





LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO
y su efecto en la remoción de zinc de aguas residuales



Caty Ceras Cuadros
Hans Gianny Ochoa León
Ever Florencio Ingaruca Álvarez

EDITORIAL
TERCER SOL
MEXICO

LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO y su efecto en la remoción de zinc de aguas residuales

Caty Ceras Cuadros
Hans Gianny Ochoa León
Ever Florencio Ingaruca Álvarez

Caty Ceras Cuadros
Correo de contacto: cceras@uncp.edu.pe
Perfil: Ingeniera Químico egresada de la Universidad Nacional del Centro del Perú, colegiada con CIP N° 148896, con maestría en Seguridad y Medio Ambiente en Minería y estudios concluidos de doctorado en Ingeniería Química y Ambiental.
Experiencia como analista junior y manejo del equipo de Absorción Atómica, en la empresa Bureau Veritas Inspectorate Services Perú S.A.C.; control documentario en el sistema de gestión de seguridad y como Inspector – Prevencionista en Seguridad, Salud y Medio ambiente; docente universitario en la facultad de Ingeniería Química de la UNCP, perteneciente a la línea de investigación de Nanotecnología de la UNCP, preparación de nanomateriales, síntesis y caracterización de nanopartículas para el tratamiento de aguas residuales.
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6251-534X
Afiliación: Universidad Nacional del Centro del Perú.

Ever Florencio Ingaruca Álvarez
Correo de contacto: eingaruca@uncp.edu.pe
Perfil: Ingeniero Químico. Egresado de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Maestro en Ingeniería Química Ambiental de la Universidad Nacional de Trujillo. Estudios concluidos de Doctorado en Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Estudios concluidos de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Química, Universidad de Concepción, Chile. Estudios concluidos de Segunda Especialización en Ingeniería del Gas Natural en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Coordinador del Grupo de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología (NanoTech) FIQ-UNCP, Responsable del Laboratorio de Nanotecnología de la FIQ-UNCP. Asesor del Capítulo Estudiantil AIChE, UNCP, Consejero en representación de las Universidades de Junín ante el Consejo de Recursos Hídricos de la Cuenca Interregional del Mantaro. Docente de la Facultad de Ingeniería Química en la Universidad Nacional del Centro del Perú. Responsable de los Proyectos de Investigación del Grupo de NanoTech, Universidad Nacional del Centro del Perú. Autor y coautor de artículos científicos en revistas nacionales e internacionales. Expositor en eventos académicos nacionales y extranjeros. Líneas principales de investigación en aguas residuales, bioprocesos, ciencia de los materiales, síntesis y caracterización de nanopartículas. Experiencia en formulación, evaluación y ejecución de proyectos ambientales para el sector público y privado. Amplia experiencia en estudios ambientales.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4142-4507
Afiliación: Universidad Nacional del Centro del Perú.

Hans Gianny Ochoa León
Correo de contacto: d.hochoal@upla.edu.pe
Perfil: Ingeniero Químico graduado de la Universidad Nacional del Centro del Perú, colegiado con CIP N° 148940, con Maestría es Seguridad y Medio Ambiente en Minería. Con experiencia profesional como analista de laboratorio químico; experiencia como inspector profesional en Insumos Químicos y Bienes Fiscalizados en la División de Auditoria en la I.R. Junín y en la Intendencia Nacional de Insumos Químicos y Bienes Fiscalizados de la SUNAT. Docente universitario adscrito a la facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Peruana Los Andes. Investigador en la línea de nanotecnología perteneciente a la línea de investigación de Nanotecnología de la UNCP, preparación de nanomateriales, síntesis y caracterización de nanopartículas para el tratamiento de aguas residuales.
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5673-8077
Afiliación: Universidad Peruana Los Andes.

Todas nuestras publicaciones son sometidas a
revisión doble-ciego de pares académicos
(*Peer Review Double Blinded*).

Esta publicación cuenta con licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial - SinObraDerivada 3.0 Unported License.



Los procesos de tratamiento y su efecto en la remoción de zinc de aguas residuales

© Caty Ceras Cuadros
© Ever Florencio Ingaruca Álvarez
© Hans Gianny Ochoa León

Editado por:
© Editorial Tercer Sol
www.editorialtercersol.com

ISBN: 978-607-59951-4-4
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.10042363

Este libro es resultado de la investigación *"Remoción de zinc de las aguas de mina en el nivel 3900 de la compañía minera Los Quenuales - Unidad de Producción Yauliyacu a nivel de laboratorio"*, realizada en la Universidad Nacional del Centro del Perú.

Queda prohibida la reproducción bajo cualquier modalidad de toda o una parte de esta obra sin autorización expresa del titular de los derechos.

Editado en México / *Published in Mexico*

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS **5**
ÍNDICE DE FIGURAS **6**
INTRODUCCIÓN **7**

CAPÍTULO I ASPECTOS RELEVANTES DE LA INDUSTRIA MINERA Y SU RELACIÓN CON LAS AGUAS RESIDUALES **9**
1.1. ¿Qué se comprende por la industria minera? 10
1.2. La actividad minera y metalúrgica: aspectos comparativos 13
1.3. La industria minera y su efecto en la calidad de aguas 15
1.4. Principales fuentes de generación de aguas residuales 18

CAPÍTULO II EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: NOCIONES ELEMENTALES **22**
2.1. Concepciones generales de las aguas residuales 23
2.2. Tratamientos biológicos de las aguas residuales: características generales 26
2.3. Procesos sustanciales para el tratamiento de aguas residuales 29
2.4. La toma de muestras de aguas residuales: fundamental para su investigación 33

CAPÍTULO III LA CONCENTRACIÓN DE SUSTANCIAS COMO EL ZINC EN AGUAS: ESENCIALIDADES **38**
3.1. Concentración de sustancias: reflexiones medulares 39
3.2. La actividad de la ingeniería química: remoción de sustancias como el zinc 43
3.3. Limitaciones para las descargas de aguas al ambiente 46
3.3.1. Límite máximo permisible 48
3.3.2. Límite promedio anual 48
3.4. Relación entre la ingeniería química y la minería: generalidades 49

CAPÍTULO IV LA EFICACIA DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN DE ZINC DE AGUAS DE MINA EN UNA COMPAÑÍA MINERA **51**

CAPÍTULO V ASPECTOS CONCLUYENTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE LA REMOCIÓN DEL ZINC Y SU EFECTO EN LA SALUD DEL HOMBRE Y EL CUIDADO DEL MEDIOAMBIENTE **80**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **86**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Fuentes de origen de las aguas residuales	24
Tabla 2.	Pasos comunes para el tratamiento de aguas residuales	27
Tabla 3.	Mediciones de concentración en sólidos y en líquidos	41
Tabla 4.	Dependencia del rechazo en el pH para el compuesto químico cZn(II) = 100-120 mg L-1, y las configuraciones del experimento medidos en P = 10 bar, T = 25°C	45
Tabla 5.	Concentración y rechazo observado de Zn de la muestra real de agua residual, membrana AFC 40, P = 10, 15 y 20 bar, pH 4,5, caudal de alimentación 9 L min-1, T = 25°C	45
Tabla 6.	Flujo de agua pura y de permeado con una muestra real de agua residual, membrana AFC 40, P = 10, 15 y 20 bar, flujo de alimentación 9 L min-1, T = 25°C	46
Tabla 7.	Variables y dominio experimental	54
Tabla 8.	Diseño factorial	54
Tabla 9.	Parámetros físicos de la muestra de agua de mina	58
Tabla 10.	Concentración de zinc (ppm) en la muestra de agua de mina	58
Tabla 11.	Datos experimentales para la curva de neutralización	59
Tabla 12.	Datos experimentales para el proceso de coagulación	61
Tabla 13.	Datos experimentales para el proceso de floculación	62
Tabla 14.	Datos experimentales para la sedimentación	64
Tabla 15.	Concentración final de zinc de las dos repeticiones en el equipo de jarras	66
Tabla 16.	Concentración final de zinc en las dos repeticiones en el módulo	67
Tabla 17.	Promedios de las concentraciones finales de zinc	68
Tabla 18.	Eficiencia de remoción de zinc de las dos repeticiones	70
Tabla 19.	Matriz de diseño	75
Tabla 20.	Las combinaciones de los tratamientos	75
Tabla 21.	Resultados para el contraste	76
Tabla 22.	Resultados para la sumatoria de cuadrados	76
Tabla 23.	Resultados del análisis de varianza	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de neutralización convencional 21
Figura 2. Proceso de Lodos de Alta Densidad (HDS) 21
Figura 3. Estado pastoso del agua 33
Figura 4. Disgregación de agua de mina 34
Figura 5. Diferentes muestras de agua con $FeCl_3$ 35
Figura 6. Proceso de sedimentación en la toma de agua 36
Figura 7. Estandarización de materiales y de parámetros para el cálculo muestral de los niveles de zinc 44
Figura 8. Espacio tridimensional 54
Figura 9. Curva de neutralización 60
Figura 10. Curva de coagulación 61
Figura 11. Curva de floculación 63
Figura 12. Curva de sedimentación 64
Figura 13. Curva de la zona interfacial 65
Figura 14. Curva de la zona de transición y comparación 65
Figura 15. Promedios de las concentraciones finales de zinc 68
Figura 16. Comparación de eficiencia de zinc 70
Figura 17. Balance de materia para sólidos en suspensión 72

INTRODUCCIÓN

La actividad minera es necesaria en el desarrollo económico de un país; sin embargo, puede ocasionar resultados negativos como la contaminación y la destrucción (Vilela et al., 2020). En ese sentido, Ayala et al. (2019) indican que la actividad minera puede afectar el recurso hídrico de varios modos, contaminando sus fuentes superficiales, subterráneas y de consumo humano. De acuerdo con ello, la industria minera coopera con el progreso de la humanidad, pero también puede afectar gravemente los recursos de la naturaleza como el agua; por tal motivo, se deben tomar medidas que cooperen con la reducción de aguas infectadas por sustancias de la actividad minera.

Las aguas residuales, producto de la actividad minera, son todas las fuentes líquidas que provienen de las industrias y se encuentran descargadas en espacios fuera la industria (Peña y Araya, 2021), por ende, el tratamiento de estas aguas es factible para reducir los agentes contaminantes de la industria minera, e implica una cantidad de procesos químicos, físicos y biológicos que reestructuran la composición del agua con el fin de que este recurso de la naturaleza sea favorable para el consumo humano y de los animales. Además, este tratamiento implica una toma de muestras para comprobar el estado de las aguas (específicamente residuales).

Por otro lado, cabe indicar que, en la actividad minera, se emplean elevadas cantidades de agua que pueden servir de abastecimiento para varios habitantes de una región. Este hecho

fomenta el uso de aguas residuales tratadas que se requieren en una tarea relacionada con la concentración de minerales (Aquino, 2017). La concentración de minerales u otras sustancias alrededor del planeta se constituye como el resultado de las actividades humanas y los fenómenos naturales. En el caso del agua, el aumento de las acciones antropogénicas facilita, en gran proporción, su contaminación química, física y orgánica (INEI, 2019).

El agua residual puede presentar ciertos metales pesados como el plomo, cadmio, cromo y zinc, los cuales son descargados en los ecosistemas acuáticos. La existencia de esta agua se muestra como un peligro para la biodiversidad, a pesar de que posea baja concentración de tales metales (Pabón et al., 2020). Uno de estos metales es el zinc; este elemento químico es necesario para los organismos biológicos, aunque la concentración elevada de este es un compuesto tóxico que puede desencadenar un riesgo para la vida en el agua, sobre todo, para los peces (Barros et al., 2016). En ese sentido, se deduce que la remoción del zinc de las aguas residuales es una acción que contribuye con la preservación de especies de peces.

Además, la existencia de esta concentración de metales u otras sustancias posibilita la realización de estudios que tratan de mejorar las condiciones químicas y físicas del agua residual con el fin de reutilizar el agua y favorecer a las distintas especies de vida que existen en el mundo.

Por todo lo expresado, se comprende que los temas relacionados con la industria minera, el tratamiento de aguas residuales y con la concentración de sustancias químicas son importantes para el cuidado del medioambiente y de la biodiversidad. A causa de ello, es propicio conocer las esencialidades de estos temas.

CAPÍTULO I

ASPECTOS RELEVANTES DE LA INDUSTRIA MINERA Y SU RELACIÓN CON LAS AGUAS RESIDUALES

La importancia del agua en la vida del ser humano es tal que ocupa un papel decisivo en la dimensión económica cuando se busca industrializar un territorio. De acuerdo a Pérez y Guimaraes (2017), para el sector minero las corrientes de agua fueron desde siempre tanto un recurso indispensable como un espacio de necesaria innovación técnica para su acceso. En las últimas décadas del siglo XIX, el progreso de la revolución tecnológica trajo una expansión clave de la industria minera, y con ello un veloz desarrollo de la degradación de las aguas mineras.

En ese sentido, controlar la calidad del agua se ha ido convirtiendo en uno de los mayores retos que atraviesa el mundo, pues, a causa de las actividades antrópicas, se depositan en los ecosistemas acuáticos restos industriales, urbanos y productos empleados para el bienestar humano mediante aguas residuales. La producción y utilización intensiva de productos químicos en las actividades humanas deriva irremediablemente en el deterioro de los cuerpos de agua en todo el planeta "por la adición de materia orgánica, sales solubles, metales pesados y diversas sustancias con efectos tóxicos a la biota" (Robledo et al., 2016, p. 222).

De todos los desechos, la actividad minera provee aquellos que representan mayor peligrosidad para la integridad humana y la sostenibilidad de los ecosistemas. Los metales pesados, por ejemplo, son amenazas potenciales para los recursos hídricos por su toxicidad en bajas concentraciones puesto que son bioacumulables y no biodegradables. Los metales tóxicos en las descargas mineras se presentan en altas concentraciones, lo que ocasiona perturbaciones físicas, químicas y biológicas en los cuerpos de agua como turbidez, viscosidad, incremento de la necesidad de oxígeno, alteraciones en el pH, etc. (Vera et al., 2016).

1.1. ¿Qué se comprende por la industria minera?

En primer lugar, es central conceptualizar la actividad en torno a la cual se desarrolla toda una industria: la minería. La minería es una actividad económica dedicada a la extracción de minerales concentrados en espacios naturales conocidos como yacimientos. La escala industrial de la minería es indisociable al papel que ocupan las grandes compañías multinacionales en la producción, procesamiento y transporte de los minerales.

Tamayo et al. (2019) explican que un yacimiento es un acontecimiento insólito en la naturaleza debido a las altas concentraciones de recursos minerales que presenta en la corteza terrestre. Ahora bien, existen variables que condicionan la explotación de un yacimiento minero, a partir de lo cual se desprenden dos naciones: recursos y reservas. Los recursos refieren a la acumulación de minerales susceptibles de explotación; la reserva es una sección de todo ese recurso que, a través de análisis de campo y de rentabilidad que pueda generar, ha resultado viable para ser extraída. El primero con respecto al segundo es una etapa previa, más elemental.

La industria minera interviene directa e indirectamente en otras industrias de un país. En el caso del Perú, los productos mineros metálicos y no metálicos adoptan distintas

funciones según el sector al que serán dirigidos. Por ejemplo, la conductividad del cobre lo convierte en recurso vital para la industria eléctrica, electrónica y construcción. Por su resistencia mecánica, el hierro y el acero son productos de alta demanda en la industria de la construcción (Tamayo et al., 2017).

La industria minera destaca por el considerable impacto que produce en la economía de un país, más aún en los países en vías de desarrollo. En países como Colombia y Perú, el sector minero se entiende como un poderoso motor de la economía nacional. Espinosa et al. (2016a) apunta que las enormes cantidades de minerales extraídos en esos países reflejan sus economías nacionales en creces. En la actualidad, el sector minero es el negocio de materia prima de mayor relevancia en el mercado global, debido a que son cada vez más las compañías mineras que participan en la explotación de metales. Con frecuencia se invisibilizan los impactos sociales y ambientales, pero los índices económicos de los países extractivistas no para de crecer. El Perú, gran explotador minero de alcance mundial, se ubica en el puesto número uno en explotación aurífera en Latinoamérica y entre las ocho primeras posiciones a nivel mundial en la explotación de plata, cobre y zinc (Espinosa et al., 2016a)

La minería *per se* es una actividad de alto riesgo por los efectos nocivos que puede ocasionar en el medioambiente si no es apropiadamente regulada y fiscalizada. Continuando con el caso peruano, Salazar (2019) subraya las complejidades del sector minero, pues si bien ha contribuido notoriamente a la economía nacional (representa más del 10% del producto bruto interno (PBI) y el 61.8% de las exportaciones), también ha acarreado conflictos como Tía María y las protestas de comunidades arequipeñas tras la publicación del estudio de impacto ambiental del proyecto minero en 2011. Este caso refleja la divergencia de intereses entre la empresa privada (Southern Copper), el Estado, los gobiernos locales y las comunidades de las zonas aledañas al yacimiento.

Como bien anota Martínez (2016), estos desencuentros entre la actividad minera y las secuelas ecológicas y ambientales ocurre no solo a nivel regional; al contrario, es una constante en el contexto global. Los perjuicios ecológicos suelen ser ocasionados por una negligente actividad minera y carente de enfoque de responsabilidad socio-ambiental. En términos concretos, las afectaciones que se producen en el medioambiente a causa de la minería van desde la contaminación y agotamiento del agua, la contaminación de los suelos, el desgajamiento de cerros, la contaminación sonora, la invasión de zonas naturales protegidas, la explotación y traslado ilegal de minerales y la desestructuración territorial. En esta enumeración, Martínez (2016) agrega un perjuicio no menor que tiene que ver con las amenazas a opositores del proyecto minero, desapariciones y muertes, todo en el marco de un conflicto social.

Ciertamente, los países que gozan de una fuerte presencia de la industria minera han tenido que aplicar un marco normativo que regule las actividades extractivas. Estas medidas son concebidas para reglamentar las operaciones de la actividad minera desde múltiples enfoques: medioambiental, social, laboral, tributario.

El sistema de concesiones mineras es un mecanismo legal utilizado en varios países latinoamericanos para "otorgar a los titulares el derecho a la exploración y explotación de los recursos minerales de los recursos minerales en el subsuelo del área concedida" (MINEM, 2008, p. 7). Como el Perú, Chile contempla el derecho a la consulta previa como parte requisito para el otorgamiento de concesiones mineras. No obstante, Carmona (2020) comenta que en las concesiones mineras la norma consultiva pierde operatividad. El autor afirma que desde la puesta en vigencia de esta norma los pueblos indígenas no están siendo consultados en los procesos de otorgamiento de concesiones de exploración y explotación de recursos minerales.

Como parte de la consulta, las concesiones mineras comprenden un estudio de impacto ambiental que tiene que contar con la aprobación de los organismos estatales (en el caso peruano, la Dirección General de Asuntos Ambientales del MINEM o la oficina ambiental de los Gobiernos Regionales en el caso de minería artesanal). Las evaluaciones de impacto ambiental persiguen el objetivo de mitigar los efectos que la actividad minera produce en el ecosistema y en el entorno humano. Asimismo, son estrategias de prevención de gestión ambiental, pues instalan un marco de referencia dentro del cual las políticas ambientales deben ser cumplidas (Rosario, 2016).

En el plano económico, existe el régimen tributario exigido por parte del Estado a las compañías mineras. En el Perú, la recaudación de la tributación minera tiene distintos canales de ingreso, a saber, el Impuesto a la Renta (IR), el canon minero, las regalías, el Impuesto Especial a la Minería y el Gravamen Especial a la Minería. Como señala Chávez (2019), "el 47 % de las utilidades de una minera se destina al pago de impuesto en el Perú". En teoría, la alta tasa de recaudación está concebida para ser destinada exclusivamente a proyectos de infraestructura e investigación. Sin embargo, de acuerdo con Moscoso et al. (2021), las autoridades públicas no han ejecutado eficientemente los recursos recibidos por la industria minera que se traduzca en la satisfacción y bienestar de los ciudadanos.

1.2. La actividad minera y metalúrgica: aspectos comparativos

La metalurgia comprende una gama de técnicas y operaciones industriales segmentadas en todo el mundo cuya finalidad es, por medio del procesamiento y extracción de minerales, la manufacturación de metales. A día de hoy, las técnicas empleadas en la industria metalúrgica se han optimizado a sobremanera, consiguiendo la extensión y replicación de tales procesos tecnificados de producción de piezas en serie de variables características, logrando niveles de calidad de alta factura. En ese sentido, explica González (2018) se ha difundido el

"conocimiento técnico especializado en numerosos procesos de fabricación de metales (tales como función, forjado en caliente, maquinado, entre otros)", conocimiento que se ha desarrollado a una elevadísima intensidad desde el origen de la revolución industrial.

La metalurgia tiene injerencia en muchas otras industrias como la petrolera, automotriz, eólica, puesto que provee piezas y productos esenciales para la marcha de tales negocios. Del mismo modo, tiene presencia en las ciencias de los materiales, cuya finalidad es descubrir y manufacturar materiales nuevos, entre ellos las aleaciones (Aragunde y Campos, 2017).

Cuando estas actividades productivas presentan desperfectos, el metalúrgico tiene que identificar las causas de dichas anomalías mediante un examen detallado de análisis y experiencia. La participación de la metalurgia es, como se ha señalado, fundamental en la producción de metales, que van desde la extracción de minerales hasta el proceso de fundición. Cada etapa de este proceso de producción es aprovechada por el metalúrgico para estudiar el comportamiento y las cualidades de los metales; con esto y su experiencia, se valen para producir cada vez mejores piezas (Campos y Aragunde, 2017)

El rasgo distintivo de la actividad minera es que, a diferencia de la metalurgia, aquella contempla procesos de preparación para la exploración y explotación de minerales como la adecuación del ambiente, instalación de campamentos, túneles, canales de oxigenación al interior de la mina, etc. Por su parte, la metalurgia presta atención particularmente a actividades de obtención de recursos y materiales de interés, así como en la fabricación de piezas a partir de componentes derivados del metal.

Ahora bien, no se trata de disciplinas incompatibles pues también se habla en la actualidad de la presencia de una actividad minero-metalúrgica que comprende dos actividades centrales: la extracción de minerales en bruto y la metalurgia con énfasis en las actividades

de fundición de metales y manufacturación de productos a partir del metal. Tal cual apunta, Gallardo et al. (2019) esta conjunción de sectores implica también una potente generación de impactos ambientales negativos, que se agravan en razón de las gestiones inadecuadas de dichos procesos desde el momento en que los proyectos son concebidos.

1.3. La industria minera y su efecto en la calidad de aguas

Los efectos colaterales de la actividad minera en el medioambiente han sido materia de controversia, reclamos y conflictos. Concretamente, la industria minera con frecuencia genera un impacto nocivo en el agua, no solo porque menoscaba la disponibilidad del recurso al consumir incalculables galones de agua para las operaciones extractivas, sino porque afecta la calidad del agua por efectos de contaminación.

En la minería a pequeña escala, la contaminación del agua ocurre por el empleo del mercurio en los procesos de extracción de oro. La minería artesanal (muchas veces en su forma ilegal) emplea técnicas rudimentarias de extracción aurífera. Entre ellas, está el proceso de amalgamación con mercurio que se usa para depurar el oro separándolo de partículas sin valor, para más adelante someter al mercurio a evaporación. Tras el proceso de evaporación, el gas de mercurio se enfría, se condensa y se introduce en la corteza terrestre y en los cuerpos de agua (Chacón, 2019).

De acuerdo con Loza y Ccancapa (2020), "muchas zonas mineras son importantes fuentes de dispersión en sistemas acuáticos y contribuyen a la contaminación por metilmercurio" (p. 34). El metilmercurio es una versión más nociva que el mercurio en su forma original, producido por la metilación del mercurio inorgánico por injerencia de bacterias y microorganismos presentes en el suelo, aire y agua. Luego, es recurrente la bioacumulación (la acumulación del metilmercurio en organismos acuáticos) cuya

concentración incrementa en razón de su ascenso a niveles tróficos más altos de la cadena alimenticia (biomagnificación). Así pues, el ser humano, consumidor de estos organismos y especies, se halla expuesto ante un peligro de elevada toxicidad (Loza y Ccancapa, 2020).

Debido a que se acumula sin dificultad en los organismos vivos, el mercurio es un contaminante duradero y altamente tóxico. Domínguez et al. (2016) explican que la contaminación producida por envenenamiento de mercurio ocasiona trastornos neurológicos y renales, y empeora el funcionamiento de los pulmones. Si bien en los países de primer mundo es ilegal el uso de mercurio metálico en la extracción aurífera, se sigue usando en varias partes del mundo en minería a pequeña escala. En los países menos desarrollados, las actividades de explotación aurífera en minerías artesanales llegan a liberar al ecosistema hasta 800 toneladas de Hg metálico por año, cantidad que comprende el 20 % de las emisiones globales de mercurio producto de actividades antropogénicas (Domínguez et al., 2016).

Por otro lado, los relaves mineros son otra manifestación de contaminación hídrica ocasionada por las actividades extractivas. Luego de la extracción de minerales sulfurados en el proceso de flotación, se generan los relaves mineros: residuos compuestos de agua mezclada con mineral molido y de las rocas desechadas durante la excavación (Menéndez y Muñoz, 2021). Eventualmente estos residuos tienen que ser trasladados a depósitos de tratamiento y aislamiento del material tóxico. Sin embargo, la construcción defectuosa o la longevidad del depósito dan pie a posibles filtraciones de pozos de relave. Esto acarrea un proceso de contaminación del agua tomando en cuenta que las filtraciones emplean la misma trayectoria de la corriente subterránea para la propagación del contaminante (Peña y Araya, 2021).

La peligrosidad de los relaves mineros se potencia en la medida en que la mala gestión de los mismos representa una pérdida absoluta de garantías. Según Menéndez y Muñoz (2021),

el riesgo de los relaves mineros tiene su fuente en dos características centrales: de un lado, su manejo ineficiente en todas las etapas de control (confinamiento, recolección, transporte y tratamiento); de otro lado, sus componentes tóxicos, a saber, As (arsénico), Cd (cadmio), Cu (cobre), Pb (plomo), Hg (mercurio), Cr (cromo), Se (selenio), Zn (zinc), entre otros.

Siguiendo con Menéndez y Muñoz (2021), resulta inevitable considerar la contaminación de relaves mineros en los proyectos de minería, en concreto con la degradación de los suelos, aire y, por supuesto, de las aguas superficiales y subterráneas. La contaminación por relaves minerales introduce minerales y metaloides en las zonas en que se infiltra, trastornando los modos de vida de las personas. No solo afecta el estilo de vida cotidiano de las personas: también influyen negativamente en actividades económicas y productivas que manejan productos de consumo humano (en la ganadería, por ejemplo, los animen padecen malestares a causa del agua contaminada que ingieren y estos posteriormente pasan a ser consumidos por el ser humano).

Ahora bien, como se ha comentado, la contaminación hídrica puede ser contrarrestada con una gestión eficiente de los relaves mineros. Comentando el caso de extracción aurífera, Espín et al. (2017) señalan que un manejo adecuado de relaves podría implicar beneficios económicos si se emplean procesos metalúrgicos correctos y tecnología capaz. Los relaves requieren de un tratamiento especializado: por su contenido altamente tóxico para los cuerpos de agua, tienen que ser apropiadamente almacenados, implementando tecnología ecológicamente racional y económicamente sostenible, con el objetivo de preservar la integridad de las comunidades, el medioambiente y el entorno sociocultural. Un monitoreo efectivo que busque amortiguar la infiltración de los tranques de relave debe contemplar, entre sus técnicas de manejo, a obras civiles de permanente control y láminas geosintéticas para rellenos de tierra (geomembrana) (Espín et al., 2017).

1.4. Principales fuentes de generación de aguas residuales

En términos elementales, las aguas residuales son aquellos cuerpos de agua que "han sufrido una alteración en sus características originales debido a la actividad humana" (OEFA 2014, citado en Rivera, 2019). La influencia antropogénica menoscaba las propiedades y la calidad del agua pues, al estar cargadas de impurezas, se tornan en elementos altamente contaminantes. Una vez que se transforman en residuos de la actividad humana (doméstica o industrial, por lo general), el agua pierde todo el valor que inicialmente tenía asignado para una tarea en específico.

Considerando que la actividad humana se vale del agua para realizar actividades harto diversas, se pueden localizar distintos focos de generación de aguas residuales. En el ámbito doméstico, se producen aguas residuales como resultado de las actividades humanas llevadas a cabo en el hogar. El grado de contaminación de las aguas residuales domésticas obedece a sus múltiples formas de empleo que implican la presencia de desechos orgánicos, jabones, detergentes, grasas, aceites, etc. Menchaca y Lozada (2017) advierten la importancia de atender las aguas residuales domésticas pues se trata de la esfera en que se "ubican prácticamente las actividades de todos los seres humanos, mismas que impactan y afectan sensiblemente los servicios ambientales ecosistémicos" (p.15). Debido a los elementos nocivos que se desprende de la actividad doméstica (materia orgánica, drenaje, aceites, detergentes, etc.), las aguas residuales domésticas representan una peligrosidad que, de no ser tratada apropiadamente, dañan los mantos acuíferos y las aguas superficiales y subterráneas.

Existen varios sistemas de tratamiento de las aguas residuales pensados para depurar los cuerpos de agua de las impurezas por medio de una red integrada de operaciones físicas, químicas y biológicas. Como explican Vargas et al. (2020), en los procesos físicos, se

procede a determinar las propiedades diferenciales de las partículas y las del agua aplicando procedimientos de disolución como la sedimentación y la flotación; en los químicos, se hace uso de coagulantes o floculantes con el objetivo de producir partículas coloidales de alta densidad que posteriormente sean susceptibles de ser divididas; y en los procesos biológicos, la estrategia de tratamiento consiste en valerse de los procesos naturales de los ríos, lagos o suelos en donde los microorganismos se alimentan de la materia orgánica (componente abundante en los aguas residuales domésticas) y producen material celular. Esta alternativa es funcional para estabilizar, condensar y separar los sólidos coloidales incapaces de sedimentarse naturalmente.

En cuanto a las aguas residuales domésticas, la finalidad de su tratamiento es contrarrestar los niveles de contaminación en las aguas subterráneas y superficiales, puesto que generalmente el trayecto de las aguas residuales tiene como estadio final los cuerpos de agua y el suelo. En los países subdesarrollados (latinoamericanos, entre ellos), los índices de aguas residuales tratada son mínimos, lo cual obedece a factores esencialmente económicos, al abandono de las autoridades ambientales y a la ignorancia de procedimientos técnicos necesario para esta clase de tratamientos (Vargas et al., 2020).

En la industria minera, el agua es un recurso que se consume en enormes cantidades. En varias etapas de las operaciones mineras, el uso y desuso del agua está presente: en el agua fresca, agua de procesos (enfriamiento, limpieza, producción, calefacción), agua de contacto (agua que interacciona con sustancias minerales), escorrentías de aguas residuales y el drenaje de mina (escurrimiento de flujos de agua).

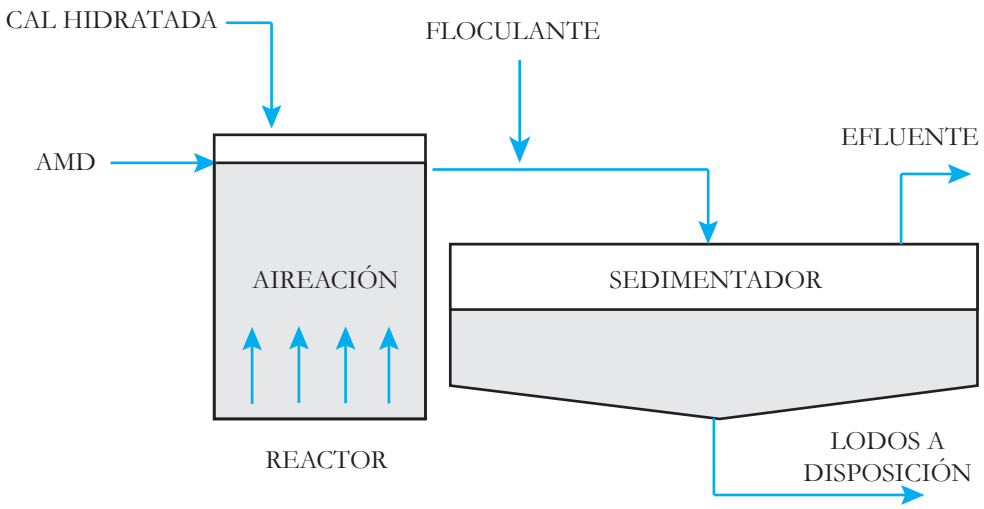
En algunas minas, la interacción de los minerales con la pirita (FeS_2) (el principal mineral sulfurado) produce, por medio de la oxidación, ácido sulfúrico (H_2SO_4). Espinosa et al. (2016b) señalan que si bien este proceso de generación de ácido sulfúrico (conocido

también como drenaje ácido de mina) es un fenómeno natural, esta se potencia con la intervención de las compañías mineras y sus actividades de explotación que perturban las zonas mineralizadas. La explotación de los yacimientos mineros expone a los componentes del área socavada a los elementos del intemperismo natural (rocas de mina), lo cual hace del lugar una zona de extrema peligrosidad pues se convierte en una poderosa fuente de generación de drenaje ácido. En ese contexto, la amenaza de contaminación se hace latente en razón de la descarga del drenaje ácido en ríos, lagos o arroyos (Espinosa et al. 2016b).

Pérez et al. (2017) precisan que al drenaje ácido de mina (AMD, por sus siglas en inglés) contiene altas concentraciones de hierro (bajo la forma de $FE(OH)_3$, que presenta coloración roja/naranja), de sulfato (por encima de los 2500 mg/l y bajo pH (2.0-4.5)). En todo este compuesto, como se ha indicado, la pirita es el mineral hegemónico en la generación de AMD. El impacto negativo del drenaje ácido en el medioambiente tiene que ser tratado "antes de su descarga a aguas superficiales o de su extracción para consumo humano" (Pérez et al., 2017, p. 54).

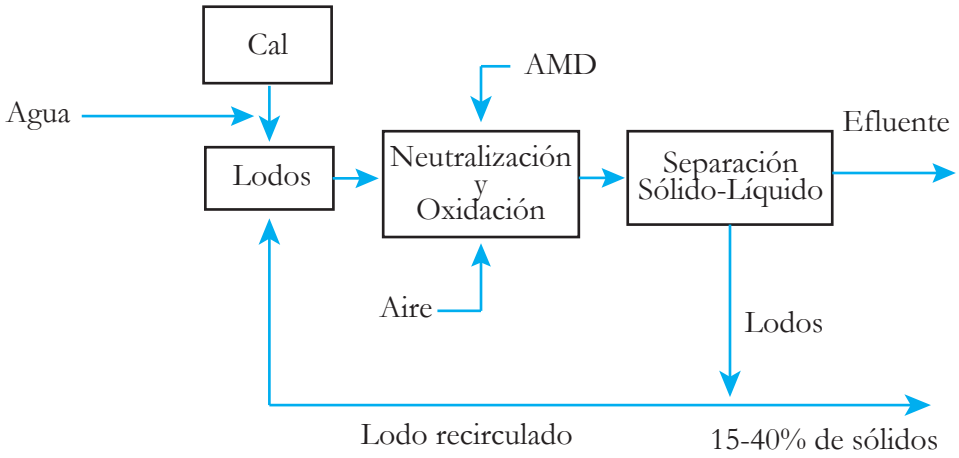
En definitiva, el drenaje ácido de mina, si no es monitoreado adecuadamente, puede llegar a convertirse en la fuente principal de polución de los relaves mineros, pues el AMD está constituido por relaves con altas concentraciones de minerales sulfurados (Pérez et al, 2020). No solo son perjudiciales para la actividad biológica o los cursos de agua, sino que incluso pueden deteriorar estructuras construidas por el ser humano. Es así que, en la actualidad, existen distintos sistemas de tratamiento del drenaje ácido de mina como, por ejemplo, el proceso de neutralización convencional (Ver Figura 1), la ósmosis inversa, el proceso de lodos de alta densidad (HDS) (Ver Figura 2), intercambio iónico, etc. (Espinosa et al., 2016b).

Figura 1. *Proceso de neutralización convencional*



Nota. Tomado de Espinosa et al. (2016b).

Figura 2. *Proceso de Lodos de Alta Densidad (HDS)*



Nota. Tomado de Espinosa et al. (2016b).

CAPÍTULO II

EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: NOCIONES ELEMENTALES

En la presentación del libro Aguas residuales industriales en Iberoamérica (2019), se señala que el agua es un recurso indispensable para las diferentes formas de vida que existen en el planeta y, evidentemente, para la población humana. Esta afirmación es una realidad conocida por todos los humanos, quienes usan este recurso en varias de sus actividades.

De acuerdo con lo anterior, el agua es un recurso que, por sus beneficios, merece un cuidado o tratamiento apropiado, por tanto, es posible visualizar distintos procesos que tratan las aguas. Estos métodos o proceso de tratamiento de agua —de acuerdo con Herrera (2020)— implican un gran variedad de técnicas como los métodos físicos, químicos y biológicos.

El agua puede contener ciertos elementos, tras el depósito de estos últimos en ella; este hecho establece la aparición de las aguas residuales, las cuales merecen un tratamiento determinado y eficaz para remover la alta concentración de elementos contaminantes. Añadiendo a ello, Al et al. (2020) indica que, a lo largo del tiempo, se han propuesto varias técnicas tecnológicas y analíticas que permiten detectar compuestos contaminantes,

incluso, en baja concentración, generando la remoción de estos elementos en las aguas residuales.

Para un estudio sobre la composición del agua, es preciso la toma de muestra, la cual —según el Ministerio de Salud (2017)— refiere a la recolección de ciertas cantidades de un elemento bajo normas establecidas. En tal sentido, es fundamental conocer un poco más sobre el tratamiento de las aguas residuales.

2.1. Concepciones generales de las aguas residuales

Las aguas residuales —también denominadas como efluentes y aguas servidas— han recibido varias definiciones, por ende, no se puede aseverar que existe un único concepto. Uno de estos conceptos es aquel que señala que estas aguas son recursos hídricos usados que almacenan desperdicios disueltos o en suspensión, otro es aquella concepción que la denomina como agua de calidad negativa por acciones antropogénicas (Connor et al., 2017).

Por otro lado, es importante diferenciar a las aguas residuales de las aguas residuales tratadas, por ello, se sostiene que —en conformidad con Aquino (2017)— el agua residual es un despojo o desecho líquido que proviene de los depósitos, generados por el uso de agua en las distintas tareas domésticas o no domésticas; mientras que el agua residual tratada se concibe como el agua residual que, a través de ciertos procesos, ha eliminado componentes microbiológicos, físicos y químicos y, dado ello, se puede disponer de esta agua, incluso, para su reutilización.

Las aguas residuales, de origen industrial, urbano y agrícola, contienen distintos tipos de contaminantes como materia orgánica biodegradable y no biodegradable, sólidos suspendidos, turbidez, nutrientes, metales pesados, pesticidas, patógenos, entre otros.

Todos estos contaminantes representan una amenaza para el medioambiente y la salud humana, por ello, las técnicas para su tratamiento deben adaptarse a la naturaleza de estas aguas con la finalidad de optimizar su remoción. Además, la eficiencia del tratamiento de estas aguas debe ser sostenible a nivel ambiental, económico y ético (Herrera, 2020).

Tabla 1. *Fuentes de origen de las aguas residuales*

Fuente de agua residual	Descripción
Desechos humanos y animales	Depósitos líquidos y sólidos de los humanos y animales que son considerados peligrosos para la salud humana por contener bacterias, virus y otros patógenos.
Desechos domésticos	Desechos provenientes del hogar como papeles, compuestos de limpieza, detergentes, basuras y otras sustancias que terminan en las aguas.
Desechos industriales	Materiales propios de los procesos de industrias específicas que, generalmente, son químicos, tintes, ácidos, álcalis, arenilla, detergentes y elementos altamente tóxicos
Escurrimiento de aguas pluviales	La ocurrencia de tormentas en zonas de escurrimiento, en sistemas de recolección o en corrientes de agua ocasiona el almacenamiento de grandes cantidades de arena, grava y de la misma agua
Infiltración de aguas subterráneas	El agua subterránea puede ingresar a los sistemas de recolección más antiguos que, están sellados incorrectamente generando que se agreguen cantidades de agua y arena a las aguas residuales

Nota. Adaptado de Spellman (2020).

Por otro lado, son diferentes las formas o fuentes por las cuales se pueden obtener aguas residuales. En tal sentido, Spellman (2020) indica que las mayores fuentes de origen de estas aguas son cinco: desechos humanos y animales, desechos domésticos, desechos industriales, escurrimiento de aguas pluviales e infiltración de aguas subterráneas, tal como se observan en la Tabla 1.

Las aguas son un elemento crítico en el ciclo del agua, por ello, es un factor que debe tomarse en cuenta durante cualquier gestión que implique la utilización del agua como, por

ejemplo, la distribución, la recolección y el tratamiento de agua, la captación de agua dulce, entre otras más (Connor et al., 2017).

En cuanto a composición de las aguas residuales, Irfan y Alharbi (2019) indican que las aguas residuales, procedentes del uso doméstico, pueden ser ricas en materia orgánica como desechos domésticos, desperdicios alimenticios o de cocina y partículas trituradas de comida. Además, estas aguas suelen constituirse de ciertas sustancias como sólidos disueltos, sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, cloruro, alcalinidad, BOD_5, aceite o elementos adiposos, entre otros.

De acuerdo con lo anterior, se desprende que la composición de las aguas residuales puede variar dependiendo si es doméstica, industrial o de otra actividad. En tal sentido, Aquino (2017) señala que pueden existir tres tipos de agua residual: doméstica, industrial y minera. A partir de ello, se puede sostener que existen ciertos tipos de aguas residuales, considerando su uso.

La composición de las aguas residuales presenta variaciones de acuerdo con la fuente y el tiempo de formación de esta agua; sin embargo, su componente principal continúa siendo el agua (Cordeiro et al., 2017). Añadiendo a lo anterior, se afirma que el agua residual, en su mayoría, se conforma de un 99 % de agua y solo de 1 % de sólidos en disolución, suspensión o en forma coloidal (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, WWAP, 2017).

En síntesis, se puede afirmar que las aguas residuales son una aglomeración de recursos hídricos que se han usado en otras actividades, con anterioridad, y, por ende, pueden poseer elementos que son perjudiciales para el planeta y para la salud de las personas. La existencia de estos elementos en estas aguas permite que se desarrollen procesos de tratamiento con la finalidad de reutilizar esta agua.

2.2. Tratamientos biológicos de las aguas residuales: características generales

El tratamiento de las aguas residuales, *grosso modo*, es la combinación de procesos como transformación biológica, filtración, sedimentación y desinfección, los cuales funcionan como medios para purificar el agua residual. A partir de ello, se garantiza que este tratamiento es esencial para asegurar la salud pública y para aumentar la seguridad de los sistemas de aguas (Oliphant et al., 2019).

Por otro lado, el tratamiento de las aguas residuales es una actividad fundamental en la reutilización de los recursos hídricos, en la reducción de contaminación y en temas relacionados con la salud pública. A causa de lo anterior, se puede aseverar que el tratamiento de aguas residuales precisa de normas políticas vinculadas con la disposición de agua potable para las poblaciones de ciudades con aguas residuales provenientes del uso doméstico, industrial y agrícola (Larios et al., 2015).

A partir de lo expresado, se evidencia que el tratamiento de las aguas residuales es un proceso que no solo contribuye con el cuidado del agua y de la salud humana, sino también con las políticas relacionadas con la protección del medioambiente a nivel mundial, por ello, es imprescindible contar con organizaciones que promueven este tratamiento y la purificación del agua.

Añadiendo a lo anterior, dado que el tratamiento de las aguas residuales es de mucha importancia para la prevención de enfermedades y la protección del medioambiente, se han creado diversas obras de tratamiento, realizadas por el sector público y privado, como las plantas industriales (Spellman, 2020).

En otro sentido, en la actualidad, los avances científicos y tecnológicos proporcionan un nuevo escenario para las personas y sus actividades, De ese modo, el tratamiento y

manejo de aguas residuales se vuelve pertinente. Al respecto, Cayetano (2019) indica que existen diversas tecnologías para el tratamiento de aguas contaminadas, como biológico, floculación, métodos electroquímicos, entre otros más. Asimismo, la existencia de estas tecnologías de tratamiento de estas aguas es posible, dado que la tecnología avanza y emite progresos y mejores en los productos y procedimientos, en este caso, de la gestión del agua.

Tabla 2. *Pasos comunes para el tratamiento de aguas residuales*

Pasos	Descripción
Tratamiento preliminar	Se eliminan los materiales que pueden dañar el equipo de la planta u ocupar la capacidad del tratamiento sin tratarlos.
Tratamiento primario	Se eliminan los sólidos sedimentables y flotantes.
Tratamiento secundario	Se elimina la Demanda Biológica de Oxígeno (BOD5) y la materia orgánica disuelta, coloidal y suspendida, asimismo, se convierten los orgánicos en sólidos estables, dióxido de carbono y más organismos.
Tratamiento avanzado de desechos	Se desarrollan procesos físicos, químicos y biológicos con la finalidad de reducir el valor adicional de BOG5, sólidos y nutrientes.
Desinfección	Se eliminan los microorganismos con el fin de reducir el riesgo de enfermedades después de que los flujos de agua son descargados.
Tratamiento de lodos	Se estabilizan los sólidos desechados de las aguas residuales durante el tratamiento, se inactivan los agentes patógenos y se reduce el volumen de los lodos al suprimir agua.

Nota. Adaptado de Spellman (2020).

Por otro lado, los tratamientos de agua residual prosiguen un conjunto de pasos para cumplir uno o más procesos de tratamientos. Entre los pasos más usados se encuentran los siguientes: tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento avanzado de desechos, desinfección y tratamiento de lodos. Estos procesos cooperan con la remoción de elementos innecesarios y dañinos, como se observa en la Tabla 2.

Por otro lado, dentro de los pasos o niveles de los tratamientos de aguas residuales, se pueden encontrar distintos procesos como sedimentación, desinfección, filtración química, lodos activados, lagunas de estabilización, entre otros que permiten la remoción de elementos contaminantes (Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión, INCyTU, 2019).

Entre estos procesos, se encuentran los tratamientos biológicos, los cuales —según Spellman (2020)— se denominan biológicos por ser derivados de procesos que ocurren, en forma natural, en el planeta. Además, estos procesos consisten en regular y controlar el ambiente necesitado para un propicio desarrollo de los microorganismos involucrados en el tratamiento, independientemente del tipo de desperdicio.

De acuerdo a lo anterior, los procesos de tratamiento biológicos pueden clasificarse en dos tipos: usando microorganismos y usando plantas. El tratamiento biológico usando microorganismo se comprende como el tratamiento que tiene como objetivo realizar cambios en la composición de los agentes contaminantes a través de los mecanismos biológicos y bioquímicos de los microorganismos. En cuanto al tratamiento biológico usando plantas, este tratamiento se basa en exponer a plantas frente a metales pesados con la finalidad de que concentren metales en sus partes, ya sea, en menor o mayor proporción, que en el suelo (Cayetano, 2019).

En resumen, el tratamiento de las aguas residuales es una actividad esencial de las plantas que gestionan el agua porque cooperan con el cuidado de la vida y del planeta. Este tratamiento se desarrolla a través de pasos, los cuales, a su vez, envuelven a procesos como los métodos biológicos que usan microorganismos y plantas.

2.3. Procesos sustanciales para el tratamiento de aguas residuales

Los procesos para el tratamiento de aguas residuales son diversos y cooperan con la purificación y recuperación de tales aguas. Estos procesos también son considerados como métodos, al igual que los tratamientos biológicos. Al respecto, Zajda y Aleksander (2019) señalan que dichos procesos se pueden agrupar en tres grupos: mecánicos, físico-químicos y biológicos. En tal sentido, dentro de los procesos mecánicos, se encuentran, principalmente, la filtración, la sedimentación, la separación y la centrifugación. En cuanto a los físico-químicos, resaltan la sorción, electrocoagulación, la coagulación y floculación, el uso de membranas y la ozonización. Respecto a los biológicos, se pueden encontrar aquellos relacionados con las condiciones de oxígeno o con las condiciones anaeróbicas.

Tras lo señalado, es pertinente brindar algunas nociones sobre los procesos de tratamiento de aguas residuales más importantes en la ingeniería de minas y química, dado que estos procesos son relevantes para la eliminación de agentes dañinos.

Neutralización

De acuerdo con Bermeo et al. (2017), la neutralización es un término usado para referirse a los tratamientos que tienen por finalidad alcanzar un pH próximo a la neutralidad en el agua. En tal sentido, esta neutralización se logra mediante la siguiente ecuación química:

Cabe señalar que el pH es un método que expresa la condición ácida del agua residual en una escala de 1 a 14; el rango del pH del agua residual, generalmente, está entre 6,5 a 9; mientras que el rango normal o neutral (ideal) del agua es de 6,5 a 8 (Spellman, 2020).

Sedimentación

La sedimentación —también conocida como espesamiento— es un proceso de separación de líquidos y sólidos, la cual consiste en aumentar la masa del sólido o pulpa para recuperar

una elevada cantidad de agua, generando dos productos con densidades diferentes. Cabe señalar que, para los sólidos, el proceso se denomina espesamiento y, para los líquidos, clarificación. Este proceso, generalmente, se realiza a través de fuerzas gravitacionales y en equipos espesadores que permiten obtener los dos productos por separado (Bustamante et al., 2019).

Coagulación/floculación

En el tratamiento de las aguas residuales, la coagulación y la floculación son dos procesos o métodos muy usados para la remoción de sólidos suspendidos y compuestos orgánicos. La eficacia de estos dos procesos es dependiente de la selección del coagulante apropiado (Zajda y Aleksander, 2019). Por tanto, se puede afirmar que estos son procesos de separación. Por otro lado, el término coagulación se refiere a la reacción entre partículas químicas y aquellas moléculas suspendidas que poseen una densidad igual al del agua para formar un microcompuesto coagulado. Asimismo, este proceso se desarrolla para eliminar metales pesados y formar compuestos pocos solubles; cabe destacar que se usa, en mayor proporción, en la eliminación de arcillas, organismos microscópicos, materia orgánica natural, algas, bacterias y varias bacterias que se encuentran en el agua (Al et al., 2020).

En lo que respecta a la floculación, este proceso físico prosigue a la coagulación se basa en mezclar el agua coagulada, en forma pausada, con la finalidad de incrementar las probabilidades de colisión de partículas y reducir la cantidad flóculos (compuestos coagulados), al aumentar su tamaño (Spellman, 2020).

Filtración

El proceso de filtración se refiere a métodos, impulsado por presión, que precisan de membranas para mover, a distintas velocidades, a los componentes que deben ser separados.

Este proceso se desarrolla, con frecuencia, en las industrias farmacéuticas, de alimentos y de tratamiento de agua (McBride et al., 2020). En el caso de la filtración del agua, este proceso físico consiste en la separación de partículas mediante un material granular (como la membrana) e implica la filtración misma, la sedimentación y adsorción (Spellman, 2020). Esto indica que también es un proceso de separación.

Aireación

De acuerdo con Chourouk et al. (2019), la aireación (difusión de oxígeno) tiene como objetivo mejorar la producción de oxígeno en el agua, cooperando con las necesidades de las bacterias aeróbicas; es decir, este proceso proporciona el oxígeno necesario para el desarrollo de la actividad aeróbica de la microflora y, por ende, la reducción de contaminantes (ingeridos por los microorganismos).

Por otra parte, la aireación es, usualmente, usada para tratar el agua que contiene gases atrapados que emanan un sabor y olor desagradables, aunque puede ser útil para la oxidación de hierro y manganeso, oxidando sustancias húmicas. Asimismo, este proceso no solo se basa en el reposo en un tanque, sino, en ciertas ocasiones, tiende a ser forzada (Spellman, 2020).

Precipitación química

El proceso de precipitación química se basa en la captación de contaminantes y la captación de los productos formados. Este proceso tiene como ventaja el hecho de que es una tecnología simple, eficiente y, económicamente, beneficioso; sin embargo, no es eficiente para la remoción de iones de metales en bajas concentraciones (Crini y Lichtfouse, 2018).

Adsorción

El proceso de adsorción es no destructivo y posee una tecnología simple y adaptable para una gran variedad de formatos de tratamientos, pero la inversión en este proceso es

relativamente alta (Crini y Lifchtfouse, 2018). Este proceso se relaciona con un tipo de sorción que envuelve la unión de moléculas en la superficie de un sólido o líquido (Zajda y Kwaterczak, 2019). Por tanto, se puede inferir que este proceso no está dentro de aquellos que implican una separación de moléculas o sustancias.

Intercambio iónico

El intercambio iónico consiste en una actividad de intercambios de iones específicos que son parte de la sustancia tratada con otros iones que, también, se encuentran en la misma sustancia o disolución (Cayetano, 2019). En términos generales, el intercambio iónico es un proceso físico químico usado para eliminar o reducir la dureza que el agua puede presentar (Spellman, 2020).

Ósmosis inversa

La ósmosis inversa es un proceso de membrana, impulsado por la presión, que usa una membrana semipermeable sintetizada, hecha a base de acetato de celulosa y poliamida para separar dos medios de distinta concentración de soluto. Este proceso puede ser usado para retener elementos no deseados como agua de mar y agua residual, por ello, se usa, ampliamente, en la recuperación de aguas residuales por industrias dedicadas al tratamiento de estas aguas (Al et al., 2020). En otras palabras, la ósmosis inversa se configura como un proceso, en el cual el agua casi pura es pasada a través de una membrana semipermeable (Spellman, 2020).

Electrodiálisis

El término electrodiálisis trae a conversación a los métodos electroquímicos, por ello, es preciso comprender el concepto de estos últimos. Los métodos electroquímicos —tal como Cayetano (2019) señala— se configuran como la producción de reacciones de oxidación-reducción a través de electrodos (ánodo y cátodo) que se encuentran en una disolución.

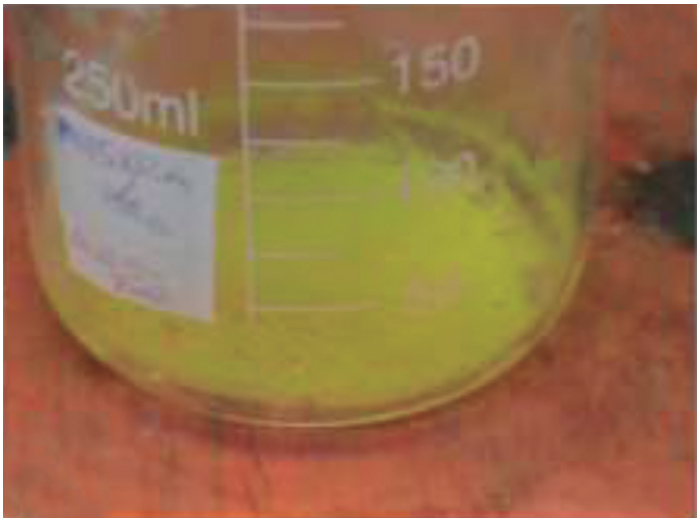
En lo que respecta a la electrodiálisis, esta es un proceso electroquímico que utiliza una membrana de separación con la finalidad de que los iones presentes en el líquido traspasen la membrana con la aplicación de un potencial eléctrico. Este proceso es eficiente y beneficioso para las aguas con metales pesados (Sarria et al., 2020).

De manera resumida, el tratamiento de las aguas residuales es una práctica moderna que incluye procesos mecánicos y biológicos. Los primeros procesos de este tratamiento se diseñaron para tratar las aguas residuales a nivel municipal, pero, dado el avance tecnológico, se han producido métodos físico-químicos y otros nuevos (Zajda y Aleksander, 2019). Estos procesos son importantes dentro de cualquier planta de gestión de agua en la actualidad.

2.4. La toma de muestras de aguas residuales: fundamental para su investigación

Para el estudio y tratamiento de las aguas residuales, se debe tener en cuenta diversas actividades, las cuales deben ser desarrolladas con rigurosidad para evitar ciertos problemas o márgenes de error y, por tanto, lograr mejores resultados. Entre estas actividades, aparte de los procesos de tratamiento, se encuentra la toma de muestras de este tipo de aguas.

Figura 3. *Estado pastoso del agua*



Según la Figura 3, cuando se opta por una muestra, el estado del agua puede encontrarse con distintas características. La toma o recolección de muestras es una de los procesos más complejos para el monitoreo ambiental de las aguas dulces. En la actualidad, se usa un muestreo al azar que puede ofrecer concentraciones puntuales, pero también se encuentran las muestras automáticas y continuas que mejoran la representatividad de las muestras y, por ende, la precisión de los estudios. Esta toma de muestras debe considerar los recursos humanos, técnicos y financieros, el objetivo de la investigación, aparte del tipo de muestreo (Kianpoor et al., 2019).

Figura 4. *Disgregación de agua de mina*



Respecto a la Figura 4, la toma de muestra de agua pasa por procesos químicos para su posterior estudio. Entre los tipos de muestras de aguas residuales, se tienen en cuenta la muestra simple, compuesta, cualificada y para un análisis microbiológico. La muestra simple es, en sentido general, la muestra que se toma en un determinado momento o en un instante; su recolección es fácil y rápida, puesto que solo requiere el uso de un recipiente. Cabe indicar que esta muestra se usa, ampliamente, en casos en que el agua no presenta variaciones significativas. En lo que respecta a la muestra compuesta, esta es un conjunto de muestras simples recogidas durante un periodo de tiempo con la finalidad de regular

la eficacia del tratamiento y la calidad del agua. Concerniente a la muestra cualificada, esta exige más tiempo, dedicación e instrumentos como muestreadores y jarras de medición. En el caso de las muestras para análisis microbiológico, se debe recoger la muestra de forma simple con frascos estériles en contaminación (Servicio Nacional para la Sostenibilidad de Servicios en Saneamiento Básico, SENASBA, 2015).

De acuerdo con lo anterior se deduce que pueden existir cuatro tipos de muestreo para el recojo de aguas residuales y su posterior análisis. Por otro lado, la toma de muestras consta de una serie de pasos que posibilitan la adecuada cantidad del elemento para muestra. El Ministerio de Salud (2017) señala que el procedimiento de esta actividad implica identificación de las muestras, su recolección, su preservación y su transporte. En la identificación de muestras, se debe tomar en consideración el lugar y tiempo de la muestra, el pH, la temperatura, los residuos de cloro y la turbiedad. Para la recolección, se tiene en cuenta el tipo de muestreo. En cuanto a la preservación, se desarrollan métodos que permitan aplazar la acción biológica, y la hidrólisis de compuestos y complejos químicos. Finalmente, se ejerce un proceso de transporte, cuidadosamente, de las muestras con el fin de realizar el estudio debido en un laboratorio.

Figura 5. *Diferentes muestras de agua con* $FeCl_3$



En la Figura 5, las muestras de agua deben ser comparadas para advertir diversos efectos del agregado químico a fin de identificar cambios diversos. Entre las acciones más resaltantes que se deben considerar para el muestreo de aguas residuales, Stichting ZDHC Foundation (2019) indica que las muestras deben ser obtenidas por el personal apropiado y ocurrir durante un tiempo que represente la continuidad y normalidad de la producción y del tratamiento de las aguas residuales.

Por otro lado, es pertinente indicar que la conservación de las aguas precisa de técnicas de almacenamiento para evitar el desarrollo microbiano; sin embargo, es recomendable realizar un análisis inmediato después de la toma de muestras de agua para evitar alguna falla o contratiempo en el proceso de análisis (Kianpoor et al., 2019).

Figura 6. *Proceso de sedimentación en la toma de agua*



Según se observa en la Figura 6, en las tomas de muestra se debe observar todo proceso químico y físico para su posterior análisis en el estudio. La toma de muestras es otro de los procesos que se desarrollan en los estudios relacionados con el análisis de la composición de aguas (como las aguas residuales) y con el tratamiento de aguas. Además, esta toma es fundamental, dado que, a través de ella, se puede obtener las cantidades numéricas de

agentes patógenos que las aguas estudiadas poseen y, de ese modo, se puede elegir los procesos de tratamiento apropiados.

En resumen, el tratamiento de las aguas residuales contempla diversos tipos de procesos que tienen por finalidad reducir o eliminar la cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos perjudiciales para la vida humana. Dicho tratamiento puede ser llevado a cabo por ciertas industrias que se enfocan en el cuidado del ambiente.

CAPÍTULO III

LA CONCENTRACIÓN DE SUSTANCIAS COMO EL ZINC EN AGUAS: ESENCIALIDADES

La industrialización y la urbanización propias de las dos últimas décadas del siglo XX y de los albores del siglo XXI han generado una elevada emisión de metales pesados tóxicos que ingresan en la biosfera. Estos procesos de liberación mediante formas biológicas o mediante compuestos químicos alteran los procesos ecológicos realizados por los seres vivos (Rupa et al., 2019). A pesar de que los metales pesados como Cu^{2+}, Zn^{2+}, Fe^{2+}, son micronutrientes esenciales para que los animales y el ser humano realizan en beneficio propio, cuando están presentes en exceso son sumamente tóxicos.

La concentración del zinc en el agua se produce en las fases finales de las actividades económicas manufactureras y mineras. Por ello, se requiere conocer los niveles de concentración de zinc en el agua para contrarrestar los focos de contaminación de los eventos industriales y mineros. A partir de estos resultados, es necesario priorizar un proyecto con el que se fiscalice la limpieza de los componentes químicos de metales como el zinc en las fuentes de agua (Destouni et al., 2021).

El presente capítulo aborda las generalidades en torno a las concentraciones de Zn en las fuentes de agua, principalmente, en las de los desechos mineros. Para evitar un

agravamiento de la contaminación por zinc, se deben emplear determinados fundamentos de la química para limitar las transferencias de agua, sedimentos y plaguicidas de las laderas a los sistemas fluviales. De esta manera, se recomienda la aplicación de prácticas eficaces de limitación el flujo de agua en cuanto a una conectividad de los sedimentos y asociado a través de los componentes tóxicos de los metales pesados (Sedira et al., 2017).

3.1. Concentración de sustancias: reflexiones medulares

La concentración de sustancias es la magnitud escalar que se mide la relación geométrica que existe entre el valor numérico de la masa del elemento soluto y el valor que se obtiene del elemento que se emplea como disolvente. A partir de ese procedimiento, se interpreta que por cada proporción de menores valores del soluto que se disuelve en una sustancia solvente, se generará una menor medida de solución, y viceversa (Raviolo et al., 2021). De esta manera, para certificar que una solución está concentrada, se debe añadir más soluto (por ejemplo, alcohol o minerales) o reducir la cantidad de solvente (*verbi gratia*, agua).

La concentración de sustancias depende de los constituyentes físico-químicos que estas expliciten, puesto que al menos que dos sustancias sean miscibles en un entorno determinado, existe una concentración a la que no se disolverá más soluto en una solución. En este punto, los químicos postulan que la solución está saturada. Desde una perspectiva experimental, si se agrega soluto adicional a una solución saturada, no se disolverá, excepto en ciertas circunstancias, cuando puede ocurrir sobresaturación (Larasati et al., 2020). En cambio, se producirá la separación de fases, lo que conducirá a fases coexistentes, ya sea completamente separadas o mezcladas como una suspensión. El punto de saturación depende de muchas variables, como la temperatura ambiente y la naturaleza química precisa del disolvente y el soluto.

Estos procedimientos se explican mejor mediante fórmulas químicas con base en cálculos matemáticos como son las siguientes: (i) porcentajes del soluto, (ii) molaridad, (iii) normalidad, (iv), los constituyentes por millón. Con estas fórmulas, se puede conocer si en una muestra, el estudio de la abundancia absoluta o relativa de determinados componentes químicos determinan las propiedades específicas de los elementos que los reciben. Conocer la composición de una muestra es muy importante, y se han desarrollado varias formas para hacerlo posible, como el análisis gravimétrico y volumétrico. El análisis gravimétrico produce datos más precisos sobre la composición de una muestra que el análisis volumétrico, pero también lleva más tiempo realizarlo en el laboratorio. El análisis volumétrico, por otro lado, no toma tanto tiempo y puede producir resultados satisfactorios. El análisis volumétrico puede ser simplemente una titulación basada en una reacción de neutralización, pero también puede ser una precipitación o una reacción de formación de complejos, así como una valoración basada en una reacción redox (Carlos y De Jagger, 2019). Las fórmulas señaladas se tabulan de la siguiente manera:

Tabla 3. *Mediciones de concentración en sólidos y en líquidos*

Cuantificación dimensional de concentración	
Porcentajes de masa del soluto	
Porcentaje masa-masa de los constituyentes	$\%\ masa = \frac{masa\ constituyente\ del\ soluto\ (g)}{masa\ constituyente\ de\ disolución\ (g)} \times 100$
Porcentaje volumen-volumen de los constituyentes	$\%\ volumen = \frac{volumen\ del\ soluto\ (ml)}{volumen\ de\ disolución\ (ml)} \times 100$
Porcentaje masa-volumen de los constituyentes	$\%\ {}^{m}/_{v} = \frac{masa\ constituyente\ del\ soluto\ (g)}{volumen\ de\ disolución\ (ml)} \times 100$
Cálculos mediante porcentajes masa-masa y volumen-volumen	$Disolución\ =\ soluto\ +\ disolvente$
Masa molecular	$mf = \sum_{i} N_i m_{a,i,}$
Concentración molar	$M = \frac{moles\ del\ soluto\ (n)}{volumen\ de\ la\ disolución\ (L)}$
Molalidad	$m = \frac{moles\ del\ soluto\ (n)}{masa\ de\ constitución\ del\ disolvente\ (kg)}$
Formalidad	$F = \frac{moles\ del\ soluto\ (n)}{masa\ de\ constitución\ del\ disolvente\ (kg)}$
Normalidad	$N = \frac{eqg_{sto}}{V_L}$
Normalidad ácido-base	$n = moles \times H^+\ para\ los\ ácidos$ $n = moles \times OH^-\ para\ las\ bases$
Normalidad redox	$n = moles \times e^-$ $N = M \times e^-$

Nota. Adaptado de Lumen. Chemistry for Non-Majors (s. f.).

Al considerar el párrafo anterior, este debe servir para extrapolar a las realidades en las sociedades modernas. En este sentido, se debe verificar en las infraestructuras urbanas y rurales cuáles son las sustancias que al concentrarse generan efectos negativos en la salud pública, puesto que, a partir de un eficiente manejo de esta, se explicitará una estabilidad en todos los ámbitos sociales. De esta manera, la concentración de sustancias debe respetar los límites internacionales con los que se toleran los compuestos químicos en las fuentes de agua aptas para el consumo humano. Las fuentes de metales pesados en el agua natural pueden proceder de reacciones geoquímicas, vertidos industriales incontrolados,

el uso agrícola de plaguicidas que contienen metales pesados o la guerra química. Se ha informado de que la presencia de una mayor concentración de metales pesados en el agua es extremadamente perjudicial para la salud humana. El riesgo de la presencia de metales pesados reside principalmente en su tendencia a acumularse en los tejidos de plantas y animales, algunos de los cuales son cancerígenos (Barlokova et al., 2019).

Uno de los procedimientos principales de concentración de soluciones es la medición de concentraciones, cada 0,5 ml de la solución de 1ppt constituyen una 1ppm (parte por millón) en muestras obtenidas de agua residual de 500 ml, según el estándar europeo. El investigador debe variar las concentraciones hasta que se formen flóculos en las muestras de agua. *Ipso facto*, se añaden floculantes después de que se formaran los flóculos, para que estos aumenten de tamaño y se depositaran en el fondo del vaso de precipitados. El agua más clara permanece en la parte superior mientras que toda la suciedad se deposita en el fondo del vaso. Las siete muestras de agua, el afluente, el efluente no tratado y las cinco muestras tratadas a diferentes concentraciones, se diluyen en la proporción de 1:10 a fin de verificar la apta para el consumo humano (Msimago et al., 2018).

A partir de la descripción del experimento, se señala que en Europa únicamente se aplican estrictos requisitos de seguridad alimentaria. La concentración de cualquier sustancia que pueda afectar negativamente a nuestra salud en los alimentos debe ser lo más baja posible. Para garantizarlo, las normas de seguridad alimentaria se establecen para hacer cumplir una concentración máxima permitida de sustancias en productos. Las normas de seguridad alimentaria se determinan principalmente a nivel internacional (europeas y mundiales) y su seguridad se evalúa sobre la base de análisis científicos de los efectos peligrosos de las sustancias presentes en los alimentos (Mota et al., 2021).

3.2. La actividad de la ingeniería química: remoción de sustancias como el zinc

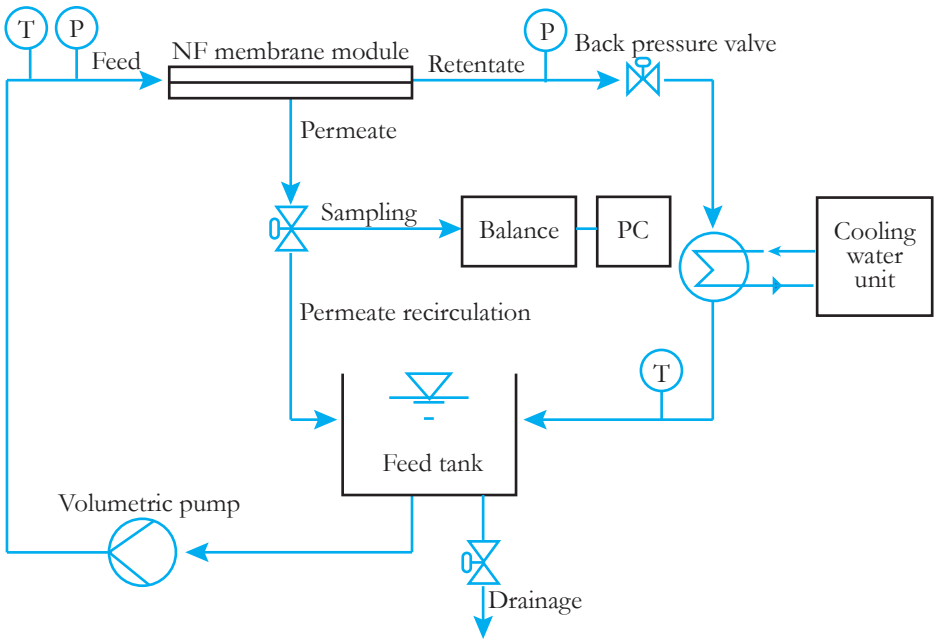
Diversas acciones humanas se realizan sin medir el impacto ambiental que se genera en un entorno particular con ellas. A partir de este problema social, ecológico y de impacto económico, se debe verificar los niveles de medición de componentes químicos que se arrojan a las fuentes hídricas, a los suelos y al aire de un territorio determinado (Silva et al., 2000). En este sentido, es menester de diversos profesionales como los químicos, los minerólogos y los ecólogos participen en los proyectos que permitan regular adecuadamente las emisiones de actividades como las generadoras de energía, las cuales desechan metales como el cromo (Cr), el vanadio (V) y el zinc (Zn).

En el presente trabajo de investigación, el foco principal se centra en el zinc. De esta manera, se advierte que los componentes bioquímicos, que las proteínas y que las enzimas que contienen zinc participan en todos los aspectos del metabolismo. El exceso de zinc puede causar problemas de salud, como calambres estomacales, irritación de la piel, vómitos, náuseas y anemia. En los estándares internacionales, se ha establecido un límite máximo de suministro en 5 mg/l de zinc en el agua potable. A nivel ecológico, estos vertidos originan efectos adversos en la flora y la fauna acuáticas. De manera específica, la polución en esos entornos incide en las fuentes de agua de las reservas naturales y de las zonas urbanas alrededor de áreas industriales, donde el zinc forma parte de la constitución de los vertidos (Larakeb et al., 2017).

Como experimentación, estudios previos realizados en Europa Central advierten que se puede comprobar qué elementos biológicos, físicos y químicos permiten la eliminación de sulfato de zinc de soluciones acuosas —tomadas como muestras— para ser contrastadas con los valores que se obtienen de las aguas residuales y de las fuentes hídricas aptas para el consumo humano. Se investigaron los efectos de diversas condiciones de funcionamiento

en el rendimiento de los aparatos que cumplen las funciones bioquímicas del zinc y de las aplicaciones que lo emplean. De esta manera, se requiere, tal como se observa en la Figura 7, la regularización de los parámetros y condiciones de funcionamiento del sistema industrial que emplea el metal de transición a fin de obtener un cálculo preciso de los valores en el experimento para compararlos con las muestras reales que se obtienen de las aguas residuales industriales (Kočanová et al., 2017).

Figura 7. *Estandarización de materiales y de parámetros para el cálculo muestral de los niveles de zinc*



Nota. Tomado de Kočanová et al. (2017).

En la República Checa, los estudios se realizan mediante la selección de valores estables como muestras de la conductividad de los productos o elementos bioquímicos que contengan el zinc. En la Tabla 4, en la Tabla 5 y en la Tabla 6, se evidencian las variaciones de los niveles de compuestos del Zn al ser experimentados en diferentes presiones análogas con los procesos en los desechos industriales vertidos a las fuentes hídricas. Por otra parte, se evidencia que la concentración de los compuestos químicos que fungen como

alimentadores de los compuestos que contienen el zinc es considerablemente superior al límite permitido, esto es, el 61,88 mg L^{-1}; esto se debe, una vez más, a la evaporación durante el largo periodo experimental (Łomińska-Płatek y Anielak, 2021; Kočanová et al., 2017). A partir de los altos valores de rechazo, los valores de los elementos que contienen el Zn como el elevado grado de los instrumentos que se emplearán en la separación explicitan los tipos de presiones que sufre el zinc en contextos tanto de agua residuales como en la simulación de estas.

Tabla 4. *Dependencia del rechazo en el pH para el compuesto químico Zn(II) = 100-120 mg L-1, y las configuraciones del experimento medidos en P = 10 bar, T = 25°C*

Zn (II) concentración (mg L^{-1})	pH		
	3	5	6.5
Alimentación	120.00	100.00	101.10
Permeado	0.850	1.800	1.400
Rechazo (%)	99.29	98.20	98.62

Nota. Adaptado de Kočanová et al. (2017).

Tabla 5. *Concentración y rechazo observado de Zn de la muestra real de agua residual, membrana AFC 40, P = 10, 15 y 20 bar, pH 4,5, caudal de alimentación 9 L min-1, T = 25°C*

Presión (bar)	Zn (II) concentración (mg L–1) Rechazo (%)		
	Alimentación	Permeado	
10	99.10	1.235	98.75
15	92.84	1.121	98.79
20	91.82	1.140	98.76

Nota. Adaptado de Kočanová et al., 2017

Tabla 6. *Flujo de agua pura y de permeado con una muestra real de agua residual, membrana AFC 40, P = 10, 15 y 20 bar, flujo de alimentación 9 L min-1, T = 25°C*

Flux ($L\ h^{-1}\ m^{-2}$)	Presión (bar)		
	10	15	20
Agua desmineralizada	66.2	104.5	141.4
Desecho acuático industrial	54.5	85.9	120.5
Decrecimiento (%)	17.7	17.8	14.8

Nota. Adaptado de Kočanová et al. (2017).

Los valores medios del flujo de permeado para el desmineralizado (PWF) y el agua residual se midieron tras la estabilización de las presiones y de la temperatura. La comparación del PWF y el flujo de permeado de la muestra real de agua residual se presenta en la Tabla 4. De la comparación del PWF y los valores de los experimentos europeos, se deduce que en las zonas industriales europeas se evidencia, pese a los programas ecológicos, niveles moderados de contaminación de las fuentes acuáticas. (Rodrigues et al., 2018).

Otras investigaciones realizadas con tecnología de punta demuestran que el uso de nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas biogenéticamente mediante caseína (ZnONP CS) como un nanoadsorbente descontamina de manera eficiente las aguas residuales que contienen metales, tintes industriales orgánicos y microbios. Para verificar estos procesos, se utiliza caseína como agente reductor y de remate de ZnONP CS (Somu y Paul, 2018). De esta manera, la ingeniería química aporta en el tratamiento de las aguas contaminadas por zinc mediante el empleo de caseína, puesto que contribuye con una carga altamente negativa a la superficie de ZnONP CS a pH neutro, mejora la eficiencia de adsorción de metales catiónicos y reduce el tiempo de proceso.

3.3. Limitaciones para las descargas de aguas al ambiente

Es menester de los Estados, las empresas y los representantes de las organizaciones civiles deben acordar en consenso determinados límites para el tratamiento de los recursos

naturales. Uno de estos es el agua, la cual debe ser tratada de manera responsable para que lo emplee el ser humano en sus actividades económicas y cotidianas. Un ejemplo de ello es el conjunto de subvenciones financieras y la legislación nacional de los países miembros de la Unión Europea en materia de energías renovables y de fuentes hídricas que se promueven en contraposición a los grandes de almacenamiento, debido a la explotación del potencial hidroeléctrico de los ríos caudalosos (Bejarano et al., 2019).

Las restricciones en la necesidad urgente de mejorar nuestra comprensión de los impactos ecológicos de estos esquemas e incorporar dicho conocimiento en decisiones de planificación y explotación. Es menester de los científicos examinar las compensaciones entre la energía en las plantas industriales y en las empresas mineras que generan desvíos en el cauce de desvío y los cambios ecológicos a lo largo de sus tramos fluviales desviados, cuando se imponen diferentes restricciones derivadas del uso de diferentes atributos de caudal ecológicamente más significativos. Estos atributos se explicitan mediante diferentes reglas en las difieren dependiendo de (i) la Metodología de Flujo Ambiental (EFM) aplicada por cada Estado soberano y de (ii) las características particulares del régimen de caudales de cada río (Haller, 2018).

De manera general, se consideran las aplicaciones de los resultados generalizables que sirvan de herramientas de apoyo a la toma de decisiones por parte de los gestores que garanticen el funcionamiento sostenible de las centrales hidroeléctricas de pasada. En particular, los investigadores deben establecer un enfoque para evaluar la idoneidad de un escenario específico de acuerdo con los objetivos particulares de producción de energía y estado ecológico del río. En este sentido, el mejoramiento de la estructura industrial y la expansión de la población podrían mejorar significativamente la eficiencia de los recursos hídricos, mientras que los efectos del suministro de agua y el nivel educativo per cápita fueron insignificantes (Guo et al., 2021).

3.3.1. *Límite máximo permisible*

El límite máximo permisible para el vertido de Zn en las fuentes hídricas está establecido en el Decreto Supremo N.º 010 promulgado por el Ministerio del Ambiente (2010), citado por Cuadros et al. (2020), es < 1,5 mg/l. El término metal pesado se refiere a cualquier elemento metálico que tenga pesos atómicos entre 63,5 y 200,6 y una gravedad específica superior a 5,0. Los metales pesados son componentes naturales de la corteza terrestre y pueden ingresar al suministro de agua a través de desechos industriales y de consumo, o incluso de la lluvia ácida que descompone los suelos y libera metales pesados en arroyos, lagos, ríos y aguas subterráneas.

No pueden degradarse ni destruirse, pero tienden a bioacumularse y, por lo tanto, provocan un aumento de su concentración en un organismo biológico a lo largo del tiempo, en comparación con su cantidad en el medioambiente. En pequeña medida, ingresan a nuestro cuerpo a través de los alimentos, el agua potable y el aire. Como oligoelementos, algunos metales pesados (por ejemplo, cobre, cobalto, hierro, manganeso, molibdeno, vanadio, estroncio, selenio y zinc) son esenciales para mantener el metabolismo del cuerpo humano (Li et al., 2020).

Sin embargo, en concentraciones más altas pueden provocar intoxicación. Por lo tanto, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) han regulado el nivel máximo aceptable de descarga al medioambiente y, por lo tanto, controlando el nivel de contaminación del agua. Según la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA), la Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades (ATSDR) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), las concentraciones máximas aceptables recomendadas para níquel, zinc, cromo y cobre en el agua potable son 0.02, 3.00, 0.05 y 2.00 mg / L, respectivamente (Lundy et al., 2017).

3.3.2. *Límite promedio anual*

A partir de análisis comparativos de datos de concentración de corrientes para cloruro (Cl -), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn), se pueden determinar los límites anuales para la

descarga del Zn en las fuentes hídricas agua, medidos durante un año en múltiples cuencas hidrológicas (19 para Cl^-, 11 para Cu y Zn, 10 para Pb) en una región específica. Para Cl -, la fracción de carga promedio de las fuentes activas se cuantifica en un 19 % y las contribuciones promedio de concentración activa y heredada en 2.9 y 11 mg / L, respectivamente. Para los metales, las fracciones de carga activa promedio en las salidas son del 1 % al 3 % en todas las cuencas y del 9 % al 14 % en las relativamente pocas cuencas con fuentes de metales mixtos. Los límites anuales promedio para la concentración activa y heredada no deben exceder de las medidas de 0.14 y 3.2 μg / L para Cu, 0.05 y 1.5 μg / L para Pb, y 1.4 y 12 μg / L para Zn, respectivamente. Este análisis de cuencas múltiples indica, por lo tanto, una prevalencia generalizada de fuentes heredadas, con mayor herencia que contribuciones de concentración activa para Cl -y los metales, y las contribuciones activas juegan un papel más importante para el cloruro que para los metales (Raval et al., 2016).

3.4. Relación entre la ingeniería química y la minería: generalidades

El engarce entre la ingeniería química y la minería es el estudio que se propone a partir de las descripciones de las características que se consideran el factor crítico que restringe la utilización completa de los residuos industriales. La ingeniería química proporciona las herramientas y la metodología necesarias para el tratamiento de los residuos industriales como los ácidos residuales, los cuales se han convertido en problemas importantes que restringen el desarrollo de la economía social. Las autoridades ambientales, con base en dichos conocimientos, deben regular los niveles de concentración de sustancias que contengan zinc en los residuos mineros y en los industriales para lograr beneficios económicos y ecológicos (Xue et al., 2019).

El rol de la ingeniería química en el manejo del Zn es que permite indicar que tasas de reducción de los desechos industriales deben permitirse para eliminar adecuadamente el

zinc. Las tasas de eliminación de dichos compuestos si bien deben ser superiores a las reportadas en la literatura, se debe cotejar con los principios de la Ecología para sugerir la eliminación de residuos de aguas ácidas en la mina. En este sentido, los sistemas de reducción de desechos de Zn requieren el diseño de otros sistemas para evitar la lixiviación de metales de los procedimientos industriales (Al-Abed et al., 2017).

Como conclusión del capítulo, se enfatiza que se deben verificar los mecanismos de reducción de sulfatos para aumentar la eficacia en las aplicaciones de campo de la minería. Esta revisión se centrará en el origen y la transformación de las características metalúrgicas de la extracción del zinc en residuos industriales menos contaminantes. Para ello, se debe enfatizar en la regulación de los desechos industriales, al tiempo que proporcionará un punto de referencia científica para su uso potencial como enmiendas para mejorar el suelo y el agua de las zonas mineras e industriales contaminadas por Zn (Van Yken et al., 2021).

CAPÍTULO IV

LA EFICACIA DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN DE ZINC DE AGUAS DE MINA EN UNA COMPAÑÍA MINERA

En 2013, muchas compañías mineras mantenían un sistema de tratamiento en el Nivel 3900 (neutralización, floculación y sedimentación), el cual no cumplía estrictamente los requisitos ambientales del Estado Peruano, por lo que un trabajo de investigación era necesario con el fin de remover el zinc, el cual es el metal con mayor concentración. En tal sentido, el tratamiento de esta sustancia toma en consideración los procesos que emplean diversas compañías mineras y se implementa con el proceso de coagulación, para obtener mejores resultados.

Esta investigación es un modelo de mucha ayuda para la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Centro del Perú, dado que apoya a los estudiantes de tal facultad en su aprendizaje sobre la realización de tratamientos de aguas de mina en el laboratorio, en el reconocimiento y manejo de los factores que influyen en dicho tratamiento y en la aplicación profesional de este modelo en la industria minera.

Hipótesis general

Las cantidades del agente neutralizante (NaOH), el coagulante ($FeCl_3$) y el floculante (Polychem PC 7220) influyen favorablemente en la remoción de zinc contenidos en las

aguas de mina del nivel 3900 de una compañía minera, a través del proceso de neutralización por control directo de pH (con adición de NaOH), del proceso de coagulación por adición de coagulante inorgánico ($FeCl_3$), del proceso de floculación por adición de floculante orgánico (Polychem PC 7220) y de la sedimentación por zonas.

Objetivo general

Remover el zinc de las aguas de mina que descarga el nivel 3900 de una compañía minera, empleando el proceso de neutralización por control directo de pH (con adición de NaOH), el proceso de coagulación por adición de coagulante inorgánico ($FeCl_3$), el proceso de floculación por adición de floculante orgánico (Polychem PC 7220) y la sedimentación por zonas, a nivel de laboratorio.

Objetivos específicos

- Determinar los parámetros físicos y la concentración de zinc en el agua de mina a la salida del nivel 3900 de una compañía minera.
- Determinar los niveles de las variables: la cantidad de agente neutralizante (NaOH), cantidad de coagulante (FeCl3) y cantidad de floculante (Polychem PC 7220) en el equipo de jarras.
- Construir un módulo para los procesos de neutralización, coagulación - floculación y sedimentación para remover metales.
- Establecer la cantidad de agente neutralizante (NaOH), la cantidad de coagulante (FeCl3) y la cantidad de floculante (Polychem PC 7220) para la remoción de zinc empleando el proceso de neutralización, coagulación - floculación y sedimentación a nivel de laboratorio.

- Comprobar la remoción de zinc después del tratamiento en el módulo con la lectura de concentración final de zinc en el fotómetro, para cumplir con los Límites Máximos Permisibles para Descargas de Líquidos Minero - Metalúrgicos establecidos en el DS N.º 010 - 2010 - MINAM.
- Determinar la eficiencia de remoción de zinc en el módulo, en función de la concentración inicial del zinc en el agua de mina y la concentración final de zinc después del tratamiento.
- Comparar la cantidad de lodos producidos en el módulo con la cantidad de lodos obtenidos en el balance del módulo.

Variables de la investigación

La variable dependiente es la concentración de zinc (ppm) y las variables independientes son la cantidad de sodio 0,1 N (mL), la cantidad de coagulante 0,1 % (mL) y la cantidad de floculante 0,05 (mL).

Población y muestra de la investigación

Se tomaron muestras, empleando el muestreo de tipo compuesto, del agua que tiene un caudal de 51 L/s en el mismo punto a la salida del túnel Graton, el cual representa a la población de estudio. En cuanto a la muestra, su recolección se realizó en el centro del flujo, por ende, se tomaron volúmenes de 500 mL cada hora, generando un volumen de 3000 mL por día, y, en total, 21 L, el cual es el tamaño de la muestra.

Nivel y diseño de la investigación

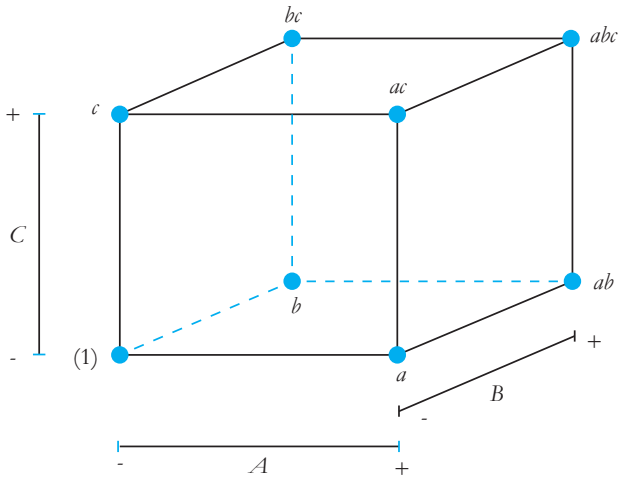
Tabla 7. *Variables y dominio experimental*

	Niveles de las variables	
Variables	**Bajo**	**Alto**
A = Cantidad de hidróxido de sodio (mL)	8	13
B = Cantidad de coagulante (mL)	8	14
C = Cantidad de floculante (mL)	5	7

Tabla 8. *Diseño factorial*

Matriz de experimentos			
N.°	**A**	**B**	**C**
1	8	8	5
2	13	8	5
3	8	14	5
4	13	14	5
5	8	8	7
6	13	8	7
7	8	14	7
8	13	14	7

Figura 8. *Espacio tridimensional*



Donde:

A = Cantidad de hidróxido de sodio (mL)

B = Cantidad de coagulante (mL)

C = Cantidad de floculante (mL)

El nivel de la investigación es exploratorio con un diseño factorial, esto se observa en las Tablas 7 y 8. El diseño es experimental, dado que consistió en puntos experimentales que se representan por los vértices de un cubo o un espacio tridimensional. Dicho cubo se representa en la Figura 4.

Procedimiento experimental

Determinación de los parámetros físicos y determinación de la concentración de zinc del agua de mina a la salida del nivel 3900

Para realizar la determinación de los parámetros físicos y de la concentración de zinc del agua de mina a la salida del nivel 3900, fue necesario realizar un análisis físico, el cual ayudó a conocer las condiciones del tratamiento y del análisis de la concentración del zinc disuelto en la muestra de agua de mina.

Procedimiento experimental para el análisis físico del agua

- Primero, se realizó la determinación del pH
- En segundo lugar, se determinaron los sólidos disueltos
- En tercer lugar, se determinó la turbidez

Procedimiento experimental para la determinación de la concentración de zinc por análisis instrumental UV-Vis.

- Se aplicó un método para que los iones de zinc reaccionen con piridilazoresorcina.
- Se usaron reactivos y frascos reactivos
- Luego, de una serie de procedimientos, se midió la muestra de medición en el espectrofotómetro.
- Finalmente, se determinó la concentración de zinc en mg/L en el agua de mina.

Elección de los procesos de tratamiento para remover zinc de aguas de mina de una compañía minera

Para poder realizar la elección de los procesos de tratamiento, se consideró la descripción general del sistema de una compañía minera. También se tomaron en cuenta los procesos unitarios de Gerard Kiely, (1985) para determinar un proceso en el tratamiento de las aguas residuales. Asimismo, la empresa contó con tratamientos que no remueven el zinc de forma efectiva, por lo que fue necesario implementarlo.

Procedimiento experimental en el equipo de jarras

Los procesos de tratamiento de las aguas de mina realizados en el procedimiento experimental son neutralización, coagulación-floculación y sedimentación, para los cuales se necesitó un control minucioso con el objetivo de evaluar las variables de la investigación. El equipo de jarras permitió ajustar el pH, añadiendo diferentes dosis de agente neutralizante, coagulante y floculante para determinar los niveles bajo y alto de las variables señaladas. Para este procedimiento, se realizaron las siguientes actividades:

- La preparación de hidróxido de sodio 0,1 N, disolviendo 1g de NaOH en un volumen de 250 mL.
- Controlar y manejar el proceso de neutralización.
- Controlar y manejar el proceso de coagulación-floculación y sedimentación.

Procedimiento experimental en el módulo y en el análisis del zinc removido del agua de mina tratada

En cuanto a los pasos experimentales en el módulo, se realizaron distintos pasos hasta proceder con el análisis respectivo de la concentración de zinc en el fotómetro. En lo que corresponde al análisis del zinc removido, se realizaron distintos pasos con la finalidad de obtener la cantidad de zinc que se logró remover.

Equipos, materiales y reactivos

Los equipos usados fueron un pH metro de marca HANNA Instruments, un turbidímetro, un equipo multiparámetro, una balanza analítica, espectrofotómetro, un fotómetro y un equipo de jarras.

Los principales materiales usados son una cocinilla, la rejilla de asbesto, el soporte universal, un vaso precipitado, pipetas, buretas, varilla de vidrio, probetas y cubetas. En lo que respecta a los reactivos, se utilizó agua destilada, HCI, reactivos, hidróxido de sodio, cloruro férrico y un floculante *Polychem*.

Resultados y discusión

Los resultados de las experimentaciones realizadas en el equipo de jarras y en el módulo posibilitaron la determinación de la eficiencia del proceso de remoción en función de la concentración inicial y final de zinc, la cual fue comprobada por medio de la lectura en el fotómetro. La obtención de los resultados tuvo en cuenta dos aspectos importantes: la determinación de los parámetros físicos y la determinación de la concentración de zinc.

Determinación de los parámetros físicos y determinación de la concentración de zinc del agua de mina a la salida del nivel 3900

La determinación de los parámetros físicos y de la concentración de zinc del agua de mina a la salida del nivel 3900 fueron necesarias para identificar los niveles de las variables con los parámetros físicos (como pH, la turbidez y los sólidos suspendidos) y para conocer la concentración inicial de zinc y la eficiencia del proceso de remoción.

Determinación de los parámetros físicos

Tabla 9. *Parámetros físicos de la muestra de agua de mina*

Parámetros	Expresado	Resultados (mg/l)
Potencial de Hidrógeno	pH	6,43
Conductividad	µS/cm.	4200
Sólidos totales	Unidades	3084
Sólidos en suspensión	Unidades	1384
Sólidos disueltos	Unidades	1700
Turbidez	NTU	372,2

La determinación de los parámetros físicos fue realizada con el fin de conocer ciertos parámetros físicos importantes. La determinación de estos fue medida con el equipo multiparámetros, obteniéndose los resultados que se visualizan en la Tabla 9.

Determinación de la concentración de zinc

Tabla 10. *Concentración de zinc (ppm) en la muestra de agua de mina*

Parámetro (metal o ion)	Factor	Factor dedilución	Absorbancia	Resultado (ppm)
Zinc	0.40	2	1.812	**70.47**

Se determinó la concentración inicial de zinc (ppm), mediante la lectura de un espectrofotómetro, cuyo resultado se muestra en la Tabla 10. Este análisis fue necesario, debido a que permitió verificar la concentración de zinc disuelto en el agua de mina antes del tratamiento y para calcular la eficiencia de la remoción al final del tratamiento.

Curvas para la determinación de los niveles de las variables para la remoción del zinc de las aguas de mina

La determinación de las curvas de los niveles de las variables para la remoción de zinc de las aguas de mina se realizó usando un equipo de jarras, dado que este equipo puede controlarse de manera muy precisa en las velocidades y los tiempos de agitación, los cuales fueron parámetros que cooperaron con la determinación de la dosis de agente neutralizante (NaOH), coagulante ($FeCl_3$) y floculante (Polychem Pc 7220).

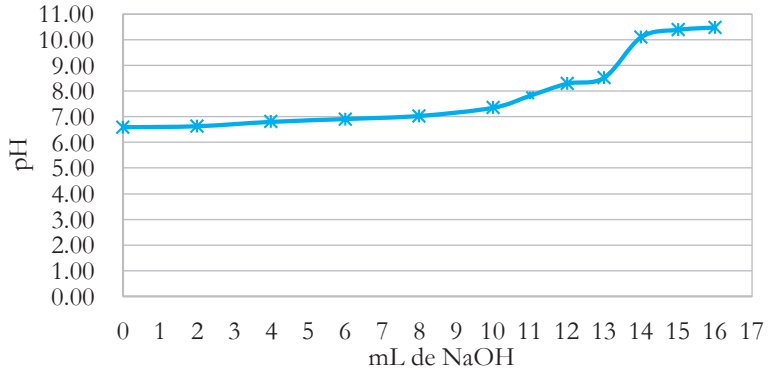
Curva de neutralización

Tabla 11. *Datos experimentales para la curva de neutralización*

Curva de neutralización		
N.°	**NaOH 0,1 N (mL)**	**pH**
1	0	6,59
2	2	6,63
3	4	6,80
4	6	6,91
5	8	7,03
7	10	7,35
8	11	7,82
9	12	8,29
10	13	8,52
11	14	10,10
12	15	10,39
13	16	10,48

Para la determinación de los niveles del agente neutralizante (NaOH), se graficó una curva de neutralización y se trabajó en un rango de 7 a 8,5, donde el zinc se encontró a un rango de concentración de 0,1 ppm a 120 ppm que precipitó como hidróxido de zinc. Asimismo, la reacción química (r1) muestra la formación de Zn $(OH)_2$ en el proceso de neutralización y es la siguiente:

Figura 9. *Curva de neutralización*



De acuerdo con los resultados, visualizados en la Tabla 11, en el proceso de neutralización, el rango de pH fue de 7 a 8,5 en las cantidades de 8 mL hasta los 13 mL de NaOH a 0,1 N. Asimismo, en los valores de pH mayores a 8,5, el zinc se solubilizó. A partir de ello, se establecen los niveles bajo y alto. En tal sentido, en la Figura 9, se muestra que, para los valores mayores de 13 mL de NaOH a 0,1 N, el pH aumentó a valores mayores de 10 y, por tal motivo, el zinc se solubilizó.

Curvas de coagulación – floculación:

La determinación de los niveles bajo y alto en el proceso de coagulación–floculación se realizó en forma separada, debido a la diferencia del comportamiento de la turbidez en cada proceso.

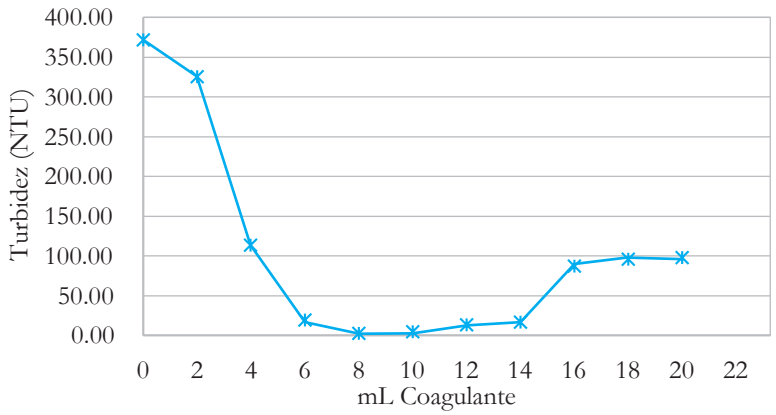
Curva de coagulación

En el proceso de coagulación, se añadió el ($FeCl_3$) para desestabilizar las partículas de $Zn(OH)_2$ y para la formación de $ZnCl_2$. Para la determinación de los niveles del coagulante ($FeCl_3$), se construyó una curva de coagulación que relacionó la turbidez con la cantidad de $FeCl_3$ a una concentración de 0,1 %. Asimismo, la reacción de este proceso se muestra a continuación:

Tabla 12. *Datos experimentales para el proceso de coagulación*

Curva de coagulación		
Nº	**$FeCl_3$ 0,1 % (mL)**	**Turbidez**
1	0	372,20
2	2	326,00
3	4	113,00
4	6	19,77
5	8	3,04
6	10	4,57
7	12	13,49
8	14	16,85
9	16	87,54
10	18	96,00
11	20	98,00

Figura 10. *Curva de coagulación*



En el proceso de coagulación, los resultados de la turbidez, como se observa en la Tabla 12, muestran que los dos primeros valores fueron altos y, por ende, que se necesitaba incrementar la cantidad de coagulante para disminuir la turbidez. Por ejemplo, en la Figura 10, se aprecia que, en 8 mL, la turbidez disminuyó de manera violenta y se mantuvo casi constante hasta los 13 mL. Además, al añadir mayor cantidad de coagulante, la turbidez aumentó, debido a que el coagulante ($FeCl_3$) añadido se presentó en exceso y no hubo reacción. Por esta razón, se estableció al 14 mL como nivel alto y al 8 mL como nivel bajo.

Curva de floculación

En el proceso de floculación, las partículas ya desestabilizadas se aglomeraron al añadirle el floculante (Polychem PC 7220), que contiene un grupo imidamina que posee nitrógeno y puede capturar al zinc. La reacción de esta (r3) es la siguiente:

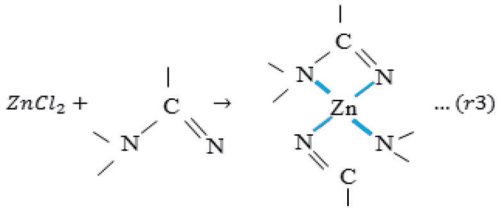
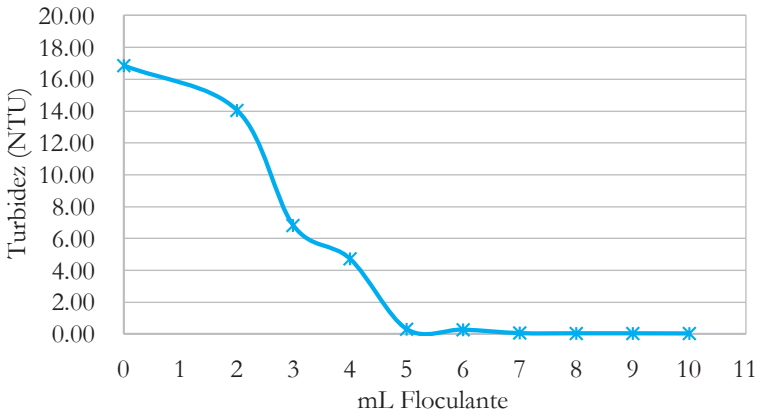


Tabla 13. *Datos experimentales para el proceso de floculación*

Curva de floculación		
Nº	**Polychem 0,05 %(mL)**	**Turbidez**
1	0	16,85
2	2	14,05
3	3	6,81
4	4	4,73
5	5	0,33
6	6	0,29
7	7	0,07
8	8	0,06
9	9	0,06
10	10	0,05

La determinación de los niveles del floculante (Polychem PC 7220) se realizó a través de la construcción de una curva de floculación que relacionó la turbidez con la cantidad de Polychem a una concentración de 0,05 %.

Figura 11. *Curva de floculación*



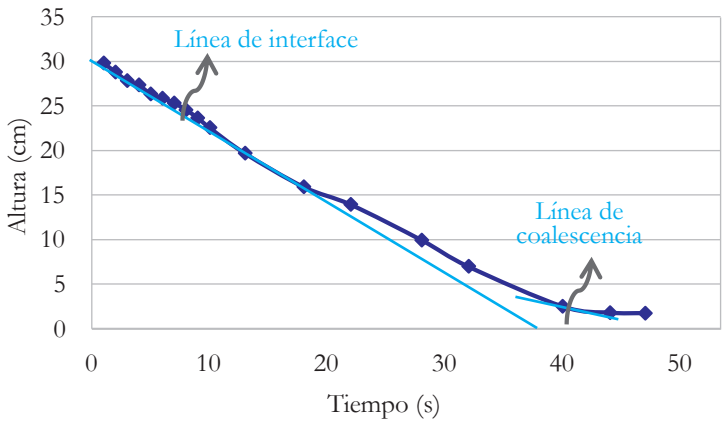
El proceso de floculación tuvo como finalidad que la turbidez tienda a cero, por ello, como se observa en la Tabla 13 y en la Figura 11, se estableció que 5 mL sea el nivel bajo y 7 mL sea el nivel alto y, de ese modo, la turbidez se hizo constante según. En ese sentido, si se añadieran mayores cantidades a 7 mL, el agua sería viscosa e impediría que los flocs sedimenten más rápido.

Curvas de sedimentación en la remoción del zinc

Tabla 14. *Datos experimentales para la sedimentación*

Curva de sedimentación	
Tiempo (s)	Altura (cm)
1	29,8
2	28,8
3	27,8
4	27,3
5	26,3
6	25,8
7	25,3
8	24,5
9	23,6
10	22,5
13	19,7
18	15,9
22	13,9
28	10,0
32	7,0
40	2,5
44	1,8
47	1,7

Figura 12. *Curva de sedimentación*



En la remoción de zinc, se realizó la sedimentación floculada en el cono Imhoff, relacionando la altura y el tiempo para determinar la velocidad de sedimentación. Los resultados obtenidos para la curva de sedimentación se muestran en la Tabla 14. Asimismo,

en la Figura 12, se puede observar la sedimentación por zonas. En ese sentido, los 10 primeros se ubican en la zona de interfase; los cuatro siguientes, en la zona de transición y los cuatro restantes, en la zona de compactación.

Figura 13. *Curva de la zona interfacial*

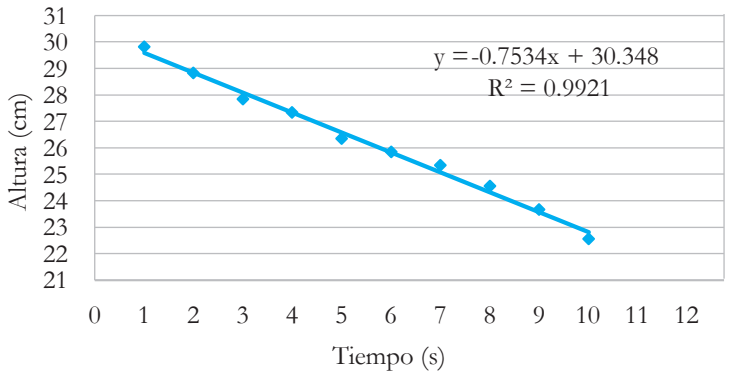
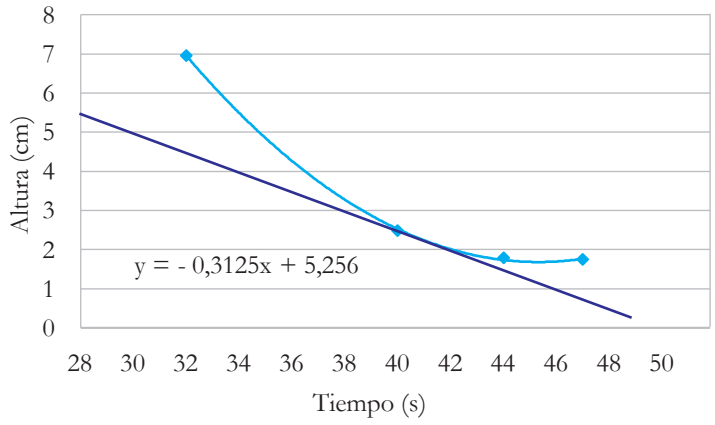


Figura 14. *Curva de la zona de transición y comparación*



En la Figura 13, se muestra la determinación de la Velocidad de sedimentación (Vs) a partir de la pendiente de la línea de interfase y, en la Figura 14, se observa la determinación de la Velocidad crítica (Vc) a partir de la línea de coalescencia. En ese sentido, de acuerdo con las Figuras 13 y 14, se estima que la velocidad de sedimentación fue mayor que la velocidad crítica, puesto que se generó un incremento de la viscosidad y de la densidad de la suspensión, desapareciendo la zona de transición.

Concentración final de zinc en el equipo de jarras

Tabla 15. *Concentración final de zinc de las dos repeticiones en el equipo de jarras*

N.º Pruebas	NaOH 0,1 N (mL)	FeCl3 0,1 % (mL)	Polychem 0,05 % (mL)	Concentración final de zinc en la repetición 1 (ppm)	Concentración final de zinc en la repetición 2 (ppm)
1	8	8	5	0,81	0,80
2	13	8	5	0,73	0,70
3	8	14	5	0,62	0,63
4	13	14	5	0,57	0,52
5	8	8	7	0,11	0,10
6	13	8	7	0,13	0,13
7	8	14	7	0,06	0,05
8	13	14	7	0,08	0,09

Los procesos experimentales en el equipo de jarras se realizaron con las combinaciones de los niveles de las variables en cada uno de los procesos de neutralización, coagulación-floculación y, de ese modo, se obtuvo una concentración mínima de zinc, la cual se corroboró mediante la lectura de la concentración final de zinc en el fotómetro.

En ese sentido, en la Tabla 15, se muestran los resultados obtenidos en las dos repeticiones y, conforme a estos resultados, se indica que, en ambas repeticiones, las concentraciones de zinc después del tratamiento estuvieron debajo del Límite Máximo Permisible. Asimismo, la combinación N.º 7 fue la más resaltante, puesto que obtuvo la mínima concentración final de zinc y se comprobó que, en las mismas condiciones de trabajo, se obtienen los mínimos valores, según la lectura en el fotómetro. En el caso de la combinación N.º 2, esta fue la más apropiada, pues obtuvo la mayor concentración final y evitó la contaminación, tras agregar más cantidades de reactivos químicos.

Concentración final de zinc en el módulo

Tabla 16. *Concentración final de zinc en las dos repeticiones en el módulo*

N.º Pruebas	NaOH 0,1 N (mL)	FeCl3 0,1 % (mL)	Polychem 0,05 % (mL)	Concentración final de zinc en la repetición 1 (ppm)	Concentración final de zinc en la repetición 2 (ppm)
1	8	8	5	0,95	0,93
2	13	8	5	0,98	0,96
3	8	14	5	0,93	0,90
4	13	14	5	0,89	0,95
5	8	8	7	0,18	0,15
6	13	8	7	0,16	0,20
7	8	14	7	0,09	0,07
8	13	14	7	0,11	0,14

Los procesos experimentales en el módulo se realizaron con las combinaciones de los niveles de las variables de cada uno de los procesos para obtener una concentración mínima de zinc que se corroboró mediante la lectura de la concentración final de zinc en el fotómetro.

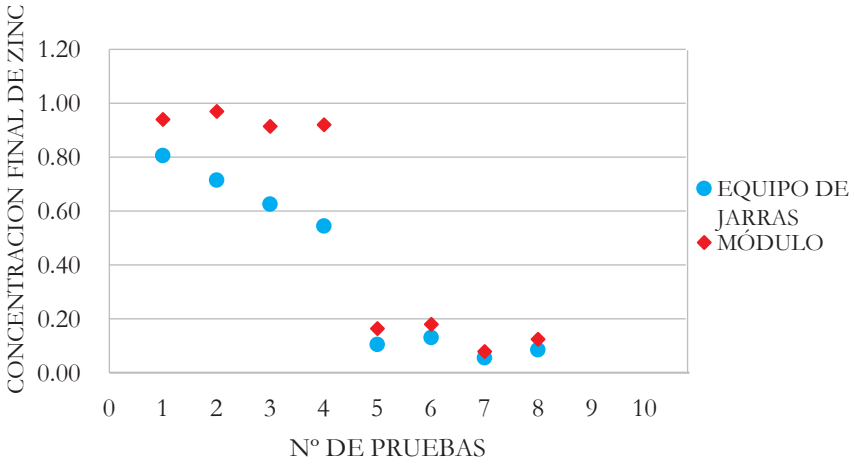
En la Tabla 16, se visualiza que, en ambas repeticiones, las concentraciones de zinc cumplen con los Límites Máximos Permisibles después del tratamiento. Además, la combinación N.º 7 fue la más resaltante por obtener la concentración final mínima de zinc; no obstante, la combinación N.º 2 fue la más apropiada por obtener la mayor concentración final de zinc y estar debajo del Límite Máximo Permisible, cumpliendo con las normas del Estado peruano. En consecuencia, se afirma que, al obtener el mayor valor de concentración en estas combinaciones, se trata de evitar la contaminación por parte de reactivos químicos.

Comparación entre el promedio de las concentraciones finales de zinc en el equipo de jarras y en el módulo

Tabla 17. *Promedios de las concentraciones finales de zinc*

Nº Prueba	Promedio de la concentración final de zinc en el equipo de jarras (ppm)	Promedio de la concentración final de zinc en el módulo (ppm)
1	0,81	0,94
2	0,72	0,97
3	0,63	0,92
4	0,55	0,92
5	0,11	0,17
6	0,13	0,18
7	0,06	0,08
8	0,09	0,13

Figura 15. *Promedios de las concentraciones finales de zinc*



Para comparar las concentraciones finales de zinc, se calculó el promedio de los resultados de las dos repeticiones en el equipo de jarras y en el módulo. Dichos resultados se muestran en la Tabla 17. Por otro lado, en la Figura 15, se observa que las concentraciones finales de zinc después del tratamiento en el equipo de jarras fueron menores que las concentraciones finales de zinc después del tratamiento en el módulo, encontrándose ambas en las mismas condiciones de trabajo. Esto pudo deberse a que el módulo tiene un agitador de un margen

de error mayor al del equipo de jarras, además, los rpm del módulo son medidos por un tacómetro; mientras que los rpm del equipo de jarras, por un tablero digital.

También se puede observar que, en las cuatro primeras pruebas o combinaciones, las concentraciones de zinc son mayores en comparación con las otras, por tanto, se sostiene que, para obtener mejores resultados, se debe realizar la combinación N.º 7.

Eficiencia de remoción de zinc

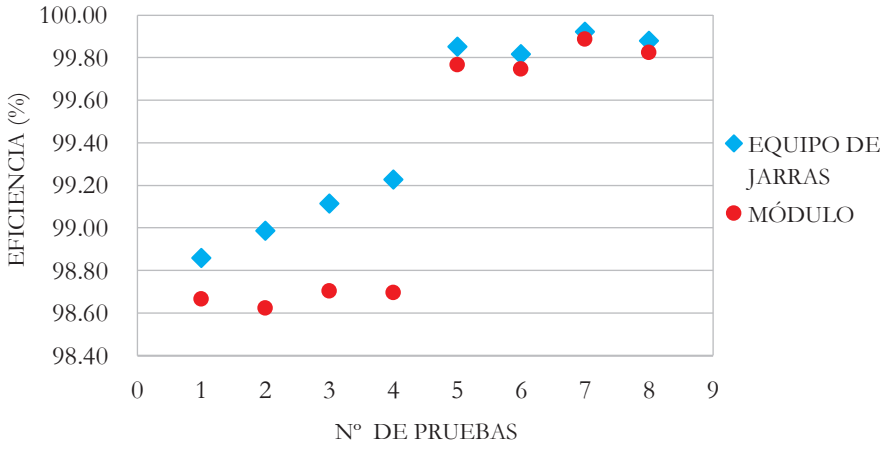
La eficiencia de la remoción de zinc se calculó con los resultados obtenidos en el equipo de jarras y en el módulo, en función de la concentración inicial del zinc y la concentración fin del zinc que se obtuvo después del tratamiento, por tanto, dicha eficiencia fue calculada mediante siguiente la fórmula:

Tras lo indicado, en la Tabla 12, se muestran los resultados de las eficiencias de la remoción de zinc, teniendo en cuenta que la concentración inicial de zinc antes del tratamiento fue de 70,47 ppm.

Tabla 18. *Eficiencia de remoción de zinc de las dos repeticiones*

N.º Prueba	Equipo de jarras					Módulo				
	Concentración final de Zinc en el equipo de jarras (ppm)		Eficiencia de remoción de zinc en el equipo de jarras		Promedio de la eficiencia de remoción de zinc en el equipo de jarras	Concentración final de Zinc en el módulo (ppm)		Eficiencia de remoción de zinc en el equipo módulo		Promedio de la eficiencia de remoción de zinc en el módulo
	R 1	R 2	R 1	R 2		R 1	R 2	R 1	R 2	
1	0,81	0,80	98,85	98,86	98,86	0,95	0,93	98,65	98,68	98,67
2	0,73	0,70	98,96	99,01	98,99	0,98	0,96	98,61	98,64	98,62
3	0,62	0,63	99,12	99,11	99,11	0,93	0,90	98,68	98,72	98,70
4	0,57	0,52	99,19	99,26	99,23	0,89	0,95	98,74	98,65	98,69
5	0,11	0,10	99,84	99,86	99,85	0,18	0,15	99,74	99,79	99,77
6	0,13	0,13	99,82	99,82	99,82	0,16	0,20	99,77	99,72	99,74
7	0,06	0,05	99,91	99,93	99,92	0,09	0,07	99,87	99,90	99,89
8	0,08	0,09	99,89	99,87	99,88	0,11	0,14	99,84	99,80	99,82

Figura 16. *Comparación de eficiencia de zinc*



En la Tabla 18, se aprecia que la eficiencia de remoción fue mayor en la prueba N.º 7 del equipo de jarras y del módulo, dado que el módulo construido tiene un agitador que

tiene un margen de error mayor al del equipo de jarras. Asimismo, en la Figura 16, se observa que los promedios de las eficiencias en el equipo de jarras y en el módulo fueron similares a partir del N.º 5 y, por tal motivo, se obtuvieron eficiencias mayores al 98 %. Esto demuestra que los procesos, realizados en secuencia, del tratamiento fueron los mejores para la remoción de zinc del agua de mina.

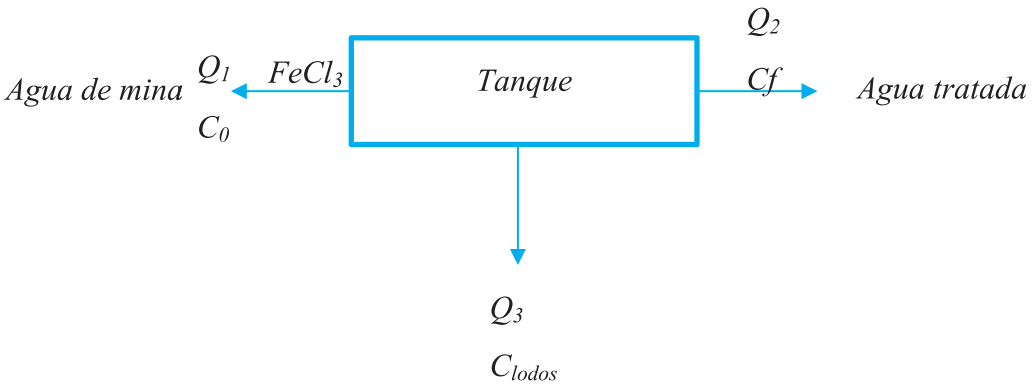
Determinación de la cantidad de lodos en el módulo

Para comprobar qué cantidad de lodos se produjo en el proceso de remoción, se compararon las cantidades de lodos producidos en forma teórica, mediante un balance alrededor del tanque de agitación y la cantidad de lodos obtenidos en la experimentación, en función del peso.

Determinación de la cantidad de lodos teóricos en el módulo

Para determinar la cantidad de lodos teóricos es necesario realizar un balance de materia para los sólidos en suspensión y un balance estequiométrico para el coagulante (FeCl3). En tal sentido, el balance de materia para sólidos en suspensión se expresa de la forma en que se observa en la Figura 17 y por medio de fórmulas.

Figura 17. *Balance de materia para sólidos en suspensión*



$$Acumulación = Entrada - Salida + Generación - Consumo$$

$$0 = Entrada - Salida + 0 - 0$$

$$Entrad = Salida$$

Datos:

Q_1= 241,13 mL/s

Q_2= 211,45 mL/s

Q_3= 211,45 mL/s

C_0= 1384 mg/L

C_f= 251,8 mg/L

Reemplazando en la ecuación:

$$Q_1 \times C_0 = Q_2 \times C_f + Q_3 \times C_{lodos}$$

Despejando C_{lodos} de la ecuación:

$$Clodos = \frac{Q_1 \times C_0 - (Q_2 \times C_f)}{Q_3}$$

Reemplazando los valores en la ecuación:

$$Clodos = \frac{\left(241{,}13\,\frac{mL}{s} \times 1384\ mg/L\right) - \left(211{,}4\,\frac{mL}{s} \times 251{,}8\ mg/L\right)}{211{,}45\ mL/s}$$

$$Clodos = \frac{(0{,}3337\ g/s) - (0{,}0532\ g/s)}{(211{,}45)\ mL/s}$$

Determinando la masa de lodos:

$$masa = concentración \times volumen$$

$$Cantidad_{lodos\ suspendidos} = \frac{(0{,}3337\ g/s) - (0{,}0532\ g/s)}{(211{,}45)\ mL/s} \times 1000\ mL$$

$$Cantidad_{lodos\ suspendidos} = 1{,}327\ g$$

Para calcular el balance de materia estequiométrico para el coagulante, se desarrolló la siguiente fórmula:

$$3Zn(OH)_2 + 2FeCl_3 \rightarrow 3ZnCl_2 + 2Fe(OH)_3$$

$$3(99{,}36) + 2(162{,}20) \rightarrow 3(136{,}29) + 2(106{,}87)$$

$$1g\ FeCl_3 \left(\frac{1\ mol\ FeCl_3}{162{,}20\ g\ FeCl_3}\right)\left(\frac{3\ mol\ ZnCl_3}{2\ mol\ FeCl_3}\right)\left(\frac{136{,}29\ g\ ZnCl_2}{1\ mol\ ZnCl_2}\right)$$

$$= 1{,}2604\ g\ ZnCl_2$$

$$1g\ FeCl_3 \left(\frac{1\ mol\ FeCl_3}{162{,}20\ g\ FeCl_3}\right)\left(\frac{2\ mol\ Fe(OH)_3}{2\ mol\ FeCl_3}\right)\left(\frac{106{,}87\ g\ ZnCl_2}{1\ mol\ Fe(OH)_3}\right)$$

$$= 0{,}6589\ g\ Fe(OH)_3$$

Cabe señalar que la cantidad de lodos, de acuerdo con el balance estequiométrico, es la cantidad de sales formadas por el coagulante ($FeCl_3$), por ello, se obtiene el siguiente resultado:

$$Cantidad\ de\ lodos_{sales} = 1{,}2604\ g\ + 0{,}6589\ g$$

$$Cantidad\ de\ lodos_{sales} = 1.919\ g\ de\ lodos$$

Por otro lado, la cantidad de lodos teóricos es la suma de los lodos suspendidos y los lodos formados por el coagulante, por ende, se obtiene lo siguiente:

$$Cantidad\ de\ lodos_{teórico} = 1{,}327\ g + 1.919\ g$$

$$Cantidad\ de\ lodos_{teórico} = 3{,}246\ g$$

Determinación de la cantidad de lodos experimentales en el módulo

Para determinar la cantidad de lodos en forma experimental, se añadió a la filtración como última etapa y, de tal manera, se obtuvo la cantidad de lodos producidos mediante el peso. En esta etapa, se puso el papel filtro y el contenido de lodos en la mufla a 350 ºC por 24 horas, luego, se pesó en una balanza analítica, dando como resultado el peso de 4,1826 g, al cual se le restó 1,0016 g (peso del papel filtro). Después de ello, se obtuvo como resultado 3,181 g de lodo.

El agua de mina tratada también posee ciertos metales, como el plomo, el fierro y el cadmio que no precipitaron por no estar en el rango de 7 a 8,5 del pH; dichos metales se encontraban solubles y no influyeron en la diferencia de la cantidad de lodos teóricos y experimentales. En ese sentido, la diferencia de lodos fue de 0,065 g, puesto que los lodos no se depositaron en el papel filtro por tener una porosidad de 20 μm a 25 μm, por ello, se afirma que existió un margen de error en el papel.

Tratamiento de datos

En el tratamiento de datos, se compararon la concentración inicial y final de zinc, por medio de los procesos de neutralización, coagulación–floculación y sedimentación, considerando las variables de cantidad de hidróxido de sodio (mL), la cantidad de coagulante (mL) y la cantidad de floculante (mL), las cuales intervinieron en la determinación de la concentración final de zinc.

Para conocer la relevancia y la influencia de cada una de las variables en el proceso de remoción, se realizó un análisis de varianza. Este análisis se desarrolló con un diseño factorial, considerando los factores Cantidad de hidróxido de sodio (mL), Cantidad de coagulante (mL) y Cantidad de floculante (mL). De tal forma, se tienen tres factores

binarios, con los cuales se pudo realizar ocho combinaciones posibles en dos réplicas. Para calcular tales combinaciones, se construyó una matriz de diseño, la cual se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. *Matriz de diseño*

Matriz de experimentos				Etiquetas	Factores		
N.º	A	B	C	(1)	A	B	C
1	-	-	-	a	8	8	5
2	+	-	-	b	13	8	5
3	-	+	-	ab	8	14	5
4	+	+	-	c	13	14	5
5	-	-	+	ac	8	8	7
6	+	-	+	bc	13	8	7
7	-	+	+	abc	8	14	7
8	+	+	+	(1)	13	14	7

Tabla 20. *Las combinaciones de los tratamientos*

R1	R2	n= 2	
		N.º de experimentos	
0,95	0,93	1=	1,88
0,98	0,96	a=	1,84
0,93	0,9	b=	1,83
0,89	0,95	ab=	1,84
0,18	0,15	c=	0,33
0,16	0,20	ac=	0,36
0,09	0,07	bc=	0,16
0,11	0,14	abc=	0,25
			8,49

Tabla 21. *Resultados para el contraste*

A=	0,01125
B=	-0,04125
C=	-0,78625
AB=	-0,06875
AC=	0,01875
BC=	-0,02875
ABC=	0,00125

Tabla 22. *Resultados para la sumatoria de cuadrados*

SCA	0,00050625
SCB	0,00680625
SCC	2,47275625
SCAB	0,01890625
SCAC	0,00140625
SCBC	0,00330625
SCABC	6,25E-06
SCT	2,67909375
SCE	0,1754

Tabla 23. *Resultados del análisis de varianza*

F.V.	S.C.	G.L.	M.C	F	F1; 8; 0,05
Factor A	0,000506	1	0,000506	0,023090	5,32
Factor B	0,006806	1	0,006806	0,310433	5,32
Interacción AB	2,472756	1	2,472756	112,782497	5,32
Factor C	0,018906	1	0,018906	0,862315	5,32
Interacción AC	0,001406	1	0,001406	0,064139	5,32
Interacción BC	0,003306	1	0,003306	0,150798	5,32
Interacción ABC	0,000006	1	0,000006	0,000285	5,32
Residual	0,175400	8	0,021925		
Total	2,679094	15			

Considerando los resultados del proceso de remoción de zinc en las dos repeticiones, se calcularon las combinaciones de los tratamientos en un orden estándar, el cual se observa en la Tabla 20. Asimismo, en las Tablas 21 y 22, se señalan los resultados para el contraste y para la sumatoria de cuadrados, respectivamente.

Por otro lado, en la Tabla 23, se observa que el valor de F1; 8; 0.05 fue 5.32, donde F1; 8; 0.05 > FAB, por tanto, se interpreta que solo la interacción entre la cantidad de NaOH y la cantidad de FeCl3 influenció favorablemente en la remoción de zinc de las aguas de mina del lugar de estudio a través de los procesos de neutralización por control directo de pH (con adición de NaOH), del proceso de coagulación por adición de coagulante inorgánico (FeCl3). A causa de ello, se recomienda implementar el proceso de coagulación en el tratamiento de las aguas de mina con la finalidad de obtener concentraciones que no excedan el Límite Máximo Permisible.

Conclusiones

- Se removió el zinc de las aguas de mina que descarga el nivel 3900 de una compañía minera, usando el proceso de neutralización por control directo de pH (con adición de NaOH), el proceso de coagulación por adición de coagulante inorgánico (FeCl3), el proceso de floculación por adición de floculante orgánico (Polychem PC 7220) y la sedimentación por zonas, a nivel de laboratorio, dado que, según el análisis, la concentración final de zinc fue menor a la inicial
- Se determinó, como resultado del análisis físico, que el valor numérico del pH fue 6.03; el valor numérico de los sólidos disueltos, 1.70 ppt; el valor numérico de los sólidos suspendidos, 1384 ppm y el valor numérico de la turbidez, 372.2 NTU. Como resultado del análisis de la concentración inicial del zinc, se obtuvo 70.47 ppm.
- Se determinaron las cantidades necesarias de NaOH: entre 8 mL y 13 mL como nivel bajo y nivel alto respectivamente. También, se identificaron las cantidades necesarias de FeCl3 (8 mL y 14 mL) y la cantidad necesaria Polychem que fue entre 5 mL y 7 mL.

- Se construyó un módulo para los procesos de neutralización, coagulación-floculación y sedimentación para remover metales.
- Se estableció que la cantidad de agente neutralizante (NaOH) de 8 mL, la cantidad de coagulante (FeCl3) de 14 mL y la cantidad de floculante (Polychem PC 7220) de 7 mL, en conjunto, brindan un resultado de 0,08 que es el promedio de las dos repeticiones realizadas en el módulo y fue el mejor por tener una mínima concentración mínima de zinc.
- Se corroboró la remoción de zinc, después del tratamiento en el módulo, obteniéndose como resultados 0.07 ppm y 0.98 ppm, valor mínimo y máximo respectivamente, los cuales están debajo del Límite Máximo Permisible.
- Se determinó la eficiencia de la remoción de zinc en el módulo, conforme a la concentración inicial de zinc y a la cantidad final de zinc removido en el módulo, obteniéndose como mejores resultados a 99,87 % y 99,90 % en la prueba o combinación N.º 7 y su repetición.
- Se comparó la cantidad de lodos producidos en el módulo (3.181 g) y la cantidad de lodos obtenidos en el balance de materia (3.246 g).

Recomendaciones

- Es necesario utilizar una solución buffer de pH 7 y pH 14 para calibrar el pH metro y obtener buenos resultados en el proceso de neutralización.
- La dosis del coagulante también es un factor que se debe tener en cuenta, ya que si se sobredosifica, aparece el fenómeno de la reestabilización de la partícula coloidal, lo cual dificulta los aglomerados y la formación de flocs.

- Para leer la turbidez, es necesario que el turbidímetro esté previamente calibrado de 0 NTU a 500 NTU con la finalidad de evitar errores en la lectura a elevados NTU y homogeneizar bien la muestra, antes de leer la turbidez.
- Para el uso del floculante Polychem PC 7220, se recomienda que la preparación se realice y utilice el mismo día.
- Es favorable utilizar el cono imhoff como tanque de sedimentación, donde las partículas se encuentran colocadas a distancias tan reducidas, generando aumentos en la velocidad conforme interfieren los campos situados alrededor de las partículas individuales.
- Para conocer la concentración de zinc del agua de mina tratada, es recomendable utilizar un fotómetro, ya que este equipo es de respuesta inmediata, a diferencia del espectrofotómetro que tiene procedimientos previos a la lectura de la absorbancia.

CAPÍTULO V

ASPECTOS CONCLUYENTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE LA REMOCIÓN DEL ZINC Y SU EFECTO EN LA SALUD DEL HOMBRE Y EL CUIDADO DEL MEDIOAMBIENTE

El agua es un recurso natural esencial que es usado en distintas actividades humanas, animales y de otros organismos, por ello, la protección de este recurso es vital para el desarrollo y aumento de la vida en el planeta. Al respecto, las Naciones Unidas (2019) indica que el "agua dulce es un recurso valioso que es clave para la salud humana, la seguridad alimentaria y energética, la erradicación de la pobreza y muchos otros aspectos del desarrollo sostenible" (p. 34).

De lo anterior, se sobreentiende que el desarrollo humano es posible, en parte, por el agua dulce, la cual se cataloga como un tipo de agua apropiada y limpia para el consumo humano; sin embargo, es posible encontrar reservorios o corrientes de agua que pueden presentar ciertos elementos que perjudican la salud del humano. Una de estas aguas son las aguas residuales.

De manera general, el agua residual es una mezcla de fugas de fertilizantes y de depósitos de aguas usadas en conjunto con los desechos animales, industriales, agrícolas y otros (Spellman, 2020). Estas aguas, por tanto, surgen de diferentes fuentes como de las

actividades humanas (como la industria, del hogar y de la minería), de los animales y de los mismos fenómenos naturales.

Agregando a lo anterior, las aguas residuales pueden provenir de la minería, las aguas residuales mineras pueden, a su vez, ser depositadas en agua natural o potable, generando las aguas de contacto minero y la expansión de la contaminación del agua (Peña y Araya, 2021). Estas aguas residuales de la minería son consideradas tóxicas para el humano, dado su elevada concentración de sustancias químicas, biológicas y físicas que no son aptas para el desarrollo de vida.

Por otro lado, como se ha señalado progresivamente, la minería no es una actividad que debe ser concebida como un facilitador de la contaminación del agua, sino como una función del humano que se encarga de aportar al crecimiento económico y tecnológico de las naciones. Asimismo, esta misma industria puede aportar al tratamiento de las aguas que surgen después de un trabajo minero.

En concordancia con lo anterior, no se puede negar que esta industria sí puede generar la contaminación del agua a través de las aguas residuales; por ejemplo, Menéndez y Muñoz (2021) afirman que las diferentes actividades que se desarrollan en la industria de minas como la extracción de minerales, en varias ocasionas, ocasionan contaminaciones en el agua por medio de relaves mineros y de la alta toxicidad de los minerales. De acuerdo con ello, se comprende y resalta que las aguas residuales contienen un alto porcentaje de agentes patógenos.

Las actividades económicas del hombre desestabilizan la naturaleza y su equilibrio, sobre todo cuando se emplea prácticas intensivas mediante uso de elementos químicos fabricados solo para cuidar los productos, mas no el medioambiente, lo que afecta luego

a la salud humana en relación a su entorno natural (Fonseca-Sánchez et al., 2019). La contaminación del agua y su conversión a agua residual afecta a todo ser vivo que se sirve y precisa de los recursos hídricos a disposición; en adición, no solo existe la posibilidad de presenciar microorganismos que producen enfermedades estomacales, sino también se puede presenciar elementos químicos que desestabilizan las condiciones naturales del medioambiente (Bravo-Moreira et al., 2016). Por tal, es importante medir la actividad humana en cuanto a su producción económica porque el uso intensivo de productos químicos o los desechos finales de la producción contaminan el medioambiente y, por ende, todo tipo de recurso natural que puede ser utilizado por el hombre y por otros seres vivos.

Las principales fuentes de aguas que provienen de las minas pueden agruparse, de manera general, en agua de mina, agua de procesos de aguas residuales, aguas residuales domésticas y del escurrimiento en superficie. Las aguas de las minas pueden almacenar en su composición una cantidad significativa de contaminantes químicos que distorsionan, negativamente, la calidad del agua a nivel de superficie o subterráneo (Harwin et al., 2019).

Por tanto, es una realidad que la minería contribuye con la formación de aguas residuales, las cuales son tóxicas para el humano, a pesar de que es una actividad crucial para el avance tecnológico y crecimiento económico de una nación. Esta realidad genera que el hombre no suprima esta actividad, sino que mejore sus procesos mineros con la finalidad de reducir el porcentaje de contaminación. En tal sentido, uno de los procesos o actividades que se pueden realizar dentro de la minería para la mitigación de agentes contaminantes de las aguas residuales es el tratamiento de dichas aguas.

El tratamiento de aguas residuales —como se ha indicado en este documento— es un conjunto de procesos destinados a remover los agentes tóxicos y purificar el agua residual.

Este tratamiento, usualmente, es realizado por compañías dedicadas a la minería, ya que estas organizaciones deben tener en cuenta que la protección de los recursos del medioambiente es una prioridad en la actualidad.

Cabe indicar que las plantas que se enfocan en tratar las aguas residuales se constituyen como uno de los factores más importantes para

enfrentar los impactos ambientales de las aguas que se consideran residuales, por ello, en varias partes de Latinoamérica, se observa que nuevas tecnologías, aparte de las convencionales, son utilizadas (Abello et al., 2020). En ese sentido, se comprende que, en tiempos actuales, las compañías mineras deben optimizar sus procesos de tratamiento y adecuarlos a los desafíos actuales.

Los tratamientos de agua residual están ligados a la descontaminación de las aguas, ya que proporcionan cierta reducción en la carga contaminante dentro del agua. Crini y Lichtfouse (2018) sostienen que el agua contaminada y los procesos de descontaminación tienden a ser dos factores muy necesarios cuando se trata de cuidar el medioambiente, por lo tanto, se debe elegir el mejor sistema o enfoque de purificación para cumplir las metas de descontaminación trazadas, conforme a lo establecido por ley (Crini y Lichtfouse, 2018).

De acuerdo con ello, se deduce que existen diversos enfoques, métodos y procesos para la descontaminación o tratamiento de las aguas residuales. Como se ha observado en capítulos anteriores, los procesos que más resaltan en el tratamiento del agua son los tratamientos biológicos, neutralización, sedimentación, coagulación/floculación, filtración, aireación, precipitación química, adsorción, intercambio iónico, entre otros más. Estos procesos permiten que el agua se separe, en distintas formas, de las moléculas sólidas y líquidas que la contaminan.

Por su parte, Aquino (2017) apunta que el agua residual, proveniente de las minas, debe ser tratada y tomada en cuenta dentro de una gestión del recurso hídrico, dado que, en todo momento, se desarrollan tareas en plantas mineras y para la explotación minera. De acuerdo con esto, las aguas residuales de las minas, en todo momento, precisan de uno de los procesos de tratamiento de aguas.

Por otro lado, los procesos de tratamiento no son solo métodos que se usan de manera individual, sino que pueden ser usados, en conjunto, para mejorar la eficacia del tratamiento. Por ejemplo, la coagulación y la floculación tienden a estar muy ligadas porque usan un coagulante con la finalidad de formar compuestos sólidos más grandes que se distingan en una cierta cantidad de agua y se puedan extraer con facilidad.

Estos procesos de tratamiento cooperan con la reducción de concentración de elementos perjudiciales para la salud como los metales pesados, dado que el agua puede contaminarse de estos metales por actividades mineras. Al respecto, Reyes et al. (2016) indica que la contaminación del agua por metales pesados, por medio antrópico y natural, afecta, en gran magnitud, a la salud ciudadana y a la seguridad de consumir los alimentos y el agua. Entre estos metales, se encuentra el arsénico, el plomo, níquel y el zinc.

En relación con lo anterior, se comprende que son diversos los metales o sustancias tóxicas que se concentran en el agua residual. La elevada concentración de estas sustancias genera nuevos tratamientos de aguas residuales y, por ende, nuevos estudios que traten la reducción de la concentración de metales pesados como el zinc.

El zinc se encuentra en el interior físico de la corteza terrestre y, en consecuencia, puede ingresar a las fuentes de recursos hídricos, por medio de procesos naturales. La minería puede afectar este proceso, por ello, se trata de mejorar los procesos de esta condición

física terrestre y, en ese sentido, reducir las concentraciones de zinc, provenientes de las minas (Singh et al., 2019).

Es cierto que el zinc es un elemento necesario para nuestra supervivencia, pero la alta concentración en el agua que un humano ingiere puede ocasionar diversos malestares para la salud de los humanos, animales y plantas. En tal sentido, es propicio reducir la concentración del zinc a un límite permisible, según políticas de salud, a través del uso de los procesos de tratamiento de aguas.

Por ejemplo, Cuadros et al. (2020), en su estudio, señalan que la laguna Pajuscocha contiene una alta concentración del zinc, debido al desbalance metabólico que existe en la flora. De acuerdo con ello, los autores proponen reducir la cantidad de concentración de este metal pesado a través del uso de coagulantes como el sulfato de aluminio.

En conclusión, la industria minera debe desarrollar, a través de procesos químicos, físicos y biológicos, un apropiado tratamiento de las aguas residuales con la finalidad de mitigar o remover la alta concentración de sustancias nocivas como el zinc y, por tanto, cooperar con la protección del medioambiente, de la biodiversidad del mundo y del desarrollo sostenible de las naciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abello, V., Muñoz, E., Lira, S. y Garrido, E. (2020). Evaluación de eco-eficiencia de tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas en Chile. *Tecnología y ciencias del agua*, *11*(2), 190-228. http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/2431/1717

Al, M., Kara, C. y Mujtaba, I. (2020). *Wastewater Treatment by Reverse Osmosis Process*. CRC Press. https://bit.ly/39QR2PZ

Al-Abed, S. R., Pinto, P. X., McKernan, J., Feld-Cook, E., y Lomnicki, S. M. (2017). Mechanisms and effectivity of sulfate reducing bioreactors using a chitinous substrate in treating mining influenced water. *Chemical engineering journal, 323*(1), 270-277. http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.045.

Aquino, P. (2017). *Calidad del agua en el Perú. Retos y aportes para una gestión sostenible en aguas residuales*. DAR. https://www.dar.org.pe/archivos/publicacion/176_aguasresiduales.pdf

Aragunde, M. y Campos, E. (2017). *Sistema experto para diagnóstico de defectos en piezas metalúrgicas* [Tesis para optar el título de Ingeniero Informático, Universidad de Los Andes]. http://hdl.handle.net/123456789/6485

Ayala, H., Cabrera, M., Cadena, A., Castaño, C., Contreras, S., Diaz, L., Espitia, L., Gil, Gonzalo, Gómez, S., González, H., Ipaz, S., Larrahondo, J., Macías, L., Madriñan, L., Mantilla, L., Medina, Y., Molina, C., Montaya, C., Pantoja, F., …Velásquez, J. (2019). *Diagnóstico de la información ambiental y social respecto a la actividad minera y la extracción ilícita de minerales en el país*. http://www.humboldt.org.co/images/documentos/2-diagnstico-actividad-minera-y-explotacin-ilicita-expertos.pdf

Barlokova, D., Ilavsky, J., Marton, M. y Kunstek, M. (2019). Removal of Heavy Metals in Drinking Water by Iron-based Sorption Materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 362*(1). https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/362/1/012109/pdf.

Barros, O., Doria, C. y Marrugo, J. (2016). Metales pesados (Pb, Cd, Ni, Zn, Hg) en tejidos de Lutjanus synagris y Lutjanus vivanus de la Costa de La Guajira, Norte de Colombia. *Veterinaria y Zootecnia*, 10(2), 27-41. https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/vetzootec/article/view/3403/3149

Bejarano, M., Sordo-Ward, A., Gabriel-Martin, I. y Garrote, L. (2019). Tradeoff between economic and environmental costs and benefits of hydropower production at run-of-river-diversion schemes under different environmental flows scenarios. *Journal of Hydrology, 572*(1), 790-804. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.048.

Bermeo, M., Bonilla, S. y Coloma, T. (2017). *Neutralización: aplicado a aguas residuales*. Compás. http://142.93.18.15:8080/jspui/bitstream/123456789/69/3/ilovepdf_merged-6-ilovepdf-compressed.pdf

Bravo-Moreira, C., Bello-Moreira, Í. y López-Zambrano, Y. (2016). Contaminación de agua cruda de río y potabilizada de consumo doméstico en Manta - Ecuador. *Dominio de las Ciencias*, *2*(3), 171-186. https://bit.ly/3n14VSY

Bustamante, M., Bustamante, P., Osorio, J. y Daza, A. (2019). Thickener and Continuous Countercurrent Decantation (CCD) geometric design in gold mining for tailings disposal. *Revista Boletín de Ciencias de la Tierra*, 46, 19-26. http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n46/0120-3630-bcdt-46-19.pdf

Carlos, K. y De Jager, L. (2017). Determination of sulfite in food by liquid chromatography tandem mass spectrometry: Collaborative study. *Journal of AOAC International, 100*(6), 1785-1794. https://doi.org/10.5740/jaoacint.17-0033.

Carmona, C. (2020). Minería en territorio indígena. Analizando la ausencia de consulta en el otorgamiento de concesiones mineras en Chile. *Revista de Derecho de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*, 55, 157-193. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-68512020000200157

Carrera, J. y Suárez (2019). *Aguas residuales industriales en Iberoamérica*. CYTED. http://triton-cyted.com/wp-content/uploads/2019/10/Libro-Aguas-industriales-Iberoamerica.pdf

Cayetano, P. (2019). *Tecnologías para la recuperación de agua contaminada con metales pesados: plomo, cadmio, mercurio y arsénico*. Instituto Nacional de Salud. https://web.ins.gob.pe/sites/default/files/Archivos/ogitt/cati/3%20BOLET%C3%8DN%20T%C3%89CNOLOGICAS%20N-3%202019.pdf

Chacón, L. (9 de octubre de 2020). *Contaminación por mercurio: un problema que va de la mano con la minería ilegal e informal*. SPDA. Actualidad Ambiental. https://www.actualidadambiental.pe/contaminacion-por-mercurio-problema-que-va-de-la-mano-con-la-mineria-ilegal-e-informal/

Chávez, L. (28 de agosto de 2019). IPE: ¿Cuánto pagan en impuestos las mineras en el Perú? *El Comercio*. https://elcomercio.pe/economia/peru/ipe-pagan-impuestos-mineras-peru-renta-regalias-canon-devolucion-igv-ipe-snmpe-noticia-669879-noticia/?ref=ecr

Chourouk, I., Salah, H. y Abdennaceur, H. (20). Performance of municipal wastewater treatment procedures. En A. Magdalena, *Wastewater treatment: processes, uses and importance* (pp. 31-68). https://bit.ly/2WqoCJu

Connor, R., Cordeiro, A., Koncagül, E., Uhlenbrook, S., Lamizana, B., Zadeh, S y Qair, M. (2017). Introducción. En WWAO., *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado* (pp. 16-22). https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/9A13A8A4E16D102F05258175006A9AD1/$FILE/1__15.247647s.pdf

Cordeiro, A., Connor, R., Moss, J., Heal, K., Lamizana, B., Van der Steen, P., Hooijmans, T., Zandaryaa, S., Qadir, M. y Medlicott, K. (2017). Aspectos técnicos de las aguas residuales. En WWAO., *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado* (pp. 38-48). https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/9A13A8A4E16D102F05258175006A9AD1/$FILE/1__15.247647s.pdf

Crini, G. y Lichtfouse, E. (2018). Wastewater treatment: an overview. En Crini, G. y E. Lichtfouse, *Green adsorbents for pollutant removal: fundamentals and design* (pp. 1-21). https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02065607/document

Cuadros, S., Uriarte, A. y Javier, L. (2020). Reducción del zinc mediante sulfato de aluminio y superfloc a-110: nivel laboratorio. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM*, 23(46), 73-80. http://dx.doi.org/10.15381/iigeo.v23i46.17378

Destouni, G., Cantoni, J., y Kalantari, Z. (2021). Distinguishing active and legacy source contributions to stream water quality: Comparative quantification for chloride and metals. *Hydrological Processes, 35*(7), e14280. https://doi.org/10.1002/hyp.14280.

Domínguez, M., Gómez, S. y Ardilla, A. (2016). Fitorremediación de mercurio presente en aguas residuales provenientes de la industria minera. *UGCiencia*, 22, 227-237. https://revistas.ugca.edu.co/index.php/ugciencia/article/view/705

Espín, D., Jarrín, J. y Escobar, O. (2017). Manejo, gestión, tratamiento y disposición final de relaves mineros generados en el proyecto Río Blanco. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, 2(4), 1-12. https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-seguridad-defensa/article/view/2137/1600

Espinosa, K., Hernández, A. y Mantilla, E. (2016a). La participación de la minería y sus beneficios económicos en Colombia y Perú. *Vestigium Ire, 10*(1), 208-228. http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ivestigium/article/view/1188

Espinosa, M., Hidalgo, A. y Delgado, R. (2016b). Diseño de un sistema de tratamiento para el drenaje ácido de mina basado en el proceso de lodos de alta densidad (HDS). *Ingeniería, 20*(2), 64-75. https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/23/67

Fonseca-Sánchez, A., Madrigal-Solís, H., Núñez-Solís, C., Calderón-Sánchez, H., Moraga-López, G. y Gómez-Cruz, A. (2019). Evaluación de la amenaza de contaminación al agua subterránea y áreas de protección a manantiales en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. *Uniciencia*, *33*(2), 76-97. https://dx.doi.org/10.15359/ru.33-2.6

Gallardo, D., Bruguera, N., Díaz, J., Lastra, J. y Pons, J. (2019). Modelo de gestión ambiental integral para la actividad minero-metalúrgica en yacimientos sulfurosos de Santa Lucía, Pinar del Río. *Minería y Geología*, 35(4), 441-463. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223560062006

Guo, X., Cui, P., Chen, X., Li, Y., Zhang, J. y Sun, Y. (2021). Estimation of discharges of water flows and debris floods in a small watershed. *Earth Surface Processes and Landforms, 46*(3), 642-658. https://doi.org/10.1002/esp.5053.

González, J. (2018). *Análisis computacional del proceso de función a la cera perdida en aplicaciones industriales y en la reconstrucción tecnológica de piezas industriales y en la reconstrucción tecnológica de piezas de metalurgia prehispánica.* [Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico, Universidad de Los Andes]. http://hdl.handle.net/1992/39158

Haller, D. (2018). *Environmental, Ecological and Recreational Impacts of a Proposed Hydroelectric Dam on the Teno River, Chile.* [Tesis de maestría. University of North Carolina at Greensboro]. https://core.ac.uk/download/pdf/345086037.pdf

Herrera, J. (2020). Sustainable wastewater treatment systems. *Sustainability, 12,* 1-5. https://www.researchgate.net/publication/339669514_Sustainable_Wastewater_Treatment_Systems_2018-2019

Hirwa, H., Nshimiyimana, F., Tuyishime, H. y Shingiro, C. (2019). Impact of mining activities on water quality status at Wolfram Mining and Processing (WMP), Burera, Rwanda. *Journal of materials and environmental sciences, 10*(12), 1214-1220. https://bit.ly/2Yfgtsk

INCyTU. (2019). *Tratamiento de aguas residuales. INCyTU, 28*. https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_19-028.pdf

INEI. (2019). *Perú: anuario de estadísticas ambientales*. INEI. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1704/libro.pdf

Irfan, S. y Alharbi, B. (2019). Wastewater treatment and agricultural uses. En A. Magdalena, *Wastewater treatment: processes, uses and importance* (pp. 1-30). https://bit.ly/2WqoCJu

Kianpoor, Y., Jabbarian, B., Huang, B., Henareh, A., Hu, W., Gao, H. y Thompson, M. (2019). Methods for Sample Collection, Storage, and Analysis of Freshwater Phosphorus. *Water, 11*, 1-24. https://bit.ly/3inD10L

Kočanová, V., Cuhorka, J., Dušek, L. y Mikulášek, P. (2017). Application of nanofiltration for removal of zinc from industrial wastewater. *Desalination and Water Treatment, 75*(1), 342-347. https://bit.ly/39OTE0J

Larakeb, M., Youcef, L. y Achour, S. (2017). Removal of zinc from water by adsorption on bentonite and kaolin. *Athens Journal of Sciences, 4*(14), 47-57. https://doi.org/10.30958/ajs.4-1-4.

Larasati, A., Fowler, G. y Graham, N. (2020). Chemical regeneration of granular activated carbon: preliminary evaluation of alternative regenerant solutions. *Environmental Science: Water Research & Technology, 6*(8), 2043-2056. https://doi.org/10.1039/D0EW00328J.

Larios, J., González, C., Morales, Y. (2015). *Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú*. Universidad San Ignacio de Loyola. https://www.usil.edu.pe/sites/default/files/revista-saber-y-hacer-v2n2.2-1-19set16-aguas-residuales.pdf

Li, X., Yang, C., Zeng, G., Wu, S., Lin, Y., Zhou, Q., y Zhong, Y. (2020). Nutrient removal from swine wastewater with growing microalgae at various zinc concentrations. *Algal Research, 46*(1). https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101804

Łomińska-Płatek, D. y Anielak, A. M. (2021). Quantitative balance and analysis of fulvic acids changes in the process of municipal sewage treatment. *Water Resources and Industry, 26*(1). https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100155.

Loza, A. y Ccancapa, Y. (2020). Mercurio en un arroyo altoandino con alto impacto por minería aurífera artesanal (La Rinconada, Puno, Perú). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *36*(1), 33-44. https://doi.org/10.20937/rica.2020.36.53317

Lumen. Chemistry for Non-Majors. (s.f.). *Percent Solutions*. https://courses.lumenlearning.com/cheminter/chapter/percent-solutions/.

Lundy, L., Alves, L., Revitt, M. y Wildeboer, D. (2017). Metal water-sediment interactions and impacts on an urban ecosystem. *International journal of environmental research and public health, 14*(7). https://doi.org/10.3390/ijerph14070722.

Martínez, H. (2016). Concesiones, explotación minera y conflicto en la frontera Jalisco-Colima. *Espiral. Estudios sobre Estado y Sociedad*, *23*(67), 45-90. https://doi.org/10.32870/espiral.v23i67.5692

Mayhua, Y. (2020). *El acarreo de mineral y la producción de la sección I, en la Mina Yauliyacu - Empresa Minera Los Quenuales S.A., Huarochirí* [Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional del Centro del Perú]. http://hdl.handle.net/20.500.12894/6071

McBride, K., Sanchez, E. y Sundmacher, K. (2020). Hybrid semi-parametric modeling in separation processes: a review. *Chemie Ingenieur Technik, 92*(7), 842-855. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/cite.202000025

Menchaca, S. y Lozada, R. (2017). Tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales: una propuesta para las zonas rurales. *UVserva, 3*, 14-22. https://uvserva.uv.mx/index.php/Uvserva/article/view/2544/4426

Menéndez, J. y Muñoz, S. (2021). Contaminación del agua y suelo por los relaves mineros. *PAIDEIA*, *11*(1), 141-154. https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Paideia/article/view/3622/4588

Ministerio de Energía y Minas (2008). *Guía de inversiones de la gran y mediana minería*. http://www.minem.gob.pe/images/publicaciones/INVERSIONISTA-z028zz2o.jpg

Ministerio de Salud. (2017). *Vigilancia y control de la calidad del agua*. Instituto Nacional de Salud y Ministerio de Salud. http://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/4516.pdf

Moscoso, K., Beraún, M. y Cárdeno, M. (2021). Contribución de la minería en términos de canon y otras regalías en el Perú. *Investigación Valdizana, 15*(2), 57-68. http://revistas.unheval.edu.pe/index.php/riv/article/view/1007

Mota, I., Neves, R., Nascimento, S., Maciel, B., Morais, A. y Passos, T. (2021). Artificial Dyes: Health Risks and the Need for Revision of International Regulations. *Food Reviews International, 1*(1), 1-16. https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1934694.

Msimango, V., Ozor, P. y Mbohwa, C. (2018). Effective Management of Waste Water in Abattoirs. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Managemen* (pp. 1657-1666). Pretoria / Johannesburg, South Africa. http://ieomsociety.org/southafrica2018/papers/427.pdf

Naciones Unidas. (2019). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019*. Naciones Unidas. https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019_Spanish.pdf

Oliphant, B., Caponelli, S., Sow, P., Boyer, J., Amin, S., Bahnsen, L. y Kjellerup, B. (2019). Exploring the energy potential of wastewater with microbial fuel cells. En A. Magdalena, *Wastewater treatment: processes, uses and importance* (pp. 69-93). https://bit.ly/2WqoCJu

Pabón, S., Benítez, R., Sarria, A. y Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, *14*(27), 9-18. http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v14n27/1909-8367-ecei-14-27-9.pdf

Peña, S. y Araya, P. (2021). Aguas de contacto, efectos en la minería y el medioambiente. *Revista de la Facultad de Derecho*, *50*, 1-29. http://www.scielo.edu.uy/pdf/rfd/n50/2301-0665-rfd-50-e106.pdf

Pérez, J. y Guimaraes, P. (2017). Aguas da norte: la contaminación de las aguas en las ciencias mineras de la península ibérica. *Revista de Historia Industrial. Economía y Empresa*, *26*(69), 81-108. https://revistes.ub.edu/index.php/HistoriaIndustrial/article/view/21502/23287

Pérez, J., Ruiz, A. y Aramburú, V. (2020). Reducción de contaminantes del relave ácido de mina en planta concentradora de Jangas, Perú. *Avances, 22*(2), 208-221. http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/145/1451813009/index.html

Pérez, N., Schwarz, A. y Urrutia, H. (2017). Tratamiento del drenaje ácido de minas: estudio de reducción de sulfato en mezclas orgánicas. *Tecnología y Ciencias del Agua, 8*(1), 53-64. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-04

Pizarro, Y. (2019). *Carguío y acarreo de mineral mediante el uso de indicadores claves de desempeño (KPLs) en CIA minera los quenuales s.a., Yauliyacu, Lima -2018*. [Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac]. http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/821

Raval, N. P., Shah, P. U. y Shah, N. K. (2016). Adsorptive removal of nickel (II) ions from aqueous environment: A review. *Journal of Environmental Management, 179*(1), 1-20. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.04.045.

Raviolo, A., Farré, A. y Schroh, N. (2021). Students' understanding of molar concentration. *Chemistry Education Research and Practice, 22*(2), 486-497. https://doi.org/10.1039/D0RP00344A.

Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M. y González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, *16*(2), 66-77. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6096110.pdf

Revista Energiminas (30 de junio de 2021). Glencore vende su mina Los Quenuales a Austria Duvaz. *Revista Energiminas.* https://energiminas.com/glencore-vende-su-mina-los-quenuales-a-austria-duvaz/

Rivera, D. (2019). *Tratamiento de aguas residuales y su influencia en el impacto ambiental del distrito de Huaura año 2018* [Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/UNJFSC/3313

Robledo, V., Velázquez, M., Montañez, J., Pimentel, J., Vallejo, A., López, M. y Venegas, J. (2016). Hidroquímica y contaminantes emergentes en aguas residuales urbano industriales de Morelia, Michoacán, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, *33*(1), 221-235. https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.02.04

Rodrigues, E., Alpendurada, M., Ramos, F. y Pardal, M. (2018). Environmental and human health risk indicators for agricultural pesticides in estuaries. *Ecotoxicology and environmental safety, 150*(1), 224-231. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.047.

Rosario, Y. (2016). Seguimiento en el tiempo de la evaluación de impacto ambiental en proyectos mineros. *Luna Azul*, *42*, 256-269. https://doi.org/10.17151/luaz.2016.42.16

Rupa, E., Kaliraj, L., Abid, S., Yang, D. y Jung, S. (2019). Synthesis of a zinc oxide nanoflower photocatalyst from sea buckthorn fruit for degradation of industrial dyes in wastewater treatment. Revista *Nanomaterials, 9*(12), 1-15. http://dx.doi.org/10.3390/nano9121692.

Salazar, J. (7 de febrero de 2019). ¿Qué hace falta para lograr despegue minero? Conexiónesan. https://www.esan.edu.pe/conexion/actualidad/2019/02/07/que-hace-falta-para-lograr-el-despegue-minero/

Sarria, R., Gallo, J. y Benítez, R. (2020). Tecnologías para remover metales pesados presentes en aguas. Caso Cromo y Mercurio. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, *12*(1), 94-109. http://jci.uniautonoma.edu.co/2020/2020_8.pdf

Sedira, N., Castro-Gomes, J., Kastiukas, G., Zhou, X., y Vargas, A. (2017). A review on mineral waste for chemical-activated binders: mineralogical and chemical characteristics. *Mining Science, 24*(1), 29-58. http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-11201b60-8a87-44e5-9adc-1216dce43470.

SENASBA. (2015). *Guía para la toma de muestras de agua residual*. PERIAGUA. https://www.bivica.org/files/5376_aguas-residuales-muestra.pdf

Signh, M., Kumar, R. y Prasad, L. (2019). Zinc Impurity in Drinking Water and Its Toxic Effect on Human Health. *Indian Internet Journal of Forensic Medicine & Toxicology*, *17*(4), 84-87. http://dx.doi.org/10.5958/0974-4487.2019.00015.4

Silva, T., Campos, E. y Olguín, M. (2000). Remoción de níquel, cadmio y zinc del agua, utilizando clinoptilolita heulandita. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva, 7*(3), 251-258. https://www.redalyc.org/pdf/104/10401906.pdf.

Somu, P. y Paul, S. (2018). Casein based biogenic□ synthesized zinc oxide nanoparticles simultaneously decontaminate heavy metals, dyes, and pathogenic microbes: a rational strategy for wastewater treatment. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 93*(10), 2962-2976. https://doi.org/10.1002/jctb.5655.

Spellman, F. (2020). *Handbook of water and wastewater treatment plant operations*. CRCPRESS. https://bit.ly/3F5KxY7

Stichting ZDHC Foundation. (2019). *Wastewater and sludge laboratory sampling and analysis plan (SAP) version 1.1*. Stichting ZDHC Foundation. https://uploads-ssl.webflow.com/5c4065f2d6b53e08a1b03de7/5db6f4114b8590ae5fc4408e_ZDHC_SAP_SLUDGE_V1.1_SEP19.pdf

Tamayo, J., Salvador, J., Vásquez, A. y Víctor, Z. (eds.). La minería. Características técnicas y económicas. En *La industria de la minería en el Perú: 20 años de contribución al crecimiento y desarrollo económico del país* (pp. 30-50). Osinergmin.

Torres, H. (2021). *Implementación de disciplina operativa y su influencia en las actividades operacionales en la empresa Minera Los Quenuales S.A – Unidad Yauliyacu* [Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas, Universidad Continental]. https://hdl.handle.net/20.500.12394/8724

Van Yken, J., Boxall, N. J., Cheng, K. Y., Nikoloski, A. N., Moheimani, N. R. y Kaksonen, A. H. (2021). E-waste recycling and resource recovery: A review on technologies, barriers and enablers with a focus on Oceania. *Metals, 11*(8), 1-40. https://doi.org/10.3390/met11081313.

Vargas, A., Calderón, J., Velásquez, D., Castro, M. y Núñez, D. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, *28*(2), 315-322. https://www.ingeniare.cl/index.php?option=com_ingeniare&view=d&doc=105/12-_VARGAS-28-2.pdf&aid=792&vid=105&lang=es

Vera, L. Uguña, M., García, N., Flores, M. y Vázquez, V. (2016). Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. *Afinidad: Revista de química teórica y aplicada*, *73*(573), 43-49. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5467346&orden=0&info=link

Vilela, W., Espinosa, M. y Bravo, A. (2020). La contaminación ambiental ocasionada por la minería en la provincia de El Oro. *Estudios de la gestión, 8*, 215-233. https://revistas.uasb.edu.ec/index.php/eg/article/view/2437/2228

WWAP. (2017). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2017. Aguas residuales: el recurso desaprovechado.* UNESCO. https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/9A13A8A4E16D102F05258175006A9AD1/$FILE/1__15.247647s.pdf

Xue, S. G., Wu, Y. J., Li, Y. W., Kong, X. F., Zhu, F., William, H., y Ye, Y. Z. (2019). Industrial wastes applications for alkalinity regulation in bauxite residue: A comprehensive review. *Journal of Central South University, 26*(2), 268-288. https://doi.org/10.1007/s11771-019-4000-3.

Zajda, M. y Aleksander, U. (2019). Wastewater Treatment Methods for Effluents from the Confectionery Industry – an Overview. *Journal of Ecological Engineering, 20*(9), 293-304. http://www.jeeng.net/pdf-112557-42473?filename=Wastewater%20Treatment.pdf


EDITORIAL
TERCER SOL
MEXICO