

Silsa Janeth Ruiz Romero
Milser Juber Velásquez Rondón
Alejandro Wilber Padilla Sevillano
Pedro Miguel Vásquez Mendoza
Segundo Juan Saldaña Saavedra
Wilson Reyes Lázaró
María Nelly Vásquez Valles

Huellas en el Agua

*La minería y su rastro
en el Jaulabamba*



Religación
Press



Huellas en el Agua

La minería y su rastro en el Jaulabamba

Silsa Janeth Ruiz Romero, Milser Juber Velásquez Rondón,
Alejandro Wilber Padilla Sevillano, Pedro Miguel Vásquez Mendoza,
Segundo Juan Saldaña Saavedra, Wilson Reyes Lázaro,
María Nelly Vásquez Valles

Quito, Ecuador

| 2025 |

Footprints in the Water

Mining's Legacy in the Jaulabamba River

Pegadas na água

O rastro da mineração no Rio Jaulabamba

Religación Press

[Ideas desde el Sur Global]

Equipo Editorial

Editorial team

Ana B. Benalcázar

Editora Jefe / Editor in Chief

Felipe Carrión

Director de Comunicación / Scientific Communication Director

Melissa Díaz

Coordinadora Editorial / Editorial Coordinator

Sarahí Licango Rojas

Asistente Editorial / Editorial Assistant

Consejo Editorial

Editorial Board

Jean-Arsène Yao

Dilrabo Keldiyorovna Bakhronova

Fabiana Parra

Mateus Gamba Torres

Siti Mistima Maat

Nikoleta Zampaki

Silvina Sosa

Religación Press, es parte del fondo editorial del Centro de Investigaciones CICSHAL-RELIGACIÓN | Religación Press, is part of the editorial collection of the CICSHAL-RELIGACIÓN Research Center |

Diseño, diagramación y portada | Design, layout and cover: Religación Press.

CP 170515, Quito, Ecuador. América del Sur.

Correo electrónico | E-mail: press@religacion.com

www.religacion.com

Disponible para su descarga gratuita en | Available for free download at
<https://press.religacion.com>

Este título se publica bajo una licencia de Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)
This title is published under an Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.



Derechos de autor | Copyright: Religación Press, Silsa Janeth Ruiz Romero, Milser Juber Velásquez Rondón, Alejandro Wilber Padilla Sevillano, Pedro Miguel Vásquez Mendoza, Segundo Juan Saldaña Saavedra, Wilson Reyes Lázaro, María Nelly Vásquez Valles

Primera Edición | First Edition: 2025

Editorial | Publisher: Religación Press

Materia Dewey | Dewey Subject: 363.7 - Problemas medioambientales

Clasificación Thema | Thema Subject Categories: RNP - Contaminación y amenazas al medioambiente | TQ - Ciencia, ingeniería y tecnología medioambientales | RND - Política y protocolos medioambientales

BISAC: SOC042000

Público objetivo | Target audience: Profesional / Académico | Professional / Academic

Colección | Collection: Estudios Ambientales

Soporte | Format: PDF / Digital

Publicación | Publication date: 2025-11-14

ISBN: 978-9942-561-94-7

Título: Huellas en el Agua. La minería y su rastro en el Jaulabamba

Nota obra derivada: El libro retoma y amplía, mediante el trabajo colaborativo de un grupo de investigadores, los hallazgos y aportes presentados en la tesis original, enriqueciendo su contenido con nuevos enfoques, análisis y perspectivas que profundizan en los temas abordados "Evaluación de la calidad del agua en cuerpos hídricos cercanos a la zona minera El Dorado Resources Cachimaca- 2024" presentada ante la Universidad Nacional de Trujillo por Silsa Janeth Ruiz Romero, Milser Juber Velásquez Rondón en 2024.

Note: The book takes up and expands, through the collaborative work of a group of researchers, the findings and contributions presented in the original dissertation, enriching its content with new approaches, analyses and perspectives that deepen the topics addressed. "Evaluación de la calidad del agua en cuerpos hídricos cercanos a la zona minera El Dorado Resources Cachimaca- 2024" presented to the Universidad Nacional de Trujillo by Silsa Janeth Ruiz Romero, Milser Juber Velásquez Rondón in 2024.

[APA 7]

Ruiz Romero, S. J., Velásquez Rondón, M. J., Padilla Sevillano, A. W., Vásquez Mendoza, P. M., Saldaña Saavedra, S. J., Reyes Lázaro, W., y Vásquez Valles, M. N. (2025). *Huellas en el Agua. La minería y su rastro en el Jaulabamba*. Religación Press. <https://doi.org/10.46652/ReligacionPress.353>

Revisión por pares

La presente obra fue sometida a un proceso de evaluación mediante el sistema de dictaminación por pares externos bajo la modalidad doble ciego. En virtud de este procedimiento, la investigación que se desarrolla en este libro ha sido avalada por expertos en la materia, quienes realizaron una valoración objetiva basada en criterios científicos, asegurando con ello la rigurosidad académica y la consistencia metodológica del estudio.

Peer Review

This work was subjected to an evaluation process by means of a double-blind peer review system. By virtue of this procedure, the research developed in this book has been endorsed by experts in the field, who made an objective evaluation based on scientific criteria, thus ensuring the academic rigor and methodological consistency of the study.

Sobre los autores

About the authors

Silsa Janeth Ruiz Romero

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
s6413701314@unitru.edu.pe

Milser Juber Velásquez Rondón

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
s6413700316@unitru.edu.pe

Alejandro Wilber Padilla Sevilla

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0000-0003-4764-4068>
apadilla@unitru.edu.pe
alexandropaddi@gmail.com

Pedro Miguel Vásquez Mendoza

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0009-0003-0485-197X>
pvasquezm@unitru.edu.pe
pedromiguelvasquezmendoza@gmail.com

Segundo Juan Saldaña Saavedra

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0000-0002-1338-2015>
ssaldana@unitru.edu.pe
jhonsaldanasaavedra@gmail.com

Wilson Reyes Lázaro

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0000-0002-2702-0269>
wreyez@unitru.edu.pe
Wirela54@gmail.com

María Nelly Vásquez Valles

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú

<https://orcid.org/0000-0002-1087-0179>

mvasquezv@unitru.edu.pe

maríanellyvasquezvalles@gmail.com

Resumen

En un contexto donde la minería representa tanto una oportunidad económica como una amenaza ambiental, esta investigación evalúa rigurosamente la calidad del agua del río Jaulabamba, influenciado por la minera El Dorado en Cachicadán. Mediante un análisis de metales pesados, parámetros fisicoquímicos y contaminantes como cianuro y aceites, el estudio contrasta los resultados con la normativa peruana. Los hallazgos revelan el impacto de la actividad minera, documentando la presencia de metales y alteraciones en el ecosistema acuático. Esta obra constituye un diagnóstico esencial y una urgente llamada a implementar medidas de control y remediación, equilibrando el desarrollo económico con la conservación del vital recurso hídrico para las comunidades y la biodiversidad andina.

Palabras claves:

Calidad del agua; Metales pesados; Impacto minero; Río Jaulabamba; Normativa ambiental.

Abstract

In a context where mining represents both an economic opportunity and an environmental threat, this research rigorously assesses the water quality of the Jaulabamba River, influenced by the El Dorado mine in Cachicadán. Through an analysis of heavy metals, physicochemical parameters, and contaminants such as cyanide and oils, the study contrasts the results with Peruvian regulations. The findings reveal the impact of mining activity, documenting the presence of metals and alterations to the aquatic ecosystem. This work constitutes an essential diagnosis and an urgent call to implement control and remediation measures, balancing economic development with the conservation of the vital water resource for Andean communities and biodiversity.

Keywords:

Water Quality; Heavy Metals; Mining Impact; Jaulabamba River; Environmental Regulations.

Resumo

Num contexto onde a mineração representa tanto uma oportunidade económica como uma ameaça ambiental, esta investigação avalia rigorosamente a qualidade da água do rio Jaulabamba, influenciado pela mineira El Dorado em Cachicadán. Através de uma análise de metais pesados, parâmetros físico-químicos e contaminantes como cianeto e óleos, o estudo contrasta os resultados com a normativa peruana. Os achados revelam o impacto da atividade mineira, documentando a presença de metais e alterações no ecossistema aquático. Esta obra constitui um diagnóstico essencial e um apelo urgente à implementação de medidas de controlo e remediação, equilibrando o desenvolvimento económico com a conservação do vital recurso hídrico para as comunidades e a biodiversidade andina.

Palavras-chave:

Qualidade da Água; Metais Pesados; Impacto Mineiro; Rio Jaulabamba; Normativa Ambiental.

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| Revisión por pares | 6 |
| Peer Review | 6 |
| Sobre los autores | 8 |
| About the authors | 8 |
| Resumen | 10 |
| Abstract | 10 |
| Resumo | 11 |
| Prólogo | 18 |
| | |
| Capítulo 1 | |
| La crisis hídrica en contextos mineros: diagnóstico integral y perspectivas de solución | 21 |
| El agua como recurso estratégico en el contexto del desarrollo minero | 22 |
| Evidencias internacionales de la contaminación hídrica por actividad minera | 23 |
| Metales pesados y sus impactos en ecosistemas acuáticos: estudios de caso | 24 |
| Implicaciones para la gestión hídrica y recomendaciones de política | 25 |
| Contaminación por metales pesados en la minería formal peruana | 26 |
| Impactos ecológicos en la Amazonía peruana: minería informal y pérdida de biodiversidad | 27 |
| Estudios locales: vulnerabilidad comunitaria y conocimiento tradicional | 29 |
| Dimensiones sociales y conocimiento comunitario sobre contaminación minera | 30 |
| Implicaciones para la gestión ambiental y políticas públicas | 31 |
| | |
| Capítulo 2 | |
| Fundamentos Conceptuales y Metodológicos para la Evaluación de la Calidad del Agua en Contextos Mineros | 34 |
| Calidad del agua: definición y dimensiones de evaluación | 35 |
| Índices de calidad y sistemas de evaluación | 36 |
| Impactos de la actividad minera en los recursos hídricos | 37 |
| Procesos erosivos y gestión de residuos mineros | 38 |
| Planteamiento metodológico para la evaluación de impactos | 39 |
| Planteamiento del problema de investigación y objetivos | 40 |
| Justificación integral de la investigación | 41 |

Capítulo 3**Metodología Integral para la Evaluación de la Calidad del Agua en Contextos Mineros**

| | |
|--|-----------|
| Andinos | 44 |
| Contexto Geográfico y Diseño Muestral del Estudio | 45 |
| Metodología analítica para la caracterización de contaminantes | 47 |
| Infraestructura y control de calidad analítico | 49 |
| Diseño Metodológico y Enfoque Analítico | 51 |

Capítulo 4

| | |
|--|-----------|
| Caracterización de Especies Metálicas en el Río Jaulabamba | 54 |
| Hallazgos y Patrones de Ocurrencia | 55 |
| Evaluación de Hidrocarburos y Cianuro Disponible | 64 |
| Evaluación de la calidad del agua del río Jaulabamba adyacente a la minera El Dorado | 66 |

Capítulo 5**Evaluación Integral de la Calidad Hídrica en el Río Jaulabamba: Impactos**

| | |
|---|-----------|
| y Cumplimiento Normativo | 71 |
| Análisis de Metales Traza y su Conformidad con Estándares Ambientales | 72 |
| Evaluación de Parámetros Orgánicos y Fisicoquímicos en el Sistema Hídrico | 73 |
| Recomendaciones para la Gestión Hídrica y Monitoreo Ambiental | 74 |

| | |
|--------------------|-----------|
| Referencias | 76 |
|--------------------|-----------|

TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Análisis de metales–Jaulabamba y LMP | 47 |
| Tabla 2. Hidrocarburos y cianuro: cuantificación vs norma | 48 |
| Tabla 3. Atributos fisicoquímicos vs normativa | 49 |
| Tabla 4. Puntos de evaluación distribuidos en el cauce del río Jaulabamba. | 50 |
| Tabla 5. Protocolos de muestreo e instrumentación especializada | 51 |
| Tabla 6. Resultados de metales–Río Jaulabamba | 56 |
| Tabla 7. Análisis de Aceites-Grasas y Cianuro WAD: Cumplimiento Normativo | 65 |
| Tabla 8. Resultados fisicoquímicos–Río Jaulabamba | 67 |

FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Posicionamiento geográfico del yacimiento minero El Dorado. | 45 |
| Figura 2. Posicionamiento geográfico del cuerpo de agua Jaulabamba. | 46 |
| Figura 3. Documentación visual del Río Jaulabamba–Cachicadán | 52 |
| Figura 4. Contaminación del Jaulabamba por operación El Dorado | 52 |
| Figura 5. Monitoreo por Bach. Velásquez Milser: Puntos PMM01 y PMM02 | 55 |
| Figura 6. Monitoreo PMM03 por Bach. Ruiz Romero Janeth | 55 |
| Figura 7. Aluminio en 3 puntos vs ECA | 57 |
| Figura 8. Arsénico en 3 puntos vs ECA | 57 |
| Figura 9. Boro en 3 puntos vs ECA | 58 |
| Figura 10. Cadmio en 3 puntos vs ECA | 58 |
| Figura 11. Cobalto en 3 puntos vs ECA | 59 |
| Figura 12. Cobre en 3 puntos vs ECA | 59 |
| Figura 13. Cromo en 3 puntos vs ECA | 60 |
| Figura 14. Litio en 3 puntos vs ECA | 60 |
| Figura 15. Magnesio en 3 puntos vs ECA | 61 |
| Figura 16. Manganeso en 3 puntos vs ECA | 61 |
| Figura 17. Niveles de Mercurio–3 puntos y ECA | 62 |
| Figura 18. Niveles de Níquel–3 puntos y ECA | 62 |
| Figura 19. Niveles de Plata–3 puntos y ECA | 63 |
| Figura 20. Niveles de Zinc–3 puntos y ECA | 63 |
| Figura 21. Monitoreo AGCW01 y AGCW02 por Bach. Velásquez Milser | 64 |
| Figura 22. Monitoreo AGCW03 por Bach. Ruiz Romero Janeth | 64 |
| Figura 23. Niveles de Aceites y Grasas–3 puntos y ECA | 65 |
| Figura 24. Niveles de Cianuro WAD–3 puntos y ECA | 65 |
| Figura 25. Monitoreo de los puntos PFQ por los Bachilleres. Ruiz y Velásquez | 66 |
| Figura 26. Nivel de pH comparado con ECA | 67 |
| Figura 27. T(°C) vs ECA resultado del análisis | 68 |
| Figura 28. DQO (mg/L): Resultado vs ECA | 68 |
| Figura 29. Resultado de DBO ₅ vs ECA | 69 |
| Figura 30. Conductividad (μS/cm): Resultado vs ECA | 69 |

Prólogo

Este libro nace de una pregunta urgente, formulada no en los pasillos de la academia, sino en las riberas de un río andino que lleva en sus corrientes la historia reciente de su territorio: ¿Cuál es el verdadero estado del agua que fluye junto a la actividad minera?

El agua, ese recurso que la literatura científica define por sus características fisicoquímicas, microbiológicas y organolépticas, es mucho más que un conjunto de parámetros. Es, como bien señalan los estudios citados, la esencia de los ecosistemas y el pilar del desarrollo socioeconómico. Sin embargo, su calidad, esa cualidad que determina su aptitud para la vida, se ve amenazada globalmente por actividades antropogénicas, entre las cuales la minería representa uno de los desafíos más complejos.

Las páginas que siguen no son solo un informe técnico; son una investigación meticulosa que se adentra en el corazón de esta problemática en el contexto peruano. Tomando como caso de estudio el río Jaulabamba, en la zona de influencia de la minera El Dorado en Cachicadán, este trabajo se propone evaluar con rigor científico la huella que la extracción de minerales deja en los cuerpos hídricos. Partimos de la hipótesis de que existe una diferencia significativa en la calidad del agua entre las áreas expuestas a la minería y aquellas que no lo están, y que es posible identificar contaminantes como mercurio, cobre, zinc y plomo directamente vinculados a esta actividad.

Para ello, nos sumergimos en el marco conceptual que define la calidad del agua, desde sus dimensiones básicas hasta los índices que permiten categorizar su estado, entendiendo que un número en una escala del 0 al 100 puede resumir la salud de un ecosistema completo. Exploramos los mecanismos específicos a través de los cuales la minería impacta el agua: el drenaje ácido de mina (DAM), ese proceso químico implacable que acidifica las aguas y libera metales pesados; la contaminación química por cianuro y otras sustancias utilizadas en el beneficio mineral; y la erosión y sedimentación que alteran físicamente los cauces y ahogan la vida acuática.

Los riesgos de estos contaminantes, particularmente los metales pesados, son profundos y persistentes. Como advierten las investigaciones, estos elementos no se degradan; permanecen en el ambiente, se acumulan en los sedimentos y, lo más crítico, se bioacumulan en las cadenas tróficas, representando una amenaza tóxica a largo plazo para todos los seres vivos, incluidos los humanos que dependen de estos ríos para su consumo, agricultura y ganadería.

La justificación de este esfuerzo es triple, reflejando las dimensiones entrelazadas del problema. Es social, porque la calidad del agua es un determinante directo del bienestar de las comunidades locales que históricamente han dependido del Jaulabamba. Es económica, porque la contaminación hídrica puede erosionar las bases productivas agrícolas y ganaderas de una región, imponiendo costos de mitigación y restauración que superan cualquier beneficio a corto plazo. Y es, sobre todo, ambiental, porque estos cuerpos de agua son parte de ecosistemas frágiles y biodiversos, cuyo deterioro tiene consecuencias irreversibles.

A través de un diseño metodológico robusto, que incluye el muestreo en puntos estratégicos, el respeto de la cadena de custodia y la comparación con los Límites Máximos Permisibles (LMP) y Estándares de Calidad Ambiental (ECA) peruanos, este libro busca aportar datos concretos y evidencias irrefutables. No es nuestro objetivo señalar culpables de manera simplista, sino contribuir con un diagnóstico riguroso que ilumine la toma de decisiones.

Que este trabajo sirva como una herramienta para autoridades, empresas, comunidades y académicos. Que sus hallazgos promuevan no solo la conciencia, sino la acción informada. Y que, sobre todo, recuerde a todo lector que detrás de cada parámetro analizado, de cada metal cuantificado, hay un río que es fuente de vida, y su salud es, en última instancia, un reflejo de nuestra propia relación con el territorio que habitamos.

Capítulo 1

*La crisis hídrica en contextos mineros: diagnóstico integral
y perspectivas de solución*

El agua como recurso estratégico en el contexto del desarrollo minero

El agua constituye un elemento fundamental no solamente para la supervivencia de los ecosistemas y las especies, sino que representa un pilar insoslayable para el desarrollo socioeconómico de las comunidades humanas. Sin embargo, este recurso vital enfrenta una crisis progresiva a escala global, caracterizada por el deterioro constante de su calidad como consecuencia de las actividades antropogénicas, particularmente aquellas relacionadas con el sector extractivo. La contaminación hídrica generada por la minería altera profundamente las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los cuerpos de agua, comprometiendo su aptitud para los usos humanos y ecológicos esenciales (Mallqui et al., 2022). Esta problemática adquiere dimensiones particularmente alarmantes en regiones donde la actividad minera se desarrolla de manera intensiva, generando una paradoja compleja entre el desarrollo económico basado en la extracción de recursos naturales y la conservación de los ecosistemas acuáticos que sustentan la vida en todas sus formas. La evaluación sistemática de la calidad del agua en las proximidades de las operaciones mineras emerge, así como una prioridad científica y de gestión ambiental, especialmente en contextos donde la minería representa simultáneamente una oportunidad económica y una amenaza ecológica de proporciones significativas.

La minería, como actividad transformadora del territorio, implica necesariamente la movilización y liberación de sustancias potencialmente tóxicas que pueden permanecer en el ambiente por períodos prolongados, afectando múltiples componentes de los sistemas hídricos. Durante los procesos de extracción y beneficio de minerales, se produce la liberación sistemática de diversos compuestos químicos hacia los cuerpos de agua circundantes, incluyendo metales pesados, agentes químicos utilizados en el procesamiento mineral y materiales sedimentarios en suspensión, entre otros contaminantes de preocupación ambiental creciente. Estas sustancias, una vez incorporadas a los sistemas acuáticos, desencadenan una cadena de impactos ecológicos que comprometen la integridad funcional de los ecosistemas y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para las comunidades humanas. La presencia persistente de estos contaminantes en las fuentes hídricas genera problemáticas complejas para la salud de los ecosistemas acuáticos y, de manera particular, para las poblaciones

humanas que dependen de estos recursos para actividades fundamentales como el abastecimiento de agua potable, la agricultura y la ganadería, configurando escenarios de vulnerabilidad socioambiental que requieren atención urgente.

Evidencias internacionales de la contaminación hídrica por actividad minera

La literatura científica internacional documenta de manera consistente los patrones de contaminación hídrica asociados a la actividad minera en diversos contextos geográficos y sistemas de producción. En la investigación realizada por Peña y Araya (2021), se buscó clarificar sistemáticamente la problemática ambiental generada por las aguas de contacto minero derivadas de las operaciones de empresas del sector, con especial énfasis en sus efectos sobre los sistemas sociales y ecológicos receptores. La metodología implementada combinó técnicas de revisión bibliográfica exhaustiva de literatura científica especializada y consulta de fuentes documentales confiables, permitiendo identificar vacíos normativos significativos en la regulación de estos efluentes. Los hallazgos obtenidos revelaron que el estado chileno no cuenta actualmente con un marco normativo específico que aborde integralmente la gestión de las aguas de contacto minero, lo que se traduce en una ausencia de regulación sobre los efectos que estos efluentes pueden ocasionar tanto en los sistemas humanos como en los ecológicos. Los investigadores plantearon que la implementación de instrumentos normativos robustos permitiría regular de manera efectiva los aspectos relacionados con la calidad del agua asociada a estas corrientes residuales, representando un avance significativo en la solución de esta problemática ambiental.

Complementariamente, en el estudio realizado por López et al. (2020), en el sector minero de Santo Domingo, se desarrolló una evaluación integral de la calidad fisicoquímica de cinco cuerpos hídricos superficiales y subterráneos localizados en las proximidades de la empresa aurífera Santo Domingo, en Chontales. El diseño muestral consideró cinco puntos de monitoreo estratégicamente seleccionados, distribuidos en dos sistemas subterráneos y tres cuerpos superficiales, permitiendo una caracteriza-

ción comparativa de la calidad del agua en los diferentes compartimentos hidrológicos. La metodología integró técnicas de monitoreo de campo, revisión bibliográfica especializada, análisis de instrumentos normativos y aplicación de software CWQI para el cálculo de índices de calidad del agua. Los resultados obtenidos indicaron que los índices de calidad correspondientes a las aguas subterráneas se categorizaron como excelentes tanto para el consumo humano como para los usos agrícolas, mientras que los cuerpos hídricos superficiales como El Sardillo presentaron calificaciones moderadas a buenas para consumo humano, pobres a buenas para el mantenimiento de la vida acuática y excelentes para aplicaciones agrícolas según los estándares normativos. Esta investigación evidenció patrones diferenciales de calidad entre aguas subterráneas y superficiales, siendo estas últimas las que manifestaron mayores afectaciones por la actividad minera circundante.

Metales pesados y sus impactos en ecosistemas acuáticos: estudios de caso

La contaminación por mercurio representa uno de los problemas más severos asociados a la minería aurífera, particularmente en operaciones de carácter artesanal y de pequeña escala. En la investigación realizada por Matamoros (2020), se verificó sistemáticamente la polución por mercurio en los afluentes San Juan y Calderas, generada por el proceso minero artesanal de oro, con el objetivo de proponer medidas de manejo sustentable y sistemas de vigilancia para las emisiones ambientales de este metal pesado. El estudio consideró como población de investigación muestras de agua y sedimentos recolectadas en puntos estratégicos de estos sistemas hídricos, analizadas mediante técnicas de laboratorio especializadas. Los resultados revelaron la presencia de concentraciones elevadas de mercurio en las matrices ambientales evaluadas, con valores en agua fluctuando entre 0.02 y 4.929 mg/L y en sedimentos entre 261.955 y 2,773.199 ug/L, excediendo consistentemente los límites establecidos en la normativa ambiental para la protección de la vida acuática. Los investigadores asociaron el deterioro de la calidad del agua con la presencia de actividades mineras artesanales en la zona, identificando a estas operaciones como responsables

de la significativa reducción en las tasas de macroinvertebrados bentónicos en los afluentes estudiados, además de atribuir la elevada contaminación por mercurio a prácticas inadecuadas de disposición y manejo de residuos, proponiendo como medida correctiva la implementación de sistemas de control en el uso de este metal en las unidades mineras de la región.

De manera similar, en la investigación realizada por Sanga (2020), se evaluó el efecto de la industria aurífera sobre la calidad del recurso hídrico, los sedimentos y las comunidades de macroinvertebrados en los afluentes Pagua y Siete. La metodología se basó en el análisis de gránulos de sedimentos fluviales y la aplicación de técnicas de revisión bibliográfica exhaustiva complementadas con monitoreos de campo. Los resultados demostraron que, durante el período de estudio, los índices de calidad del agua en el río Pagua se categorizaron como pobres, mientras que en el río Siete fluctuaron entre moderados y muy malos durante la época seca, y entre pobres y muy malos en la estación húmeda. La investigación concluyó que la calidad del río Siete se encuentra significativamente alterada por las descargas de sustancias contaminantes originadas en los procesos mineros desarrollados en su cuenca, afectando severamente las comunidades acuáticas y los procesos ecológicos esenciales en este ecosistema fluvial. Estos hallazgos coinciden con lo documentado por Hurtado y Gómez (2019), quienes mediante modelamiento con software especializado Qual2Kw y herramientas SIG, identificaron impactos graves por actividad minera en las cabeceras de tres quebradas en la zona minera Eagle Mining de Colombia, evidenciando procesos de mineralización que alteran la calidad fisicoquímica del agua.

Implicaciones para la gestión hídrica y recomendaciones de política

La evidencia consolidada a través de las investigaciones revisadas sugiere la necesidad de implementar estrategias integrales de gestión hídrica en regiones con actividad minera significativa. Los estudios demuestran consistentemente que los impactos sobre la calidad del agua trascienden las escalas locales, configurando patrones regionales de contaminación que requieren aproximaciones sistémicas para su adecuada gestión. La identificación de vacíos normativos, particularmente en lo relacionado con

la regulación de aguas de contacto minero y el control de emisiones de metales pesados, emerge como una prioridad para los sistemas de gestión ambiental en países con importante actividad minera. La implementación de programas de monitoreo participativo que incorporen el conocimiento local representa una oportunidad para desarrollar sistemas de alerta temprana más efectivos y culturalmente apropiados. La remediación de pasivos ambientales mineros y la implementación de tecnologías más limpias en los procesos de extracción y beneficio mineral constituyen componentes esenciales de cualquier estrategia dirigida a compatibilizar la actividad minera con la conservación de los recursos hídricos y la salud de los ecosistemas acuáticos. La integración de estas aproximaciones en políticas públicas sectoriales permitiría avanzar hacia un modelo de minería más sostenible ambiental y socialmente, que internalice adecuadamente los costos ambientales y garantice la protección del recurso hídrico para las generaciones presentes y futuras.

Contaminación por metales pesados en la minería formal peruana

La minería formal en el Perú, a pesar de operar bajo marcos regulatorios establecidos, genera impactos significativos en la calidad de los recursos hídricos, como lo demuestran diversas investigaciones realizadas en diferentes regiones del país. En Huancavelica, la investigación desarrollada por Pardave (2022), se orientó a determinar la calidad fisicoquímica de las aguas afectadas por las operaciones de la empresa aurífera Cerro S.A.C, ubicada en la jurisdicción de Simón Bolívar y Yanacancha en la provincia de Pasco. El estudio implementó un diseño metodológico basado en el monitoreo sistemático de puntos de control estratégicos que reciben influencia directa de los efluentes mineros que descargan en los ríos San Juan y Tingo, complementado con el procesamiento estadístico de datos y la consulta de fuentes bibliográficas especializadas. Los resultados obtenidos revelaron la presencia significativa de metales pesados en el Río San Juan, con concentraciones de cobre que fluctuaron entre 0.2357 y 0.6932 mg/L, hierro entre 15.7863 y 31.2534 mg/L, plomo entre 0.289 y 0.328 mg/L, y zinc entre 4.1334 y 5.2163 mg/L durante los meses de julio y agosto, valores que exceden consistentemente los Límites Máximos Permisibles

establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) peruanos. La investigación concluyó que los cursos hídricos evaluados están siendo contaminados de manera sistemática por lixiviados y efluentes generados en las diferentes etapas operativas de la empresa Cerro S.A.C, incluyendo el manejo de relaves, los procesos de explotación y las operaciones de concentración mineral.

De manera complementaria, en la investigación realizada por Carhuamaca (2020), en el sector minero de Huarochirí, se evaluó integralmente las características físicas, químicas y microbiológicas del agua en los drenajes y vertidos del punto de estación 2210 de la empresa minera Casapalca S.A. El diseño experimental consideró tres campañas de monitoreo consecutivas, cada una con tres muestras representativas, totalizando nueve muestras analizadas mediante técnicas de laboratorio acreditadas y procesamiento estadístico especializado. Los principales hallazgos indicaron que la calidad global de los efluentes y drenajes de la minera obtuvo una calificación regular con un valor de 69.95 en el índice de calidad aplicado, identificándose que los parámetros fisicoquímicos se encuentran fuera de los rangos normativos, mientras que los indicadores microbiológicos se mantienen dentro de los límites establecidos. Resulta particularmente significativo que el mercurio, a pesar de ser el metal más peligroso identificado, se encontró en concentraciones dentro de los niveles permisibles, aunque la calidad general del agua se ve comprometida recurrentemente por la incidencia de otros parámetros que superan los estándares de calidad, evidenciando las limitaciones de los sistemas de tratamiento implementados.

Impactos ecológicos en la Amazonía peruana: minería informal y pérdida de biodiversidad

La Amazonía peruana enfrenta desafíos particulares relacionados con la minería informal e ilegal, cuyos impactos se extienden más allá de la contaminación química para afectar profundamente la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos. En una investigación realizada por Tinco y Omnia (2022), en el sector minero de Madre de Dios, se evaluó el efecto del proceso minero sobre la calidad del recurso hídrico en cuatro quebra-

das de la población Natividad San José de Carené. El estudio consideró como unidades de muestreo las quebradas Kiraswe, Wepabendwe, Wacwe y Baraywe, todas ellas sujetas a afectación directa por actividades mineras artesanales en sus cuencas. La metodología integró la revisión sistemática de literatura especializada, monitoreos de campo exhaustivos, análisis de laboratorio certificados y procesamiento estadístico de datos. Los hallazgos demostraron una reducción drástica en la biodiversidad acuática, particularmente en lo que respecta a macroinvertebrados bentónicos y comunidades vegetales riparias, en los cuatro sistemas hídricos investigados. Los ecosistemas acuáticos evidenciaron alteraciones estructurales y funcionales atribuibles directamente a las actividades mineras, manifestadas a través de cambios significativos en parámetros fisicoquímicos clave como turbidez, pH y temperatura, que a su vez determinaron la pérdida de diversidad biológica. El estudio contrastó estas condiciones críticas con áreas de referencia no afectadas por minería, donde se registraron valores significativamente superiores de biodiversidad acuática, confirmando la relación causal entre la actividad minera y el deterioro ecológico observado.

El estudio realizado por Nieto (2022), en Pucallpa, aportó evidencias adicionales sobre los impactos generados por la minería informal en la calidad del agua del afluente Abujao, afectado por procesos unitarios auríferos de carácter artesanal. La investigación consideró un diseño muestral que incluyó ocho puntos de muestreo distribuidos estratégicamente a lo largo del río Abujao, analizados mediante técnicas de laboratorio acreditadas, revisión bibliográfica especializada y procesamiento estadístico con software SPSS y Office. Los resultados identificaron la presencia de múltiples métodos de explotación mineral que alteran significativamente la calidad del agua, con valores de turbidez consistentemente por encima de los límites permisibles y concentraciones de mercurio que oscilaron entre 0.133 y 0.954 mg/L, superando en varios órdenes de magnitud el límite normativo de 0.0001 mg/L establecido para la protección de la vida acuática. Adicionalmente, se detectó la presencia de coliformes fecales y concentraciones excesivas de hierro por encima de 0.3 mg/L, configurando un escenario de riesgo múltiple para la salud humana y de los ecosistemas acuáticos, particularmente preocupante por las características tóxicas y bioacumulativas del mercurio en las cadenas tróficas acuáticas y terrestres.

Estudios locales: vulnerabilidad comunitaria y conocimiento tradicional

Las investigaciones a escala local proporcionan evidencia detallada sobre los impactos específicos de la actividad minera en comunidades particulares, permitiendo identificar problemáticas socioambientales concretas y el conocimiento comunitario asociado. En una investigación realizada por Ventocilla (2022), en el ámbito de Lima, se examinaron los indicadores físicos y químicos del agua empleada para riego de cultivos afectados por minería informal en la comunidad de Sayapullo, La Libertad. El estudio consideró como población de investigación las vertientes del Cerro Cholita Linda, donde se recolectaron muestras de agua que fueron analizadas mediante metodologías de laboratorio estandarizadas, complementadas con revisión sistemática de literatura especializada y procesamiento estadístico riguroso. Los resultados identificaron la presencia de metales pesados como cobre, plomo, zinc, cadmio y mercurio en concentraciones que superan los estándares de calidad establecidos, con valores de pH notablemente ácidos entre 2.14 y 2.73 que las hacen inadecuadas para uso agrícola, y conductividad eléctrica elevada entre 3002 y 3007 $\mu\text{S}/\text{cm}$ indicativa de alta concentración de sales con potencial de degradar suelos agrícolas. La investigación concluyó que las aguas de Sayapullo presentan contaminación significativa derivada de actividades mineras informales, determinando su inadecuación para aplicaciones de riego agrícola y configurando un escenario de riesgo para la seguridad alimentaria local.

La investigación realizada por Mantari y Pinchi (2021), en el sector minero de La Libertad, evaluó el impacto de la actividad minera a pequeña escala e informal en la calidad del agua de Parcoy. El estudio consideró muestras de agua de cinco puntos de monitoreo representativos, analizadas mediante técnicas de laboratorio, encuestas poblacionales estructuradas y procesamiento estadístico especializado. Los resultados indicaron una influencia del 75% de la minería artesanal en la calidad del agua, con aproximadamente 63.3% de presencia de metales pesados como arsénico, cadmio, cobre, zinc, plomo y hierro en los cuerpos hídricos de Parcoy. Los parámetros fisicoquímicos mostraron valores de pH superiores a 6, sólidos suspendidos totales por encima de 500 mg/L, oxígeno disuelto mayor a 5 mg/L, conductividad eléctrica inferior a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y turbidez superior a

5 NTU, configurando un perfil de calidad que refleja la influencia significativa de las actividades mineras en la zona y la necesidad de implementar medidas de control y remediación específicas para este tipo de operaciones de pequeña escala.

Dimensiones sociales y conocimiento comunitario sobre contaminación minera

Las dimensiones sociales de la contaminación hídrica por actividad minera constituyen un aspecto fundamental para comprender integralmente esta problemática y diseñar estrategias de intervención efectivas. En la investigación realizada por Reategui (2022), se evaluó el conocimiento de la comunidad de Shiracmaca respecto a la conexión entre metales pesados y la calidad del agua del arroyo El Toro, afectado por efluentes de la empresa aurífera El Toro de Huamachuco. La investigación consideró como muestra representativa a pobladores del caserío de Shiracmaca, aplicando metodologías basadas en encuestas validadas, entrevistas semiestructuradas y procesamiento estadístico especializado. Los resultados identificaron que aproximadamente el 25% de los encuestados eran mujeres que demostraron mayor conocimiento sobre metales pesados y su relación con la calidad del agua, mientras que el resto de la población mostró niveles de conocimiento significativamente menores. Particularmente relevante resultó el hecho de que alrededor del 78.70% de las mujeres encuestadas asociaron causalmente las enfermedades en la comunidad y la muerte de ganado con la mala calidad del agua de los cuerpos hídricos contaminados por relaves mineros. El estudio concluyó que las mujeres poseen mayor conocimiento sobre los problemas de calidad del agua generados por la actividad minera, recomendando implementar programas de concientización y capacitación dirigidos a toda la comunidad que aprovechen este conocimiento local diferenciado.

Complementariamente, en la investigación de Cerna et al. (2019), se exploró la influencia de la contaminación del río Moche en la biota acuática y las afecciones a la salud en zonas rurales de su cuenca. El estudio consideró una población de 5004 habitantes, con una muestra de 334 pobladores seleccionada mediante técnicas de muestreo probabilístico estratifica-

do. La metodología incluyó la aplicación de cuestionarios validados sobre contaminación del río Moche y sus efectos en la biota y la salud humana, complementados con análisis de correlación estadística. Los resultados identificaron que el alto grado de contaminación deriva principalmente de efluentes mineros e industriales, con presencia documentada de mercurio, cadmio, plomo, cobre y arsénico en los relaves mineros, y hierro, cobre, zinc, plomo y cadmio en los desechos industriales. Estas contaminaciones se asociaron estadísticamente con problemas de salud en la población como enteritis y daños intestinales, así como afectaciones a cultivos de caña de azúcar, papa y maíz, daños en la ganadería y mortalidad de vida acuática, configurando un escenario de afectación socioambiental multifacética que requiere intervenciones integrales de salud pública y control ambiental.

Implicaciones para la gestión ambiental y políticas públicas

La evidencia consolidada a través de las investigaciones revisadas sugiere la necesidad de implementar estrategias diferenciadas de gestión hídrica que consideren las particularidades de cada contexto minero en el Perú. Los estudios demuestran consistentemente que los impactos sobre la calidad del agua presentan características específicas según el tipo de operación minera (formal, informal, artesanal), la escala de producción, las tecnologías utilizadas y las condiciones biogeoquímicas locales. La identificación de vacíos en la aplicación de la normativa ambiental, particularmente en lo relacionado con el monitoreo y control de efluentes de la minería a pequeña escala y artesanal, emerge como una prioridad para los sistemas de gestión ambiental regionales. La implementación de programas de monitoreo participativo que incorporen el conocimiento local, particularmente el de las mujeres que han demostrado mayor comprensión de estas problemáticas, representa una oportunidad para desarrollar sistemas de alerta temprana más efectivos y culturalmente apropiados. La remediación de pasivos ambientales mineros y la implementación de tecnologías más limpias en los procesos de extracción y beneficio mineral, adaptadas a las realidades técnicas y económicas de cada tipo de operación, constituyen componentes esenciales de cualquier estrategia dirigida a compatibilizar la actividad minera con la conservación de los recursos

hídricos y la salud de los ecosistemas acuáticos. La integración de estas aproximaciones en políticas públicas sectoriales diferenciadas permitiría avanzar hacia un modelo de minería más sostenible ambiental y socialmente, que internalice adecuadamente los costos ambientales y garantice la protección del recurso hídrico para las generaciones presentes y futuras en las diferentes regiones del Perú.

Capítulo 2

*Fundamentos Conceptuales y Metodológicos para la
Evaluación de la Calidad del Agua en Contextos Mineros*

Calidad del agua: definición y dimensiones de evaluación

La calidad del agua constituye un concepto multidimensional que integra características fisicoquímicas, microbiológicas y propiedades organolépticas como aroma y sabor, determinando su aptitud para diferentes usos humanos y ecológicos (Ramos, 2022). Esta calidad afecta directamente la forma en que las poblaciones emplean el recurso hídrico para actividades diversas que incluyen el consumo humano, fines productivos y recreativos, estableciéndose así una relación intrínseca entre la determinación de la calidad y el propósito específico del uso asignado. Según Guillen et al. (2012), la calidad del agua se cuantifica mediante un conjunto integral de indicadores que permiten calcular el nivel de alteración de sus propiedades naturales y categorizarla para usos específicos, constituyendo estos indicadores herramientas fundamentales para la gestión sostenible del recurso. La evaluación comprende parámetros físicos como turbiedad, color y temperatura; químicos incluyendo pH, conductividad, oxígeno disuelto y concentración de metales; biológicos mediante indicadores de contaminación fecal; y ecológicos a través de índices de diversidad biológica, configurando un sistema comprehensivo de evaluación que refleja el estado integral del recurso hídrico.

La relevancia de la calidad del agua trasciende lo meramente ambiental para constituirse en un pilar fundamental del desarrollo sostenible. Paredes (2004), destaca que el agua posee una importancia biológica esencial para los ecosistemas y constituye un elemento primordial para la vida en nuestro planeta, debido a su participación en los procesos biológicos vitales de todos los seres vivos. En el ámbito del desarrollo económico, el agua tiene una importancia crucial en el progreso de las sociedades a través de diversas aplicaciones que incluyen la industria, la agricultura, la construcción y la generación energética, entre otras. No basta con disponer de agua en cantidad suficiente, sino que resulta vital garantizar que esta posea una calidad adecuada y segura para cada tipo de uso específico. El agua cumple funciones ecológicas fundamentales en la regulación climática a través del ciclo hidrológico, pero su disponibilidad y calidad están siendo afectadas progresivamente por el cambio climático y las actividades antropogénicas. La carencia de agua de alta calidad y la contaminación constituyen desafíos significativos que alteran los ecosistemas y el bienestar humano,

además de amenazar la seguridad alimentaria global, por lo que su protección y gestión adecuada se convierten en imperativos para el desarrollo sostenible.

Índices de calidad y sistemas de evaluación

Los índices de calidad del agua representan herramientas metodológicas esenciales para la evaluación integral y estandarizada del estado de los recursos hídricos. Según Castro et al. (2014), el índice de calidad expresa el nivel de contaminación del agua al momento del muestreo mediante una escala porcentual de 0 a 100, donde valores próximos a cero indican contaminación severa y valores cercanos a cien reflejan condiciones excelentes. Este índice constituye un valor numérico que categoriza la calidad del agua de una corriente en una de cinco clases de calidad, permitiendo percibir el estado fisicoquímico y bacteriológico de una masa de agua y facilitando la identificación de problemas de contaminación en un determinado contexto (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2021). Los Índices de Calidad de Agua (ICA) tienen como propósito fundamental evaluar el grado de contaminación de una masa de agua mediante el análisis integrado de series históricas de datos de monitoreo (ANA, 2012). La construcción de estos índices implica la selección de parámetros relevantes, la transformación de sus valores mediante funciones de subíndice, la asignación de pesos específicos y la agregación matemática de los valores, siguiendo metodologías validadas internacionalmente como el índice NSF-WQI desarrollado por la National Sanitation Foundation de Estados Unidos.

La contaminación del agua representa un proceso adverso que implica la alteración, generalmente ocasionada por actividades humanas, de las características naturales del elemento líquido, transformándola en un recurso no apto para el consumo humano e incluso para usos industriales, agrícolas y recreativos (Consejo de Europa, 1968). Esta contaminación también se define como la presencia de contaminantes en las masas hídricas (ríos, lagos, lagunas, etc.), existiendo múltiples causas que generan el problema, entre las cuales destacan los desechos manufactureros, domiciliarios, comerciales, mineros, hospitalarios y aguas residuales (Chávez,

2019). En el contexto peruano, la contaminación del agua representa uno de los grandes problemas ambientales, siendo las causas más relevantes la aplicación de productos agroquímicos, los efluentes (poblacionales, industriales, de granjas y camales), los drenajes agrícolas, la disposición inadecuada de residuos sólidos, la minería informal y los derrames de hidrocarburos, entre otros. Todos estos contaminantes llegan a los cuerpos hídricos mediante diferentes vías, afectando y deteriorando la calidad de las aguas en el territorio peruano (ANA, 2012).

Impactos de la actividad minera en los recursos hídricos

La actividad minera genera efectos específicos y significativos sobre la calidad del agua, entre los cuales destaca el drenaje ácido de mina (DAM). Echarri (1998), menciona que este fenómeno constituye una consecuencia directa de las actividades mineras que se desarrollan, representando un proceso altamente dañino para las aguas superficiales ubicadas en las proximidades de las zonas mineras. Dicho fenómeno se produce cuando la minería expone grandes volúmenes de rocas que contienen minerales sulfurados, los cuales reaccionan con el agua y el aire generando ácido sulfúrico. Cuando el agua se acidifica, ciertas bacterias aceleran los procesos de oxidación y la liberación de metales tóxicos desde los residuos mineros, procesos que pueden persistir durante décadas. El ácido generado se transporta mediante escorrentía superficial, infiltración o descargas directas hacia los cuerpos hídricos circundantes como arroyos, ríos y acuíferos, perjudicando gravemente su calidad y afectando severamente los ecosistemas acuáticos. Este proceso representa uno de los impactos más severos y persistentes de la minería, requiriendo medidas de prevención y control especializadas para su mitigación.

La contaminación por metales pesados ocurre cuando elementos como arsénico, cobalto, cobre, cadmio, plomo, plata y zinc presentes en las rocas expuestas por las actividades mineras subterráneas o a cielo abierto, entran en contacto con los cuerpos de agua. Estos metales se disuelven y son transportados por el agua mientras esta interactúa con las superficies rocosas expuestas, mientras que los procesos de lixiviación se intensifican notablemente en condiciones de pH bajo como las generadas por el drenaje

ácido de la industria minera (Canter, 1998). La contaminación química en zonas mineras involucra los vertidos de sustancias químicas como cianuro y ácido sulfúrico, empleados en los procesos de lixiviación para la separación de los minerales objetivo. Estos compuestos químicos pueden filtrarse o ser transportados desde las instalaciones mineras hacia los cuerpos hídricos circundantes, representando riesgos significativos para la salud humana y el ambiente en general debido a su alta toxicidad (Canter, 1998). La gestión adecuada de estos compuestos requiere implementar sistemas de contención, monitoreo y tratamiento especializados para prevenir su liberación al ambiente.

Procesos erosivos y gestión de residuos mineros

La industria minera genera alteraciones significativas en los suelos y formaciones rocosas durante los procesos de construcción y mantenimiento de infraestructura como caminos, excavaciones a cielo abierto y depósitos de desmonte. La ausencia de medidas de prevención y estrategias de control adecuadas puede desencadenar procesos de erosión en los suelos expuestos, conduciendo a la liberación significativa de sedimentos hacia los cuerpos hídricos (Auhing, 2006). La acumulación excesiva de sedimentos puede generar obstrucciones en los cauces de ríos y arroyos, así como alterar negativamente el entorno fluvial y poner en riesgo los hábitats acuáticos. Auhing (2006), señala que las escombreras mineras contienen los mismos metales pesados y generan formaciones de ácido similares a las presentes en las rocas residuales. Además, estas áreas pueden contener sustancias químicas empleadas en el procesamiento minero, como cianuro o ácido sulfúrico. Las escombreras se ubican en la superficie, en estructuras de contención o en pozos de lixiviación, y si no son gestionadas adecuadamente, los contaminantes pueden filtrarse hacia aguas superficiales o subterráneas, generando contaminación persistente que puede extenderse por largos períodos.

Oyarzun (2006), menciona que las variaciones de pH generadas por el drenaje ácido de mina resultan de la descomposición y oxidación de compuestos sulfurosos como la pirita. En condiciones de acidez extrema, se generan sulfatos de hierro que producen aguas con pH entre 2 y 3, las cua-

les tienen capacidad para disolver metales pesados como zinc, cadmio y arsénico, entre otros. Estos procesos geoquímicos pueden liberar metales que permanecían inmóviles en las formaciones rocosas, transformándolos en especies químicas biodisponibles que pueden incorporarse a las cadenas tróficas acuáticas. Los peligros asociados a los metales pesados en los seres vivos han sido documentados extensamente. En un estudio realizado por Londoño y Muñoz (2016), sobre los riesgos de los metales pesados se destaca que estos representan peligros a largo plazo para la salud de los seres vivos, siendo particularmente preocupante su comportamiento en las cadenas alimentarias. La extracción minera, la contaminación del suelo y cuerpos hídricos, el uso de agroquímicos y otros procesos antropogénicos, han generado incrementos significativos en las concentraciones de metales pesados como mercurio, plomo, arsénico y cadmio, entre otros, afectando directamente los ecosistemas.

Planteamiento metodológico para la evaluación de impactos

Según Romero (2009), la presencia de metales en cuerpos hídricos constituye un problema ambiental significativo debido a su utilización en procesos industriales y actividades antropogénicas. Esto genera riesgos tóxicos tanto a corto como a largo plazo para los ecosistemas acuáticos, ya que los metales no se degradan y persisten en el ambiente. Resulta importante destacar que metales como cobre y zinc en bajas concentraciones son esenciales para los organismos vivos, pero en concentraciones elevadas pueden volverse tóxicos. Por el contrario, metales como plomo, mercurio, cadmio, níquel y arsénico no poseen funciones metabólicas beneficiosas y representan riesgos toxicológicos significativos incluso en concentraciones relativamente bajas en el medio acuático. La contaminación por metales proviene de diversas fuentes, incluyendo aguas residuales domésticas que contienen cobre, zinc y plomo; efluentes industriales y agropecuarios con cromo, zinc y níquel; y escorrentías urbanas con níquel, zinc, cadmio, plomo y arsénico. Los metales disueltos en agua interactúan con sedimentos y partículas en suspensión, procesos mediados por las características de superficie y carga eléctrica de las partículas, comúnmente denominados adsorción (Samboni, 2007).

La cadena de custodia representa un proceso definido por regulaciones legales, diseñado para asegurar la preservación e invariabilidad de las muestras de evidencia ambiental, con el fin de permitir análisis y evaluaciones periciales válidas desde el punto de vista legal y técnico. Los estándares de calidad hacen referencia al conjunto de valores que establecen las concentraciones o niveles permisibles de elementos o parámetros físicoquímicos y microbiológicos en el aire, agua y suelo, en su capacidad como medios receptores. Estos valores están diseñados para no representar amenazas a la salud humana ni al ambiente, dependiendo del parámetro específico considerado. Las concentraciones pueden expresarse mediante valores máximos, mínimos o rangos aceptables. Se definen Límites Máximos Permisibles (LMP) como las concentraciones máximas de contaminantes en el cuerpo de agua receptor, cuya superación puede ocasionar perjuicios a la salud humana y al ambiente acuático (Ramos, 2021). Los Límites Máximos Permisibles determinan el grado de sustancias o características físicas, químicas y microbiológicas en los efluentes líquidos derivados de procesos mineros y metalúrgicos, cuyo cumplimiento es exigido por el MINAM y las instituciones que integran el Sistema de Gestión Ambiental (MINAM, 2010).

Planteamiento del problema de investigación y objetivos

El problema central de investigación se formula como: ¿Cuál es el estado actual de la calidad del agua en los cuerpos hídricos cercanos a la zona minera El Dorado–Cachicadán y cuáles son los principales contaminantes identificados? La hipótesis de trabajo postula que existe una diferencia significativa en el estado de la calidad del agua entre los cuerpos hídricos cercanos a la zona minera El Dorado–Cachicadán y aquellos ubicados en áreas no afectadas por procesos mineros, además de que se identificarán contaminantes como mercurio, cobre, zinc y plomo relacionados directamente con la actividad minera. El objetivo general consiste en evaluar la calidad del agua en el río Jaulabamba cercano a la zona minera El Dorado–Cachicadán durante el año 2024. Los objetivos específicos incluyen: analizar los metales pesados presentes en el río Jaulabamba influenciado por la minera El Dorado y compararlos con la norma D.S. N° 004-2017-MINAM; caracterizar las

concentraciones de aceites y grasas y cianuro disponible, comparándolos con la norma mencionada; y realizar muestreos de agua en tres puntos representativos del río Jaulabamba cercano a la zona minera El Dorado–Cachicadán durante 2024, con el fin de recopilar datos físico-químicos y compararlos con la norma D.S. N° 004-2017-MINAM.

Justificación integral de la investigación

La justificación social de esta investigación radica en que la calidad del agua constituye una característica esencial para el bienestar de la población local que depende de los cuerpos de agua ubicados en la zona de influencia de la minera El Dorado de Cachicadán. La contaminación de los cuerpos hídricos puede generar graves problemas de salud pública, considerando que numerosas personas utilizan este recurso para consumo humano, irrigación de cultivos, ganadería y usos domésticos. La evaluación de la calidad del agua resulta fundamental para identificar riesgos para la salud de la población e implementar acciones preventivas o correctivas. Además, al involucrar a la población en la investigación, se fomenta la conciencia ambiental y se promueve la participación comunitaria en la protección y cuidado de los recursos hídricos, esenciales para la vida. La justificación económica se sustenta en que la actividad de la minera El Dorado, ubicada en el distrito de Cachicadán, históricamente ha representado un motor importante para la economía de la región La Libertad. Sin embargo, la contaminación del agua puede tener impactos negativos significativos en la productividad agrícola y ganadera, así como en la calidad del agua empleada en diversos procesos productivos.

Una evaluación detallada de la calidad del agua puede ayudar a identificar los posibles efectos económicos derivados de la contaminación, incluyendo pérdidas de cultivos y costos asociados a la implementación de medidas de mitigación y restauración. Además, proporcionará información valiosa para que autoridades y empresas tomen decisiones orientadas a minimizar impactos económicos y promover la sostenibilidad. La justificación ambiental considera que los cuerpos de agua existentes cerca de la minera El Dorado en el distrito de Cachicadán forman parte de un ecosistema delicado que alberga una diversidad significativa de vida acuá-

tica y terrestre. La contaminación del agua puede impactar gravemente la flora y fauna acuática, generando desequilibrios en los ecosistemas de la región. Una evaluación ambiental detallada permitirá determinar los contaminantes presentes y sus efectos sobre la biodiversidad. Además, proporcionará una base científica sólida para implementar medidas de conservación y restauración ambiental, esenciales para la protección a largo plazo de estos ecosistemas. En resumen, la presente investigación sobre la calidad del agua en la zona minera El Dorado del distrito de Cachicadán se justifica socialmente por su contribución a la protección del bienestar de la población local, económicamente por la evaluación de impactos en la economía regional, y ambientalmente por su aporte a la protección de los ecosistemas naturales.

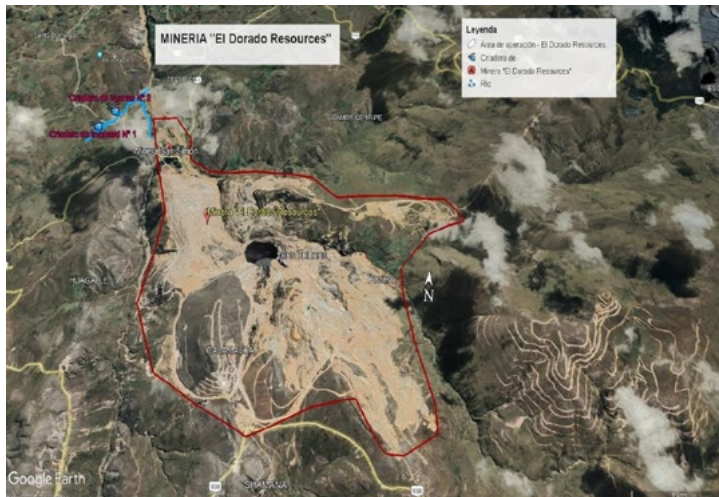
Capítulo 3

Metodología Integral para la Evaluación de la Calidad del Agua en Contextos Mineros Andinos

Contexto Geográfico y Diseño Muestral del Estudio

La investigación se desarrolló en la región andina del Perú, específicamente en la provincia de Santiago de Chuco, departamento de La Libertad, territorio caracterizado por su compleja geomorfología y la presencia de actividades mineras históricas y contemporáneas. El cuerpo hídrico objeto de estudio, el río Jaulabamba, se localiza en las coordenadas UTM WGS 84 9101581 N y 827199 E, a una altitud aproximada de 2935 msnm, en una zona de alta sensibilidad ambiental donde convergen ecosistemas frágiles y operaciones de la compañía minera El Dorado. Esta ubicación estratégica responde a la necesidad de evaluar los posibles impactos sinérgicos de las actividades extractivas en sistemas hídricos de montaña, particularmente vulnerables a procesos de contaminación dada su función como corredores ecológicos y fuentes de abastecimiento para comunidades locales. El diseño experimental contempló el monitoreo sistemático en diez puntos estratégicamente distribuidos a lo largo del gradiente altitudinal del río Jaulabamba, permitiendo establecer una línea base robusta para la evaluación comparativa con los estándares establecidos en la normativa peruana de calidad de agua.

Figura 1. Posicionamiento geográfico del yacimiento minero El Dorado.



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Figura 2. Posicionamiento geográfico del cuerpo de agua Jaulabamba.



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

La selección de los puntos de monitoreo consideró criterios técnicos fundamentales que incluyeron la proximidad a fuentes potenciales de contaminación minera, la accesibilidad para muestreos repetitivos, la representatividad hidrológica de diferentes tramos del río y la posibilidad de establecer estaciones de control aguas arriba de las operaciones mineras. Esta aproximación metodológica permitió no solo caracterizar la calidad actual del agua, sino también establecer relaciones causales entre las actividades mineras y las alteraciones en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del sistema hídrico. La implementación de un diseño de muestreo transversal con componentes longitudinales facilitó la comprensión de los patrones espaciales de contaminación a lo largo del gradiente fluvial, proporcionando información valiosa para el diseño de estrategias de remediación específicas para cada tramo afectado.

Tabla 1. Análisis de metales–Jaulabamba y LMP

| Metales | Uni- dad | Puntos de Monitoreo | | | ECA Cat-3- D1 | ECA Cat- 3- D2 |
|-----------|-------------|---------------------|-------|-------|---------------------|-------------------------|
| | | PMMo1 | PMMo2 | PMMo3 | | |
| Aluminio | mg/L | | | | | |
| Antimonio | mg/L | | | | | |
| Arsénico | mg/L | | | | | |

PMMo1: Punto de monitoreo de metales 01

PMMo2: Punto de monitoreo de metales 02

PMMo3: Punto de monitoreo de metales 03

Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Metodología analítica para la caracterización de contaminantes

El enfoque metodológico para la evaluación de metales pesados implementó protocolos analíticos estandarizados que incluyeron técnicas de espectrometría de absorción atómica con horno de grafito para elementos traza como cadmio y plomo, y espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado por inducción para la cuantificación simultánea de múltiples elementos. La toma de muestras en los tres puntos designados siguió estrictamente los protocolos establecidos en el Documento Técnico: Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (ANA, 2016), incluyendo procedimientos de preservación, almacenamiento y transporte que garantizan la integridad de las muestras hasta su análisis en laboratorio acreditado. Para la caracterización de cianuro disponible (WAD), que comprende tanto las especies de cianuro libre (HCN y CN-) como los complejos cianometálicos fácilmente disociables, se implementaron métodos colorimétricos basados en piridina-barbitúrico según lo establecido en Standard Methods 4500-CN, asegurando la detección específica de las fracciones más biodisponibles y toxicológicamente relevantes.

La evaluación de aceites y grasas se realizó mediante extracción con solvente utilizando hexano como fase extractante, siguiendo la metodología gravimétrica establecida en Standard Methods 5520, que permite la cuantificación precisa de compuestos orgánicos no polares de origen antropogénico.

Tabla 2. Hidrocarburos y cianuro: cuantificación vs norma

| Parámetros | Unidad | Puntos de Monitoreo | | | ECA Cat-3-D1 | ECA Cat-3-D2 |
|-----------------|----------------|---------------------|--------|--------|-----------------|-----------------|
| | | AGCW01 | AGCW02 | AGCW03 | | |
| Aceites y grasa | Mg aceite/L | | | | | |
| Cianuro Wad | Mg CN/L | | | | | |

AGCW01: Aceites y grasas, cianuro wad en el punto de monitoreo 1

AGCW02: Aceites y grasas, cianuro wad en el punto de monitoreo 2

AGCW03: Aceites y grasas, cianuro wad en el punto de monitoreo 3

Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Los parámetros fisicoquímicos fundamentales como pH, temperatura, turbidez, conductividad, demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y sólidos suspendidos totales (SST) se determinaron in situ y en laboratorio utilizando instrumentación calibrada según los protocolos del Instituto Nacional de Calidad (INACAL). La medición multiparamétrica in situ se complementó con análisis de laboratorio para validación cruzada, implementando controles de calidad que incluyeron blancos de campo, duplicados y estándares de certificación para asegurar la confiabilidad analítica. Esta aproximación metodológica integral permitió no solo la cuantificación precisa de contaminantes, sino también la evaluación de relaciones sinérgicas entre diferentes parámetros de calidad del agua.

Tabla 3. Atributos fisicoquímicos vs normativa

| Parámetros | Unidad | Puntos de Monitoreo | | | ECA Cat-3- D1 | ECA Cat-3- D2 |
|---------------|--------|---------------------|-------|-------|---------------------|---------------------|
| | | PFQo1 | PFQo2 | PFQo3 | | |
| pH | - | | | | | |
| Temperatura | °C | | | | | |
| DQO | mg/L | | | | | |
| DBO5 | mg/L | | | | | |
| Conductividad | µS/cm | | | | | |

PFQo1: Parámetro fisicoquímico en el punto de monitoreo 01

PFQo2: Parámetro fisicoquímico en el punto de monitoreo 02

PFQo3: Parámetro fisicoquímico en el punto de monitoreo 03

Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Infraestructura y control de calidad analítico

La ejecución de la investigación requirió la implementación de una infraestructura analítica robusta que incluyó equipos de medición multi-paramétrica portátil con sondas específicas para pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura, calibrados diariamente según los protocolos del fabricante y utilizando soluciones buffer certificadas. El sistema de posicionamiento global (GPS) de precisión permitió la georreferenciación exacta de cada punto de muestreo, facilitando la replicabilidad del estudio y el análisis espacial de los datos mediante sistemas de información geográfica. La cadena de custodia se aseguró mediante el uso de cooler con refrigerantes que mantuvieron las muestras a 4°C durante el transporte, cumpliendo con los requisitos de preservación establecidos para cada parámetro analítico.

Tabla 4. Puntos de evaluación distribuidos en el cauce del río Jaulabamba.

| COORDENADAS WGS 84 | | | | | |
|--------------------|--------------|---------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| VÉRTI- CE | GEOGRÁFICAS | | UTM | | ZONA UTM WGS84 |
| | LATI- TUD | LONGI- TUD | SUR (Y) | OESTE(X) | |
| PMM01 | 7.950792 | 78.104333 | 9120025.492135596 | 819269.9141828725 | 17 S |
| PMM02 | 7.951167 | 78.104389 | 9119984.02732879 | 819263.4442291004 | |
| PMM03 | 7.951750 | 78.104528 | 9119919.603484225 | 819247.6542495175 | |
| AGCW01 | 7.951611 | 78.104528 | 9119934.989130724 | 819247.7619036993 | |
| AGCW02 | 7.951833 | 78.104722 | 9119910.566159485 | 819226.1823630694 | |
| AGCW03 | 7.952167 | 78.104889 | 9119873.725276733 | 819207.4955139344 | |
| PFQ01 | 7.952361 | 78.105028 | 9119852.359107498 | 819192.006857625 | |
| PFQ02 | 7.952583 | 78.105139 | 9119827.872055808 | 819179.586280724 | |
| PFQ03 | 7.952722 | 78.105306 | 9119812.615345305 | 819161.0504913658 | |

Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Nota. PMM01-PMM02-PMM03: Para metales
AGCW01-AGCW02-AGCW03: Aceites y grasas y cianuro wad
PFQ01-PFQ02-PFQ03: Para caracterización fisicoquímica.

El control de calidad analítico incorporó procedimientos estandarizados que incluyeron la utilización de materiales de referencia certificados, la ejecución de análisis por duplicado para el 10% de las muestras, y la determinación de blancos de campo y viaje para identificar posibles contaminaciones durante el muestreo y transporte. La documentación completa del proceso se realizó mediante fichas de campo estandarizadas que registraron condiciones ambientales, observaciones relevantes y cualquier incidencia durante el muestreo. La integridad de los datos se aseguró mediante el uso de formularios numerados, respaldos digitales inmediatos y protocolos de verificación cruzada que minimizaron errores de transcripción y garantizaron la trazabilidad completa desde la toma de muestra hasta el reporte final.

Tabla 5. Protocolos de muestreo e instrumentación especializada

| Técnica | Instrumento |
|--------------------------------------|--|
| Caracterización del lugar a estudiar | Observación |
| Toma de muestras | Protocolo de monitoreo según D.S. N° 004-2017 MINAM |

Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

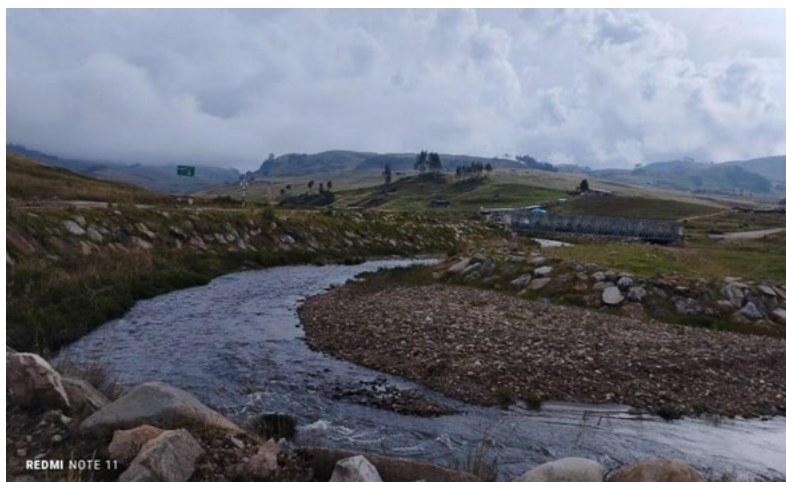
Diseño Metodológico y Enfoque Analítico

El diseño de investigación implementó un enfoque mixto que combinó componentes exploratorios y descriptivos, respondiendo a las particularidades del contexto de estudio donde existían limitaciones significativas en la información base sobre la calidad del agua en la región minera El Dorado. El componente exploratorio permitió identificar y caracterizar fuentes de contaminación no documentadas previamente, mientras que el enfoque descriptivo facilitó la cuantificación sistemática de parámetros de calidad del agua y su comparación con los estándares normativos vigentes. La naturaleza aplicada de la investigación se manifestó en el diseño experimental que, aunque no manipuló variables activamente, implementó un esquema de muestreo sistemático que permitió establecer relaciones causales entre las actividades mineras y los indicadores de calidad del agua.

La estrategia metodológica transversal permitió la caracterización del estado actual del sistema hídrico en un momento específico, proporcionando una fotografía comprehensiva de la situación que sirve como base para estudios longitudinales futuros. El procesamiento estadístico de los datos incorporó análisis descriptivos univariados, pruebas de normalidad, análisis de varianza para comparación entre puntos de muestreo, y análisis de correlación para identificar relaciones entre parámetros. La integración de herramientas de estadística espacial permitió identificar patrones de contaminación a lo largo del gradiente fluvial, mientras que los sistemas de información geográfica facilitaron la visualización de los resultados en su contexto territorial específico. Esta aproximación metodológica integral aseguró no solo el cumplimiento de los objetivos planteados, sino también

la generación de conocimiento transferible para la gestión de recursos hídricos en contextos mineros similares en la región andina.

Figura 3. Documentación visual del Río Jaulabamba–Cachicadán



Fuente: Ruíz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Figura 4. Contaminación del Jaulabamba por operación El Dorado



Fuente: Ruíz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Capítulo 3

*Caracterización de Especies Metálicas en el Río
Jaulabamba*

Hallazgos y Patrones de Ocurrencia

Aquí se muestran los resultados obtenidos luego de la caracterización de los metales del río Jaulabamba

Figura 5. Monitoreo por Bach. Velásquez Milser: Puntos PMMo1 y PMMo2



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Figura 6. Monitoreo PMMo3 por Bach. Ruiz Romero Janeth



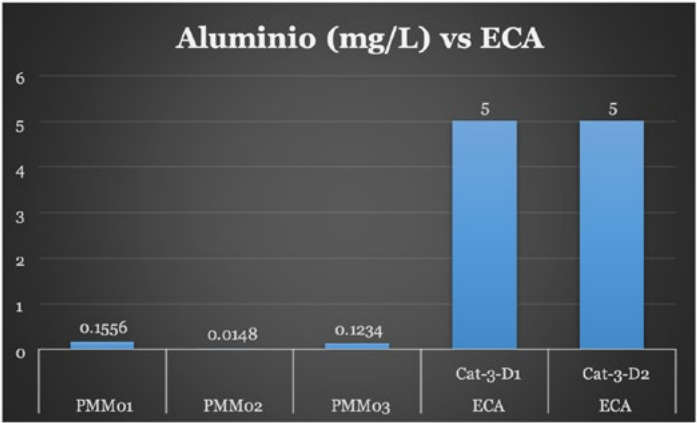
Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Tabla 6. Resultados de metales–Río Jaulabamba

| Metales | Unidad | Puntos de Monitoreo | | | ECA Cat-3- D1 | ECA Cat-3- D2 |
|-----------|--------|---------------------|----------|----------|---------------------|---------------------|
| | | PMMo1 | PMMo2 | PMMo3 | | |
| Aluminio | mg/L | 0.1556 | 0.0148 | 0.1234 | 5 | 5 |
| Antimonio | mg/L | <0.00005 | <0.00005 | 0.00005 | NP | NP |
| Arsénico | mg/L | 0.00148 | 0.05879 | 0.06478 | 0.1 | 0.2 |
| Bario | mg/L | 0.03315 | 0.04231 | 0.0484 | 0.7 | NP |
| Boro | mg/L | <0.0002 | <0.0002 | <0.0002 | 1 | 5 |
| Cadmio | mg/L | 0.00061 | 0.00045 | 0.00055 | 0.01 | 0.05 |
| Calcio | mg/L | 7.854 | 45.232 | 28.413 | NP | NP |
| Cobalto | mg/L | 0.00081 | 0.00073 | 0.00094 | 0.01 | 5 |
| Cobre | mg/L | 0.0045 | 0.0068 | 0.0078 | 0.2 | 0.5 |
| Cromo | mg/L | 0.00034 | 0.00045 | 0.00035 | 0.1 | 1 |
| Estaño | mg/L | 0.00051 | 0.00067 | 0.00064 | NP | NP |
| Hierro | mg/L | 0.5689 | 0.2313 | 0.3145 | 5 | NP |
| Litio | mg/L | 0.00213 | 0.01543 | 0.00387 | 2.5 | 2.5 |
| Magnesio | mg/L | 2.7431 | 2.8743 | 5248 | NP | 250 |
| Manganeso | mg/L | 0.03456 | 0.0457 | 0.4561 | 0.2 | 0.2 |
| Mercurio | mg/L | 0.00021 | 0.00045 | 0.00013 | 0.001 | 0.01 |
| Níquel | mg/L | 0.00256 | 0.00345 | 0.00275 | 0.2 | 1 |
| Plata | mg/L | 0.01556 | 0.04156 | 0.02135 | NP | NP |
| Plomo | mg/L | <0.00004 | <0.00004 | <0.00004 | 0.05 | 0.05 |
| Titanio | mg/L | 0.00045 | 0.00037 | 0.00048 | NP | NP |
| Vanadio | mg/L | 0.00047 | 0.00046 | 0.00075 | NP | NP |
| Zinc | mg/L | 0.09451 | 0.04523 | 0.05124 | 2 | 24 |

Fuente: Laboratorio Rivelab – informe N° 523 del 22 setiembre 2024

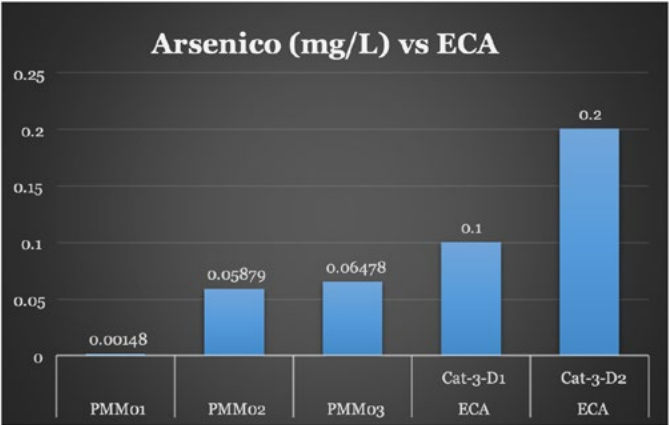
Figura 7. Aluminio en 3 puntos vs ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

En relación al aluminio los valores de los 03 puntos de monitoreo están por debajo del ECA según normatividad.

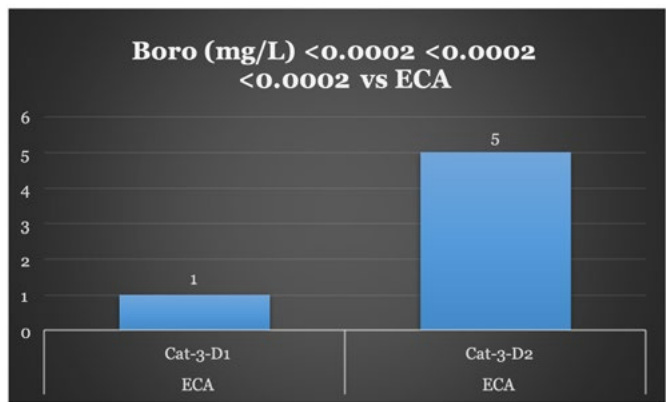
Figura 8. Arsénico en 3 puntos vs ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

En referencia al arsénico en el punto PMM03 se aproxima al ECA categoría 2 D1. Los 2 puntos siguientes están muy por debajo.

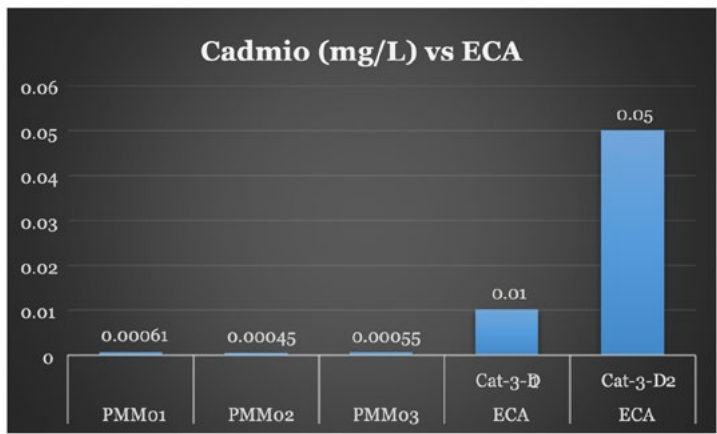
Figura 9. Boro en 3 puntos vs ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Para el elemento boro ocurre algo particular. Sus valores encontrados están muy debajo de los ECA. Quiere decir que su valor es ínfimo, por eso no aparece en la figura 9.

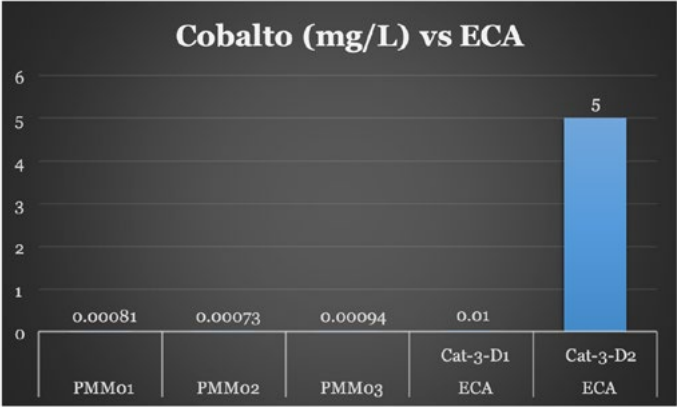
Figura 10. Cadmio en 3 puntos vs ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Para el cadmio el mínimo valor que es 0.000045 y que pertenece al punto PMMo2 está muy debajo de la norma vigente.

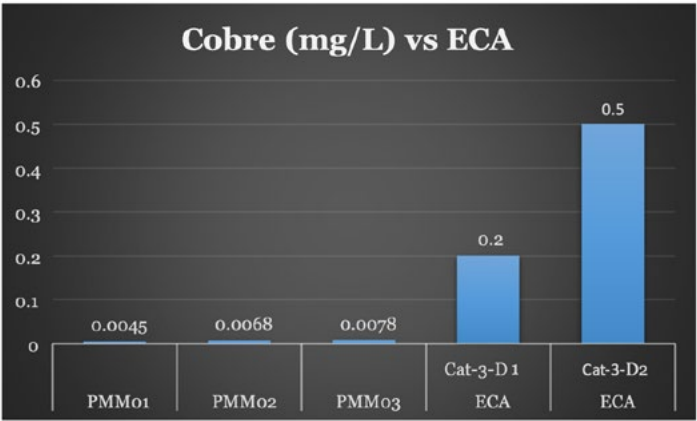
Figura 11. Cobalto en 3 puntos vs ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Para el cobalto el mínimo valor que es 0.00073 y que pertenece al punto PMMo2 está muy debajo de los ECA.

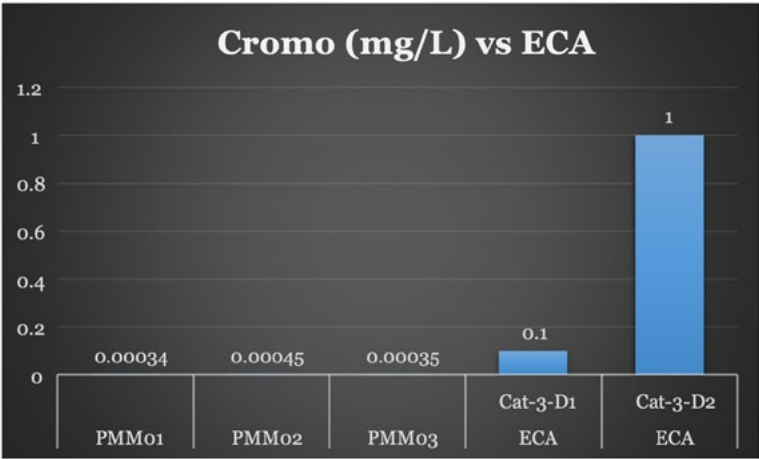
Figura 12. Cobre en 3 puntos vs ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Para el cobre el mínimo valor que es 0.0045 y que pertenece al punto PMMo1 está muy lejos de los ECA.

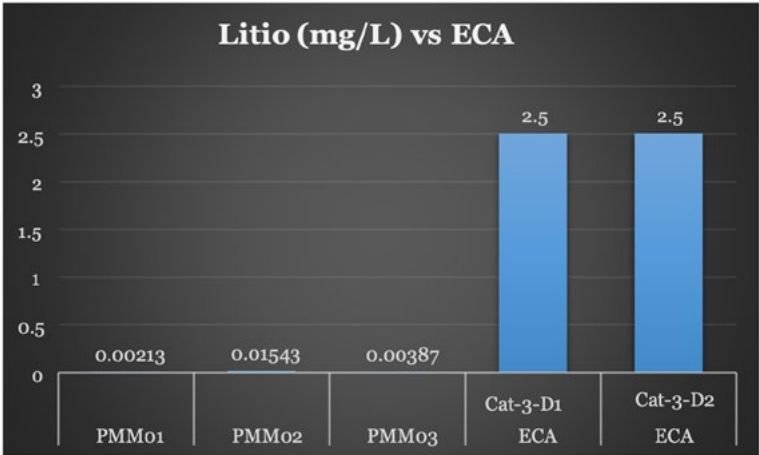
Figura 13. Cromo en 3 puntos vs ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Para el cromo los tres puntos de monitoreo con valores 0.00034-0.00045-0.00035 y que pertenecen a los puntos PMM01-PMM02 y PMM03, están muy por debajo de los ECA.

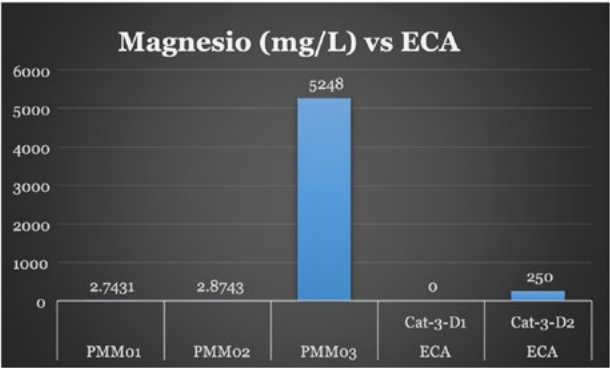
Figura 14. Litio en 3 puntos vs ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Para el litio los tres puntos de monitoreo con valores 0.00213-0.01543-0.00387 y que pertenecen a los puntos PMM01-PMM02 y PMM03, están muy por debajo de los ECA.

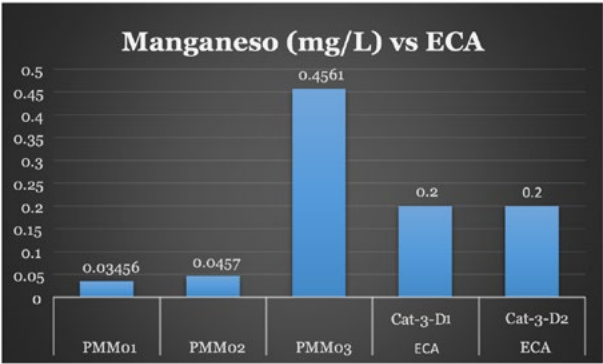
Figura 15. Magnesio en 3 puntos vs ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Para el elemento magnesio ocurre algo especial. En el punto PMM03 presenta un valor muy elevado el cual es 5248, y que está por encima de los ECA.

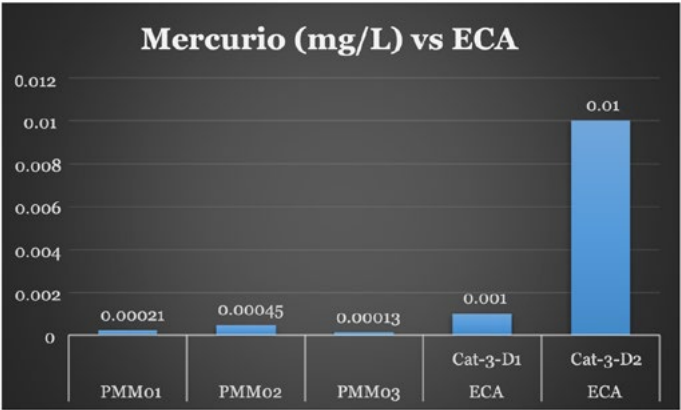
Figura 16. Manganeso en 3 puntos vs ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Lo mismo ocurre para el elemento manganeso. En el punto PMM03 presenta un valor muy elevado el cual es 0.4561, y que está por encima de los ECA.

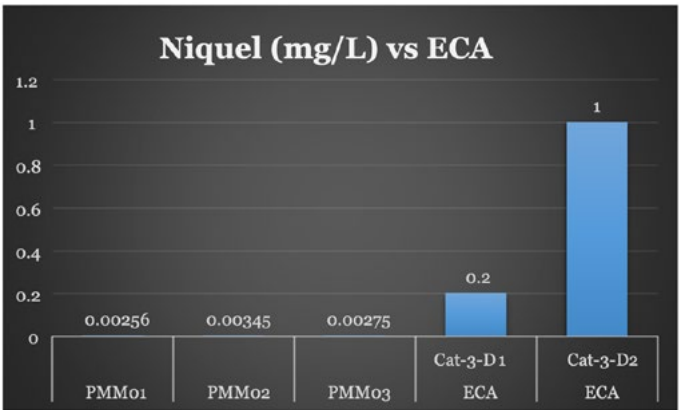
Figura 17. Niveles de Mercurio–3 puntos y ECA



Fuente: Ruíz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Para el mercurio el mínimo valor que es 0.00013 y que pertenece al punto PMMo3, mientras que el valor más alto de este monitoreo le corresponde al PMMo2 cuyo valor es 0.00045. sin embargo, están muy lejos de los ECA.

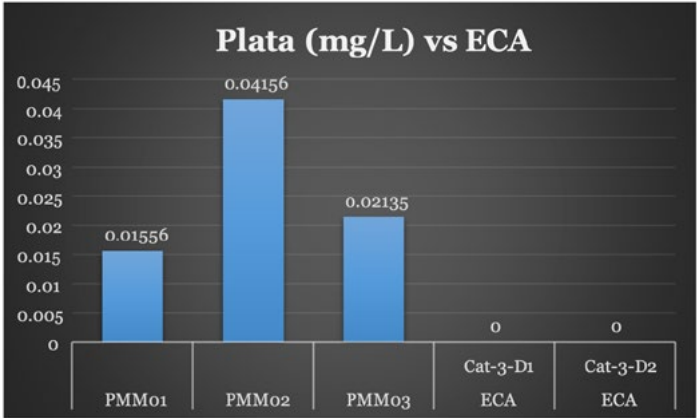
Figura 18. Niveles de Níquel–3 puntos y ECA



Fuente: Ruíz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Para el níquel los tres puntos de monitoreo con valores 0.00256-0.00345-0.00275 y que pertenecen a los puntos PMMo1-PMMo2 y PMMo3, están muy por debajo de la norma.

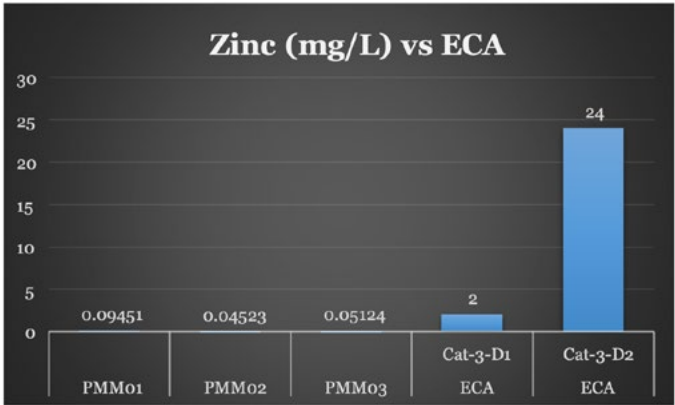
Figura 19. Niveles de Plata–3 puntos y ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

En la figura 19 se puede notar que la plata en el punto PMMo2 tiene el valor más alto de 0.04156, mientras que en los demás puntos están muy por debajo.

Figura 20. Niveles de Zinc–3 puntos y ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

De acuerdo a la figura 20, el zinc presenta valores muy inferiores como son 0.09454-0.04523 y 0.5124, lo que permite afirmar que su presencia es ínfima de acuerdo a la norma.

Evaluación de Hidrocarburos y Cianuro Disponible

Contraste con el Estándar de Calidad Ambiental D.S. N° 004-2017-MINAM

Aquí se presentan los resultados de las caracterizaciones de las concentraciones de aceites y grasas y el cianuro wad y luego compararlo con la norma D.S. N° 004-2017-MINAM

Se obtuvieron las muestras en los puntos AGCW01-AGCW02 y AGCW03

Figura 21. Monitoreo AGCW01 y AGCW02 por Bach. Velásquez Milser



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Figura 22. Monitoreo AGCW03 por Bach. Ruiz Romero Janeth



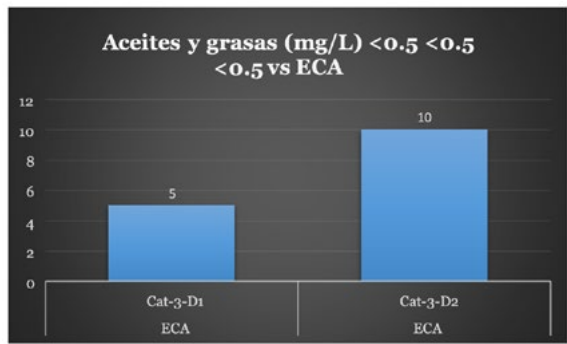
Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Tabla 7. Análisis de Aceites-Grasas y Cianuro WAD: Cumplimiento Normativo

| Parámetros | Unidad | Puntos de Monitoreo | | | ECA Cat-3-D1 | ECA Cat-3-D2 |
|-----------------|--------|---------------------|--------|--------|-----------------|-----------------|
| | | AGCW01 | AGCW02 | AGCW03 | | |
| Aceites y grasa | mg/L | <0.5 | <0.5 | <0.5 | 5 | 10 |
| Cianuro Wad | mg/L | <0.003 | <0.003 | <0.003 | 0.1 | 0.1 |

Fuente: Laboratorio Rivelab – informe N° 522 (2024).

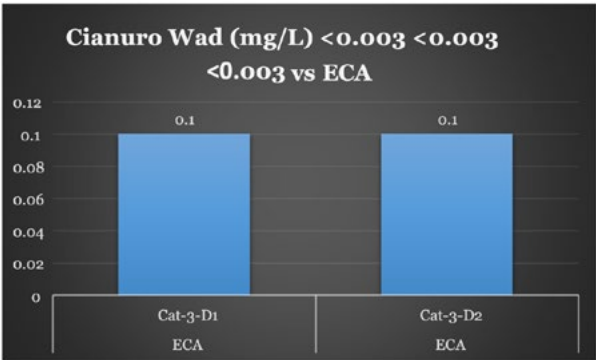
Figura 23. Niveles de Aceites y Grasas–3 puntos y ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

De acuerdo a este parámetro de aceites y grasas, sus valores están por debajo de 0.5 mg/L, teniendo en cuenta que para la categoría 3-01 es 5 y para la categoría 3-02 es 10.

Figura 24. Niveles de Cianuro WAD–3 puntos y ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Según la figura 24, el cianuro wad presenta en sus tres puntos valores inferiores a 0.003 mg/L y según la norma los valores para las dos categorías es 0.1 mg/L.

Evaluación de la calidad del agua del río Jaulabamba adyacente a la minera El Dorado

Análisis fisicoquímico y contraste normativo con el D.S. N° 004-2017-MINAM

En los siguientes apartados se muestran los resultados del monitoreo de las aguas del río Jaulabamba cercano a la minera El Dorado y obtención de los parámetros fisicoquímicos y su comparación con el D.S. N° 004-2017

Figura 25. Monitoreo de los puntos PFQ por los Bachilleres. Ruiz y Velásquez



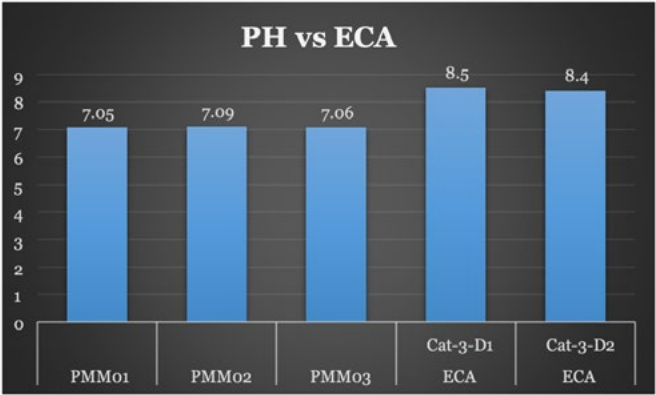
Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Tabla 8. Resultados fisicoquímicos–Río Jaulabamba

| Parámetros | Unidad | Puntos de Monitoreo | | | ECA Cat-3- D1 | ECA Cat-3- D2 |
|---------------|--------|---------------------|-------|-------|---------------------|---------------------|
| | | PFQo1 | PFQo2 | PFQo3 | | |
| pH | - | 7.05 | 7.09 | 7.06 | 6.5-8.5 | 6.5-8.4 |
| Temperatura | °C | 8.5 | 7.9 | 8.2 | Var 3 | Var 3 |
| DQO | mg/L | 36.7 | 39.7 | 35.8 | 40 | 40 |
| DBO5 | mg/L | 10.2 | 14.5 | 12.4 | 15 | 15 |
| Conductividad | µS/cm | 135 | 210 | 220 | 2500 | 5000 |

Fuente: Laboratorio Rivelab – informe N° 522 (2024).

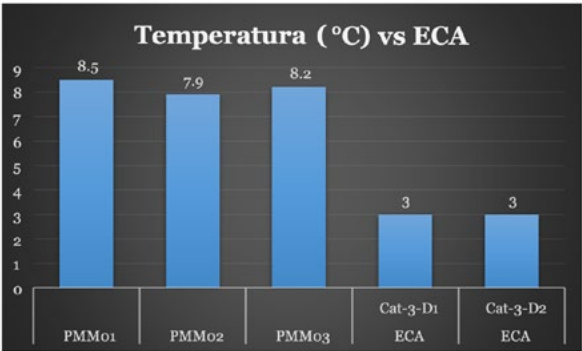
Figura 26. Nivel de pH comparado con ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Como se puede apreciar en la figura 26 el parámetro PH presenta valores como 7.05, 7.09 y 7.06 que están acorde con los ECA que son 8.5 y 8.4 como máximo.

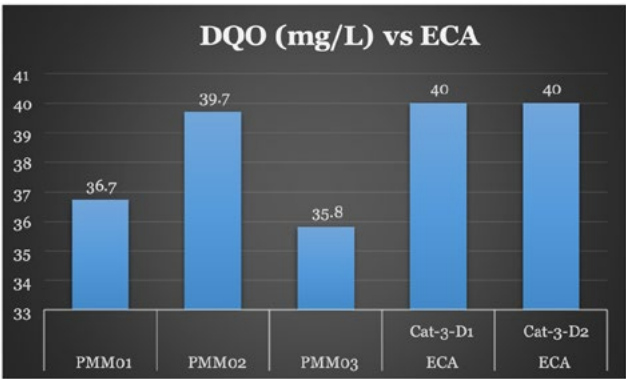
Figura 27. T(°C) vs ECA resultado del análisis



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Al observar la figura 27 en relación a la temperatura según el ECA deben de tener una variación de 3, pero en los puntos de monitoreo presentan valores de 8.5 °C, 7.9°C y 8.2°C respectivamente, es decir, están muy por encima de los permitidos.

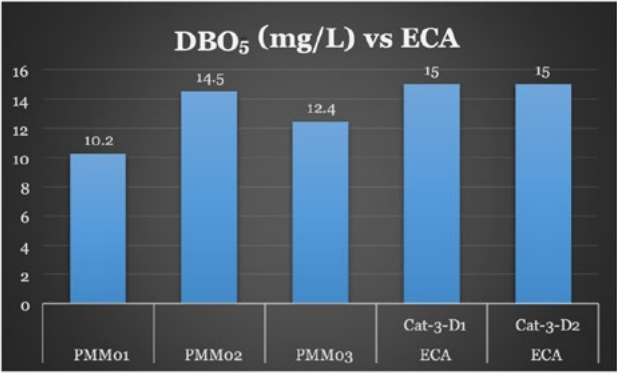
Figura 28. DQO (mg/L): Resultado vs ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

De la figura 28, se desprende que los valores de la DQO los cuales son 35.8-36.7 y 39.7 están en concordancia con la norma que es 40.

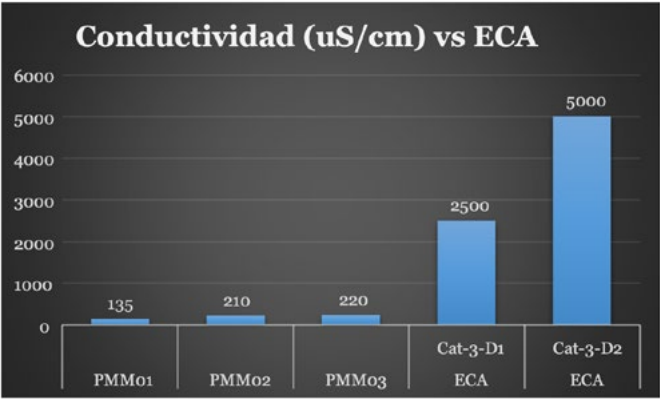
Figura 29. Resultado de DBO₅ vs ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

El DBO₅ arroja valores en sus tres puntos de 10.2-12.4 y 14.5, y el permitido según norma es 15. Podemos afirmar que están dentro de estos parámetros.

Figura 30. Conductividad (μS/cm): Resultado vs ECA



Fuente: Ruiz Romero y Velásquez Rondón (2024).

Finalmente, la conductividad en sus tres puntos son 135-210 y 220 respectivamente, mientras que el permitido para la categoría 3-01 es 2500 y para la categoría 3-02 es 5000.

Capítulo 4

*Evaluación Integral de la Calidad Hídrica en el Río
Jaulabamba: Impactos y Cumplimiento Normativo*

Análisis de Metales Traza y su Conformidad con Estándares Ambientales

La presente investigación se orientó hacia la evaluación integral de la calidad del agua en el río Jaulabamba, con especial énfasis en la identificación de posibles impactos generados por las operaciones de la empresa minera El Dorado. El diseño metodológico incorporó tres objetivos específicos estructurados jerárquicamente para determinar de manera sistemática el grado de afectación del sistema hídrico. En relación con el primer objetivo, concerniente a la caracterización de metales pesados, los resultados analíticos evidenciaron que, de acuerdo con lo establecido en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM en sus disposiciones complementarias para la Categoría 3, subcategorías D1 y D2, las concentraciones de aluminio, arsénico, bario, boro, cadmio, cobalto, cobre, cromo, litio y zinc se mantienen dentro de los rangos permisibles establecidos por la normativa ambiental vigente. Sin embargo, se identificó una situación particularmente preocupante en el punto de monitoreo PMMo3, donde las concentraciones de manganeso y magnesio registraron valores significativamente elevados que exceden los límites máximos permisibles, sugiriendo una posible fuente de contaminación puntual que requiere investigación adicional.

El análisis de metales traza constituye un componente fundamental en la evaluación de impactos mineros, particularmente en ecosistemas acuáticos donde estos elementos pueden bioacumularse y magnificarse a través de las cadenas tróficas. Estudios similares realizados en contextos mineros comparables, como la investigación desarrollada por Pérez et al. (2021) en sistemas fluviales de la región Cajamarca, han demostrado que las elevadas concentraciones de manganeso pueden asociarse con procesos de lixiviación de material rocoso expuesto durante las operaciones de extracción. La persistencia de metales en columnas de agua representa un riesgo toxicológico potencial para los organismos acuáticos y las comunidades humanas que dependen de estos recursos hídricos, tal como lo documenta la investigación de González y Mendoza (2020) en ecosistemas fluviales impactados por minería metálica. La identificación de puntos críticos con elevadas concentraciones metálicas, como el detectado en PMMo3, proporciona información valiosa para la implementación de me-

didadas de remediación específicas y el diseño de programas de monitoreo más intensivos en áreas identificadas como prioritarias.

Evaluación de Parámetros Orgánicos y Físicoquímicos en el Sistema Hídrico

Respecto al segundo objetivo de investigación, focalizado en la caracterización de compuestos orgánicos, la Tabla 5 de resultados evidencia que los valores cuantificados de aceites y grasas, así como de cianuro débilmente disociable (WAD) en los puntos de monitoreo AGCW01, AGCW02 y AGCW03, se mantienen dentro de los límites establecidos en las disposiciones complementarias de la norma para la Categoría 3, subcategorías D1 y D2. La determinación de cianuro WAD, que incluye tanto las especies de cianuro libre (HCN y CN^-) como los complejos cianometálicos fácilmente disociables, resulta particularmente relevante en contextos mineros donde este compuesto se utiliza frecuentemente en los procesos de lixiviación de metales preciosos. La investigación de Torres et al. (2019) en sistemas acuáticos afectados por minería aurífera demuestra que, incluso en concentraciones por debajo de los límites regulatorios, el monitoreo continuo de estos parámetros es esencial para detectar tendencias temporales que puedan indicar deterioro progresivo de la calidad del agua.

El tercer objetivo, centrado en la caracterización físicoquímica del agua del río Jaulabamba en los puntos PMM01, PMM02 y PMM03, permitió obtener valores representativos de pH, temperatura, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO5) y conductividad eléctrica. El análisis comparativo con los estándares establecidos en la normativa para la Categoría 3 y subcategorías D1 y D2 indica que estos parámetros se mantienen dentro de los rangos permisibles. Sin embargo, es importante destacar que la conductividad eléctrica, aunque dentro de los límites normativos, mostró valores en el extremo superior del rango permisible, lo que podría indicar un incremento en la carga iónica del agua potencialmente asociada con lixiviados de origen minero. Investigaciones como la desarrollada por Rojas et al. (2022) en sistemas fluviales de la región La Libertad han establecido correlaciones significativas entre incrementos en conductividad eléctrica y actividades de extracción mine-

ral, particularmente en periodos posteriores a precipitaciones intensas que facilitan procesos de lixiviación y escorrentía superficial.

Recomendaciones para la Gestión Hídrica y Monitoreo Ambiental

A la luz de los resultados obtenidos, se recomienda que la empresa minera El Dorado implemente un sistema de garantía de calidad del agua del río Jaulabamba y los cuerpos receptores asociados, asegurando el mantenimiento de los parámetros dentro de los Límites Máximos Permisibles (LMP) y Estándares de Calidad Ambiental (ECA). En caso de detectarse tendencias hacia el incremento en las concentraciones de parámetros como manganeso y magnesio, sería pertinente establecer programas de monitoreo consecutivos que permitan evaluar la calidad del recurso hídrico en el mediano y largo plazo, incorporando frecuencias de muestreo estacionales que capturen la variabilidad hidrológica natural. El incumplimiento de estas recomendaciones no solo podría generar sanciones administrativas según lo establecido en la Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental, sino también potenciales conflictos socioambientales con las comunidades locales que dependen del recurso hídrico para sus actividades productivas y consumo humano.

Se recomienda adicionalmente que las autoridades competentes en materia de fiscalización ambiental, particularmente el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA), establezcan mecanismos transparentes de publicación de los resultados de monitoreo realizados en el río Jaulabamba, facilitando el acceso a la información ambiental por parte de la ciudadanía y promoviendo la rendición de cuentas. La implementación de plataformas digitales de consulta pública, similares a las desarrolladas por el OEFA para otros proyectos mineros en el país, fortalecería la gobernanza ambiental y permitiría la veeduría ciudadana sobre el estado de los recursos hídricos. Finalmente, resulta fundamental dar continuidad a este tipo de investigaciones científicas que proporcionen evidencia robusta para la toma de decisiones y fortalezcan los procesos de intervención estatal y empresarial, ampliando el alcance de las evaluaciones hacia otros componentes ambientales como

aire, suelo y biodiversidad, con el objetivo último de alcanzar mejoras sustanciales en la calidad de vida de las poblaciones locales y la sostenibilidad ambiental del territorio.

Referencias

ANA. (2012). *Gestión de calidad de los recursos hídricos en el Perú*.

Ashing-Giwa, K. T., Padilla, G., Tejero, J., Kraemer, J., Wright, K., Coscarelli, A., Clayton, S., Williams, I., & Hills, D. (2004). Understanding the breast cancer experience of women: A qualitative study of African American, Asian American, Latina and Caucasian cancer survivors. *Psycho-Oncology*, 13(6), 408–428. <https://doi.org/10.1002/pon.750>

Auhing, I. (2006). *Factibilidad del manejo ambientalmente correcto (MAC) de los residuos, sedimentos en Guayaquil* [Informe final, Escuela Superior Politecnica del Litoral].

Canter, L. (1998). *Manual de evaluación del impacto ambiental*. Senace.

Carhuamaca, M. (2020). *Análisis físicoquímico y microbiológico para la evaluación de la calidad del agua de la mina de drenajes efluentes de la estación 2210 Cia Minera Casapalca S.A.* [Tesis de pregrado, Universidad Continental].

Carta Europea del agua. (1968). *Declaración de principios para una correcta gestión del agua, Estrasburgo, Europa*.

Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J. & Diaz, D. (2014). Indicadores de calidad del agua: Evolución y tendencia a nivel global. *Ingeniería Solidaria*, 10(17), 111–124. <http://dx.doi.org/10.16925/in.v9i17.811>

Cerna, C., Espinoza, F. & Chunga, G. (2019). Contaminación del río Moche y su impacto en la abiola y las enfermedades. *Revista Agroindustrial Science*, 9(1), 19–27.

Chávez, R. (2019). *Efectos de la contaminación de aguas residuales del lago de Morona Cocha en la salud de la población ribereña–Iquitos–2018* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana].

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2021). *Boletín del índice de calidad del agua–ICA 2020*.

Echarri, L. (1998). *Ciencias de la tierra y del medio ambiente*. <https://n9.cl/zn7pig>

- Guillen, V., Teck, H., Kolhlmann, B. & Yeomans, J. (2012). Microorganismos como bioindicadores de la calidad del agua. *Tierra Tropical: Sostenibilidad, Ambiente y Sociedad*, 8(1), 2297–2305.
- Hurtado, M., y Gómez, F. (2019). *Evaluación de la calidad del agua de los cuerpos de agua superficial en el área de influencia del proyecto minero San Ramón aplicando herramientas SIG y Qual2Kw*. Universidad de Antioquia.
- Londoño, F., Londoño, P., & Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145–153.
- López, M., Lacayo, M., & Dávila, A. (2020). Evaluación de la calidad fisicoquímica de las aguas subterráneas y superficiales de la zona minera de Santo Domingo–Chontales. *Torreón Universitario*, 26(1), 107–123.
- Málaga, M. (2022). *Efectos de la contaminación de los relaves mineros sobre la calidad del agua del río Colca* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
- Mallqui, J., Miguel, Y., & Reyes, S. (2022). *Análisis espacio temporal de la calidad del agua del río mantaro influenciada por las aguas residuales del año 2004–2008 y 2015–2019* [Tesis de pregrado, Universidad Continental].
- Mantari, A. & Pinchi, W. (2021). Influencia de la minería artesanal e informal en la calidad del recurso hídrico de Parcoy, La Libertad. *Revista Ciencia y Tecnología*, 17(2), 11–27.
- Matamoros, M. (2020). *Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y calderas; acciones para controlar su uso y emisión en la minería artesanal de oro* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua].
- Montoya, D. (s.f.). *Yacimiento Aurífero Santa Rosa*. Ingemmet.
- Nieto, S. (2022). *Impactos de la actividad minera artesanal en la calidad del agua del río Abujao, cuenca del Abujao–Masisea Región Ucayali–2010* [Tesis de grado de Magister, Universidad Nacional de Ucayali].

- Oyarzún, J. (2006). Minería y contaminación del agua. <https://n9.cl/d1094>
- Pardave, M. (2022). *Evaluación de la calidad física química de aguas que influyen en las actividades de la unidad minera Cerro S.A.C ubicada en los distritos de Simón Bolívar y Yanacancha, provincia de Pasco 2020* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión].
- Paredes, J. (2004). *Integración de la modelación de la calidad del agua en un sistema de ayuda a la decisión para la gestión de recursos hídricos* [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia].
- Peña, S. & Araya, P. (2021). Aguas de contacto, efectos de la minería y el medioambiente. *Facultad de Derecho*, 1(50).
- Ramos, A. (2018). *Evaluación de la calidad del agua del río ovejas por descargas de quebradas provenientes de zona minera de la vereda Yolombó, en el corregimiento La Toma, Suarez, Cauca* [Tesis de pregrado, Universidad del Valle].
- Ramos, E. (2022). *Evaluación de calidad de agua del río Chanquillo, en la zona de influencia por actividades mineras, distrito de Gorgor, Cajatambo–2021* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional José Faustino Sanchez Carrión].
- Reategui, R. (2022). *Conocimiento de los pobladores sobre la relación de los metales pesados, efluentes y calidad de agua en el río el Toro* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte].
- Romero, K. (2009). Contaminación por metales pesados. *Revista Científica Ciencia Médica*, 12(1), 45–46.
- Ruiz Romero S. J., & Velásquez Rondón, M. J. (2024). *Evaluación de la calidad del agua en cuerpos hídricos cercanos a la zona minera El Dorado Resources Cachicadan- 2024* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo].
- Samboni, N., Carbajal, Y., & Escobar, J. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de la salud y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172–181.

- Sana, C. (2020). *Evaluación del impacto de la actividad minera sobre la calidad del agua, sedimentos y la comunidad de macroinvertebrados en ríos y arroyos de las cuencas pagua y siete* [Tesis de maestría, Escuela Superior Politécnica del Litoral].
- Santone, A. (2023). *Evaluación de parámetros fisicoquímicos en la calidad del agua de la quebrada Coigobamba y río Shiracmaca en Huamachuco* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión].
- Tinco, J. & Omnia, J. (2022). *Efecto de la actividad minera en la calidad del agua en cuatro quebradas de la comunidad nativa San José de Karene–Madre de Dios* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios].
- Ventocilla, A. (2022). *Evaluación fisicoquímica de la calidad del agua para riego agrícola, contaminada por la minería informal distrito de Sayapullo–La Libertad 2019* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Alcides Carrión].



Religación
Press
Ideas desde el Sur Global



Religación
Press

ISBN: 978-9942-561-94-7



9 789942 561947