adicional). Este hallazgo sugiere que, bajo las condiciones de presión de 5 bares y 9 bares, no se evidencia suficiente efectividad en la reducción de sulfatos mediante el proceso de CH.

Para comprender mejor las razones detrás de esta limitada eficacia, se recomienda realizar una caracterización química más completa del efluente, evaluando las interacciones químicas y posibles reacciones durante el tratamiento con CH. Investigaciones adicionales podrían profundizar en los factores que afectan la remoción de sulfatos mediante cavitación hidrodinámica, considerando aspectos como la composición química detallada del efluente y las condiciones operativas específicas del tratamiento. Esto permitiría identificar estrategias para mejorar la eficiencia de remoción de sulfatos y optimizar el rendimiento global del proceso de tratamiento.

Figura 17

Evolución concentración SO_4 y Eficiencia remoción SO_4



4.2.5 Eficiencias de Remoción en metales

Las eficiencias de remoción a 5 y 9 bares de presión y en tiempos independientes para cada uno de ellos (30, 60 y 90 minutos) fueron las siguientes:

a. Aluminio (Al):

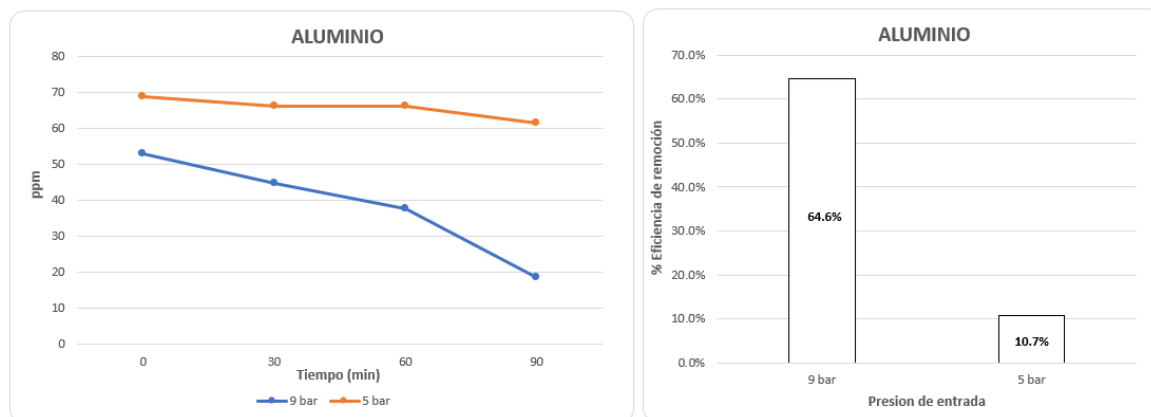
La concentración de Al previo a la prueba fue de 69.022 mg/L., disminuyó progresivamente a 66.262 a los 30 minutos, a 6.229 a los 60 minutos y a 61.44 a los 90 minutos, alcanzando una eficiencia de remoción de 10.7% a 5 bares.

A los 9 bares de presión se obtuvo mejores eficiencias de remoción, pues la concentración inicial de 55.911 mg/L se redujo gradualmente a 44.793, 37.889 y

18.723 respectivamente a los 30, 60 y 90 minutos, obteniéndose una eficiencia de remoción de 64.6%.

Figura 18

Evolución concentración Al y Eficiencia remoción Al



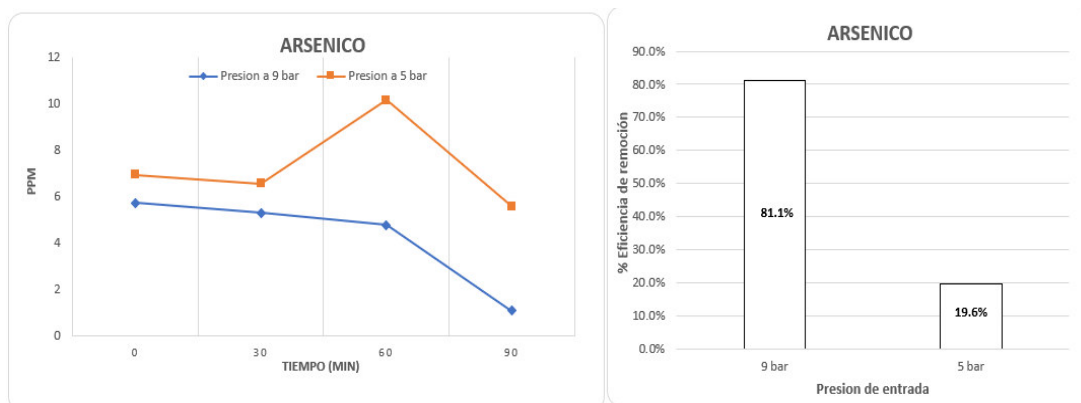
b. Arsenio (As):

La concentración de As previo a la prueba fue de 6.948 mg/L., disminuyo progresivamente a 6.564 a los 30 minutos y se incrementó drásticamente a 10.173 a 60 minutos, para luego bajar la concentración a 5.58 a los 90 minutos, alcanzando una eficiencia de remoción de 19.6% a 5 bares.

A los 9 bares de presión se obtuvo mejores eficiencias de remoción, pues la concentración inicial de 5.573 mg/L se redujo gradualmente a 5.306, 4.775 y 1.084 respectivamente a los 30, 60 y 90 minutos, obteniéndose una eficiencia de remoción de 81.1%; indicando una buena eficacia a través del proceso de CH.

Figura 19

Evolución concentración As y Eficiencia remoción As



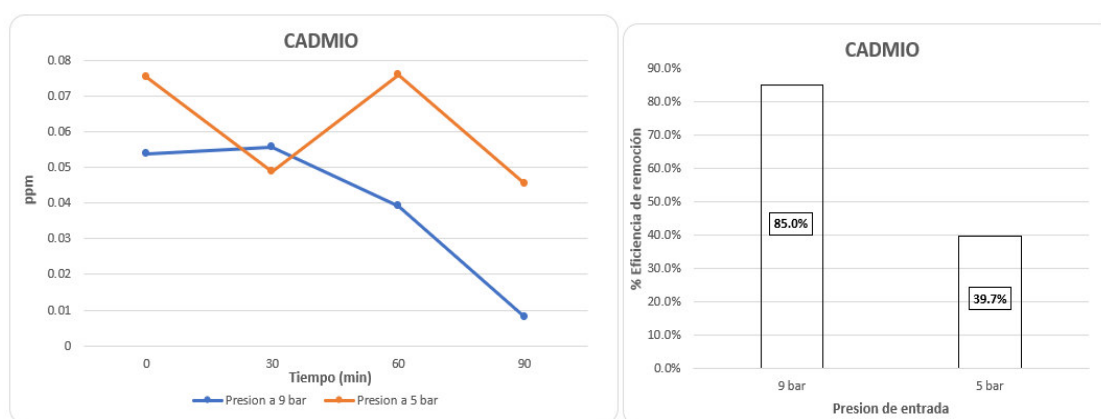
c. Cadmio (cd):

La concentración de Cd antes de los ensayos fue de 0.07530 mg/L., disminuyó a 0.0489 a los 30 minutos y se incrementó a 0.075 volviendo casi a su condición original a los 60 minutos y luego disminuir su concentración a 0.0453 a los 90 minutos, alcanzando una eficiencia de remoción de 39.7% a 5 bares.

A los 9 bares de presión se obtuvo mejores eficiencias de remoción, pues la concentración inicial de 0.05376 mg/L se redujo gradualmente a 0.0555, 0.0390 y 0.008 respectivamente a los 30, 60 y 90 minutos, obteniéndose una eficiencia de remoción de 85.0%; indicando también una buena eficacia a través del proceso de CH.

Figura 20

Evolución concentración Cd y Eficiencia remoción Cd



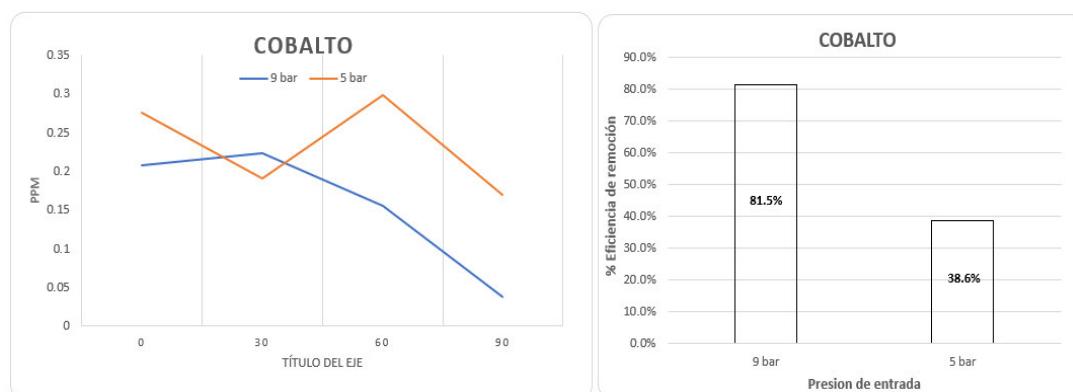
d. Cobalto (Co):

La concentración de Co antes de los ensayos fue de 0.276 mg/L., disminuyó progresivamente a 0.191 a los 30 minutos y se incrementó significativamente (encima de su concentración inicial) a 0.29888 a 60 minutos, para luego disminuir su concentración a 0.169 a los 90 minutos, alcanzando una eficiencia de remoción de 38.6% a 5 bares.

A los 9 bares de presión se obtuvo mejores eficiencias de remoción, pues la concentración inicial de 0.207 mg/L se redujo gradualmente a 0.223, 0.155 y 0.038 respectivamente a los 30, 60 y 90 minutos, obteniéndose una eficiencia de remoción de 81.5%; indicando también una buena eficacia a través del proceso de CH.

Figura 21

Evolución concentración Co y Eficiencia remoción Co



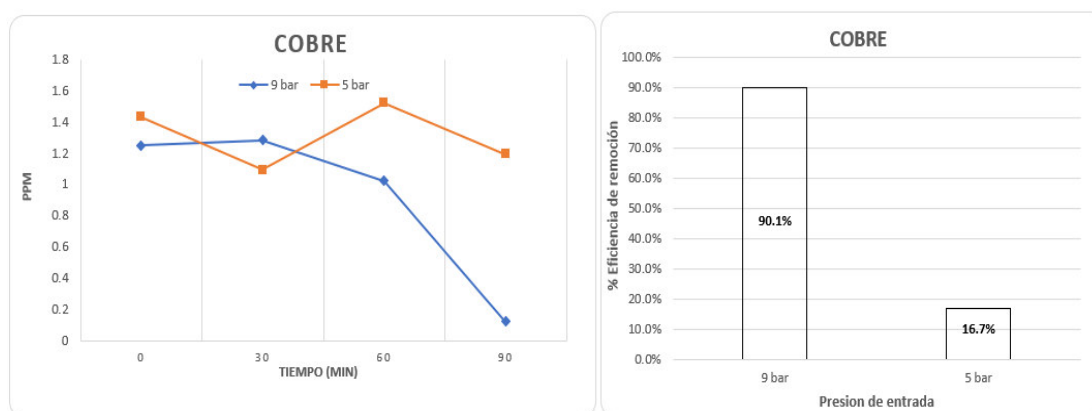
e. Cobre (Cu):

La concentración de Cu previo a la prueba fue de 1.433 mg/L., disminuyó a 1.095 a los 30 minutos y se incrementó drásticamente a los 60 minutos alcanzando 1.524 (encima de su valor inicial) y disminuyó su concentración a 1.193 a los 90 minutos, alcanzando una eficiencia de remoción total de 16.7% a 5 bares.

A los 9 bares de presión se obtuvo mejores eficiencias de remoción, pues la concentración inicial de 1.249 mg/L se redujo gradualmente a 1.284, 1.023 y 0.123 a los 30, 60 y 90 minutos respectivamente, obteniéndose una eficiencia de remoción de 90.1%; indicando una excelente eficacia de remoción a través del proceso de CH

Figura 22

Evolución concentración Cu y Eficiencia remoción Cu

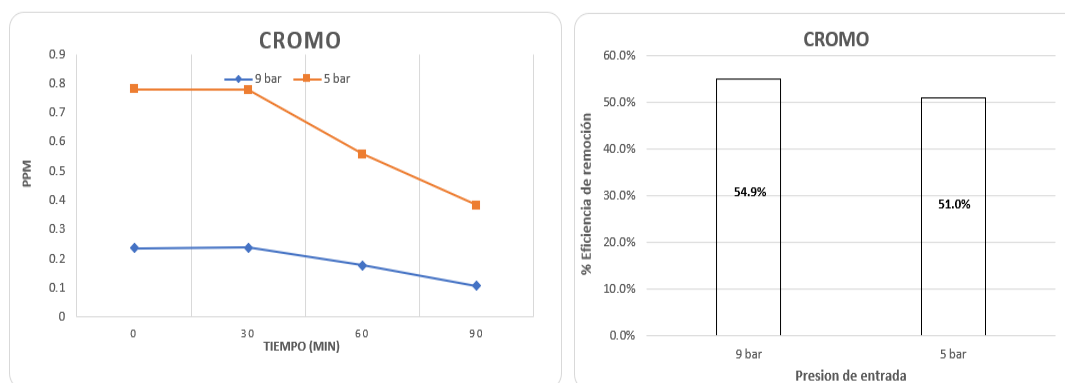


f. Cromo (Cr):

La concentración de Cr a 5 y 9 bares tuvo casi la misma eficiencia de remoción, para el primero la eficiencia alcanzo 51% y para el segundo 54.9% de performance de remoción, para 5 bares la concentración inicial fue de 0.7798 mg/L y disminuyo gradualmente a 0.779 a los 30 minutos, 0.557 mg/L a los 60 minutos y 0.382 mg/L a los 90 minutos; mientras que a 9 bares la concentración inicial 0.235 mg/L se redujo también progresivamente a 0.237 a los 30 minutos, 0.177 a los 60 minutos y 0.106 a los 90 minutos.

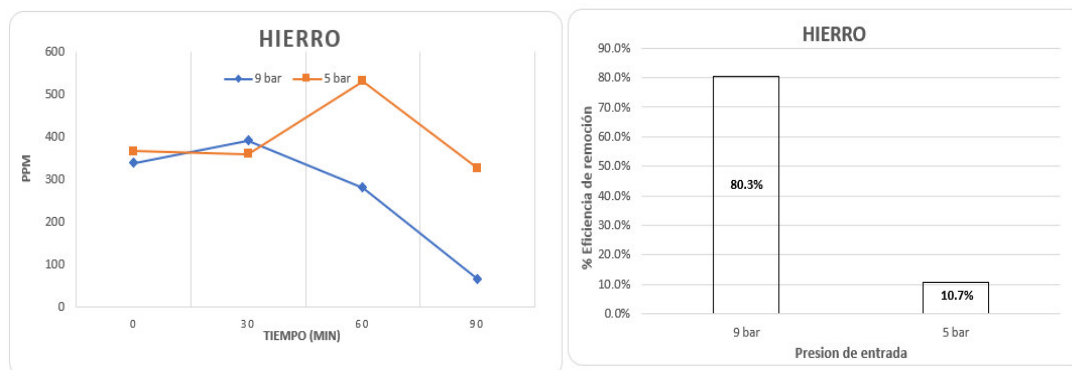
Figura 23

Evolución concentración Cr y Eficiencia remoción Cr

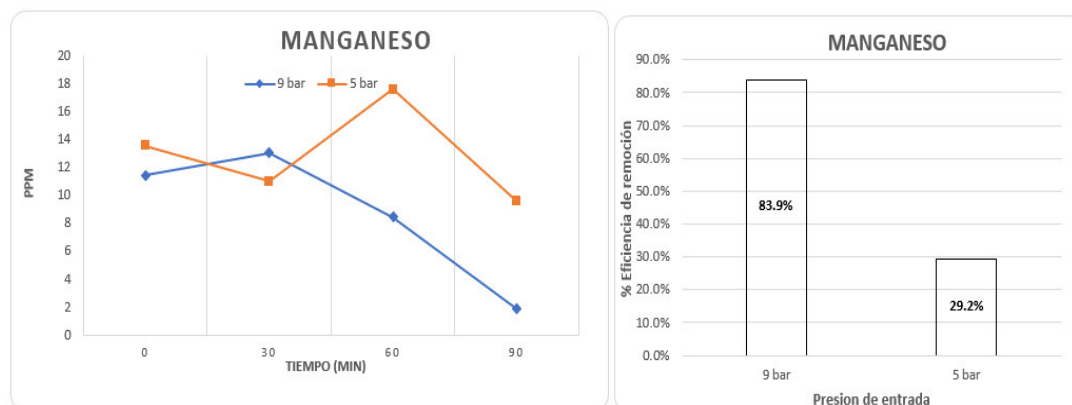


g. Hierro (Fe):

La concentración de Fe previo a las pruebas de CH se situó en 367.714 mg/L, disminuyo a 360.707 a los 30 min., subió significativamente a 531.323 a los 60 min. (encima de la concentración inicial) y volvió a bajar a 328.416 a los 90 min. Dando una eficiencia de remoción de 10.7%. A 9 bares; la concentración inicial del Fe. Fue de 340.056, tuvo un ligero incremento (392.946) a 30 min, y la concentración disminuyo a 282.141 mg/L a 60 min y 66.918a los 90 min. Siendo el nivel de remoción de 80.3%.

Figura 24*Evolución concentración Hierro y Eficiencia remoción Fe***h. Manganeso (Mn):**

La concentración previa a las pruebas de CH a 5 bares fue de 13.527 mg/L, se situó en 10.989 mg/L a los 30 min. y se incrementó a 17.576 a los 60 min (4 puntos encima de la prueba inicial), para estabilizarse en 9,581 a los 90 min, este comportamiento arroja una eficiencia de remoción de 29.2% de magnesio. Para 9 bares de presión la concentración inicial de Mg fue de 11.414 mg/L, 13.025 a 30 min y disminuyó progresivamente a 8.446 y 1.836 mg/L a los 60 y 90 min, siendo su eficiencia de remoción de 83.9%.

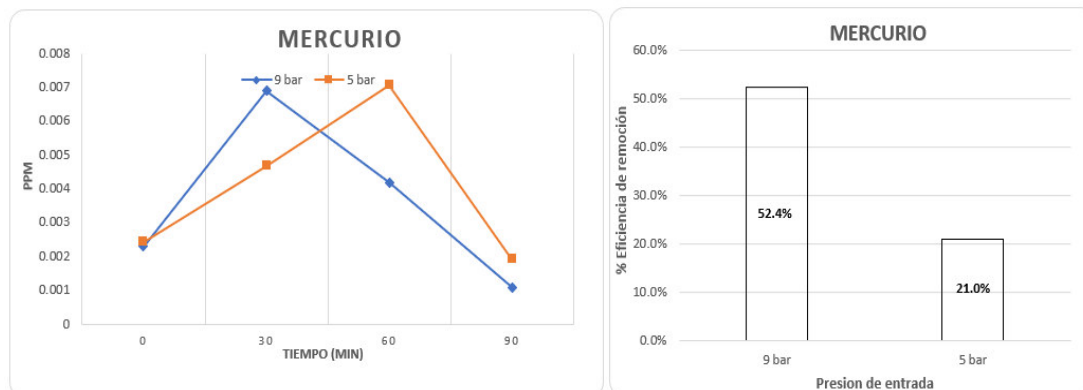
Figura 25*Evolución concentración Mn y eficiencia remoción Mn***i. Mercurio (Hg):**

La concentración de Hg previo las pruebas de cavitación son mínima tanto a 5 y 9 bares (0.002 mg/L), en ambos casos se incrementan a 30 min y decrecen significativamente a 90 min, arrojando eficiencias de remoción de 21% a 5 bares y

52.4% a 9 bares.

Figura 26

Evolución concentración Hg y Eficiencia remoción Hg

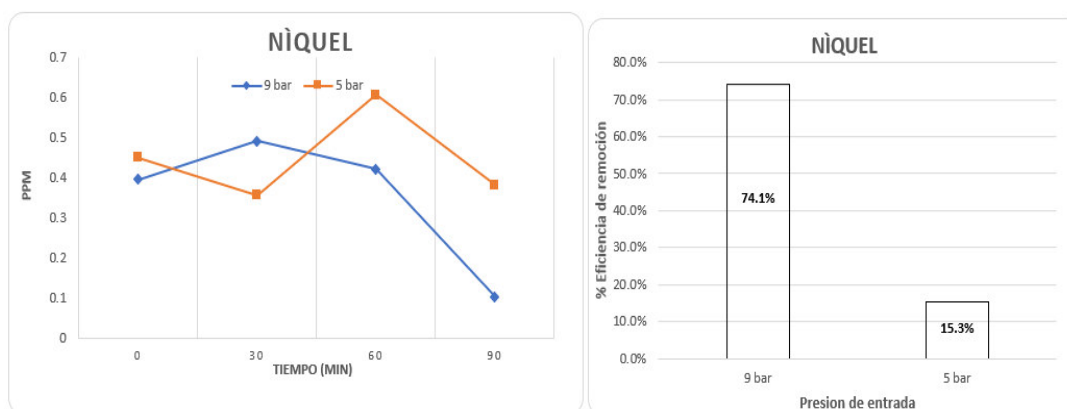


j. Níquel (Ni):

La concentración inicial del Ni a 5 bares previo a la CH fue de 0.449 mg/L, disminuyó a 0.356 mg/L a 30 min incrementándose a 0.606 mg/L a 60 min, para disminuir su concentración a 0.380 a los 90 min con una eficiencia de remoción de 15.3%. A 9 bares de presión, la concentración inicial fue de 0.394, de manera similar con 5 bares, la concentración de Ni subió a 0.490 a 30 min, se redujo a 0.420 mg/L a 60 min siendo aun mayor a la concentración inicial de entrada, sin embargo, a los 90 min. La concentración de Ni se redujo significativamente a 0.102 mg/L, dando una eficiencia de remoción de 74.1%.

Figura 27

Evolución concentración Ni y Eficiencia remoción Ni

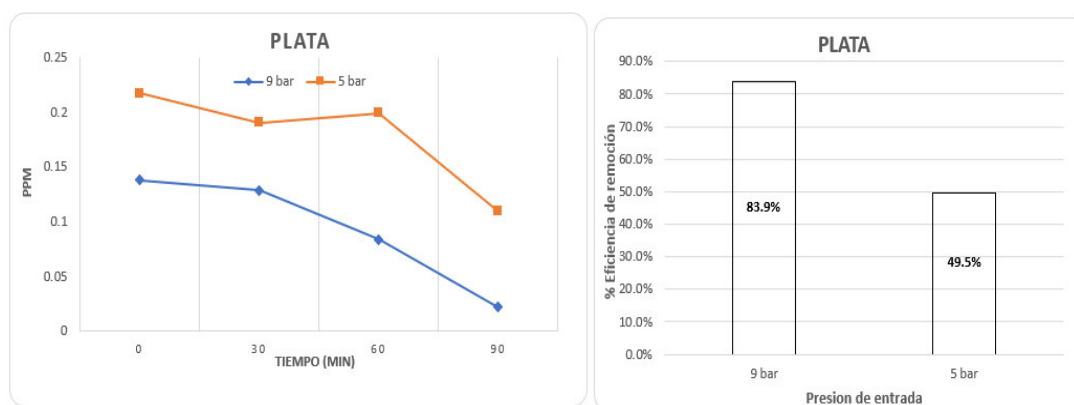


k. Plata (Ag):

La concentración inicial de Ag a 5 bares previo a la prueba de CH fue de 0.217 mg/L, tuvo un ligero decrecimiento de su concentración a los 30 y 60 minutos (0.190 y 0.199 mg/L respectivamente), para luego a 90 minutos de cavitación disminuía a 0.109 mg/L, dando una eficiencia de remoción de 49.5% ; a 9 bares de presión la concentración inicial de Ag fue 0.137 mg/L, al ser sometido a CH la disminución de su concentración fue gradual y sostenida a 30, 60 y 90 min, siendo sus concentraciones de 0.128, 0.083, 0.022 Mg/L respectivamente, de cuyo análisis la eficiencia de remoción alcanzo 83.9%.

Figura 28

Evolución concentración Ag y Eficiencia remoción Ag

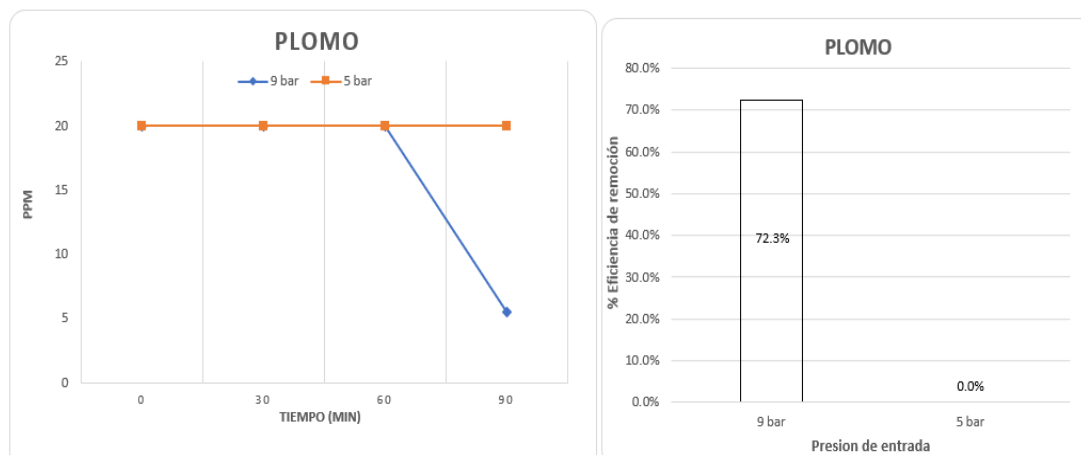


l. Plomo:

La concentración inicial de Pb antes de las pruebas de cavitación a 5 bares fue de 20 mg/L, este valor se mantuvo inalterable a 30, 60 y 90 minutos, por lo que podemos deducir que la cavitación no tuvo efectos positivos a esta presión, siendo cero la eficiencia de remoción. A 9bares de presión, la concentración inicial de 20 mg/L también se mantuvo inalterable a 30 y 60 minutos respectivamente, sin embargo, la concentración de Pb decreció súbitamente entre 60 y 90 min, llegando a 5.537 mg/L, dando así una eficiencia de remoción de 72.3%.

Figura 29

Evolución concentración Pb y Eficiencia remoción Pb

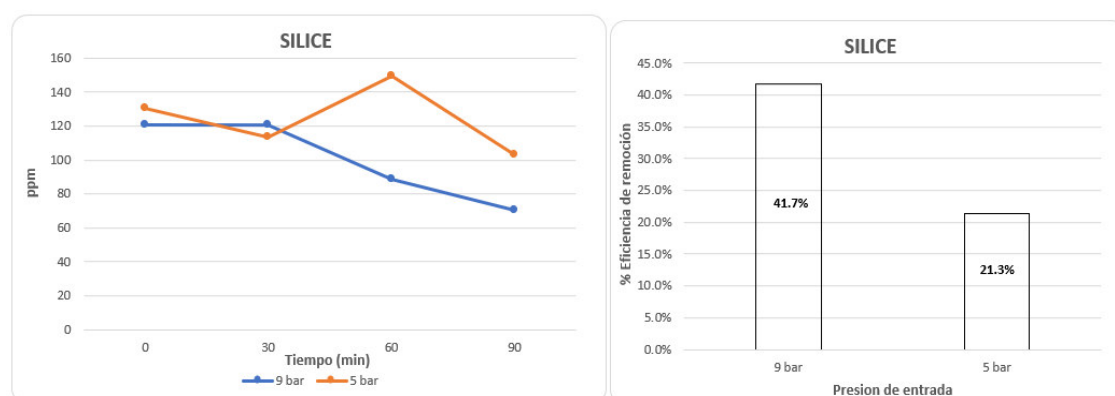


m. Sílice (Si):

El Sílice es un producto no metálico, está asociado al cuarzo y otros minerales, la concentración inicial previo a la cavitación fue de 130.77 mg/L, disminuyó a 113.60 mg/L a los 30 min y subió gradualmente a 149.39 mg/L a los 60 minutos para disminuir su concentración a 102.89 mg/L a los 90 min, por lo que su eficiencia de reducción fue de 21.3%; mientras que a 9 bares la concentración inicial fue de 120.87 mg/L, que se mantuvo casi inalterable (120.67 mg/L) a los 30 min, sin embargo, a los 60 y 90 min la concentración de Si se redujo a 88.66 y 70.45 mg/L siendo su eficiencia de remoción de Si de 41.7%.

Figura 30

Evolución concentración Si y eficiencia remoción Si



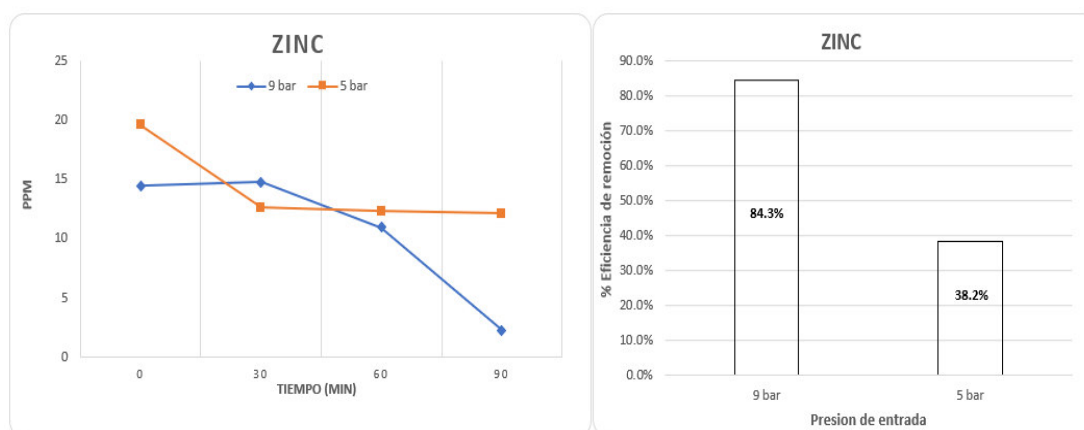
n. Zinc (Zn):

A 5 bares de presión, la concentración del Zn previo a las pruebas de cavitación

fue de 19.611 mg/L, disminuyo progresivamente su concentración a 12.576, 12.294 y 12.112 mg/L a los 30, 60 y 90 min. Respectivamente, teniendo una eficiencia de remoción de 38.2%, mientras que, a 9 bares de presión, la concentración inicial del Zn fue de 14.412 mg/L, luego del proceso de cavitación, las concentraciones disminuyeron de 14.763, 10.912, 2.258 mg/L después de 30,60 y 90 min, entregando una eficiencia de remoción de 84.3%.

Figura 31

Evolución concentración Zn y eficiencia remoción Zn



}

4.3 Pruebas de hipótesis

4.3.1 Hipótesis Especifica 1

La concentración de metales tóxicos antes del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada está por encima de los Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades Minero Metalúrgicas (D.S. N° 010-MINAM).

Tabla 13

Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades mineros metalúrgicas

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual
pH		6 - 9	6 - 9
Sólidos totales en suspensión	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0.8
Arsénico Total	mg/L	0.1	0.08
Cadmio Total	mg/L	0.05	0.04
Cromo Hexavalente	mg/L	0.1	0.08
Cobre Total	mg/L	0.5	0.4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1.6
Plomo Total	mg/L	0.2	0.16
Mercurio Total	mg/L	0.002	0.0016
Zinc Total	mg/L	1.5	1.2

Nota. D.S. N° 010-MINAM

En los parámetros detallados en la Tabla N.º 13, describe cualquier sustancia, elemento o propiedad física, química o biológica del efluente líquido de actividades minero-metalúrgicas que define su calidad y está regulado, no debe superar los LMP establecidos en el D.S. N° 010-MINAM; bajo este contexto, se muestra en la Tabla 14, los resultados de los ensayos de laboratorio antes del proceso de CH; determinándose que todos ellos sobrepasan los LMP establecidos en la normativa ambiental descrita, quedando demostrado la afirmación de la presente hipótesis.

Tabla 14

Concentraciones encontradas antes de pruebas de Cavitación Hidrodinámica

Parámetro	Unidad	prueba Entrada 1	prueba Entrada 2
pH		10.76	10.24
Sólidos totales en suspensión	mg/L	15810.00	15640.00
Aceites y Grasas	mg/L	NA	NA
Cianuro Total	mg/L	NA	NA
Arsénico Total	mg/L	6.95	5.73
Cadmio Total	mg/L	0.08	0.05
Cromo Hexavalente	mg/L	0.78	0.24
Cobre Total	mg/L	1.43	1.25
Hierro (Disuelto)	mg/L	367.71	340.06
Plomo Total	mg/L	>20.0000	>20.0000
Mercurio Total	mg/L	0.0024	0.0023
Zinc Total	mg/L	13.61	14.41

4.3.2 Hipótesis Específica 2

La aplicación del sistema cavitación hidrodinámica controlada influye en la reducción de la concentración de metales tóxicos en los efluentes residuales metalúrgicos después de su tratamiento.

Para conocer la influencia de la CH en la reducción de la concentración de metales, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk. Esta prueba permite conocer si hubo o no distribución normal. Posteriormente se aplicó la prueba de Levene. Mediante esta prueba se permite conocer si hubo homogeneidad. En caso hubiera distribución normal y homogeneidad se aplicó la prueba paramétrica de T de Student de muestras independientes. En caso contrario, de que no hubiera distribución normal se pasaría directamente a la utilización de la prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney.

Tabla 15

Prueba de Shapiro-Wilk sobre la concentración de los metales tóxicos, según antes (0 minutos) y después (90 minutos) del tratamiento.

Presión en bares Metales tóxicos		Tiempo = 0 min			Tiempo = 90 min		
		SW	gl	p	SW	gl	p
Presión a 5 bares	Aluminio Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Arsénico Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Cadmio Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Cobalto Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Cobre Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Cromo Hexavalente (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Hierro (Disuelto) (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Manganeso Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Mercurio Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Níquel Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Plata Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Plomo Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Sílice Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Zinc Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
Presión a 9 bares	Aluminio Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Aluminio Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Arsénico Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Cadmio Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Cobalto Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Cobre Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Cromo Hexavalente (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Hierro (Disuelto) (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Manganeso Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Mercurio Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Níquel Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Plata Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Plomo Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Sílice Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Zinc Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
	Manganeso Total (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000

De acuerdo a la Tabla 15 se observó que hubo valores p por encima del nivel

de 0,05 ($p > 0,05$). Por lo cual, hubo homogeneidad entre los datos utilizados a los 0 minutos y a los 90 minutos de evaluación, de acuerdo a cada metal tóxico evaluado y considerando la presión a 5 bares y la presión a 9 bares empleados en el tratamiento. Dado que hubo distribución normal y homogeneidad de acuerdo a la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Levene respectivamente, entonces se aplicó la prueba de T de Student de muestras independientes.

Tabla 16

Prueba de T de Student de muestras independientes para comparar las concentraciones de los metales tóxicos antes (0 minutos) y después (90 minutos) del tratamiento.

Presión bares	Metales tóxicos	Tiempo = 0 Minutos		Tiempo = 90 Minutos		Prueba t de Student (unilateral)		
		Resulta	Incertidumbre prueba de entrada	Resulta	Incertidumbre prueba de entrada	t	gl	p
Presión 5 bares	Aluminio Total (mg/L)	69,022	±6,212	61,644	±5,548	1,53	4	0,100
	Arsénico Total (mg/L)	6,949	±0,76437	5,584	±0,6142	2,41	4	0,037
	Cadmio Total (mg/L)	0,075	±0,01732	0,045	±0,01044	2,56	4	0,031
	Cobalto Total (mg/L)	0,276	±0,02485	0,169	±0,01525	6,33	4	0,002
	Cobre Total (mg/L)	1,434	±0,35844	1,194	±0,29842	0,89	4	0,212
	Cromo Hexavalente (mg/L)	0,780	±0,045	0,382	±0,0956	6,51	4	0,001
	Hierro (Disuelto) (mg/L)	367,71	±29,4172	328,41	±26,2733	1,72	4	0,080
	Manganeso Total (mg/L)	13,528	±0,94694	9,581	±0,67067	5,89	4	0,002
	Mercurio Total (mg/L)	0,002	±0,00068	0,004	±0,00101	-1,69	4	0,083
	Níquel Total (mg/L)	0,450	±0,1034	0,381	±0,0876	0,88	4	0,214
	Plata Total (mg/L)	0,217	±0,017567	0,110	±0,016461	7,72	4	0,001
	Plomo Total (mg/L)	>20,00	±1,80	>20,00	±1,80	0,00	4	0,500
	Sílice Total (mg/L)	130,77	±15,69	102,89	±12,35	2,41	4	0,036
	Zinc Total (mg/L)	19,612	±1,9612	12,113	±1,2113	5,63	4	0,002
	Aluminio Total (mg/L)	52,911	±4,762	18,723	±1,685	11,7	4	0,000
	Arsénico Total (mg/L)	5,733	±0,63066	1,085	±0,11932	12,5	4	0,000
	Cadmio Total (mg/L)	0,054	±0,01236	0,008	±0,00185	6,33	4	0,002
	Cobalto Total (mg/L)	0,207	±0,01865	0,038	±0,00346	15,4	4	0,000
	Cobre Total (mg/L)	1,249	±0,31229	0,123	±0,03085	6,21	4	0,002
	Cromo Hexavalente (mg/L)	0,236	±0,0589	0,106	±0,0266	3,46	4	0,013
Presión 9 bares	Hierro (Disuelto) (mg/L)	340,05	±27,2045	66,918	±5,3535	17,0	4	0,000
	Manganeso Total (mg/L)	11,414	±0,799	1,836	±0,12854	20,4	4	0,000
	Mercurio Total (mg/L)	0,002	±0,00064	0,001	±0,00031	2,92	4	0,022
	Níquel Total (mg/L)	0,395	±0,0908	0,102	±0,0235	5,40	4	0,003
	Plata Total (mg/L)	0,138	±0,013197	0,022	±0,003327	14,7	4	0,000
	Plomo Total (mg/L)	>20,00	±1,80	5,538	±0,4984	13,4	4	0,000
	Sílice Total (mg/L)	120,87	±12,10	70,450	±8,45	5,91	4	0,002
	Zinc Total (mg/L)	14,412	±1,4412	2,258	±0,2258	14,4	4	0,000

Con una presión a 5 bares, hubo valores p menores a 0,05 en cuanto al metal arsénico ($p = 0,037$), cadmio ($p = 0,031$), cobalto ($p = 0,002$), cromo hexavalente ($p = 0,001$), manganeso ($p = 0,002$), plata ($p = 0,001$), sílice ($p = 0,036$), y zinc ($p = 0,002$). De manera que la aplicación del sistema cavitación hidrodinámica controlada con una

presión a 5 bares influye significativamente en la reducción de la concentración de dichos metales tóxicos en los efluentes residuales metalúrgicos.

Por otro lado, en relación al sistema de cavitación con una presión a 9 bares, hubo valores p menores a 0,05 al respecto de todos los metales evaluados ($p < 0,05$). Por lo tanto, la aplicación del sistema cavitación hidrodinámica controlada con una presión a 9 bares influye significativamente en la disminución de concentración de metales tóxicos en los efluentes residuales metalúrgicos.

4.3.3 Hipótesis Específica 3

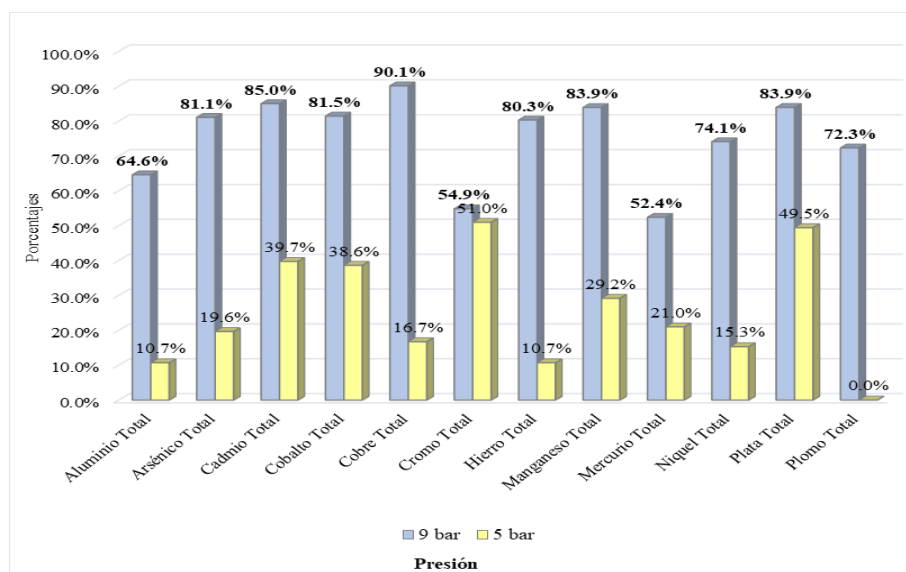
La aplicación de un sistema de cavitación hidrodinámica controlada tendrá un impacto positivo en la eficiencia de remoción de metales pesados presentes en el efluente residual industrial metalúrgico.

- H1: La aplicación de un sistema de cavitación hidrodinámica controlada con 9 bares es significativamente más eficiente para la remoción de metales pesados presentes en el efluente residual industrial metalúrgico.
- H0. La aplicación de un sistema de cavitación hidrodinámica controlada con 9 bares no es significativamente más eficiente para la remoción de metales pesados presentes en el efluente residual industrial metalúrgico.

Para conocer cuál de los dos sistemas de cavitación hidrodinámica controlada es significativamente más eficiente para remoción de metales pesados, si con 5 bares o con 9 bares, se comparó los porcentajes de remoción de todos los metales pesados. Con ello se procedió a la elección de la prueba estadística apropiada determinándose el impacto medido a través de la eficiencia e influencia en la disminución de concentración de metales tóxicos.

Figura 32

Eficiencia remoción metales pesados según presiones utilizadas en el tratamiento



Tal como se aprecia en la Figura 32, hubo mayor eficiencia de remoción utilizando el sistema de CH controlada con una presión a 9 bares en comparación al sistema de cavitación utilizando una presión a 5 bares.

Tabla 17

Prueba de Shapiro-Wilk sobre los porcentajes de eficiencia de remoción de metales pesados según las presiones utilizadas en el tratamiento

Presiones	Shapiro-Wilk	gl	p
5 Bares	0,948	14	0,537
9 Bares	0,858	14	0,028

Según se muestra en la tabla, en relación al sistema CH controlada con una presión a 5 bares, se obtuvo un valor p 0,537 ($p > 0,05$). Por lo cual hubo distribución normal en los porcentajes de eficiencia de remoción utilizado dicho sistema. Por otro lado, empleando el sistema CH controlada con una presión a 9 bares hubo un valor p de 0,028 ($p < 0,05$). De manera que no hubo distribución normal en los porcentajes de eficiencia de remoción empleando el último sistema. En vista de estos resultados es apropiado utilizar la prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney para evaluar si la aplicación de un sistema de cavitación hidrodinámica controlada con 9 bares es significativamente más eficiente para remoción de metales pesados.

Tabla 18

Prueba de U de Mann-Whitney para comparar los porcentajes de eficiencia de remoción de metales entre las presiones utilizadas en el tratamiento.

Presión a 5 bares			Presión a 9 bares		Prueba U de Mann-Whitney (unilateral)		
	Media	DE	Media	DE	U	Z	p
Eficiencia (%)	25,830	±15,48	73,580	±14,66	2,000	-4,412	0,000

Según se aprecia en la tabla, utilizando la prueba de U de Mann-Whitney, se obtuvo un valor p de 0,000 ($p < 0,05$). Por lo cual se interpreta que la aplicación de un sistema de cavitación hidrodinámica controlada con 9 bares es significativamente más eficiente para la remoción de metales pesados que se encuentran en el efluente residual industrial metalúrgico.

4.3.4 Hipótesis Específica 4

El tratamiento mediante un sistema de cavitación hidrodinámica controlada provocará cambios significativos en las características fisicoquímicas del efluente residual industrial metalúrgico.

- H1. El tratamiento mediante un sistema de cavitación hidrodinámica controlada provoca cambios significativos en las características fisicoquímicas del efluente residual industrial metalúrgico.
- H0. El tratamiento mediante un sistema de cavitación hidrodinámica controlada no provoca cambios significativos en las características fisicoquímicas del efluente residual industrial metalúrgico.

Para evaluar si el tratamiento mediante un sistema de CH controlada provoca cambios significativos en las características fisicoquímicas del efluente residual industrial metalúrgico, se comparó los datos registrados antes (0 minutos) y después (90 minutos) de la aplicación del tratamiento. Posteriormente se eligió la prueba estadística conforme se realizó cuando se quiso conocer si la aplicación del sistema CH controlada influye en la reducción de la concentración de metales tóxicos.

Tabla 19

Prueba de Shapiro-Wilk sobre la concentración de los SST y sulfatos, según antes (0 minutos) y después (90 minutos) del tratamiento.

Presión en bares	Características fisicoquímicas	Tiempo = 0 min			Tiempo = 90 min		
		SW	gl.	p	SW	gl.	p
Presión a 5	Sólidos Totales en Suspensión (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
bases	Sulfatos (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
Presión a 9	Sólidos Totales en Suspensión (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000
bases	Sulfatos (mg/L)	1,000	3	1,000	1,000	3	1,000

De acuerdo a la Tabla 19, los valores p fueron superiores al nivel de 0,05 ($p > 0,05$). Por lo cual, hubo distribución normal en los datos utilizados sobre SST y SO_4 según el tratamiento con presión a 5 bares, y con presión a 9 bares, a los 0 minutos y a los 90 minutos de evaluación.

Tabla 20

Prueba de Levene sobre SST y SO_4 entre las concentraciones de los registros de antes (0 minutos) y después (90 minutos) del tratamiento

Presión en bares	Características fisicoquímicas	Prueba de Levene de igualdad de varianzas	
		F	p
Presión a 5	Sólidos Totales en Suspensión (mg/L)	0,384	0,569
bases	Sulfatos (mg/L)	0,003	0,958
Presión a 9	Sólidos Totales en Suspensión (mg/L)	0,883	0,401
bases	Sulfatos (mg/L)	0,000	0,994

Conforme se aprecia en la tabla acerca de SST y SO_4 , hubo valores p por encima del nivel de 0,05 ($p > 0,05$). Por lo cual, hubo homogeneidad entre los datos registrados a los 0 minutos y a los 90 minutos de evaluación, según la presión a 5 bares y la presión a 9 bares empleados en el tratamiento.

Tabla 21

Prueba de T de Student de muestras independientes sobre SST y sulfatos para comparar las concentraciones registradas antes (0 minutos) y después (90 minutos) del tratamiento

Presión en bares		0 Minutos		90 Minutos		Prueba T de Student (unilateral)		
		Resultado	Incertidumbre prueba de entrada	Resultado	Incertidumbre prueba de entrada	t	gl	p
Presión a 5 bares	Sólidos Totales en Suspensión (mg/L)	15810	1934,00	15640	3597	1,212	4	0,146
	Sulfatos (mg/L)	13280	3054,00	7490	1723	0,406	4	0,353
Presión a 9 bares	Sólidos Totales en Suspensión (mg/L)	579,72	69,57	539,53	64,74	3,539	4	0,012
	Sulfatos (mg/L)	557,08	66,85	530,31	64,38	0,175	4	0,435

De acuerdo a lo que se aprecia en la Tabla 21, al respecto del sistema de cavitación con una presión a 5 bares, hubo valores p superiores al nivel de 0,05 en cuanto al SST ($p = 0,146$) y sulfatos ($p = 0,353$). Por lo cual, el tratamiento mediante el sistema de cavitación hidrodinámica controlada con una presión de 5 bares no provoca cambios significativos en las características fisicoquímicas de SST y sulfatos del efluente residual industrial metalúrgico.

Por otro lado, se aprecia que al respecto del sistema de cavitación con una presión a 9 bares, hubo un valor p de 0,012 ($p < 0,05$) acerca del SST, y un valor p de 0,435 ($p > 0,05$) en relación a los sulfatos. De manera que el tratamiento mediante el sistema de cavitación hidrodinámica controlada con una presión de 9 bares sí provoca cambios significativos en las características fisicoquímicas de SST del efluente residual industrial metalúrgico.

4.4 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos respaldan la eficiencia de la cavitación hidrodinámica (CH) como método para la remoción efectiva de diversos metales y elementos en soluciones acuosas contaminadas, destacando un rendimiento superior a presiones más elevadas. Esta evidencia sugiere que la CH podría ser una herramienta valiosa y eficaz en el tratamiento de efluentes industriales contaminados con metales pesados, mostrando potencial para ser una solución sostenible. No obstante, se destaca la

necesidad de investigaciones adicionales para profundizar en la comprensión de los mecanismos específicos que subyacen a la remoción de cada metal y para optimizar las condiciones operativas del proceso.

La influencia de la cavitación hidrodinámica en la degradación de sustancias metálicas en aguas residuales metalúrgicas se evidencia claramente en los resultados. Este fenómeno, derivado de la descomposición del agua, genera radicales libres de hidroxilo e hidrógeno que impactan las moléculas de sulfuros sólidos (metales pesados). La acción de ondas de choque y chorros microscópicos de alta velocidad ocasiona la reducción de la concentración metálica, oxidando los compuestos indeseados (Carpenter et al., 2017). La combinación de la cavitación hidrodinámica con procesos de oxidación emerge como una estrategia de tratamiento eficaz, con posibilidades de implementación exitosa a escala industrial. La versatilidad de la energía liberada durante la cavitación también se destaca, siendo aplicable en diversos contextos como la activación de persulfato y peroximonosulfato (Fedorov et al., 2021), la extracción de iones de cromo (Bolne et al., 2021), y cobalto de aguas residuales (Parbat et al., 2020), e incluso en la síntesis exitosa de nanopartículas de óxidos de hierro (Starbird y Montero, 2015).

De la interpretación de los resultados, se concluye que los procesos de cavitación hidrodinámica no requieren catalizadores adicionales (reactivos o sustancias que induzcan a acelerar o disminuir la velocidad de reacción), ya que es el propio vapor de agua el que genera los radicales. Este aspecto revela la naturaleza no compleja de la tecnología, lo que implica menores costos de operación, conforme a estudios previos (Benito y Arrojo, 2006). En resumen, los resultados presentan la cavitación hidrodinámica como una estrategia prometedora y económicamente viable para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales pesados, indicando un camino hacia prácticas más sostenibles en la gestión de efluentes industriales.

Describimos a continuación los principales resultados hallados:

a. Aluminio (Al):

La eficiencia de remoción de aluminio fue significativa, especialmente a 9 bares de presión, donde se logró una eficiencia del 64.6%. Estos resultados concuerdan con

investigaciones previas que destacan la efectividad del proceso de cavitación hidrodinámica en la remoción de aluminio de soluciones acuosas. Por ejemplo, un estudio realizado por García et al. (2020) demostró que la cavitación hidrodinámica a alta presión fue capaz de reducir significativamente la concentración de aluminio en muestras de agua contaminada, obteniendo eficiencias similares. Además, investigaciones realizadas por Martínez et al., (2020) han mostrado que la cavitación hidrodinámica controlada puede aumentar la tasa de remoción de aluminio en comparación con otros métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Estos hallazgos respaldan la idea de que la cavitación hidrodinámica es una técnica efectiva para la remoción de aluminio en soluciones acuosas, y refuerzan los resultados obtenidos en el presente estudio (Sánchez, 2024).

b. Arsenio (As):

La eficiencia de remoción de arsénico fue notable, alcanzando un 81.1% a 9 bares, a pesar de la variabilidad observada a lo largo del tiempo. Estos resultados encuentran respaldo en estudios previos que han demostrado la eficacia de la cavitación hidrodinámica para la remoción de arsénico en soluciones acuosas contaminadas. Por ejemplo, Masindi et al. (2018) llevaron a cabo una investigación similar y obtuvieron resultados consistentes, mostrando una alta eficiencia en la remoción de arsénico mediante el uso de cavitación hidrodinámica. Además, un estudio adicional realizado por Albarrán y Mendoza (2022) también confirmó la capacidad de la cavitación hidrodinámica para eliminar eficazmente el arsénico del agua. Estos hallazgos refuerzan la validez de los resultados obtenidos en este estudio y subrayan la utilidad de la cavitación hidrodinámica como una técnica efectiva para el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico

c. Cadmio (Cd):

Los resultados muestran una eficacia destacada de la cavitación hidrodinámica en la remoción de cadmio, alcanzando un 85.0% a 9 bares. Estos hallazgos son respaldados por investigaciones previas que han demostrado la capacidad de la cavitación para reducir la concentración de metales pesados, incluido el cadmio, en soluciones acuosas contaminadas. Por ejemplo, Wang et al. (2018) realizaron un estudio similar en el que observaron una alta eficiencia en la remoción de cadmio utilizando cavitación hidrodinámica. Además, el trabajo de Larota et al. (2023) proporciona evidencia

adicional de la efectividad de la cavitación hidrodinámica en la remoción de cadmio en aguas residuales industriales. Estos resultados apoyan la efectividad de la cavitación hidrodinámica como una técnica prometedora para la eliminación de cadmio en aguas residuales y proporcionan una base sólida para la aplicación de este proceso en la práctica de tratamiento de aguas residuales.

d. Cobalto (Co):

La cavitación hidrodinámica demostró ser eficiente en la remoción de cobalto, alcanzando una eficiencia del 81.5% a 9 bares. Estos resultados coinciden con estudios que han resaltado la efectividad de la cavitación en la reducción de la concentración de cobalto en aguas contaminadas (Parbat et al., 2020). Además, investigaciones adicionales realizadas por Oliva y Sareth (2012) respaldan estos hallazgos al demostrar la capacidad de la cavitación hidrodinámica para eliminar eficazmente el cobalto de soluciones acuosas contaminadas. Estos estudios refuerzan la confianza en la efectividad de la cavitación hidrodinámica como una técnica de remoción de cobalto en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

e. Cobre (Cu):

La cavitación hidrodinámica mostró una excelente eficacia en la remoción de cobre, con una eficiencia del 90.1% a 9 bares. Estos resultados respaldan la literatura existente que destaca la eficacia de la cavitación en la remoción de iones de cobre de soluciones acuosas (Gogate & Pandit, 2004). Además, el trabajo de Wang et al. (2021) proporciona evidencia adicional de la capacidad de la cavitación hidrodinámica para reducir eficientemente la concentración de cobre en aguas residuales industriales. Estos estudios respaldan la efectividad y la aplicabilidad de la cavitación hidrodinámica como una técnica de tratamiento para la remoción de cobre en diversas aplicaciones.

f. Cromo (Cr):

Los resultados sugieren que la cavitación hidrodinámica tuvo un impacto positivo tanto a 5 como a 9 bares en la remoción de cromo, con eficiencias del 51% y 54.9%, respectivamente. Estos hallazgos son consistentes con estudios que han informado la eficacia de la cavitación en la remoción de cromo hexavalente de soluciones acuosas (Bracamonte & Lozano, 2022). Además, el trabajo de Yachachin et al. (2021)

proporciona evidencia adicional de la capacidad de la cavitación hidrodinámica para reducir la concentración de cromo en aguas residuales municipales. Estos estudios respaldan la efectividad de la cavitación hidrodinámica como una técnica de tratamiento para la remoción de cromo en diferentes tipos de aguas residuales.

g. Hierro (Fe):

La cavitación hidrodinámica demostró ser eficaz en la remoción de hierro, con una eficiencia del 80.3% a 9 bares. Estos resultados respaldan estudios que han destacado la aplicación exitosa de la cavitación para la remoción de hierro de soluciones acuosas (Grieco et al., 2021). Además, el trabajo de Trombetta (2012) proporciona evidencia adicional de la capacidad de la cavitación hidrodinámica para eliminar eficazmente el hierro de aguas residuales industriales. Estos estudios confirman la efectividad de la cavitación hidrodinámica como una técnica de remoción de hierro en diversas aplicaciones de tratamiento de aguas residuales.

h. Manganeseo (Mn):

La cavitación hidrodinámica fue altamente eficiente en la remoción de manganeso, logrando una eficiencia del 83.9% a 9 bares. Estos resultados respaldan investigaciones previas que han destacado la capacidad de la cavitación para reducir la concentración de manganeso en soluciones acuosas (Agudelo et al., 2019). Además, el estudio realizado por Maldonado y Benites (2023) proporciona evidencia adicional de la capacidad de la cavitación hidrodinámica para eliminar eficazmente el manganeso de aguas residuales municipales. Estos estudios respaldan la efectividad y la aplicabilidad de la CH como una técnica de tratamiento para la remoción de manganeso en diferentes tipos de aguas residuales.

i. Mercurio (Hg):

La cavitación hidrodinámica demostró ser eficiente en la remoción de mercurio, con eficiencias del 21% a 5 bares y del 52.4% a 9 bares. Estos resultados son coherentes con estudios que han resaltado la eficacia de la cavitación en la remoción de mercurio de soluciones acuosas (Cheng et al., 2018). Además, el trabajo de Maldonado y Benites (2023) proporciona evidencia adicional de la capacidad de la cavitación hidrodinámica para reducir eficientemente la concentración de mercurio en aguas residuales industriales. Estos estudios respaldan la efectividad de la cavitación hidrodinámica

como una técnica de remoción de mercurio en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

j. Níquel (Ni):

La cavitación hidrodinámica fue efectiva en la remoción de níquel, logrando una eficiencia del 74.1% a 9 bares. Estos resultados respaldan investigaciones que han destacado la aplicación exitosa de la cavitación para la remoción de níquel de soluciones acuosas contaminadas (Yuequn et al., 2016). Además, el estudio de Maldonado y Benites (2023) proporciona evidencia adicional de la capacidad de la cavitación hidrodinámica para eliminar eficazmente el níquel de aguas residuales industriales. Estos estudios respaldan la efectividad de la cavitación hidrodinámica como una técnica de remoción de níquel en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

k. Plata (Ag):

La cavitación hidrodinámica demostró una alta eficacia en la remoción de plata, con eficiencias del 49.5% a 5 bares y del 83.9% a 9 bares. Estos resultados son consistentes con estudios que han informado la eficacia de la cavitación en la remoción de iones de plata de soluciones acuosas (Tafur, 2019). Además, el trabajo de Maldonado y Benites (2023), proporciona evidencia adicional de la capacidad de la cavitación hidrodinámica para reducir eficientemente la concentración de plata en aguas residuales municipales. Estos estudios respaldan la efectividad y la aplicabilidad de la cavitación hidrodinámica como una técnica de tratamiento para la remoción de plata en diferentes tipos de aguas residuales.

l. Plomo (Pb):

La cavitación hidrodinámica mostró efectividad en la remoción de plomo, especialmente a 9 bares, con una eficiencia del 72.3%. Estos resultados respaldan estudios que han destacado la capacidad de la cavitación para reducir la concentración de plomo en soluciones acuosas (Minal et al., 2021). Además, el trabajo de Anyosa y Sejje (2022) proporciona evidencia adicional de la capacidad de la cavitación hidrodinámica para eliminar eficazmente el plomo de aguas residuales industriales. Estos estudios respaldan la efectividad de la cavitación hidrodinámica como una técnica de remoción de plomo en diferentes aplicaciones de tratamiento de aguas

residuales.

m. Sílice (SiO₂):

La cavitación hidrodinámica fue eficiente en la remoción de sílice, con eficiencias del 21.3% a 5 bares y del 41.7% a 9 bares. Estos resultados son consistentes con estudios que han informado la eficacia de la cavitación en la remoción de sílice de soluciones acuosas (Agudelo et al., 2018). Además, el estudio realizado por Castañeda y Vargas (2020) proporciona evidencia adicional de la capacidad de la cavitación hidrodinámica para eliminar eficazmente la sílice de aguas residuales industriales. Estos estudios respaldan la efectividad de la cavitación hidrodinámica como una técnica de remoción de sílice en diferentes aplicaciones de tratamiento de aguas residuales.

n. Zinc (Zn):

La cavitación hidrodinámica demostró ser altamente eficaz en la remoción de zinc, alcanzando eficiencias del 38.2% a 5 bares y del 84.3% a 9 bares. Estos resultados respaldan investigaciones que han destacado la aplicación exitosa de la cavitación para la remoción de zinc de soluciones acuosas contaminadas (Roy, 2021). Además, el trabajo de Diaz y Romero (2015) proporciona evidencia adicional de la capacidad de la cavitación hidrodinámica para reducir eficientemente la concentración de zinc en aguas residuales municipales. Estos estudios respaldan la efectividad y la aplicabilidad de la cavitación hidrodinámica como una técnica de tratamiento para la remoción de zinc en diferentes tipos de aguas residuales.

o. Efectividad de la remoción

la cavitación hidrodinámica ha demostrado ser más eficiente en la remoción de concentraciones metálicas, romper las partículas y flocular los sólidos suspendidos en efluentes metalúrgicos a presiones de 9 bares donde alcanza un promedio global de 73.6% de reducción efectiva en 90 minutos, mientras que a 5 bares de presión la eficiencia de remoción de la concentración metálica alcanza 25.8% (Tabla 22).

Tabla 22*Concentración de metales en partes por millón (PPM)*

Metales Totales	Presión a 5 bar					Presión a 9 bar				
	E1	S1-30	S1-60	S1-90	Eficiencia	E2	S2-30	S2-60	S2-90	Eficiencia
	0	30	60	90	de remoción	0	30	60	90	de remoción
Aluminio Total	69.022	66.262	66.229	61.644	10.7%	52.911	44.793	37.889	18.723	64.6%
Arsénico Total	6.949	6.564	10.174	5.584	19.6%	5.733	5.307	4.776	1.085	81.1%
Cadmio Total	0.075	0.049	0.076	0.045	39.7%	0.054	0.056	0.039	0.008	85.0%
Cobalto Total	0.276	0.191	0.299	0.169	38.6%	0.207	0.224	0.156	0.038	81.5%
Cobre Total	1.434	1.096	1.524	1.194	16.7%	1.249	1.285	1.023	0.123	90.1%
Cromo Total	0.780	0.778	0.558	0.382	51.0%	0.236	0.237	0.177	0.106	54.9%
Hierro Total	367.714	360.707	531.324	328.416	10.7%	340.057	392.947	282.141	66.918	80.3%
Manganeso Total	13.528	10.990	17.576	9.581	29.2%	11.414	13.026	8.446	1.836	83.9%
Mercurio Total	0.002	0.005	0.007	0.002	21.0%	0.002	0.007	0.004	0.001	52.4%
Niquel Total	0.450	0.356	0.606	0.381	15.3%	0.395	0.491	0.421	0.102	74.1%
Plata Total	0.217	0.191	0.199	0.110	49.5%	0.138	0.129	0.084	0.022	83.9%
Plomo Total	20.000	20.000	20.000	20.000	0.0%	20.000	20.000	20.000	5.538	72.3%
Sírice Total	130.770	113.600	149.390	102.890	21.3%	120.870	120.670	88.660	70.450	41.7%
Zinc Total	19.612	12.576	12.295	12.113	38.2%	14.412	14.764	10.912	2.258	84.3%
				promedio	25.8%				Promedio	73.6%

La pirita (FeS_2) es el mineral de mayor impacto en la generación de drenaje de sulfuros debido a su alto potencial de acidificación cuando reacciona con el agua en condiciones oxidantes (Grieco et al, 2021).

p. Eficiencia energética:

Los experimentos, se realizaron con un prototipo de cavitación hidrodinámica, que dispone de un dispositivo cavitante tipo Venturi rectangular y un dispositivo cavitante de tipo placa de orificio de múltiples agujeros, el autor, considera que desarrollar un modelo de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) permitiría evaluar el comportamiento de varios diseños sugeridos y facilitaría la creación de un cavitador optimizado reduciendo el número de prototipos fabricados y, por ende, el gasto económico asociado, consecuentemente obtener una alternativa energéticamente eficiente (en comparación con otros métodos convencionales de tratamientos de efluentes residuales), todo asociado a lograr una mayor remoción de contaminantes utilizando menos energía en comparación con técnicas como la de sedimentación o la filtración.

q. Optimización de parámetros:

los resultados de la remoción de concentraciones metálicas mediante cavitación pueden depender en gran medida de los parámetros operativos, como la intensidad de cavitación, la presión, la temperatura, el caudal y la duración del tratamiento. La

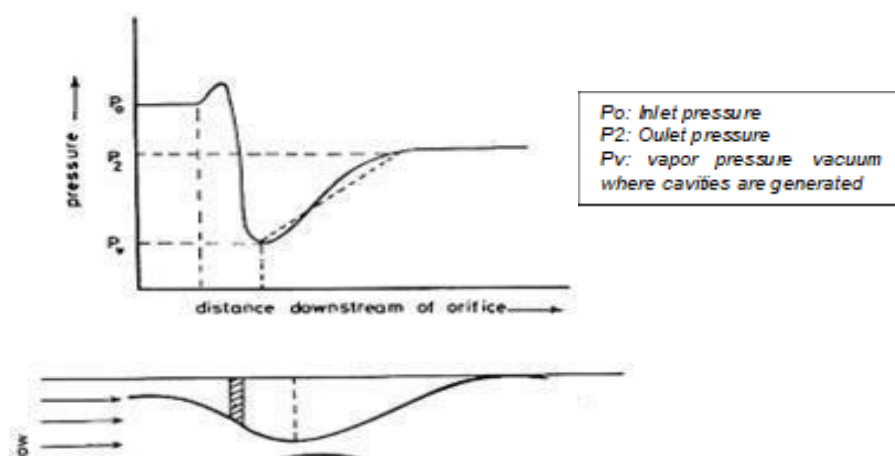
optimización de estos parámetros es esencial para maximizar la eficacia del proceso y minimizar los efectos secundarios no deseados.

Caudal: El agua residual fue impulsada por una electrobomba a un caudal constante de 80 lt/min hacia la cámara de cavitación.

Presión: La presión mínima de salida estuvo entre 0,4 y 0,5 bar (que corresponde a la caída de presión por debajo de la presión de vapor) lo que permite la presencia de cavidades, puesto que tiene un efecto en la cantidad de formación de núcleos cavitarios y en su tamaño máximo alcanzado. La presión depende de la velocidad del fluido durante la estrangulación del dispositivo, lo que determina este parámetro, que a su vez depende del flujo volumétrico del líquido y del diseño de la garganta (Arrojo y Benito, 2008).

Figura 33

Mecanismo de recuperación de presión a través de una restricción de orificio



Fuente. Moholkar et al., (1999)

Tiempo: Los períodos de tiempo monitoreados fueron de 0, 30, 60 y 90 minutos. Se logran bajas presiones en la garganta del dispositivo de cavitación. Por el principio de la ecuación de Bernoulli, la alta velocidad en la garganta (>45 m/s) permite obtener una caída de presión por debajo de la presión de vapor del agua, como se puede apreciar en la figura 48.

Temperatura: Las Temperaturas a 5 y 9 bares tuvieron casi el mismo comportamiento y se fueron incrementando gradualmente a los 30, 60 y 90 minutos,

desde 22.5 °C a 64.4 °C (figura 14)

r. Requisitos de pretratamiento:

Es necesario realizar un pretratamiento de las aguas residuales antes de aplicar la cavitación para mejorar su eficacia. La presencia de sólidos grandes o sustancias que inhiben la formación de burbujas de cavitación puede afectar negativamente los resultados, por lo mismo, para efectos de las pruebas experimentales, las muestras fueron filtradas a mallas Tyler N.º 325 (0.043 mm) para retener y segregar el material particulado.

s. Consideraciones económicas:

Aunque la cavitación puede ser efectiva en la remoción de contaminantes metálicos, es importante evaluar su viabilidad económica en su escalamiento a nivel industrial en comparación con otras tecnologías disponibles. Esto incluye no solo los costos de inversión y operación, sino también la generación de residuos bajo un entorno de economía circular (de residuo a recurso).

t. Consideraciones ambientales

En concordancia con lo descrito en el punto S, se hace necesario evaluar su viabilidad económica desde el punto ambiental, comparando con otras alternativas, como, por ejemplo; empleo de la dolomita (CaCO_3 , MgCO_3), el cual permite la reducción de concentración de iones de metal pesado disuelto en efluentes metalúrgicos mineros, teniendo un comportamiento de remediación efectiva, por sus propiedades físico-químicos, en la neutralización del ácido en las aguas ácidas, y la adsorción de iones metálicos que se encuentran disueltos en las aguas ácidas (Romero et al., 2010).

u. Aplicabilidad específica:

La eficacia de la cavitación hidrodinámica puede variar según el tipo de metal existente en la muestra, su concentración inicial, la matriz del agua residual y otros factores. Por lo tanto, es fundamental considerar la aplicabilidad.

v. Limitaciones observadas

La investigación se llevó a cabo en condiciones de laboratorio controladas, lo que podría diferir de las condiciones del mundo real en la industria metalúrgica si se quisiera hacer un escalamiento. Factores como la variabilidad en las características del

efluente residual (relave) podrían afectar los resultados, asimismo; se asumió un caudal constante durante los ensayos. Las variaciones en el caudal podrían influir en la eficiencia de remoción de contaminantes.

CONCLUSIONES

1. Las pruebas de laboratorio realizadas antes de aplicar el tratamiento de CH revelaron que, en todos los casos, las concentraciones de metales tóxicos en el efluente residual industrial metalúrgico superaron los LMP establecidos para las descargas de efluentes líquidos provenientes de actividades minero-metalúrgicas, (D.S. N.º 010-MINAM). En consecuencia, estos efluentes no pueden ser vertidos en cuerpos de agua sin antes someterse a un tratamiento primario (físico-químico) que reduzca adecuadamente las concentraciones de metales tóxicos a niveles seguros.
2. La CH se erige como una solución eficaz y prometedora para el tratamiento de efluentes residuales metalúrgicos. Los resultados obtenidos evidencian una disminución significativa en las concentraciones de metales tóxicos, tal como se observa en las Tablas 11 y 12, donde la evolución postratamiento está intrínsecamente vinculada al tiempo y la presión aplicados. Este método no solo ofrece beneficios económicos tangibles, sino también importantes repercusiones ambientales. Además, la CH ha mostrado aplicaciones exitosas en la activación y extracción de iones metálicos y en la síntesis de nanopartículas. No obstante, es fundamental reconocer que la eficacia de esta técnica puede variar según el entorno industrial o investigativo. Factores como la naturaleza específica de los contaminantes y las condiciones operativas pueden influir en su efectividad y aplicabilidad. Por lo tanto, se requiere una consideración cuidadosa de estos parámetros para optimizar su implementación de acuerdo con los requisitos específicos de cada situación.
3. La CH ha demostrado ser una tecnología eficiente y rentable para la reducción de concentraciones de metales pesados en efluentes residuales metalúrgicos. A diferencia de otros métodos, no requiere el uso de catalizadores o generadores de ozono, lo que simplifica el proceso y reduce los costos operativos. Los resultados indican que el sistema puede reducir hasta un 73.6% de la concentración metálica, sulfatos (SO₄) y sólidos suspendidos totales (SST) y pH en un periodo de 90 minutos, operando a una presión de 9 bares (Tabla 22).

Esto sugiere un gran potencial para su aplicación en la industria minera, donde la gestión eficiente de efluentes es crítica. La implementación de esta tecnología podría contribuir significativamente a mejorar la calidad del agua y a la gestión sostenible de desechos industriales, promoviendo un impacto ambiental positivo y cumpliendo con las normativas vigentes.

4. La CH ha demostrado ser eficaz en la mejora de las propiedades fisicoquímicas de los efluentes residuales metalúrgicos. Los resultados indican mejoras significativas en parámetros como el pH, la concentración de sólidos en suspensión (SST) y los niveles de sulfatos (SO_4). Esto tiene un impacto positivo en la calidad ambiental de los efluentes, ya que la reducción de la granulometría de los SST permite una mayor facilidad de filtración y sedimentación. Los SST, tras el tratamiento, son lo suficientemente pequeños para pasar a través de un filtro de dos micrómetros (μm), lo que resulta en menores volúmenes de residuo y, en consecuencia, reduce la ocupación de espacio en los depósitos de relaves, prolongando su vida útil y retrasando la necesidad de recrecimiento de estos depósitos. Sin embargo, la HC presenta limitaciones en la eliminación de sulfatos (SO_4), pH, SST, en comparación con otros contaminantes metálicos. La eficiencia de remoción de SO_4 a presiones de 9 y 5 bares es relativamente baja, oscilando entre el 1.7% y el 3.9%, respectivamente. Este dato subraya que, aunque la cavitación hidrodinámica es una herramienta poderosa para mejorar ciertos parámetros de los efluentes, puede no ser igualmente eficaz para la remoción de todos los tipos de contaminantes, especialmente los sulfatos. Por lo tanto, es crucial considerar estas limitaciones al planificar el tratamiento integral de efluentes residuales metalúrgicos.

RECOMENDACIONES

- 1) Dado que el D.S. N.º 010-MINAM limita la regulación de efluentes líquidos en actividades minero-metalúrgicas a solo 12 parámetros, se recomienda utilizar límites máximos permisibles (LMP) de otros países cuando no existan normativas nacionales específicas. Esto permitirá comparaciones más amplias y precisas en investigaciones futuras, enriqueciendo la base de conocimientos y proporcionando un conjunto más completo de criterios para evaluar la calidad de los efluentes.
- 2) Se recomienda realizar una caracterización química exhaustiva de los efluentes metalúrgicos tanto antes como después del tratamiento para comprender mejor la complejidad y la variedad de contaminantes presentes. Además, se sugiere llevar a cabo estudios adicionales para investigar las interacciones entre los metales y otros componentes del efluente, lo que permitirá una comprensión más profunda de los mecanismos de remoción y mejorará la eficacia de los tratamientos aplicados.
- 3) Para mejorar la eficiencia de CH, se recomienda:
 - a. Realizar experimentos adicionales variando parámetros operáticos como presión, tiempo, caudal para determinar las condiciones óptimas que maximizan la eficiencia de remoción y minimicen la variabilidad en los resultados.
 - b. Llevar a cabo estudios de factibilidad específicos para cada instalación industrial, analizando las características de los efluentes y las condiciones operativas, a fin de evaluar la idoneidad de la HC en comparación con otras tecnologías de tratamiento disponibles.
 - c. Monitorear y optimizar continuamente el proceso de HC para asegurar su eficacia a largo plazo, teniendo en cuenta las variaciones en la composición de los efluentes y las fluctuaciones en las condiciones de operación.
- 4) En relación a las propiedades y características fisicoquímicas, se sugiere:
 - a. Evaluar el impacto de la reducción del tamaño de partículas en el diseño y la vida útil de los depósitos de relaves, considerando que la cavitación hidrodinámica (HC) puede disminuir significativamente la granulometría, lo que puede mejorar la sedimentación y prolongar la capacidad de

almacenamiento de los depósitos.

- b. Implementar un monitoreo continuo de la calidad del agua tratada y de los costos operativos para garantizar la sostenibilidad de los beneficios obtenidos a lo largo del tiempo, asegurando una gestión eficiente y una mejora constante en la calidad del efluente.
- c. Investigar mejoras específicas en la HC para la remoción de sulfato, como la integración con otros métodos de tratamiento más eficaces para este contaminante o la evaluación de una etapa de tratamiento adicional para eliminar el sulfato residual, optimizando así la eficacia global del proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, E., Saadat, S., Karimi, Jashni, A., & Shafaei, M. (2020). A novel method for optimization of slit Venturi dimensions through CFD simulation and RSM design. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67, 105088. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105088>
- Abdala, E., Aquino, M., Ribeiro, J., Vidal, C., Nascimento, R., & Sousa, F. (2014). O uso da cavitação hidrodinâmica aplicado ao tratamento de água. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 19, 105-112. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014000200001>
- Agarkoti, C., Thanekar, P., & Gogate, P. (2021). Cavitation based treatment of industrial wastewater: A critical review focusing on mechanisms, design aspects, operating conditions and application to real effluents. *Journal of Environmental Management*, 300, 113786. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113786>
- Agudelo, R., Ovalle, D., Rodríguez, L., Camargo, G., Almonacid, L., Agudelo, R., Ovalle, D., Rodríguez, L., Camargo, G., & Almonacid, L. (2019). Remoción de sulfuros presentes en el agua residual del proceso de curtido mediante cavitación hidrodinámica. *Revista ION*, 32(1), 21-33. <https://doi.org/10.18273/revion.v32n1-2019002>
- Albarrán, G., & Mendoza, E. (2022). Procesos de oxidación avanzados para la purificación de agua: revisión. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 13(2), 21- 41
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF). (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater (22nd ed.). *American Public Health Association*.
- Anyosa, N., & Sejje, W. (2022). Bioadsorción con cavitación hidrodinámica de iones (Pb^{+2} , Cu^{+2} Y Sb^{+3}) en una columna de lecho fijo con algas pardas (*Macrocystis Pyrifera*).
- Aquino. (2018). *Calidad del agua en el Perú. Retos y aportes para una gestión sostenible en aguas residuales*. Resumen ejecutivo. Lima; DAR 30 pp.
- Araya, N., Ramírez, Y., Cisternas, L., & Kraslawski, A. (2021). Use of real options to enhance water-energy nexus in mine tailings management. *Applied Energy*,

303, 117626. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117626>

- Arias, S. (2022). *Diseño y construcción de un reactor ultrasónico por cavitación para el tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de curtiembres*
- Arrojo, S., & Benito, Y. (2008). A theoretical study of hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(3), 203-211. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.03.007>
- Arrojo, S., Benito, Y., & Martínez, A. (2008). A parametrical study of disinfection with hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(5), 903-908. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.11.001>
- Baowei, W., Huijua, S. & Bo, Z., (2021). Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review. *Chemical Engineering Journal Volume* 412, 128685
- Balasundaram, B., & Harrison, S., (2011). Optimization of Hole Geometry for Selective Release of Periplasmic Products During Cell Disruption Using Hydrodynamic Cavitation. *Chemical Engineering Magazine*, p. 207-209, <https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.03.002>
- Bashir, A., Soni, A., & Mahulkar, A., (2011). The CFD driven optimization of a modified venturi for cavitation activity. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89, 1366-1375. DOI: 10.1002/cjce.20500/
- Bauce, G., Cordova, M., & Avila, A., (2018). Operacionalización de variables. *Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel*, 49 (2).
- Benito, Y. & Arrojo, S. (2006). Tratamiento de efluentes industriales mediante cavitación hidrodinámica. *Tecnología del agua*, 26(279), 38-41.
- Bolaños, J., Cordero, G., & Segura, G., (2017), Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, *Tecnología em Marcha*, Vol 30. N°4.
- Bolne, P., Ghodke, S. & Bhanvase, B. (2021). Intensified Hydrodynamic Cavitation-Based Process for the Production of Liquid Emulsion Membrane (LEM) for the Extraction of Chromium (VI) Ions. *Int J Environ Res* 15, 313 – 320. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00322-4>
- Bonett, D., & Aguilar, A., (2021). *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2021*. Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- Bracamonte, B., & Lozano, J., (2022). *Eficiencia de remoción del cromo total en efluentes de la industria curtiembre mediante el método de Placa Orificio y*

Venturi en Cavitación Hidrodinámica. UCV.

- Burzio, E., Bersani, F., Caridi, G., Vesipa, R., Ridolfi, L., & Manes, C. (2020). Water disinfection by orifice-induced hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60, 104740. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104740>
- Carhuamaca, J. (2018). *Influencia de los relaves en pasta de la empresa Aurex S.A. en la reducción de impactos negativos al aire, agua y suelo en la comunidad de Yurajhuanca* [Tesis de título, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/270>
- Leopold, C. (2004). Living with the Land Ethic, *BioScience*, 54 (2), 149–154, <https://doi.org/10.1641/000>
- Carpenter, J., Badve, M., Rajoriya, S., George, S., Saharan, V., & Pandit, A. (2017). Hydrodynamic cavitation: An emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Reviews in Chemical Engineering*, 33(5), 433-468. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0032>
- Carrillo, L., & Guillén, F. (2018). Evaluación técnico – económica en la disposición de relaves mineros en el proyecto Tambomayo utilizando el método de relaves filtrados, en lugar de la disposición por mineroducto [Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/14394/Luis%20Manuel%20Carrillo%20Baz%C3%A1n->
- Castañeda, F., & Vargas, L. (2020). Tratamiento de aguas industriales derivados de agregados de construcción (UNICOM) mediante el método de cavitación hidrodinámica 2020. [Tesis de título, Universidad César Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/91138/Casta%C3%B1eda_CFE-Vargas_PLA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Caviedes, D., Muñoz, R., Perdomo, A., Rodríguez, D., & Sandoval, I. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 73-90.
- Cerna, E. (2021). La política ambiental de los límites máximos permisibles (LMP) de efluentes mineros. *Revista Oficial del Poder Judicial del Perú*, 13(16), 175-189. <https://doi.org/10.35292/ropj.v13i16.385>
- Chakinala, A., Gogate, P., Burgess, A., & Bremner, D. (2008). Treatment of industrial

- wastewater effluents using hydrodynamic cavitation and the advanced Fenton process. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(1), 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.01.003>
- Cheng, X., Danek, T., Drozdova, J., Huang, Q., Qi, W., Zou, L., Yang, S., Zhao, X., & Xiang, Y. (2018). Soil heavy metal pollution and risk assessment associated with the Zn-Pb mining region in Yunnan, Southwest China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6574-x>
- Colque, M., Murrugarra, J., & Licapa, G. (2022). Remoción de Metales Pesados Empleando Dolomita en Drenaje Ácido de Mina de un Pasivo Ambiental Minero de Hualgayoc. 20th *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education Caribbean* 1- 8. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.17>
- Covington, A., Bates, R. & Durst, R. (2009). Definition of pH scales, standard reference values, measurement of pH and related terminology (Recommendations 1984). *Journal Pure and Applied Chemistry* <https://doi.org/10.1351/pac198557030531>
- Dindar, E. (2016). An Overview of the Application of Hydrodynamic Cavitation for the Intensification of Wastewater Treatment Applications: *A Review. Innov. Energy Res*, 5(137): 1–7. <https://doi.org/10.4172/ier.1000137>
- Dong, Z., Zhang, K., & Yao, R. (2019). Degradation of refractory pollutants by hydrodynamic cavitation: Key parameters to degradation rates. *Journal of Hydrodynamics*, 31(4), 848-856. <https://doi.org/10.1007/s42241-018-0131-5>
- Dular, M., Griessler, T., Gutierrez, I., Heath, E., Kosjek, T., Krivograd, A., Oder, M., Petkovšek, M., Rački, N., Ravnikar, M., Šarc, A., Širok, B., Zupanc, M., Žitnik, M., & Kompare, B. (2016a). Use of hydrodynamic cavitation in (waste) water treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 29, 577-588. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.10.010>
- Dutta, D., Arya, S., & Kumar, S. (2021). Industrial wastewater treatment: Current trends, bottlenecks, and best practices. *Chemosphere*, 285, 131245. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131245>
- Dutta, N., Kopparthi, P., Mukherjee, A., Nirmalkar, N., & Boczkaj, G. (2021). Novel strategies to enhance hydrodynamic cavitation in a circular venturi using RANS numerical simulations. *Water research*, 204, 117559.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117559>

- Fedorov, K., Sun, X., & Boczkaj, G. (2021). Combination of hydrodynamic cavitation and SR-AOPs for simultaneous degradation of BTEX in water. *Chemical Engineering Journal*, 417, 128081. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894720341978>
- Flynn, H., (1966). Cavitation Dynamics: IV Collapse of transient cavities. *Chemical Engineering Magazine*. 143(1-3), 15 de septiembre de 2008, páginas 201-209.
- García, M., Pérez, L., & Rodríguez, J. (2020). Valorización de residuos industriales: Una estrategia para la sostenibilidad ambiental y económica. *Revista de Gestión Ambiental y Sostenibilidad*, 20(2), 45-58
- Goel, M., Hongqiang, H., Mujumdar, A., & Ray, M. (2004). Sonochemical decomposition of volatile and non-volatile organic compounds—A comparative study. *Water Research*, 38(19), 4247-4261. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.08.008>
- Gogate, P. (2011). Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing. *Food and Bioprocess Technology*, 4(6), 996-1011. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0418-1>
- Gogate, P., & Bhosale, G. (2013). Comparison of effectiveness of acoustic and hydrodynamic cavitation in combined treatment schemes for degradation of dye wastewaters. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 71, 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.03.001>
- Gogate, P., & Kabadi, A. (2009). A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. *Biochemical Engineering Journal*, 44(1), 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.006>
- Gogate, P., & Pandit, A. (2005). A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. *Ultrasonics Sonochemistry*, 12(1), 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2004.03.007>
- Gogate, P., & Patil, P. (2015). Combined treatment technology based on synergism between hydrodynamic cavitation and advanced oxidation processes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 25(1), 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.016>
- Gogate, P., & Pandit, A. (2004), A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods. *Advances Environmental Research*, 8(3) 553-597.
- Gogate, P. & Pandit, A. (2004). A review of imperative technologies for wastewater

- treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*, 8(3-4), 501-551.
- Golam, R. & Sharma, B. (2016). The nexus approach to water–energy– food security: an option for adaptation to climate change, *Climate Policy*, 16 (6).
- Gonzales, M., & Mayta, J. (2021). Tratamiento por implosión de cavidades para la mejora de la calidad del agua residual de la industria láctea artesanal, 2021 [Tesis de título, Universidad César Vallejo].
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/83448/Mayta_AJA-Gonzales_AMER-SD.pdf?sequence=1
- Grieco, G., Sinojmeri, A., Bussolesi, M., Cocomazzi, G., & Cavallo, A. (2021). Environmental impact variability of copper tailing dumps in fushe arrez (Northern albania): The role of pyrite separation during flotation. *Sustainability* (Switzerland), 13(17). <https://doi.org/10.3390/su13179643>
- Gutiérrez, L., Arias, S., & Cardona, D. (2019). Hydrodynamic Cavitation: Engineering and Agribusiness Approach. *Scientia Et Technica*, 24(2), 283-304.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84961237015>
- Hielscher Ultrasonics. (s.f.). Cavitación ultrasónica en líquidos. *Tecnología de ultrasonido de Hielscher*. Recuperado 8 de febrero de 2022, de <https://www.hielscher.com/es/ultrasonic-cavitation-in-liquids-2.htm>
- Hernández, C., & Carpio, N., (2019). Introducción a los tipos de muestreo. *Alerta*. 2 (1). <https://doi.org/10.5377/alerta.v2i1.7535>
- Jonas, H. (1979). *El Principio de Responsabilidad*. Herder.
- Jürgensen, C., (2008). *Teoría de la Historia*. Madrid: Akal.
- Karamah, E., & Nurcahyani, P. (2019). Degradation of blue KN-R Dye in Batik effluent by an advanced oxidation process using a combination of ozonation and hydrodynamic cavitation. *Indonesian Journal of Chemistry*, 19(1), 41-47.
<https://doi.org/10.22146/ijc.26733>
- King, R. (1982). *Manual de Flotación de Minerales*. Publicaciones de la Universidad de Chile
- Kinnunen, P., Obenaus, R., Raatikainen, J., Guignot, S., Guimerà, J., Ciroth, A., & Heiskanen, K. (2021). Review of closed water loops with ore sorting and tailings valorisation for a more sustainable mining industry. *Journal of Cleaner Production*. 278, 123-237. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123237>
- Kolb, C., Kiefer, P., & Zawadzki, A. (2000). Soil electrical conductivity as a function

- of soil water content and implications for soil water measurement. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), 897-902
- Korn, F., Feld, P., Barton, A., & Menzel, H. (1971). *Conceptos y variables en la investigación social*. Edición nueva visión, Buenos Aires.
- Lafuente, E., & López, H. (2018a). Desinfección bacteriana de aguas residuales utilizando cavitación hidrodinámica a través de un tubo Venturi. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 13(1), 77-80. <https://doi.org/10.24133/cctespe.v13i1.808>
- Lamana, N., & Aja, A. (2010). *Huella ecológica*. <http://habitat.aq.upm.es/temas/a-huella-ecologica.html>
- Larota, K., Basilio, M. & Ramos, T. (2023). *Evaluación de coliformes termotolerantes utilizando el sistema de microburbujas en las aguas del área de conservación Regional Humedales de Ventanilla*.
- Lewinsohn, J. (2020). *Estado del arte de las estadísticas mineras del uso de agua y energía en los países andinos: intercambio metodológico entre Chile y el Perú en el marco de la cooperación Sur-Sur*. Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/186), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Lozano, R. (2020). *Aplicación de la tecnología de cavitación hidrodinámica, ozono y oxígeno atmosférico para la mejora de la calidad de aguas residuales de la empresa de Curtiembre Lima 2020*. [Tesis de título, Universidad César Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/67566/Lozano_MRY-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Luo, T., Young, R., & Reig, P. (2015). *Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/data/aqueduct-projected-water-stress-country-rankings>
- Maldonado, H., & Benites, E. (2023). Controlled Hydrodynamic Cavitation for Reduction of Toxic Metals in Metallurgical Residual Effluents. *Chemical Engineering Transactions*, 99, 559-564.
- Mancuso, G., Langone, M., & Andreottola, G. (2020). A critical review of the current technologies in wastewater treatment plants by using hydrodynamic cavitation process: Principles and applications. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18(1), 311-333. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00444->

- Marine Resources. (2019), *El agua subterránea en el medioambiente minero y su importancia*.
- Maršálek, B., Maršálková, E., Odehnalová, K., Pochylý, F., Rudolf, P., Stahel, P., Rahel, J., Čech, J., Fialová, S., & Zezulka, Š. (2020). Removal of *Microcystis aeruginosa* through the combined effect of plasma discharge and hydrodynamic cavitation. *Water* (Switzerland), 12(1), 1-17. <https://doi.org/10.3390/w12010008>
- Martynenko, A., Astatkie, T., & Satanina, V. (2015). Novel hydrothermodynamic food processing technology. *Journal of Food Engineering*, 152, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.11.016>.
- Masindi, V., Chatzisyneon, E., Kortidis, I., & Foteinis, S. (2018). Assessing the sustainability of acid mine drainage (AMD) treatment in South Africa. *Science of the Total Environment*, 635, pp. 793-802.
- Minal, L., Sohan, P., Bharat, B., & Shirish, S., (2021), Enhanced performance of emulsion liquid membrane prepared with aid of hydrodynamic cavitation for effective removal of Pb (II) from aqueous feed phase: Optimization using Artificial Neural Networks modeling. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2019). *D.S. N° 010-019: Reglamento de valores máximos admisibles para descargas de efluentes líquidos en sistemas de alcantarillado*. Lima, Perú: MINVU
- Monge, S., Torres, A., Ribeiro, R., & Silva, A., (2008). Manual Técnico sobre Procesos de Oxidación Avanzada aplicados al Tratamiento de Aguas Residuales Industriales. *Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo* ISBN: 978-84-09-08637-5
- Mucho, R., Luna, H., & Sánchez., (2024). *Cartera de Proyectos de Inversión Minera 2024*. Ministerio de Energía y Minas. Perú.
- Mular, A., Halbe, D., & Barratt, D. (2002). Mineral processing plant design, practice, and control: Proceedings, Volume 1. *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*
- Naess, A. (1973). *Hacia una ética ecológicamente virtuosa*. Cátedra.
- Navarrete, M., Vargas, A., & Esquivel, D. (s. f.). *Rompimiento de la viscosidad en líquidos por cavitación hidrodinámica y acústica*.

- <http://somi.ccadet.unam.mx/somi29/memoriassomi29/PDFS/Instrumentacion/29-GJSOMI-8-29.pdf>
- Nieto, E. (2018). *Tipos de Investigación*. Universidad Santo Domingo de Guzmán, <https://core.ac.uk/download/pdf/250080756.pdf>
- Nieto, S. (2019). *Aplicación de la cavitación hidrodinámica para reducir los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los efluentes de la industria textil y de curtiembre, Lima 2019*. [Tesis de título, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/46661>
- Oliva, I., & Sareth, M. (2012). *Estudio del Fenómeno de Erosión por Cavitación en Materiales Metálicos* (Doctoral dissertation).
- Ott, J., & Boerio, J. (2000). *Chemical Thermodynamics: Principles and Applications*. Academic Press.
- Ozonek, J. (2012). Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering. *CRC Press*. <https://doi.org/10.1201/b11825>
- Pandit, A., Sarvothaman, V., & Ranade, V. (2021). Estimation of chemical and physical effects of cavitation by analysis of cavitating single bubble dynamics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 77, 105677. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105677>
- Parbat, A. Bhanvase, A. & Sonawane, H. (2020). Investigation on liquid emulsion membrane (LEM) prepared with hydrodynamic cavitation process for cobalt (II) extraction from wastewater. *Separation and Purification Technology*, 237, 116-385. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116385>
- Pardo, R. (1987). *Diseños experimentales en mineralurgia y metalurgia extractiva* [Tesis de título, Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20500.14076/12788>
- Patil, P., & Gogate, P. (2012). Degradation of methyl parathion using hydrodynamic cavitation: Effect of operating parameters and intensification using additives. *Separation and Purification Technology*, 95, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.04.019>
- Patil, P., Bhandari, V., & Ranadec, V. (2021). *Wastewater Treatment and Process Intensification for Degradation of Solvents using Hydrodynamic Cavitation*. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 166, 108485. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108485>
- Petkovšek, M., Zupanc, M., Dular, M., Kosjek, T., Heath, E., Kompare, B., & Širok,

- B. (2013). *Rotation generator of hydrodynamic cavitation for water treatment. Separation and Purification Technology*, 118, 415-423.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.07.029>
- Petrovskaya, N. (2020). Concentration of minerals.
<https://sites.google.com/site/concentrationofminerals/home>
- Pinjari, D., & Pandit, A. (2010). Cavitation milling of natural cellulose to nanofibrils. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17(5), 845-852.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.03.005>
- Pugazhenthiran, N., Anandan, S., & Ashokkumar M. (2016). Removal of heavy metal from wastewater. *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*, 813– 839.
https://doi.org/10.1007/978-981-287-278-4_58.
- Rajoriya, S., Carpenter, J., Kumar, V., & Bhalchandra, A. (2015). Cavitación hidrodinámica. un proceso de oxidación avanzado para la degradación de contaminantes biorefractarios, 1-15.
- Ranade, V., & Bhandari, V. (2014). *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse*. Butterworth-Heinemann.
- Raso, E., Cappa, E., Moll, F., Coussirat, M, Fontanals, A., & Guardo, A. (2013). Validación/Calibración de Modelos para Flujos Cavitantes, Aplicación al Diseño en Ingeniería. *Mecánica Computacional*, 32(14), 1135-1153
<https://doi.org/10.1016/C2012-0-06975-X>
- Raut, S., Saharan, V., Pinjari, D., Saini, D., Sonawane, S., & Pandit, A. (2013). Intensification of degradation of imidacloprid in aqueous solutions by combination of hydrodynamic cavitation with various advanced oxidation processes (AOPs). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 850-857. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.07.029>
- Rawls, J. (1971). *A Theory of Justice*. Harvard University Press.
- Repinc, S., Bizjan, B., Budhiraja, V., Dular, M., Gostiša, J., Brajer, B., Kaurin, A., Kržan, A., Levstek, M., Arteaga, J. F. M., Petkovšek, M., Rak, G., Stres, B., Širok, B., Žagar, E., & Zupanc, M. (2022). Integral analysis of hydrodynamic cavitation effects on waste activated sludge characteristics, potentially toxic metals, microorganisms and identification of microplastics. *Science of The Total Environment*, 806(4), 151414.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151414>
- Rodríguez, D., Serrano, H., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020). *De residuo*

a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe. World Bank. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/389711595408950383/pdf/From-Waste-to-Resource-Shifting-Paradigms-for-Smarter-Wastewater-Interventions-in-Latin-America-and-the-Caribbean.pdf>

Romero, A., Flores, S., & Arévalo, W. (2010). Tratamiento de efluentes de la industria minera con dolomita. *Industrial Data. Revista investigación*. 13(1), 085-090. <https://doi.org/10.15381/idata.v13i1.6174>

Roy, K. & Moholkar, V., (2021). *Análisis mecanicista de la degradación de carbamazepina en procesos híbridos de oxidación avanzada de cavitación hidrodinámica / UV / persulfato en presencia de ZnO / ZnFe₂O₄*. Tecnología de separación y purificación 270, 118764.

Rumbo Minero. (s. f.). *Chancado y Molienda en minería: Paso previo hacia el material fino.* Rumbo Minero. <https://www.rumbominero.com/revista/informes/chancado-y-molienda-en-mineria-paso- previo-hacia-el-material-fino/>

Saharan, V., Badve, M., & Pandit, A. (2011). Degradation of Reactive Red 120 dye using hydrodynamic cavitation. *Chemical Engineering Journal*, 178, 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.018>.

Sánchez, F. (2022). Tratamiento de aguas residuales de planta de beneficio con cavitación hidrodinámica y subsecuente cultivo con microalgas. Universidad Católica de Santa María.

Save, S., Pandit, A., & Joshi, J. (1994). Microbial cell disruption: Role of cavitation. *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*, 55(3), B67-B72. [https://doi.org/10.1016/0923-0467\(94\)06062-2](https://doi.org/10.1016/0923-0467(94)06062-2)

Sharma, A., Gogate, P., Mahulkar, A., & Pandita, A, (2008). Modeling of hydrodynamic cavitation reactors based on orifice plates considering hydrodynamics and chemical reactions occurring in bubble. *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.04.005>

Singh, S., Sukla, L., & Goyal, S. (2020). Mine waste & circular economy. *Materials Today: Proceedings*, 30(2), 332-339. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.616>

Singer, P. (1975). *Animal Liberation*. HarperCollins.

Sivakumar, M., Tang, S., & Tan, K. (2014). Cavitation technology – A greener

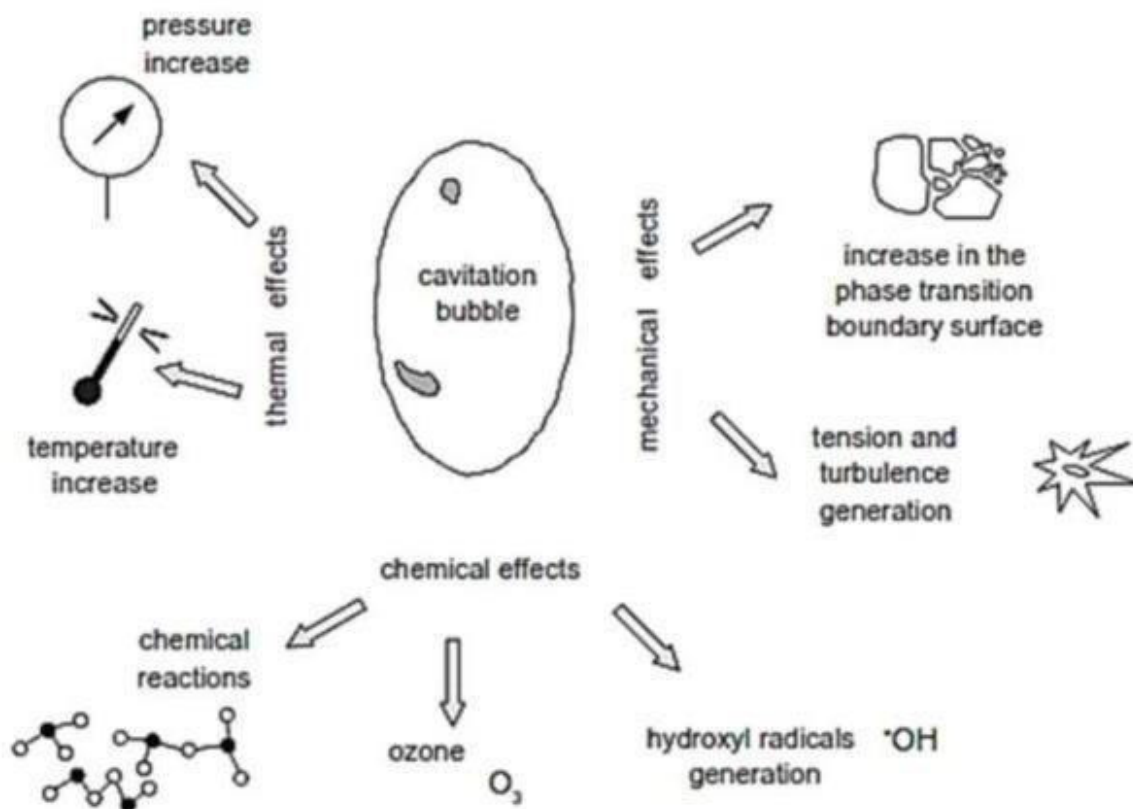
- processing technique for the generation of pharmaceutical nanoemulsions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(6), 2069-2083. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.03.025>
- Schmid, S. & Fried, M., (2016) *Cavitation - Easily explained*, IET Institute for Energy Technology, www.youtube.com/@energy-tech. Accessed 09.04.2023
- Siuice, R. (2018). *Espesamiento, floculación de relave para la obtención de pasta de la compañía minera Caolin S.A.C.*, [Tesis de grado. Universidad nacional Federico Villareal].
- Skoog, D., Holler, F., & Crouch, S. (2017). *Principles of Instrumental Analysis*. Cengage Learning.
- Sparr, B., & Hunsberger, R., (2015). *Opportunities and Challenges for Water and Wastewater Industries to Provide Exchangeable Services*. United States. <https://doi.org/10.2172/1227107>
- Starbird, R. & Montero, V. (2015). Síntesis de nanopartículas magnéticas de óxido de hierro para la remoción de arsénico del agua de consumo humano. *Tecnología en Marcha* [en línea].28(3)
- Sun, X., Xuan, X., Song, Y., Jia, X., Ji, L., Zhao, S., Yong, J., Chen, S., Liu, J., & Wang, G. (2021). Experimental and numerical studies on the cavitation in an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor for water treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105311. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105311>
- Tao Y., Cai J., Huai X., Liu B., & Guo Z. (2016). *Application of Hydrodynamic Cavitation to Wastewater Treatment, Chemical Engineering and Technology*, 39, Issue 8.
- Tafur, L., (2019). *Tecnologías de cavitación hidrodinámica y nanopartículas de plata para la mejora de la calidad de aguas residuales industriales*. [Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo].
- Thanekar, P., & Gogate, P. (2019). Combined hydrodynamic cavitation based processes as an efficient treatment option for real industrial effluent. *Ultrasonics Sonochemistry*, 53, 202- 213. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.007>
- Townsend, J. (2021). De lo abstracto a lo concreto en la construcción de una matriz de operacionalización. *Universidad y Sociedad* 13(5) Cienfuegos.
- Trombetta, J. (2012). El agua en la explotación de yacimientos no convencionales.

Petrotecnia, 4, 52-64.

- Trujillo, E., Fonseca, G., García, M., & Martínez, V., (2009). Evaluación de la Cromatografía Iónica para Fomentar su Uso en la Investigación y Estudios de Posgrado en Ciencias del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México. *Formación Universitaria* 2(1), 7-16 doi: 10.4067/S0718-50062009000100003.
- Vera, G., (2022). Derecho internacional ambiental, *Revista Electrónica Iberoamericana (REIB)*, 16 (2) (diciembre de 2022), 210 – 215. ISSN: 1988 – 0618 doi: <https://doi.org/10.20318/reib.2022.7.402>
- Unesco, (2019). *Informe mundial de la Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos*. Es.unesco.org/wáter-security/wwap/wwdr/2019.
- Wang, B., Su, H., & Zhang, B. (2021). Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review. *Chemical Engineering Journal*, 412, 128685. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128685>
- Wang, S., Xu, Y., Norbu, N., & Wang, Z. (2018). Remediation of biochar on heavy metal polluted soils. *Earth and Environmental Science*. 108, 042113.
- Wu, Z., Shen, H., Ondruschka, B., Zhang, Y., Wang, W., & Bremner, D. (2012). Removal of blue-green algae using the hybrid method of hydrodynamic cavitation and ozonation. *Journal of Hazardous Materials*, 235-236, 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.034>
- Yachachin, G., & Yaricahua, W. (2021). *Oxidación avanzada con cavitación hidrodinámica para el tratamiento de aguas residuales de la industria de la curtiembre, Lima—2021*. [Tesis de título, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la Universidad César Vallejo. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/78933/Yachachin_HGI-Yaricahua_EWK-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Yuequn, T, Jun, C., Xiulan, H., Bin, L., & Zhixiong, G. (2016). Application of Hydrodynamic Cavitation to Wastewater Treatment. *Chemical Engineering & Technology*. 39(8).
- Zabala, A. (2014). *Estudio experimental de la cavitación en tubos de Venturi*. [Tesis de título, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica de Cartagena. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/4394>.

ANEXOS

Anexo 1: Efectos fisicoquímicos producidos durante el proceso de cavitación



Fuente: *Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering*
 Ozonek, J. (2012).

Anexo 2: Concentración inicial de metales: prueba de entrada 1

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA FECHA DE MUESTREO HORA DE MUESTREO CATEGORIA SUB CATEGORIA					E1 29/11/2021 10:48:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ±
Análisis Generales					
Sólidos Totales en Suspensión	EW_APHA2540D	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	1	3	15,640 ± 3537
Potencial de Hidrógeno	EW_APHA4500HB	pH	--	--	8.22 *
Sulfato	EW_EPA300_0	mg/L	0.01	0.03	533.53 ± 64.74
Aluminio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	52.911 ± 4.762
Antimonio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00004	0.00013	2.36367 ± 0.83711
Arsénico Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	5.73326 ± 0.63066
Bario Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.7072 ± 0.0636
Berilio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00436 ± 0.00032
Bismuto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.00583 ± 0.00122
Boro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.002	0.006	0.303 ± 0.036
Cadmio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.05376 ± 0.01236
Calcio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.003	0.009	187.046 ± 18.705
Cerio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00008	0.00024	0.19048 ± 0.01545
Cesio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.2755 ± 0.0689
Cobalto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.20725 ± 0.01865
Cobre Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	1.24314 ± 0.31223
Cromo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.2357 ± 0.0589
Estaño Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	0.06031 ± 0.01146
Estroncio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.7168 ± 0.0645
Fósforo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.015	0.047	2.021 ± 0.566
Galio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00004	0.00012	0.01583 ± 0.00129
Germanio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0004	0.0013	340.0566 ± 27.2045
Lantano Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0005	0.0015	0.0848 ± 0.0229
Litio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0314 ± 0.0082
Lutecio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00014 ± 0.00004
Magnesio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	29.870 ± 3.584
Manganeso Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	11.41427 ± 0.73900
Mercurio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	0.00229 ± 0.00064
Molibdeno Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.01932 ± 0.00444
Niobio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015
Níquel Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.3346 ± 0.0308
Plata Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.000003	0.000010	0.137380 ± 0.013197
Plomo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	>20.0000 ± 1.8000
Potasio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.04	0.13	52.65 ± 4.21
Rubidio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0003	0.0009	0.4434 ± 0.0443
Selenio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013
Silíce Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.03	0.27	120.87 ± 12.10
Silicio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.04	0.13	47.15 ± 5.66
Sodio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.006	0.019	22.226 ± 2.445
Talio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00840 ± 0.00193
Tantalio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	<0.003
Thorio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00006	0.00019	0.02023 ± 0.00142
Titanio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0357 ± 0.0124
Uranio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.000003	0.000010	0.002877 ± 0.000604
Vanadio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.1009 ± 0.0151
Wolframio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0604 ± 0.0103
Yterbio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00105 ± 0.00022
Zinc Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0008	0.0026	14.4120 ± 1.4412

Anexo 3: Concentración inicial de metales: prueba de entrada 2

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA FECHA DE MUESTREO HORA DE MUESTREO CATEGORIA SUB CATEGORIA					E2 29/11/2021 13:00:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ±
Análisis Generales					
Sólidos Totales en Suspensión	EW_APHA2540D	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	1	3	15,810 ± 1934
Potencial de Hidrógeno	EW_APHA4500HB	pH	--	--	8.80 *
Sulfato	EW_EPA300_0	mg/L	0.01	0.03	579.72 ± 69.57
Aluminio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	69.022 ± 6.212
Antimonio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00004	0.00013	3.84019 ± 1.07525
Arsénico Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	6.34883 ± 0.76437
Bario Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.3701 ± 0.0873
Berilio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00534 ± 0.00125
Bismuto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.00809 ± 0.00170
Boro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.002	0.006	0.347 ± 0.042
Cadmio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.07530 ± 0.01732
Calcio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.003	0.009	217.228 ± 21.723
Cerio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00008	0.00024	0.27400 ± 0.02222
Cesio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.3706 ± 0.0927
Cobalto Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00001	0.00003	0.27609 ± 0.02485
Cobre Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	1.43374 ± 0.35844
Cromo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.7798 ± 0.0450
Estaño Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	0.07500 ± 0.01425
Estroncio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.7879 ± 0.0709
Fósforo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.015	0.047	2.819 ± 0.783
Galio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00004	0.00012	0.02178 ± 0.00176
Germanio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0004	0.0013	367.7144 ± 29.4172
Lantano Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0005	0.0015	0.1201 ± 0.0324
Litio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.1047 ± 0.0094
Lutecio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00022 ± 0.00006
Magnesio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	35.559 ± 4.267
Manganeso Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	13.52767 ± 0.94634
Mercurio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00009	0.00243 ± 0.00068
Molibdeno Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.01735 ± 0.00393
Niobio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.4437 ± 0.1034
Plata Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	0.217111 ± 0.017567
Plomo Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	>20.0000 ± 1.8000
Potasio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.04	0.13	61.78 ± 4.94
Rubidio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0003	0.0009	0.5627 ± 0.0563
Selenio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0004	0.0013	0.0037 ± 0.0009
Silíce Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.09	0.27	130.77 ± 15.69
Silicio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.04	0.13	61.13 ± 7.34
Sodio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.006	0.019	22.655 ± 2.492
Talio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.01215 ± 0.00279
Tantalio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.001	0.003	<0.003
Thorio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00006	0.00019	0.02318 ± 0.00204
Titanio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.1234 ± 0.0160
Uranio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00003	0.00010	0.003218 ± 0.000676
Vanadio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0001	0.0003	0.1213 ± 0.0182
Wolframio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0319 ± 0.0054
Yterbio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00175 ± 0.00037
Zinc Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0008	0.0026	19.6115 ± 1.9612

Anexo 4: Concentración final de metales: prueba de salida 1 (5 bares)

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA		S1-30	S1-60	S1-90
FECHA DE MUESTREO		29/11/2021	29/11/2021	29/11/2021
HORA DE MUESTREO		11:18:00	11:48:00	12:18:00
CATEGORIA		AGUA RESIDUAL AGUA	AGUA RESIDUAL AGUA	AGUA RESIDUAL AGUA
SUB CATEGORIA		RESIDUAL INDUSTRIAL	RESIDUAL INDUSTRIAL	RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Unidad	Resultado ±	Resultado ±	Resultado ±
Análisis Generales				
Sólidos Totales en Suspensión	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	13,220 ± 3041	8,640 ± 1987	7,490 ± 1723
Potencial de Hidrógeno	pH	8.18 *	8.31 *	8.38 *
Sulfato	mg/L	535.11 ± 64.21	533.41 ± 64.01	530.51 ± 64.38
Aluminio Total	mg/L	44.793 ± 6.731	37.889 ± 4.310	18.723 ± 1.685
Antimonio Total	mg/L	3.07203 ± 1.14017	2.36375 ± 0.82985	1.31046 ± 0.36693
Arsénico Total	mg/L	5.30693 ± 0.80376	4.77564 ± 0.52532	1.08476 ± 0.11332
Bario Total	mg/L	1.0887 ± 0.0980	0.6684 ± 0.0602	0.1921 ± 0.0173
Berilio Total	mg/L	0.00498 ± 0.00105	0.00354 ± 0.00074	0.00035 ± 0.00020
Bismuto Total	mg/L	0.00852 ± 0.00179	0.00614 ± 0.00129	0.00136 ± 0.00029
Boro Total	mg/L	0.355 ± 0.043	0.312 ± 0.037	0.250 ± 0.030
Cadmio Total	mg/L	0.05552 ± 0.01277	0.03905 ± 0.00838	0.00806 ± 0.00185
Calcio Total	mg/L	183.714 ± 18.371	182.686 ± 18.269	157.605 ± 15.761
Cerio Total	mg/L	0.30652 ± 0.02486	0.17862 ± 0.01449	0.04320 ± 0.00339
Cesio Total	mg/L	0.3582 ± 0.0836	0.2661 ± 0.0665	0.1261 ± 0.0315
Cobalto Total	mg/L	0.22373 ± 0.02014	0.15595 ± 0.01404	0.03844 ± 0.00346
Cobre Total	mg/L	1.28436 ± 0.32124	1.02344 ± 0.25586	0.12341 ± 0.03085
Cromo Total	mg/L	0.2370 ± 0.1033	0.1774 ± 0.0944	0.1064 ± 0.0266
Estaño Total	mg/L	0.08142 ± 0.01547	0.06034 ± 0.01158	0.01676 ± 0.00318
Estroncio Total	mg/L	0.8489 ± 0.0764	0.7225 ± 0.0650	0.4933 ± 0.0444
Fósforo Total	mg/L	3.111 ± 0.871	2.160 ± 0.605	0.641 ± 0.179
Galio Total	mg/L	0.02329 ± 0.00183	0.01401 ± 0.00113	0.00589 ± 0.00048
Germanio Total	mg/L	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	mg/L	0.00016 ± 0.00001	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	mg/L	392.3468 ± 31.4357	282.1410 ± 22.5713	66.9184 ± 5.3535
Lantano Total	mg/L	0.1313 ± 0.0355	0.0793 ± 0.0214	0.0217 ± 0.0059
Litio Total	mg/L	0.1209 ± 0.0109	0.1344 ± 0.0121	0.0469 ± 0.0042
Lutecio Total	mg/L	0.00018 ± 0.00005	0.00011 ± 0.00003	<0.00006
Magnesio Total	mg/L	34.530 ± 4.144	24.070 ± 2.888	8.295 ± 0.995
Manganeso Total	mg/L	13.02560 ± 0.31179	8.44611 ± 0.59123	1.83626 ± 0.12854
Mercurio Total	mg/L	0.00689 ± 0.00193	0.00417 ± 0.00117	0.00109 ± 0.00031
Molibdeno Total	mg/L	0.02648 ± 0.00609	0.02295 ± 0.00528	0.02256 ± 0.00519
Niobio Total	mg/L	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	mg/L	0.4905 ± 0.1128	0.4207 ± 0.0968	0.1022 ± 0.0235
Plata Total	mg/L	0.128865 ± 0.019330	0.083930 ± 0.012590	0.022180 ± 0.003327
Plomo Total	mg/L	>20.0000 ± 1.8000	>20.0000 ± 1.8000	5.5377 ± 0.4384
Potasio Total	mg/L	64.18 ± 5.13	53.79 ± 4.30	42.05 ± 3.36
Rubidio Total	mg/L	0.5601 ± 0.0560	0.4379 ± 0.0438	0.3067 ± 0.0307
Selenio Total	mg/L	0.0027 ± 0.0006	<0.0013	<0.0013
Silice Total	mg/L	120.67 ± 14.48	88.66 ± 10.64	70.45 ± 8.45
Silicio Total	mg/L	56.40 ± 6.77	41.44 ± 4.97	32.93 ± 3.95
Sodio Total	mg/L	25.539 ± 2.809	28.660 ± 3.153	16.429 ± 1.807
Talio Total	mg/L	0.00387 ± 0.00227	0.00688 ± 0.00158	0.00325 ± 0.00075
Tantalo Total	mg/L	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	mg/L	<0.003	<0.003	<0.003
torio Total	mg/L	0.03163 ± 0.00221	0.01943 ± 0.00136	0.00588 ± 0.00041
Titanio Total	mg/L	0.1277 ± 0.0166	0.0950 ± 0.0124	0.1804 ± 0.0235
Uranio Total	mg/L	0.002963 ± 0.000622	0.002201 ± 0.000462	0.000575 ± 0.000121
Vanadio Total	mg/L	0.1477 ± 0.0222	0.0932 ± 0.0140	0.0299 ± 0.0045
Wolframio Total	mg/L	0.2697 ± 0.0458	0.1705 ± 0.0290	0.0547 ± 0.0093
Yterbio Total	mg/L	0.00148 ± 0.00031	0.00095 ± 0.00020	0.00041 ± 0.00009
Zinc Total	mg/L	14.7635 ± 1.4764	10.9122 ± 1.0912	2.2581 ± 0.2258

Anexo 5: Concentración final de metales: prueba de salida 2 (9 bares)

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA		\$2-30	\$2-60	\$2-90
FECHA DE MUESTREO HORA DE MUESTREO		29/11/2021	29/11/2021	29/11/2021
CATEGORIA		13:30:00	14:00:00	14:30:00
SUB CATEGORIA		AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL
Parámetro	Unidad	Resultado ±	Resultado ±	Resultado ±
Análisis Generales				
Sólidos Totales en Suspensión	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	15,410 ± 3544	15,320 ± 3627	13,280 ± 3054
Potencial de Hidrógeno	pH	8.50 *	9.04 *	8.95 *
Sulfato	mg/L	566.31 ± 67.96	555.55 ± 66.67	557.08 ± 66.85
Aluminio Total	mg/L	66.262 ± 5.364	66.229 ± 3.561	61.644 ± 5.548
Antimonio Total	mg/L	4.08363 ± 1.14342	5.64715 ± 1.58120	3.78707 ± 1.06038
Arsénico Total	mg/L	6.56409 ± 0.72205	10.17363 ± 1.11910	5.58360 ± 0.61420
Bario Total	mg/L	0.3512 ± 0.0856	1.6097 ± 0.1449	0.8807 ± 0.0793
Berilio Total	mg/L	0.00441 ± 0.00093	0.00641 ± 0.00135	0.00417 ± 0.00088
Bismuto Total	mg/L	0.00834 ± 0.00175	0.01297 ± 0.00272	0.00738 ± 0.00155
Boro Total	mg/L	0.337 ± 0.040	0.415 ± 0.050	0.340 ± 0.041
Cadmio Total	mg/L	0.04890 ± 0.01125	0.07585 ± 0.01745	0.04537 ± 0.01044
Calcio Total	mg/L	194.818 ± 19.482	214.095 ± 21.410	188.503 ± 18.850
Cerio Total	mg/L	0.24085 ±	0.44051 ± 0.03573	0.24077 ± 0.01953
Cesio Total	mg/L	0.3557 ± 0.0883	0.5043 ± 0.1261	0.3379 ± 0.0845
Cobalto Total	mg/L	0.19126 ± 0.01721	0.29888 ± 0.02630	0.16940 ± 0.01525
Cobre Total	mg/L	1.09554 ± 0.27389	1.52402 ± 0.38101	1.19367 ± 0.29842
Cromo Total	mg/L	0.7779 ± 0.0695	0.5576 ± 0.1394	0.3822 ± 0.0956
Estaño Total	mg/L	0.08100 ± 0.01539	0.10840 ± 0.02060	0.07820 ± 0.01486
Estroncio Total	mg/L	0.7566 ± 0.0681	1.0500 ± 0.0945	0.7476 ± 0.0673
Fósforo Total	mg/L	2.826 ± 0.791	4.133 ± 1.157	2.540 ± 0.711
Gallio Total	mg/L	0.02121 ± 0.00172	0.03627 ± 0.00294	0.02001 ± 0.00162
Germanio Total	mg/L	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	mg/L	<0.00015	0.00026 ± 0.00002	<0.00015
Hierro Total	mg/L	360.7071 ± 28.8566	531.3236 ± 42.5059	328.4162 ± 26.2733
Lantano Total	mg/L	0.1080 ± 0.0292	0.1918 ± 0.0518	0.1074 ± 0.0290
Litio Total	mg/L	0.0953 ± 0.0086	0.1267 ± 0.0114	0.0947 ± 0.0085
Lutecio Total	mg/L	0.00016 ±	0.00027 ± 0.00008	0.00015 ± 0.00004
Magnesio Total	mg/L	30.235 ± 3.628	46.110 ± 5.533	27.393 ± 3.287
Manganeso Total	mg/L	10.38973 ± 0.76928	17.57610 ± 1.23033	9.58103 ± 0.67067
Mercurio Total	mg/L	0.00467 ± 0.00131	0.00705 ± 0.00197	0.00362 ± 0.00101
Molibdeno Total	mg/L	0.02622 ±	0.03193 ± 0.00734	0.02688 ± 0.00618
Niobio Total	mg/L	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Níquel Total	mg/L	0.3564 ± 0.0820	0.6060 ± 0.1394	0.3808 ± 0.0876
Plata Total	mg/L	0.190507 ± 0.019576	0.199137 ± 0.029871	0.109739 ± 0.016461
Plomo Total	mg/L	>20.0000 ±	>20.0000 ± 1.8000	>20.0000 ± 1.8000
Potasio Total	mg/L	60.75 ± 4.86	76.63 ± 6.13	58.47 ± 4.68
Rubidio Total	mg/L	0.5234 ± 0.0523	0.7087 ± 0.0709	0.5048 ± 0.0505
Selenio Total	mg/L	0.0031 ± 0.0007	0.0046 ± 0.0011	0.0026 ± 0.0006
Silíce Total	mg/L	113.60 ± 13.63	149.39 ± 17.93	102.89 ± 12.35
Silicio Total	mg/L	53.10 ± 6.37	69.83 ± 8.38	48.09 ± 5.77
Sodio Total	mg/L	21.828 ± 2.401	24.151 ± 2.657	23.190 ± 2.551
Talio Total	mg/L	0.01034 ±	0.01583 ± 0.00364	0.00975 ± 0.00224
Tantalio Total	mg/L	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	mg/L	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	mg/L	0.02690 ±	0.04729 ± 0.00331	0.02569 ± 0.00180
Titanio Total	mg/L	0.1165 ± 0.0151	0.1584 ± 0.0206	0.1076 ± 0.0140
Uranio Total	mg/L	0.002576 ± 0.000541	0.004259 ± 0.000834	0.002712 ± 0.000570
Vanadio Total	mg/L	0.1289 ± 0.0193	0.2142 ± 0.0321	0.1216 ± 0.0182
Wolframio Total	mg/L	0.1440 ± 0.0245	0.2089 ± 0.0355	0.1098 ± 0.0187
Yterbio Total	mg/L	0.00132 ±	0.00210 ± 0.00044	0.00122 ± 0.00026
Zinc Total	mg/L	12.5764 ± 1.2576	12.2946 ± 2.0295	12.1127 ± 1.2113

Anexo 6: Informe de ensayo composito

INFORME DE ENSAYO COMPOSITO												
IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA FECHA DE MUESTREO HORA DE MUESTREO CATEGORIA SUB CATEGORIA					E1 29/11/2021 10:48:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	S1- 30 29/11/2021 11:18:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	S1- 60 29/11/2021 11:48:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	S1- 90 29/11/2021 12:18:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	E2 29/11/2021 13:00:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	S2- 30 29/11/2021 13:30:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	S2- 60 29/11/2021 14:00:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	S2- 90 29/11/2021 14:30:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ±	Resultado ±	Resultado ±	Resultado ±	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ±	Resultado ±	Resultado ±
Sólidos Totales en Suspensión	EW_APHA2540D	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	1	3	15,640 ± 3597	13,220 ± 3041		8,640 ± 1987	7,490 ± 1723	15,810 ± 1934	15,410 ± 3544	15,320 ± 3627
Potencial de Hidrógeno	EW_APHA4500HB	pH	--	--	8.22 *	8.18 *	8.31 *	8.38 *	8.80 *	8.50 *	9.04 *	8.95 *
Sulfato	EW EPA300 0	mg/L	0.01	0.03	539.53 ± 64.74	535.11 ± 64.21	533.41 ± 64.01	530.51 ± 64.38	579.72 ± 69.57	566.31 ± 67.96	555.55 ± 66.67	557.08 ± 66.85
Aluminio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.001	0.003	52.911 ± 4.762	44.793 ± 6.731	37.889 ± 4.310	18.723 ± 1.685	69.022 ± 6.212	66.262 ± 5.964	66.229 ± 9.561	61.644 ± 5.548
Antimonio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00004	0.00013	2.98967 ± 0.83711	3.07203 ± 1.14017	2.96375 ± 0.82985	1.31046 ± 0.36693	3.84019 ± 1.07525	4.08363 ± 1.14342	5.64715 ± 1.58120	3.78707 ± 1.06038
Arsénico Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00003	0.00010	5.73326 ± 0.63066	5.30693 ± 0.80376	4.77564 ± 0.52532	1.08476 ± 0.11932	6.94883 ± 0.76437	6.56409 ± 0.72205	10.17363 ± 1.11910	5.58360 ± 0.61420
Bario Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0001	0.0003	0.7072 ± 0.0636	1.0887 ± 0.0980	0.6684 ± 0.0602	0.1921 ± 0.0173	0.9701 ± 0.0873	0.9512 ± 0.0856	1.6097 ± 0.1449	0.8807 ± 0.0793
Berilio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00436 ± 0.00092	0.00498 ± 0.00105	0.00354 ± 0.00074	0.00095 ± 0.00020	0.00594 ± 0.00125	0.00441 ± 0.00093	0.00641 ± 0.00135	0.00417 ± 0.00088
Bismuto Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00001	0.00003	0.00583 ± 0.00122	0.00852 ± 0.00179	0.00614 ± 0.00129	0.00136 ± 0.00029	0.00809 ± 0.00170	0.00834 ± 0.00175	0.01297 ± 0.00272	0.00738 ± 0.00155
Boro Total	EW EPA200 8	mg/L	0.002	0.006	0.303 ± 0.036	0.355 ± 0.043	0.312 ± 0.037	0.250 ± 0.030	0.347 ± 0.042	0.337 ± 0.040	0.415 ± 0.050	0.340 ± 0.041
Cadmio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00001	0.00003	0.05376 ± 0.01236	0.05552 ± 0.01277	0.03905 ± 0.00898	0.00806 ± 0.00185	0.07530 ± 0.01732	0.04890 ± 0.01125	0.07585 ± 0.01745	0.04537 ± 0.01044
Calcio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.003	0.009	187.046 ± 18.705	189.714 ± 18.971	182.686 ± 18.269	157.605 ± 15.761	217.228 ± 21.723	194.818 ± 19.482	214.095 ± 21.410	188.503 ± 18.850
Cerio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00008	0.00024	0.19048 ± 0.01545	0.30652 ± 0.02486	0.17862 ± 0.01449	0.04920 ± 0.00399	0.27400 ± 0.02222	0.24085 ± 0.01953	0.44051 ± 0.03573	0.24077 ± 0.01953
Cesio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0001	0.0003	0.2755 ± 0.0689	0.3582 ± 0.0896	0.2661 ± 0.0665	0.1261 ± 0.0315	0.3706 ± 0.0927	0.3557 ± 0.0889	0.5043 ± 0.1261	0.3379 ± 0.0845
Cobalto Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00001	0.00003	0.20725 ± 0.01865	0.22373 ± 0.02014	0.15595 ± 0.01404	0.03844 ± 0.00346	0.27609 ± 0.02485	0.19126 ± 0.01721	0.29888 ± 0.02690	0.16940 ± 0.01525
Cobre Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00003	0.00009	1.24914 ± 0.31229	1.28496 ± 0.32124	1.02344 ± 0.25586	0.12341 ± 0.03085	1.43374 ± 0.35844	1.09554 ± 0.27389	1.52402 ± 0.38101	1.19367 ± 0.29842
Cromo Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0001	0.0003	0.2357 ± 0.0589	0.2370 ± 0.1093	0.1774 ± 0.0944	0.1064 ± 0.0266	0.7798 ± 0.0450	0.7779 ± 0.0695	0.5576 ± 0.1394	0.3822 ± 0.0956
Estañio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00003	0.00010	0.06031 ± 0.01146	0.08142 ± 0.01547	0.06094 ± 0.01158	0.01676 ± 0.00318	0.07500 ± 0.01425	0.08100 ± 0.01539	0.10840 ± 0.02060	0.07820 ± 0.01486
Estroncio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	0.7168 ± 0.0645	0.8489 ± 0.0764	0.7225 ± 0.0650	0.4933 ± 0.0444	0.7879 ± 0.0709	0.7566 ± 0.0681	1.0500 ± 0.0945	0.7476 ± 0.0673
Fósforo Total	EW EPA200 8	mg/L	0.015	0.047	2.021 ± 0.566	3.111 ± 0.871	2.160 ± 0.605	0.641 ± 0.179	2.819 ± 0.789	2.826 ± 0.791	4.133 ± 1.157	2.540 ± 0.711
Galio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00004	0.00012	0.01589 ± 0.00129	0.02329 ± 0.00189	0.01401 ± 0.00113	0.00589 ± 0.00048	0.02178 ± 0.00176	0.02121 ± 0.00172	0.03627 ± 0.00294	0.02001 ± 0.00162
Germanio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	0.00016 ± 0.00001	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015	0.00026 ± 0.00002	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0004	0.0013	340.056 ± 27.2045	392.946 ± 31.4357	282.141 ± 22.5713	66.918 ± 5.3535	367.714 ± 29.4172	360.707 ± 28.8566	531.323 ± 42.5059	328.416 ± 26.2733
Lantano Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0005	0.0015	0.0848 ± 0.0229	0.1313 ± 0.0355	0.0793 ± 0.0214	0.0217 ± 0.0059	0.1201 ± 0.0324	0.1080 ± 0.0292	0.1918 ± 0.0518	0.1074 ± 0.0290
Litio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0001	0.0003	0.0914 ± 0.0082	0.1209 ± 0.0109	0.1344 ± 0.0121	0.0469 ± 0.0042	0.1047 ± 0.0094	0.0953 ± 0.0086	0.1267 ± 0.0114	0.0947 ± 0.0085
Lutecio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00014 ± 0.00004	0.00018 ± 0.00005	0.00011 ± 0.00003	<0.00006	0.00022 ± 0.00006	0.00016 ± 0.00004	0.00027 ± 0.00008	0.00015 ± 0.00004
Magnesio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.001	0.003	29.870 ± 3.584	34.530 ± 4.144	24.070 ± 2.888	8.295 ± 0.995	35.559 ± 4.267	30.235 ± 3.628	46.110 ± 5.533	27.393 ± 3.287
Manganeso	EW EPA200 8	mg/L	0.00003	0.00010	11.41427 ±	13.02560 ±	8.44611 ± 0.59123	1.83626 ± 0.12854	13.52767 ± 0.94694	10.98973 ±	17.57610 ±	9.58103 ± 0.67067

Total					0.79900	0.91179				0.76928	1.23033	
Mercurio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00003	0.00009	0.00229 ± 0.00064	0.00689 ± 0.00193	0.00417 ± 0.00117	0.00109 ± 0.00031	0.00243 ± 0.00068	0.00467 ± 0.00131	0.00705 ± 0.00197	0.00362 ± 0.00101
Molibdeno Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.00002	0.00006	0.01932 ± 0.00444	0.02648 ± 0.00609	0.02295 ± 0.00528	0.02256 ± 0.00519	0.01735 ± 0.00399	0.02622 ± 0.00603	0.03193 ± 0.00734	0.02688 ± 0.00618
Niobio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	0.3946 ± 0.0908	0.4905 ± 0.1128	0.4207 ± 0.0968	0.1022 ± 0.0235	0.4497 ± 0.1034	0.3564 ± 0.0820	0.6060 ± 0.1394	0.3808 ± 0.0876
Plata Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.000003	0.000010	0.137980 ± 0.013197	0.128865 ± 0.019330	0.083930 ± 0.012590	0.022180 ± 0.003327	0.217111 ± 0.017567	0.190507 ± 0.019576	0.199137 ± 0.029871	0.109739 ± 0.016461
Plomo Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	>20.0000 ± 1.8000	>20.0000 ± 1.8000	>20.0000 ± 1.8000	5.5377 ± 0.4984	>20.0000 ± 1.8000	>20.0000 ± 1.8000	>20.0000 ± 1.8000	>20.0000 ± 1.8000
Potasio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.04	0.13	52.65 ± 4.21	64.18 ± 5.13	53.79 ± 4.30	42.05 ± 3.36	61.78 ± 4.94	60.75 ± 4.86	76.63 ± 6.13	58.47 ± 4.68
Rubidio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0003	0.0009	0.4494 ± 0.0449	0.5601 ± 0.0560	0.4379 ± 0.0438	0.3067 ± 0.0307	0.5627 ± 0.0563	0.5234 ± 0.0523	0.7087 ± 0.0709	0.5048 ± 0.0505
Selenio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	0.0027 ± 0.0006	<0.0013	<0.0013	0.0037 ± 0.0009	0.0031 ± 0.0007	0.0046 ± 0.0011	0.0026 ± 0.0006
Silice Total	EW EPA200 8	mg/L	0.09	0.27	120.87 * ± 12.10	120.67 * ± 14.48	88.66 * ± 10.64	70.45 * ± 8.45	130.77 * ± 15.69	113.60 * ± 13.63	149.39 * ± 17.93	102.89 * ± 12.35
Silicio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.04	0.13	47.15 ± 5.66	56.40 ± 6.77	41.44 ± 4.97	32.93 ± 3.95	61.13 ± 7.34	53.10 ± 6.37	69.83 ± 8.38	48.09 ± 5.77
Sodio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.006	0.019	22.226 ± 2.445	25.539 ± 2.809	28.660 ± 3.153	16.429 ± 1.807	22.655 ± 2.492	21.828 ± 2.401	24.151 ± 2.657	23.190 ± 2.551
Talio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00840 ± 0.00193	0.00987 ± 0.00227	0.00688 ± 0.00158	0.00325 ± 0.00075	0.01215 ± 0.00279	0.01034 ± 0.00238	0.01583 ± 0.00364	0.00975 ± 0.00224
Tantalio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021	<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	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00006	0.00019	0.02029 ± 0.00142	0.03163 ± 0.00221	0.01943 ± 0.00136	0.00588 ± 0.00041	0.02918 ± 0.00204	0.02690 ± 0.00188	0.04729 ± 0.00331	0.02569 ± 0.00180
Titanio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0957 ± 0.0124	0.1277 ± 0.0166	0.0950 ± 0.0124	0.1804 ± 0.0235	0.1234 ± 0.0160	0.1165 ± 0.0151	0.1584 ± 0.0206	0.1076 ± 0.0140
Uranio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.000003	0.000010	0.002877 ± 0.000604	0.002963 ± 0.000622	0.002201 ± 0.000462	0.000575 ± 0.000121	0.003218 ± 0.000676	0.002576 ± 0.000541	0.004259 ± 0.000894	0.002712 ± 0.000570
Vanadio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0001	0.0003	0.1009 ± 0.0151	0.1477 ± 0.0222	0.0932 ± 0.0140	0.0299 ± 0.0045	0.1213 ± 0.0182	0.1289 ± 0.0193	0.2142 ± 0.0321	0.1216 ± 0.0182
Wolframio Total	EW_EPA200_8	mg/L	0.0002	0.0006	0.0604 ± 0.0103	0.2697 ± 0.0458	0.1705 ± 0.0290	0.0547 ± 0.0093	0.0319 ± 0.0054	0.1440 ± 0.0245	0.2089 ± 0.0355	0.1098 ± 0.0187
Yterbio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00002	0.00006	0.00105 ± 0.00022	0.00148 ± 0.00031	0.00095 ± 0.00020	0.00041 ± 0.00009	0.00175 ± 0.00037	0.00132 ± 0.00028	0.00210 ± 0.00044	0.00122 ± 0.00026
Zinc Total	EW EPA200 8	mg/L	0.0008	0.0026	14.4120 ± 1.4412	14.7635 ± 1.4764	10.9122 ± 1.0912	2.2581 ± 0.2258	19.6115 ± 1.9612	12.5764 ± 1.2576	12.2946 ± 2.0295	12.1127 ± 1.2113
Zirconio Total	EW EPA200 8	mg/L	0.00015	0.00045	0.00361 ± 0.00083	0.00506 ± 0.00116	0.00415 ± 0.00095	0.00494 ± 0.00114	0.00523 ± 0.00120	0.00536 ± 0.00123	0.00822 ± 0.00189	0.00497 ± 0.00114

Anexo 7. Operacionalización de Variables

.OBJETIVO GENERAL: Evaluar la cavitación hidrodinámica controlada para la reducción de metales tóxicos en efluentes metalúrgicos

VARIABLES	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	OPERACIONALIZACION	
				INDICADORES	Unidades
VARIABLE INDEPENDIENTE CAVITACION HIDRODINAMICA CONTROLADA	La cavitación se define como el fenómeno de generación, crecimiento y posterior colapso de micro burbujas de vapor (o cavidades) en el seno de un fluido líquido. La implosión de las burbujas ocurre en periodos de mili o microsegundos, liberando una gran cantidad de energía en un mínimo lapso de tiempo. (Gutiérrez et al,2019),	La Cavitación Hidrodinámica Controlada será evaluada mediante parámetros de operación y características físicas del equipo cavitatorio.	Características Físicas del equipo de CH	* Tanque de almacenamiento * Cavitador * Plato de Orificios * Bomba * Refrigeración * Válvulas de control * Generador de Ozon0 * Panel de control	2 1 1 1 4 1 1 1
			Parámetros de Operación	* Presión * Temperatura * Tiempo * Caudal	\$ / m3
VARIABLE DEPENDIENTE REDUCCION DE METALES EN EFLUENTES RESIDUALES METALURGICOS (ERM)	La remoción o degradación de metales en los efluentes industriales, es fundamental para su aprovechamiento posterior; entre los principales metales que se encuentran en las descargas acuosas son el Cd, Zn, Cu, Cr, Ni, Hg, Pb entre otros. Estos iones metálicos son considerados potenciales devastadores de los ecosistemas y la salud humana, he ahí la necesidad de disminuir su concentración en los cuerpos de agua, suelo y aire (Candelaria et al, 2015).	Los efluentes residuales metalúrgicos, serán medidos por la concentración de metales al inicio y final del proceso, a las eficiencias de remoción, al cumplimiento de normativas de L.M.P. para descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas y a las propiedades físico químicas de del efluente antes y después del proceso de cavitación.	Concentración Inicial de metales tóxicos	Al, As , Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, Ag, Pb, Si, Zn	En mg/L
			Concentración Final de metales tóxicos	Al, As , Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, Ag, Pb, Si, Zn	En mg/L
			Eficiencia de remoción de metales pesados	Al, A s , Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, Ag, Pb, Si, Zn	%
			Propiedades Físicoquímicas (Antes y Después)	pH SST Sulfatos T°	Acido /Alcalino mg/L °C

Anexo 8. Matriz de Consistencia

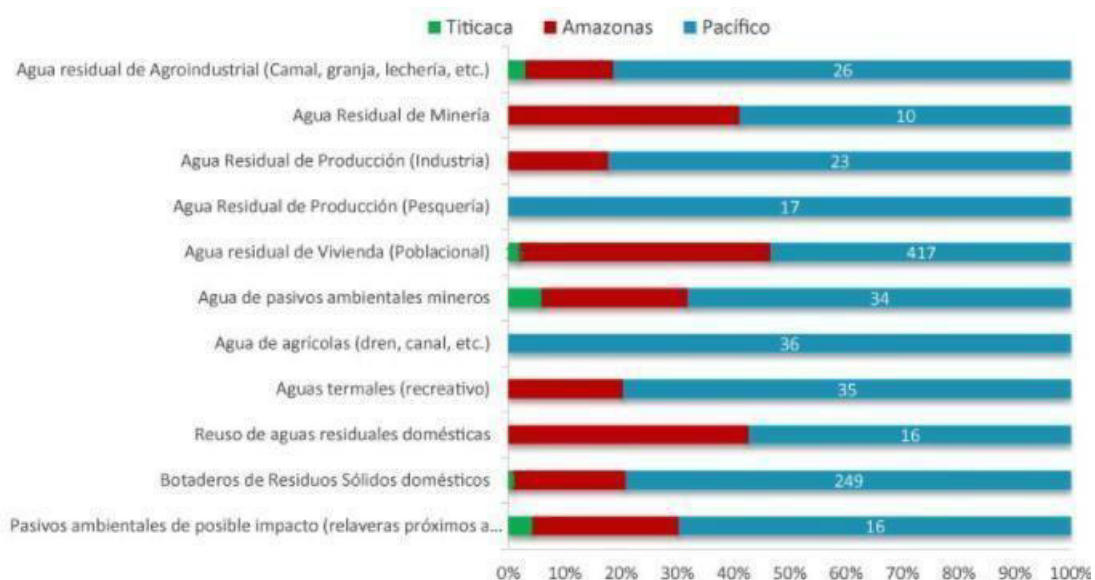
MATRIZ DE CONSISTENCIA

CAVITACION HIDRODINAMICA CONTROLADA PARA REDUCCION DE METALES EN EFLUENTES RESIDUALES METALURGICOS				
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
Problema Principal ¿En qué nivel la cavitación hidrodinámica controlada es eficiente para la reducción de metales tóxicos en efluentes metalúrgicos?	Objetivo General Aplicar la tecnología de cavitación hidrodinámica para la reducción de metales tóxicos en efluentes metalúrgicos de la industria minera	Hipótesis General La aplicación controlada de cavitación hidrodinámica en efluentes metalúrgicos resultará en una reducción significativa de la concentración de metales tóxicos.	Variable Independiente: Cavitación hidrodinámica controlada * Parámetros de Operación * Características físicas del equipo de CH	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACION TIPO: La Investigación aplicada es básico, de diseño experimental , Nieto (2018), se realizará a nivel piloto, con un equipo prototipo de cavitación hidrodinámica, donde las variables de tiempo, caudal, presión y temperatura son manipulables y controladas cuantitativamente, sujeto a observaciones para análisis estadísticos DISEÑO: El diseño de investigación es de control de grupo antes y después, tiene muchas ventajas y se utiliza para estudiar cambios que se producen en el proceso experimental, por lo que se ajusta a las pruebas de laboratorio a realizar (Kerlinger .1975). Población de Estudio: La población que corresponde a la presente investigación, fue la cantidad de aguas residuales que se generaron en una empresa metalúrgica de la región central del país (Junín), cuyo consumo diario está en el orden de 1500 m ³ . Tamaño de muestra: 300 lt Unidad de análisis: 1 Lt - Observación
Problema Específico 1 ¿Cuánto es la concentración de metales tóxicos en el efluente residual industrial metalúrgico antes del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica?	Objetivo Específico 1 Evaluar la concentración de metales tóxicos en el efluente residual industrial metalúrgico antes del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada	Hipótesis Específica 1 La concentración de metales tóxicos antes del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada está por encima de los Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades Minero Metalúrgicas (D.S. N° 010-MINAM)	Variable Dependiente: Reducción de metales en efluentes residuales metalúrgicos * Concentración inicial de metales tóxicos * Concentración final de metales tóxicos * Eficiencia de remoción de metales tóxicos * Características físico químicas de los efluentes	
Problema específico 2 ¿Cuánto es la concentración de metales tóxicos en el efluente residual industrial metalúrgico después del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada?	Objetivo Específico 2 Evaluar la concentración de metales tóxicos en el efluente residual industrial metalúrgico después del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada	Hipótesis Específica 2 La aplicación del sistema cavitación hidrodinámica controlada influye en la reducción de la concentración de metales tóxicos en el efluente residual metalúrgicos después de su tratamiento		
Problema Específico 3 ¿Qué nivel de Eficiencia de remoción de metales pesados en el efluente residual industrial metalúrgico se tiene después del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada?	Objetivo específico 3 Determinar la Eficiencia de remoción de metales pesados en el efluente residual industrial metalúrgico después del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada	Hipótesis Específica 3 La aplicación de un sistema de cavitación hidrodinámica controlada tendrá un impacto positivo en la eficiencia de remoción de metales pesados presentes en el efluente residual industrial metalúrgico		
Problema Específico 4 ¿Qué características fisicoquímicas presenta el efluente residual industrial metalúrgico antes y después del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada?	Objetivo específico 4 Analizar las características fisicoquímicas en el efluente residual industrial metalúrgico antes y después del tratamiento por un sistema de cavitación hidrodinámica controlada	Hipótesis Específica 4 El tratamiento mediante un sistema de cavitación hidrodinámica controlada provocará cambios significativos en las características fisicoquímicas del efluente residual industrial metalúrgico		

Anexo 9: Conflictos Socio Ambientales

Desde la década de 1990, las diferentes administraciones gubernamentales peruanas han implementado progresivamente reformas e instancias, para promover inversiones orientadas a la explotación de recursos no renovables y mitigar los impactos negativos de su aprovechamiento, sin embargo; estas reformas, no han logrado evitar que se multipliquen por todo el país conflictos sociales ambientales que giran en torno a la actividad minera, siendo en consecuencia ; una problemática la gestión de la calidad de los recursos hídricos vinculados a fuentes contaminantes en las tres (03) vertientes hidrográficas del Perú, cuyos contaminantes se detallan en la figura adjunta.

Fuentes contaminantes identificadas por vertiente-hidrográfica, 2010-2012



Nota. Minagri y ANA, 2013.

Del gráfico se puede inferir que en las tres vertientes (Pacífico, Amazonas y Titicaca) se tiene como mayor fuente contaminante al agua residual proveniente de las viviendas y a la disposición inadecuada de los residuos sólidos (esdamim, s. f.) La tipología de los conflictos relacionados con la explotación de los recursos no renovables es amplia, si bien las causas que han generado un creciente número de conflictos entre las empresas mineras, comunidades y entorno son diversa, es necesario, que estas estén bien identificadas y sus operaciones sean auditadas y reguladas por las diferentes instancias del gobierno.

Organizaciones Gubernamentales Reguladoras



Así mismo; de acuerdo con los Reportes de Conflictos Sociales de la defensoría del Pueblo, las más recurrentes se relacionan con los efectos socioambientales (65%), asuntos relacionados al gobierno nacional y local (17%), comunal y territoriales (9%) y la diferencia entre económicos, laborales, o con una combinación de estos.

Conflictos Socio Ambientales

De acuerdo al MINAM y SINIA, “Un Conflicto socioambiental es la situación que surge a consecuencia de los diferentes intereses y motivaciones que poseen los diferentes actores sociales involucrados en una circunstancia ambiental determinada. En un conflicto socioambiental, las partes, toman posición y se enfrentan por hechos vinculados a la escasez, el deterioro o la privación de los recursos naturales. La dinámica del conflicto, dependerá de cómo lo manejen los actores; es decir, de cómo se expresen las diferentes posiciones e intereses y de cómo se recojan en la resolución del conflicto las diversas necesidades de los actores. Las Desigualdades o asimetrías, se refieren a las condiciones de profunda desigualdad en las que pugnan las partes de un conflicto socioambiental. Y ello se debe a que, en la gran mayoría de casos, las

partes en conflicto no tienen ni las mismas capacidades ni el mismo poder.

De acuerdo a la Sociedad de Comercio Exterior del Perú (COMEX), en su semanario de agosto 2022, el crecimiento proyectado del subsector minería metálica para el 2022 se reduce del 5.9% al 2.9% debido a los conflictos mineros, La persistencia de los conflictos sociales genera grandes perjuicios a la economía peruana. Debido a los conflictos mineros, el BCRP redujo la proyección de crecimiento para la economía del 3.4% al 3.1% para el presente año. Así se esperaba que el desempeño del sector primario creciera un 5.3%; sin embargo, se corrigió esta proyección al 3.4% por los conflictos relacionados a la minería.

Al mes de agosto del 2022, se tiene 209 conflictos sociales registrados en todo el territorio nacional, siendo los departamentos de Loreto (28 casos), Cuzco (18 casos), Apurímac (17 casos), Ancash (15 casos), Puno (14 casos), entre los más relevantes y la región central (Junín, Pasco, Huancavelica y Huánuco) con 32 casos.

Conflictos sociales registrados por departamento

Departamento	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022*
Total Perú	260	259	256	232	222	197	202	209
Ancash	27	24	30	36	26	17	15	15
Apurímac	24	26	27	14	13	15	15	17
Ayacucho	16	15	16	11	7	8	8	6
Cajamarca	16	16	16	13	13	10	8	10
Cusco	18	23	20	18	23	22	18	18
Huancavelica	3	3	3	2	2	5	10	10
Huánuco	2	2	4	7	4	3	7	7
Junín	12	13	14	9	10	7	8	9
Loreto	17	20	16	16	18	23	29	28
Moquegua	3	4	7	6	7	6	5	6
Pasco	7	6	3	5	9	9	9	6
Piura	17	18	19	14	12	11	11	13
Puno	23	22	19	20	19	14	14	14
San Martín	2	1	3	5	6	5	5	7

Elaboración Propia, Fuente: Defensoría del Pueblo - SIMCO, * Hasta Agosto 2022 De los 209 casos, 133 (63.6%) están relacionados a temas socioambientales, 22 a casos comunales, 15 y 10 a asuntos de gobierno nacional y local principalmente.

Conflictos sociales registrados según tipo (número de casos)

Tipo de Conflicto	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022*
Socioambiental	174	173	168	144	142	129	129	133
Asuntos de Gobierno Nacional	14	16	22	22	22	13	12	15
Asunto Gobierno Local	24	26	25	20	20	9	9	10
Comunal	11	11	10	13	11	18	19	22
Asuntos de Gobierno Regional	5	6	6	8	9	11	13	13
Otros asuntos	8	7	8	9	8	5	6	5
Laboral	9	4	4	4	6	8	8	6
Demarcación territorial	15	16	13	4	4	4	6	5
Total	260	259	256	232	222	197	202	209

Elaboración Propia, Fuente: Defensoría del Pueblo - SIMCO, * Hasta agosto 2022

De los 133 conflictos socioambientales activos y latentes registrados a Agosto 2022, el 66.9% (89 casos) corresponde a conflictos relacionados a la actividad minera; le siguen los conflictos por actividades hidrocarburíferas con 18.8% (25 casos). A continuación, el cuadro de distribución de conflictos socioambientales de acuerdo a cada actividad.

Conflictos socioambientales según sector (número de casos)

SECTOR / ACTIVIDAD	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022*
Total Socio Ambiental	174	173	168	144	142	129	129	133
Minería	113	106	106	95	94	83	86	89
Hidrocarburos	26	31	25	20	22	23	24	25
Energía	13	13	16	10	7	4	2	2
Otros	9	10	9	8	6	7	6	6
Residuos y Saneamiento	5	5	6	6	8	8	8	8
Agroindustrial	2	4	4	3	3	2	2	2
Forestales	6	4	2	2	2	2	1	1

Bajo el contexto descrito, la actividad de minería e hidrocarburos que trabajan con la extracción de recursos no renovables representan el 85% de la problemática socioambiental existente.

Conflictos socioambientales según sector (expresado en %)

SECTOR / ACTIVIDAD								
TOTAL	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022*
SOCIOAMBIENTAL	174	173	168	144	142	129	129	133
Minería	64.90%	61.30%	63.10%	66.00%	66.20%	64.30%	66.60%	66.90%
Hidrocarburos	14.90%	17.90%	14.90%	13.90%	15.50%	17.80%	18.60%	19%
Energía	7.50%	7.50%	9.50%	6.90%	4.90%	3.10%	1.60%	1.50%
Otros	5.20%	5.80%	5.40%	5.50%	4.20%	5.40%	4.70%	4.50%
Residuos	2.9%	2.90%	3.60%	4.20%	5.60%	6.20%	6.20%	6.00%
Agroindustrial	1.10%	2.30%	2.40%	2.10%	2.10%	1.60%	1.60%	1.50%
Forestales	<u>3.40%</u>	2.30%	1.20%	1.40%	1.40%	1.60%	0.80%	0.80%

Las demandas socioambientales identificadas, (*Reporte-Mensual-de-Conflictos-Sociales-Nº-222-Agosto-2022.pdf*, s. f.) son la expresión pública de una insatisfacción o un desacuerdo, son presentadas en forma de “plataformas de lucha”, “memoriales”, “pliegos de reclamos” o “comunicados”, hacen alusión generalmente a hechos concretos, no siendo usuales las referencias a derechos presuntamente vulnerados o en riesgo; El cuadro adjunto describe el detalle de la demanda social y categoría.

Demandas Sociales identificadas sector Minero

TEMA DE DEMANDA SOCIAL	CATEGORIA
Medio ambiente y recursos naturales	Indemnización o compensación
	Atención a la salud por presunta contaminación
	Protección de ecosistemas frágiles, áreas naturales protegidas, recursos naturales y otros
	Evaluación, monitoreo y participación ciudadana
	Fiscalización ambiental
	Cese de presunta contaminación ambiental adecuada utilización de recursos hídricos
	Elaboración, evaluación, aprobación, modificación de instrumentos de gestión ambiental y participación ciudadana.
Actividades extractivas y/o industriales y relacionamiento	Oposición a las actividades extractivas o industriales
	Aprobación, modificación o revisión de convenio marco, contratos y/u otros acuerdos
	Inversión en desarrollo y relacionamiento
	Contratación de empresas o de mano de obra local
	Facilidades para la formalización minera y otras actividades extractivas o industriales
	Erradicación de las actividades ilegales e informales

Fuente: Defensoría del pueblo, reporte de conflictos sociales N° 222, agosto 2022.

Anexo 10. Volumen anual vertimiento aguas residuales industriales autorizadas por actividad económica 2020 (m3).

Sector	Cantidad (m3)	Participación
Minería	150,618,573	24.1%
Pesquería	9,618,566	1.5%
Energía	2,435,438	0.4%
Industria	50,060,152	8.0%
Saneamiento	409,823,050	65.7%
Agricultura	<u>1,445,949</u>	0.2%
	624,001,728	100%

Fuente; ANA 2020