



Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

**Evaluación de calidad de agua del río Santa Bárbara, ubicado en la provincia
del Azuay, Ecuador**

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Químico


Autores:

Kevin David Cajamarca Juela

Karol Patricia Díaz Román

Director:

Gonzalo Javier Astudillo Ochoa

ORCID:  0009-0009-9931-5689

Cuenca, Ecuador

2024-11-26

Resumen

El río Santa Bárbara, situado en la provincia de Azuay, Ecuador, es una fuente hídrica esencial para las comunidades locales, ya que proporciona agua para riego, agricultura y consumo humano. Sin embargo, actividades humanas como la minería y la urbanización han deteriorado su calidad en las últimas décadas. Este estudio tiene como objetivo evaluar la calidad del agua del río Santa Bárbara mediante el análisis de parámetros físicoquímicos (que incluyen coliformes fecales y totales, pH, turbidez, oxígeno disuelto, dureza y sólidos disueltos), así como los niveles de plomo en varios puntos de la ribera. Las muestras se recogieron en las proximidades de los distritos urbanos de Sigsig y de las comunidades mineras durante un periodo de cuatro semanas. Los datos fueron interpretados utilizando el Índice de Calidad del Agua (ICA) de la National Science Foundation (NSF), resultados indicaron que la calidad del agua varía de «media» a «buena» en varios puntos de muestreo, con niveles de contaminación más altos cerca de las áreas urbanas y mineras. Además, algunos parámetros, como los coliformes totales y fecales, el pH y la turbidez, superaron los límites establecidos por la normativa ecuatoriana en ciertas zonas. En el caso del plomo, las concentraciones encontradas estuvieron por debajo de los límites permitidos, lo que sugiere una ausencia de contaminación significativa por este metal. Estos hallazgos proporcionan información crucial para la creación de planes de conservación y gestión del agua, contribuyendo a proteger este recurso vital y la salud pública de la región.

Palabras clave del autor: parámetros físico-químicos, calidad del agua, minería ilegal, concentración de plomo



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

The Santa Barbara River, located in the province of Azuay, Ecuador, is an essential water source for local communities, providing water for irrigation, agriculture and human consumption. However, human activities such as mining and urbanization have deteriorated its quality in recent decades. This study aims to assess the water quality of the Santa Barbara River by analyzing physicochemical parameters (including fecal and total coliforms, pH, turbidity, dissolved oxygen, hardness, and dissolved solids), as well as lead levels at various points along the riverbank. Samples were collected in the vicinity of the urban districts of Sigsig and the mining communities over a four-week period. The data were interpreted using the National Science Foundation (NSF) Water Quality Index (WQI), results indicated that water quality ranged from “average” to “good” at various sampling points, with higher contamination levels near the urban and mining areas. In addition, some parameters, such as total and fecal coliforms, pH, and turbidity, exceeded the limits established by Ecuadorian regulations in certain areas. In the case of lead, the concentrations found were below the permitted limits, suggesting an absence of significant contamination by this metal. These findings provide crucial information for the creation of water conservation and management plans, helping to protect this vital resource and public health in the region.

Author keywords: physicochemical parameters, water quality, illegal mining, lead concentration



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Capítulo I.....	11
1.1. Introducción	11
1.2. Antecedentes	11
1.3. Justificación	12
1.4. Objetivos.....	14
1.4.1 Objetivo General.....	14
1.4.2. Objetivos Específicos	14
Capítulo II.....	15
2. Marco teórico	15
2.1. El agua.....	15
2.1.1. Contaminación del Agua por actividad minera.....	15
2.1.2. Calidad del agua.....	16
2.1.2.1. Índices de calidad del agua (ICA).....	16
2.1.2.2. Índice de Calidad del Agua de la Fundación Nacional de Sanidad (ICA NSF) Parámetros Utilizados en el ICA NSF	17
2.1.3. Parámetros fisicoquímicos	16
2.1.3.1 Potencial de Hidrógeno (pH)	18
2.1.3.2. Turbidez	19
2.1.3.3. Dureza.....	19
2.1.3.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	19
2.1.3.5. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	19
2.1.3.6. Sólidos disueltos.....	20
2.1.3.7. Oxígeno Disuelto.....	20
2.1.3.8. Nitratos	20
2.1.3.9. Sulfatos	20
2.1.3.10. Alcalinidad	21
2.1.3.11. Coliformes totales y fecales.....	21
2.1.4. Normativa y estándares de calidad de agua Normativas Ecuatorianas.....	21
Capítulo III.....	24
3. Metodología	24
3.1. Área de estudio	24
3.2. Metodología de muestreo	24
3.2.1. Preparación del muestreo.....	25
3.2.2. Recolección de muestras.....	25
3.2.3. Puntos de muestreo	26
3.3. Parámetros físicoquímicos.....	27
3.3.2. Determinación de pH	27
3.3.3. Determinación de turbidez	28
3.3.4. Determinación de dureza.....	28

3.3.5. Determinación de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	28
3.3.6. Determinación de DQO (Demanda Química de Oxígeno)	28
3.3.7. Determinación de Sólidos disueltos	29
3.3.8. Determinación de Oxígeno disuelto	29
3.3.9. Determinación de Nitratos y Sulfatos.....	30
3.3.10. Determinación de Alcalinidad	30
3.3.11. Determinación de Coliformes Totales y Fecales	30
3.4. Determinación de Concentración de Plomo	31
3.5. Determinación de la ICA NSF	31
Capítulo IV	32
4. Resultados y discusión	32
4.1. Resultados Parámetros Fisicoquímicos	32
4.1.1. pH.....	32
4.1.2. Turbidez	33
4.1.3. Oxígeno Disuelto	34
4.1.4. Sólidos Disueltos	35
4.1.5. Conductividad.....	36
4.1.6. Alcalinidad	37
4.1.7. Dureza	37
4.1.8. Nitratos	38
4.1.9. Sulfatos	39
4.1.10. DBO.....	40
4.1.11. DQO	41
4.1.12. Coliformes Totales.....	42
4.1.13. Coliformes Fecales.....	43
4.2. Análisis de concentración de Plomo	43
4.3. ICA NSF	44
Capítulo V	49
5. Conclusiones y recomendaciones.....	49
5.1. Conclusiones	49
5.2. Recomendaciones	50
Referencias	51
Anexos	57

Índice de figuras

Figura 1. Puntos de muestreo seleccionados para el estudio	27
Figura 2. Valores de pH en las cuatro semanas de muestreo	32
Figura 3. Valores de Turbidez en los Puntos de Muestreo	33
Figura 4. Valores de Oxígeno Disuelto en los Puntos de Muestreo	34
Figura 5. Valores de Sólidos Disueltos en los Puntos de Muestreo	35
Figura 6. Valores de Conductividad en los Puntos de Muestreo	36
Figura 7. Valores de Alcalinidad en los Puntos de Muestreo	37
Figura 8. Valores de dureza total en los Puntos de Muestreo	37
Figura 9. Valores de nitratos totales en los Puntos de Muestreo	38
Figura 10. Valores totales en los Puntos de Muestreo	39
Figura 11. Valores de Demanda química de oxígeno en los Puntos de Muestreo	40
Figura 12. Valores Coliformes Totales los Puntos de Muestreo	40
Figura 13. Valores Coliformes Fecales en los Puntos de Muestreo	42

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros y sus respectivos factores de ponderación	18
Tabla 2. Calidad del agua asociada al valor del ICA (Escala de clasificación del ICA-NSF)	19
Tabla 3. Parámetros Físicos y Químicos para la Calidad del Agua de Ríos.	23
Tabla 4. Descripción de puntos de muestreo	26
Tabla 5. Resultados del Análisis del índice de Calidad de Agua P1 Punto cercano a la concesión San Sebastián.	43
Tabla 6. Resultados del Análisis del índice de Calidad de Agua P2 Punto cercano a concesión minera Curucay.	44
Tabla 7. Resultados del Análisis del índice de Calidad de Agua P3 Punto entre las concesiones mineras Curuncay y María Felicia	44
Tabla 8. Resultados del Análisis del índice de Calidad de Agua P4 Playa de Zhingate.	45

Dedicatoria

A mis padres, David y María Dolores, por su amor incondicional y su apoyo constante a lo largo de todos estos años. Ustedes son el ejemplo de perseverancia y trabajo que siempre me ha inspirado a seguir adelante.

También dedico este trabajo a todos los familiares que me han apoyado todos estos años desde mi hermana Erika, mis tíos, mi abuela, y a quien considero una inspiración de escoger esta profesión, la Ing. Daniela Albuja.

A mis amigos, desde aquellos que conocí el primer día de la carrera hasta los que encontré en el último ciclo. Cada uno de ustedes ha sido un pilar en este camino, brindándome apoyo tanto en los estudios como en los desafíos personales.

Quiero dedicar un agradecimiento especial a Cami, quien ha sido y siempre será una de las principales razones por las que he llegado hasta este punto culminante de mi vida.

A mis profesores y mentores, quienes con paciencia y sabiduría guiaron mi aprendizaje y me ayudaron a crecer tanto personal como académicamente.

Y, en especial, a todos aquellos que creyeron en mí. Ustedes han sido la fuerza que me ha motivado a no rendirme nunca.

Kevin David Cajamarca Juela

Quiero dedicar este trabajo de titulación quiero agradecer principalmente a Dios por ser mi guía y fortaleza durante toda mi carrera y permitirme cumplir una de mis metas.

A mi mamita Carmita, mi ángel en el cielo, por su amor y dedicación, que siempre serán mi mayor inspiración. Esta tesis es un reflejo de lo que me enseñaste, te llevo en mi corazón.

A mi querido esposo Christopher, a quien tuve la dicha de conocer gracias a la universidad. A pesar de la distancia, siempre ha estado a mi lado, apoyándome en cada momento y siempre confiando en mí. Gracias por ser mi pilar y mi compañero en este camino.

A mi querida mamá, que siempre ha estado a mi lado con su apoyo incondicional. Gracias a tu esfuerzo y dedicación, he logrado salir adelante en cada desafío. Te amo profundamente por todo lo que haces y sigues haciendo por mí.

A mi papá, por su apoyo constante, le estaré eternamente agradecida por ser parte de mis logros y por su ayuda en todo, siempre tendrá mi amor y cariño.

A mis queridos hermanos, Carlitos y Litzy, gracias por su amor; su apoyo ha sido un pilar fundamental en mi vida. Y a Gaby, por el cariño y amor que siempre me has brindado.

A mi ñaño Oswaldo, por su apoyo incondicional y por estar siempre a mi lado a lo largo de mi vida. A ti y a Mayra, gracias infinitas por darme uno de los mayores motivos para seguir adelante: Jake y Dereck, quienes llenan mis días de alegría y me inspiran a ser mejor cada día.

Karol Patricia Diaz Román

Agradecimiento

Queremos agradecer, sobre todo, a Dios por darnos siempre fortaleza, guiarnos por el buen camino y permitirnos cumplir un sueño más. Su presencia en nuestras vidas ha sido fundamental para superar los desafíos y alcanzar esta meta.

Agradecemos a la Universidad de Cuenca por brindarnos no solo el espacio académico y las herramientas necesarias, sino también por fomentar un ambiente de crecimiento y aprendizaje continuo, que nos ha permitido desarrollarnos profesional y personalmente.

Expresamos nuestro más sincero y profundo agradecimiento a nuestro tutor, el Ing. Javier Astudillo, por su valiosa guía, paciencia y compromiso. Su apoyo incondicional y su capacidad para motivarnos en los momentos más desafiantes han sido claves para lograr este proyecto.

De igual manera, agradecemos profundamente a la Ing. Sonia Astudillo, cuya dedicación, conocimiento y disposición para asesorarnos en cada momento han sido fundamentales. Su experiencia y orientación fueron cruciales para llevar nuestro trabajo al siguiente nivel, ayudándonos a superar cada obstáculo con confianza.

Capítulo I

1.1. Introducción

Uno de los recursos más vitales para el crecimiento de la vida es el agua, y la calidad de este recurso afecta la salud humana, bienestar socioeconómico y el equilibrio medioambiental. En la actualidad, numerosos vertidos derivados de la actividad humana alteran la calidad del agua superficial, lo que repercute en diversos ámbitos, entre ellos la situación socioeconómica y la salud de las comunidades que rodean estas fuentes. La escasez de agua es un importante problema contemporáneo que se considera un gran reto socioambiental (Rodríguez et al., 2016).

En 2022, aproximadamente el 73 % de la población mundial tenía acceso a agua potable segura, a pesar de que muchas personas aún dependen de fuentes contaminadas. La contaminación del agua, tanto química como microbiológica, supone una grave amenaza para la salud pública. El saneamiento y la calidad del agua se reconocen como derechos humanos desde 2010 (OMS, 2023).

La contaminación del agua puede provenir tanto de fuentes naturales como de actividades antrópicas. La posibilidad de que los vertidos de la minería y las actividades urbanas aporten contaminantes peligrosos al ecosistema acuático los hace especialmente preocupantes en el caso del río Santa Bárbara.

Por lo tanto, este estudio se centra en evaluar la calidad del agua del río Santa Bárbara mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos y la concentración de plomo en las muestras de agua. Con el objetivo de identificar la presencia de contaminación y evaluar su impacto. Este análisis permitirá desarrollar estrategias efectivas para la gestión y protección de este recurso vital, contribuyendo a la preservación del ambiente y la salud pública en la región.

1.2. Antecedentes

Para numerosas comunidades rurales de la provincia ecuatoriana de Azuay, el río Santa Bárbara es un elemento vital. Sin embargo, actividades humanas como la minería y la urbanización han deteriorado la calidad del agua en los últimos años. La minería, en particular, ha dejado pasivos ambientales debido al abandono de relaveras desde 1994, como se observa en la zona minera de San Bartolomé, contribuyendo a la dispersión de metales pesados como plomo, cadmio y zinc. Esta contaminación pone en riesgo la salud humana y los ecosistemas acuáticos locales (Valencia, 2017).

Las investigaciones han demostrado los efectos perjudiciales de esta contaminación para el ecosistema y la salud pública. Además, llama la atención el hecho de que metales pesados como plomo, cadmio y mercurio pueden acumularse en el agua y tener consecuencias extremadamente nocivas. Las operaciones mineras en Azuay han agravado los problemas de calidad del agua de la ciudad. En las comunidades locales persiste la preocupación por la contaminación del agua y su impacto en la pesca, la agricultura y la disponibilidad de agua potable. El uso de métodos de evaluación de la calidad del agua, como el Índice de Calidad del Agua de la Fundación Nacional de Sanidad (ICA NSF), es esencial para monitorear y gestionar la salud de los cuerpos de agua en la región (Fernández et al., 2017).

1.3. Justificación

La conservación de los recursos hídricos se ha convertido en un desafío global cada vez más crítico debido a los impactos del cambio climático y la creciente escasez de agua. El cambio climático no solo afecta la disponibilidad de agua, sino que también impacta de manera significativa su calidad. Los eventos climáticos extremos, como sequías y lluvias intensas, alteran los ciclos naturales del agua, lo que agrava los problemas de calidad, contaminando las fuentes de agua dulce con sedimentos, nutrientes y contaminantes (Chen et al., 2020; Das, Mahanta, & Kumar, 2020). A nivel global, la degradación de la calidad del agua contribuye a la escasez hídrica, ya que reduce la cantidad de agua utilizable (Müller, Avellán, & Schanze, 2022).

La disminución en la disponibilidad de agua debido al cambio climático está relacionada con el aumento de la demanda y la sobreexplotación de los recursos, mientras que la calidad del agua se ve afectada por el incremento de contaminantes, la alteración de los ecosistemas acuáticos y los cambios en los patrones de precipitación (Delpla et al., 2009; Charron et al., 2008).

En América Latina, las fuentes hídricas juegan un papel fundamental en la vida, la economía y el equilibrio ecológico. En Ecuador, la economía ha dependido históricamente de sus abundantes recursos naturales, incluidos los hídricos, los cuales son vitales para actividades económicas clave, como la agricultura y la minería (Universidad de las Américas, 2024). El río Santa Bárbara, conocido localmente como el río de Gualaceo, es de suma importancia para los cantones de Sigüig, Chordeleg y Gualaceo. Abastece de agua para riego agrícola, ganadería y consumo humano, siendo crucial para la vida y el desarrollo económico de estos cantones, así como para el turismo local. En esta subcuenca viven

alrededor de 76,487 habitantes, quienes dependen directamente del agua que brinda el río para su supervivencia y el desarrollo de actividades agrícolas (Lojano & Lucero, 2011; INEC, 2001).

Sin embargo, a pesar de su importancia, el río Santa Bárbara enfrenta serios desafíos debido a la contaminación relacionada con actividades humanas, incluyendo la minería. Se ha documentado que la minería, especialmente la minería metálica y la actividad agrícola en áreas de recarga hídrica, contribuyen a la disminución de la calidad del agua y a la degradación de los ecosistemas acuáticos de los páramos (Célleri et al., 2023). Además, la falta de un manejo adecuado de las fuentes hídricas, junto con la deforestación y la sobreexplotación del recurso, agravan los problemas de calidad y cantidad de agua disponibles para las comunidades de la región (ETAPA EP, 2023).

Este estudio permitirá identificar contaminantes y evaluar su impacto, proporcionando datos vitales para desarrollar estrategias de gestión y conservación del agua. Usando metodologías estandarizadas, como el Índice de Calidad del Agua de la Fundación Nacional de Sanidad (ICA NSF), permitiendo realizar una evaluación precisa y continua de la calidad del agua.

El análisis de la concentración de plomo en el agua del río Santa Bárbara es relevante debido a los riesgos significativos que este metal pesado plantea para la salud humana y el medio ambiente. El plomo es tóxico incluso en concentraciones bajas, afectando órganos esenciales como los riñones, el hígado y el sistema nervioso central, tanto en humanos como en fauna acuática. La exposición prolongada puede resultar en enfermedades neurológicas graves, especialmente en niños, como la reducción en el coeficiente intelectual y alteraciones cognitivas. En ecosistemas, el plomo afecta el crecimiento de plantas y organismos acuáticos, comprometiendo la biodiversidad y la cadena trófica (Jumbo, 2015; Valencia, 2017).

En el contexto de la minería, el plomo se libera durante la extracción y procesamiento de minerales, particularmente en operaciones de beneficio, relaveras y emisiones provenientes de lixiviados mineros. Estas actividades son comunes en la región sur del Ecuador, donde la minería a pequeña escala impacta cuencas hidrográficas como las del río Santa Bárbara. Además, la gestión inadecuada de relaves y la falta de control en la disposición de residuos mineros exacerban la contaminación por plomo y otros metales pesados, convirtiéndose en un riesgo ambiental y sanitario significativo (Jumbo, 2015; Valencia, 2017).

En áreas donde se emplea maquinaria pesada o se utilizan explosivos, el polvo de plomo tiende a dispersarse fácilmente en el aire y ser transportado hacia el agua mediante escorrentía, especialmente en zonas con alta precipitación (Duarte, 2020).

La necesidad de este análisis se justifica por la creciente amenaza de contaminación y la importancia del río en la vida de las comunidades locales. Proteger la calidad del agua del río Santa Bárbara es esencial para asegurar la salud pública, mantener la productividad agrícola, preservar los ecosistemas y garantizar el desarrollo sostenible de la región. Este estudio ayudará a disminuir los efectos negativos de la contaminación e impulsará la gestión efectiva de los recursos hídricos, beneficiando tanto a las generaciones presentes como futuras.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Evaluar la calidad de agua del río Santa Bárbara, por medio de muestras tomadas en un periodo de 4 semanas a través del análisis de los parámetros fisicoquímicos, y concentración de plomo, con el propósito de identificar si existe contaminación.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Realizar muestreo de agua del río Santa Bárbara en cuatro zonas cercanas a los asentamientos mineros y a la zona urbana de Sigsig.
2. Determinar los parámetros fisicoquímicos como pH, turbidez, dureza, DBO, DQO, sólidos disueltos, oxígeno disuelto, nitratos, sulfatos, alcalinidad, coliformes fecales, coliformes totales y concentración de plomo en las muestras de agua.
3. Comparar y evaluar los resultados obtenidos con los estándares y regulaciones según los Índices de Calidad de agua de la National Science Foundation (ICA-NSF).

Capítulo II

2. Marco teórico

2.1. El agua

El agua es un recurso natural importante en el planeta ocupando más del 70 % del mismo. Es una de las únicas sustancias que se puede encontrar en tres diferentes estados: sólido, líquido y gaseoso. El agua es un recurso que se renueva naturalmente, pero tiene ciertas limitaciones. Aunque la mayor parte vuelve a los océanos a través de la precipitación, no está disponible para ser aprovechada como agua dulce (Guerrero, 2023).

La cantidad de agua disponible no está determinada únicamente por la cantidad de agua presente en el entorno, ya que diferentes sólidos y superficies pueden absorber moléculas de agua con distinta intensidad, lo que reduce su disponibilidad (Strang, 2020). Colocar citas de años recientes

El ciclo del agua se define como el paso del agua en los diferentes lugares donde esta se encuentra, manteniendo así un balance natural entre las reservas. Las etapas del ciclo del agua se dividen en diferentes fases como son la evaporación, condensación, precipitación, infiltración y la escorrentía (Fernandes, 2023). El ciclo del agua es fundamental, ya que es el responsable del equilibrio climático y también actúa como emisor y receptor de algunas alteraciones provocadas por el cambio climático (Quino, 2021).

2.1.1. Contaminación del Agua por actividad minera

En la actualidad uno de los mayores problemas a nivel ambiental es la contaminación de las fuentes hídricas del mundo por metales tóxicos. Entre los factores principales que generan impacto en los ecosistemas debido a la contaminación por metales tóxicos, se destacan las actividades humanas, como las operaciones mineras y de fundición, junto con otras actividades industriales y urbanas. Entre los metales pesados que se incluyen se encuentran el plomo, el estaño, el hierro, el cadmio, el mercurio, el cromo, el vanadio y otros (Pabón et al., 2020).

La presencia de diversos contaminantes ha causado un grave deterioro en los ecosistemas acuáticos, especialmente la contaminación por metales pesados. Estos metales presentan efectos peligrosos debido a su incapacidad de degradarse biológica o químicamente, debido a su alta toxicidad y a su capacidad de acumularse en espacios limitados y a su fácil movilidad, lo que permite que la contaminación se expanda a grandes distancias. Aunque los metales pesados pueden encontrarse en el medio ambiente de

forma natural, la actividad minera y otras actividades son una fuente importante de liberación de estos contaminantes (Villamar et al., 2023). La actividad minera en Ecuador ha sido practicada desde épocas prehistóricas. Además, estas comunidades trabajaban el oro, la plata, el cobre y el platino con fines ornamentales, rituales e intercambio comercial, obteniéndose tanto de ríos como de socavones. En la actualidad, en el Ecuador se cuenta con minerales tanto metálicos como no metálicos; encontrándose entre los más importantes el oro, la plata, el cobre, el plomo y el zinc, siendo estos de bajo volumen de concentración, pero con alto valor (Rea, 2017).

Varios estudios han demostrado que la actividad minera lleva a la liberación de sustancias tóxicas y metales pesados en el agua, lo que representa una amenaza tanto para los ecosistemas acuáticos como para la salud humana (Smith & Sainato, 2016). La lixiviación de metales pesados es uno de los principales mecanismos de contaminación del agua en la minería. Estos metales, pueden ser liberados en el agua y transportados a cuerpos de agua cercanos, causando daños (Tarras et al., 2001). La utilización de químicos en la minería como el cianuro y el ácido sulfúrico en la separación de minerales también ha sido objeto de preocupación. Estas sustancias pueden filtrarse en el agua y causar contaminación química, con efectos negativos tanto en la salud humana como en la fauna (Azcue & Nriagu, 2006).

2.1.2. Calidad del agua

Algunos agentes significativos como la sobrepoblación, la industrialización y la urbanización han aumentado el deterioro de la disponibilidad y calidad de agua. La calidad de agua de cualquier sitio o fuente determinada, puede ser evaluada a través de parámetros físicos, químicos y biológicos; si los valores de estos parámetros definidos superan los límites permisibles, se consideran perjudiciales para la salud del ecosistema (Tyagi et al., 2013).

2.1.2.1. Índices de calidad del agua (ICA)

Los índices que evalúan la calidad del agua son herramientas importantes para la toma de decisiones centradas en evitar el deterioro de sus estándares al realizar un análisis de las variaciones en sus parámetros de calidad. En la actualidad, hay diversas metodologías para evaluar la calidad del agua, y presentan diferencias entre sí en la determinación de la misma (Robledo, 2022).

"Entre los ICA más empleados se destaca el propuesto por (Brown et al., 1970), que es una versión modificada del Water Quality Index (WQI), desarrollada por la National Sanitation Foundation (ICA-NSF). Este índice goza de amplia difusión y aplicación" (Fernández et al., 2017).

El Índice de Calidad del Agua (ICA) es una expresión simplificada de un conjunto de variables que resultan ser eficaces para transmitir información sobre la calidad del agua, estas herramientas son fundamentales en la toma de decisiones para mitigar el deterioro. Este índice fue desarrollado por la Fundación de Sanidad Nacional de los Estados Unidos (NSF) en 1970 y es ampliamente utilizado para evaluar la calidad del agua en diferentes cuerpos hídricos (Saravia, 2017).

2.1.2.2. Índice de Calidad del Agua de la Fundación Nacional de Sanidad (ICA NSF)

Parámetros Utilizados en el ICA NSF

El índice de calidad del agua desarrollado por la NSF se basa en un proceso que considera la media aritmética ponderada de nueve parámetros físicos, químicos y biológicos (Fernández et al., 2017). Estos parámetros se indican a continuación.

Tabla 1. Parámetros y sus respectivos factores de ponderación

Categoría	Factor de Ponderación
Oxígeno disuelto	0.17
Coliformes fecales	0.15
pH	0.12
DBO5	0.10
Nitratos	0.10
Fosfatos	0.10
Temperatura	0.10
Turbiedad	0.08
Sólidos totales	0.08

Nota: Adaptado de Saravia Solares (2017)

Al ser una modificación del WQI original, fue implementada por la National Sanitation Foundation (NSF). Esta versión se utiliza para evaluar la calidad del agua en diferentes puntos de un mismo río y permite compararla con otros cuerpos de agua. La categoría cualitativa de la calidad del agua se determina después de calcular la ponderación numérica del ICA, y la calidad del recurso hídrico se clasifica según rangos específicos (Espinoza et al., 2022).

Tabla 2. Calidad del agua asociada al valor del ICA (Escala de clasificación del ICA-NSF)

Calidad del agua	Valor del ICA
Excelente	91 – 100
Buena	71 – 90
Media	51 – 70
Mala	26 – 50
Muy Mala	0 – 25

Nota: Adaptado de Fernández et al. (2017)

Metodología del ICA-NSF

La metodología del ICA-NSF se basa en tres pasos fundamentales:

- **Selección de Variables:** Se seleccionan los parámetros a evaluar según su relevancia para la calidad del agua.
- **Determinación de Subíndices:** Se transforman las variables medidas a subíndices en una escala de calidad.
- **Agregación de Subíndices:** Se combinan los subíndices para obtener una puntuación global del índice.

Este enfoque sistemático permite una evaluación coherente y objetiva de la calidad del agua, facilitando su interpretación y uso en la gestión de recursos hídricos (Samboni Ruiz, Carvajal Escobar, & Escobar, 2007).

2.1.3. Parámetros fisicoquímicos

2.1.3.1. Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH del agua se define como la concentración de los iones de hidrógeno presentes en el agua, es decir este indica el comportamiento ácido o básico. En aguas naturales, el intervalo de pH varía entre 4 y 9, siendo mayormente ligeramente alcalinas debido a la existencia de bicarbonatos y carbonatos derivados de metales alcalinos y alcalinotérreos. A temperatura de 25°C, el pH del agua pura es de 7, considerado neutro (Garay et al., 2003).

2.1.3.2. Turbidez

La turbidez, propiedad física del agua, se define como la dispersión de la luz por partículas suspendidas en ella, según la Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2022), la turbidez se mide en unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU) en una escala logarítmica. Este parámetro es crucial en el análisis de la calidad del agua y puede afectar su utilidad para consumo humano, agricultura e industria.

La turbidez del agua es causada por la presencia de partículas suspendidas. Las partículas pueden ser de origen inorgánico, como arcillas, fangos y óxidos minerales provenientes de la erosión del suelo, o de origen orgánico, como bacterias, parásitos, algas, zooplancton, ácidos fúlvicos y coloides húmicos. Además de las fuentes naturales, las actividades humanas contribuyen con efluentes cargados de estas partículas y otras sustancias como virus entéricos, contaminantes químicos y cloro, tanto en los cuerpos de agua como en las plantas y redes de distribución (Perez & Mariscal, 1999).

2.1.3.3. Dureza

La dureza del agua indica la cantidad de algunos metales alcalinotérreos como el magnesio (Mg) y el calcio (Ca) que se encuentran presentes en el agua, estos provienen principalmente de la disolución de rocas y minerales. Existen varios tipos de dureza como total, carbonatada o temporal y no carbonatada o permanente. Este parámetro se expresa en mg/L como carbonato de calcio ($CaCO_3$) (Solís et al., 2018).

2.1.3.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO es la cantidad de oxígeno disuelto necesaria para provocar la oxidación química de la materia orgánica presente en el agua. Es un indicador clave de la salud medioambiental de las aguas superficiales y es expresada en mg/L (Patil, Sawant, & Deshmukh, 2012).

2.1.3.5. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) mide la cantidad de oxígeno disuelto consumido por la oxidación bioquímica de materia orgánica biodegradable bajo condiciones específicas. Es un índice cualitativo o semicuantitativo de los compuestos orgánicos degradables en un corto período. La DBO se mide generalmente durante 5 o 7

días (DBO5 o DBO7) a 20 °C, utilizando métodos como la titulación de Winkler o electrodos de membrana sensibles al oxígeno (Garay et al., 2003).

2.1.3.6. Sólidos disueltos.

Los sólidos disueltos presentes en el agua son iones que se encuentran diluidos en este; la concentración de sólidos disueltos describe la presencia de sales inorgánicas y pequeñas cantidades de materia orgánica en el agua. Las fuentes de materia presentes pueden proceder de condiciones geológicas y de actividades humanas (Rusydi, 2018).

2.1.3.7. Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno presente en el agua y es esencial para la salud de los ecosistemas acuáticos. Este parámetro es un indicador clave de la calidad del agua, ya que niveles adecuados de OD son necesarios para la supervivencia de peces y otros organismos acuáticos. La capacidad del agua para disolver oxígeno depende de factores como la temperatura y la presencia de vegetación acuática. A temperaturas más bajas, el agua puede disolver más oxígeno, mientras que a temperaturas más altas, la capacidad de disolución disminuye (Pena, 2007).

El OD también se ve afectado por procesos como la fotosíntesis y la respiración de organismos acuáticos. Las plantas acuáticas y algas producen oxígeno durante la fotosíntesis, aumentando los niveles de OD. Por otro lado, la respiración de estos organismos y la descomposición de materia orgánica consumen oxígeno, lo que puede reducir sus niveles en el agua. Los niveles de OD varían y pueden oscilar entre 0 y 18 partes por millón (ppm), siendo necesario al menos 5-6 ppm para mantener una diversidad saludable de vida acuática (Pena, 2007).

2.1.3.8. Nitratos

Los nitratos son compuestos químicos que contienen el ion nitrato (NO_3^-). Son sales o ésteres del ácido nítrico (HNO_3). Los nitratos se encuentran naturalmente en el medio ambiente, tanto en los suelos como disueltos en el agua (Aguado, 2018, p. 2).

2.1.3.9. Sulfatos

Los sulfatos son sales solubles que se encuentran presentes en el agua con excepción del plomo (Pb), bario (Ba) y estroncio (Sr) (Rafael, 2019). Los sulfatos en el agua pueden tener

su origen debido al contacto del agua con terrenos ricos en yesos y a la lixiviación; además, un amplio rango de concentraciones de sulfatos está presente en aguas lluvias (Severiche & González, 2012).

2.1.3.10. Alcalinidad

La alcalinidad del agua se refiere a la capacidad del agua para neutralizar, optimizar y mitigar cualquier tipo de ácido que pueda ser perjudicial para las aguas superficiales (Berru et al., 2019).

2.1.3.11. Coliformes totales y fecales

Representa la contaminación del agua con excretas, es decir, los coliformes son una familia de bacterias que se encuentran en el ecosistema; la presencia de estas bacterias en el agua indica la contaminación de esta con aguas negras. Estas bacterias coliformes, generalmente se encuentran en la capa superficial o en los sedimentos del fondo del agua. Este tipo de contaminación pueden provocar enfermedades en la salud humana, debido a que supone la incorporación de microorganismos patógenos en el agua (Ramos et al., 2008).

2.1.4. Normativa y estándares de calidad de agua

Normativas Ecuatorianas

La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua del Ecuador

Promulgada en el 2014, constituye un marco legal fundamental para la gestión y conservación de los recursos hídricos en el país. Esta ley se basa en varios principios clave que guían su aplicación, tales como el reconocimiento del agua como patrimonio nacional estratégico y de uso público, así como la prohibición de su privatización (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014).

Entre los aspectos más destacados, se encuentra la creación de una Autoridad Única del Agua encargada de la planificación, gestión, regulación y control de los recursos hídricos. La gestión se organiza por cuencas hidrográficas, promoviendo un enfoque ecosistémico e integrado (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014).

Además, la ley enfatiza la participación y el control social a través del Consejo Intercultural y Plurinacional del Agua, y reconoce la importancia de las organizaciones comunitarias en la gestión del agua (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014).

Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULSMA)

Es un marco legal esencial para la protección y gestión de los recursos hídricos del país. Esta normativa establece políticas básicas ambientales que promueven el desarrollo sustentable, priorizando la prevención y el control de la contaminación y la degradación ambiental (TULSMA, 2017).

El TULSMA establece límites específicos para varios parámetros físicos y químicos que son cruciales para evaluar la calidad del agua de los ríos. Por ejemplo, el pH del agua debe mantenerse entre 6.5 y 8.5, y el oxígeno disuelto debe ser igual o superior a 5 mg/l para asegurar la salud de los ecosistemas acuáticos (TULSMA, 2017).

Tabla 3. Parámetros Físicos y Químicos para la Calidad del Agua de Ríos.

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Límite Máximo Permitido</i>
<i>pH</i>		6.5 – 8.5
<i>Oxígeno Disuelto (OD)</i>	mg/l	≥ 5
<i>Turbiedad</i>	NTU	≤ 5
<i>Color</i>	Unidades de color (Pt-Co)	≤ 15
<i>Sólidos Suspendidos Totales (SST)</i>	mg/l	≤ 25
<i>Nitratos (NO_3^-)</i>	mg/l	≤ 10
<i>Nitritos (NO_2^-)</i>	mg/l	≤ 0.1
<i>Amonio (NH_4^+)</i>	mg/l	≤ 0.5
<i>Fosforo Total (P)</i>	mg/l	≤ 0.1
<i>Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5)</i>	mg/l	≤ 5
<i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	mg/l	≤ 30

Nota: Adaptado de TULSMA, 2017

El TULSMA proporciona un marco importante para la protección y gestión de los recursos hídricos en Ecuador. Su aplicación efectiva es crucial para la conservación de los ecosistemas acuáticos y para garantizar la salud de las comunidades que dependen de estos recursos (TULSMA, 2017).

Capítulo III

3. Metodología

3.1. Área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la provincia del Azuay, específicamente en torno al río Santa Bárbara, un importante cuerpo de agua que desempeña un papel crucial en el ecosistema y la vida de las comunidades locales. El río Santa Bárbara se extiende a lo largo de una región geográfica diversa, abarcando áreas de montaña y valle, con altitudes que varían desde elevaciones considerables en las zonas altas hasta terrenos más bajos en su recorrido hacia el valle (Martínez, 2012).

La cuenca del río Santa Bárbara abarca una superficie de 947 km² y un perímetro de 218 km e incluye una variedad de ecosistemas, desde bosques montañosos hasta áreas agrícolas y urbanas en las zonas bajas de la cuenca. Su red hidrográfica alimenta tanto a comunidades rurales como urbanas, proporcionando agua para consumo humano, agricultura, generación de energía y otros usos (UDA, 2005).

Para el desarrollo de este estudio, se delimitaron 4 áreas específicas dentro de la cuenca del río Santa Bárbara (Tabla 4) que representan diferentes condiciones ambientales, socioeconómicas y de uso del suelo, con el fin de obtener una visión integral de los factores que influyen en la calidad y gestión de este recurso hídrico vital para la región del Azuay. Otros de los referentes que se tomaron en cuenta son las concesiones mineras ubicadas a lo largo del río Santa Bárbara, entre las que están María Felicia, Curuncay y San Sebastián. Estas 3 se encontraron dentro de nuestra zona de estudio.

3.2. Metodología de muestreo

El muestreo se llevó a cabo de acuerdo al “Anexo 1 del libro VI del texto unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua”. Se recolectaron un total de 16 muestras, durante un periodo de 4 semanas, en los 4 puntos de muestreo ya mencionados anteriormente.

Las muestras se recolectaron siguiendo el procedimiento descrito en la normativa, donde se establece la importancia de obtener tanto muestras puntuales como muestras compuestas para garantizar la representatividad y fiabilidad de los resultados. Las muestras puntuales se tomaron en momentos específicos para analizar parámetros de calidad que necesitan evaluación inmediata, como pH, oxígeno disuelto y coliformes.

3.2.1 Preparación del muestreo

Según la NTE INEN 2169:2013 se establecen las técnicas y precauciones para recolectar muestras de agua de ríos y otras fuentes. Aquí están algunos puntos clave:

Lavar los recipientes con agua y detergente para eliminar los residuos existentes en ellos. Realizar un reconocimiento de los puntos donde se llevaron a cabo los respectivos muestreos.

Etiquetar los envases, incluyendo toda la información necesaria para su correcta identificación, con el objetivo de evitar posibles confusiones durante la toma de muestras

3.2.2 Recolección de muestras

Se ingresa el frasco de vidrio de manera correcta, manteniendo una distancia considerable debido a que en las orillas del río se pueden encontrar acumulaciones de sedimentos. Llenar completamente el frasco con agua y taparlo inmediatamente para evitar que quede aire sobre la muestra, tal como lo especifica la **Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:2013**, que regula el manejo y conservación de muestras de agua. Esta norma establece que es esencial limitar el contacto del agua con el aire para evitar la interacción de la fase gaseosa, lo que podría alterar parámetros como el pH, el dióxido de carbono y el contenido de oxígeno disuelto en la muestra.

Además, se debe almacenar la muestra de forma isotérmica para mantener su temperatura durante el transporte, utilizando cajas térmicas o refrigeradores de campo, según lo estipula la misma norma. La muestra debe mantenerse a temperaturas entre **2°C y 5°C** y en un lugar oscuro para conservar su calidad hasta el análisis en el laboratorio (NTE INEN 2169:2013).

3.2.3 Puntos de muestreo

Tabla 4. Descripción de puntos de muestreo

Punto	Coordenada	Identificación
Punto cercano a la concesión San Sebastián.	Latitud: 3°05'24.6"S Longitud: 78°46'44.7"W	P1
Punto cercano a la concesión Curuncay.	Latitud: 3°05'18.1"S Longitud: 78°46'49.2"W	P2
Punto entre las concesiones mineras Curuncay y María Felicia.	Latitud: 3°04'47.9"S Longitud: 78°47'14.0"W	P3
Playa de Zhingate (Ciudad Sigsig)	Latitud: 3°03'18.7"S Longitud: 78°48'02.3"O	P4

Nota: Elaboración propia

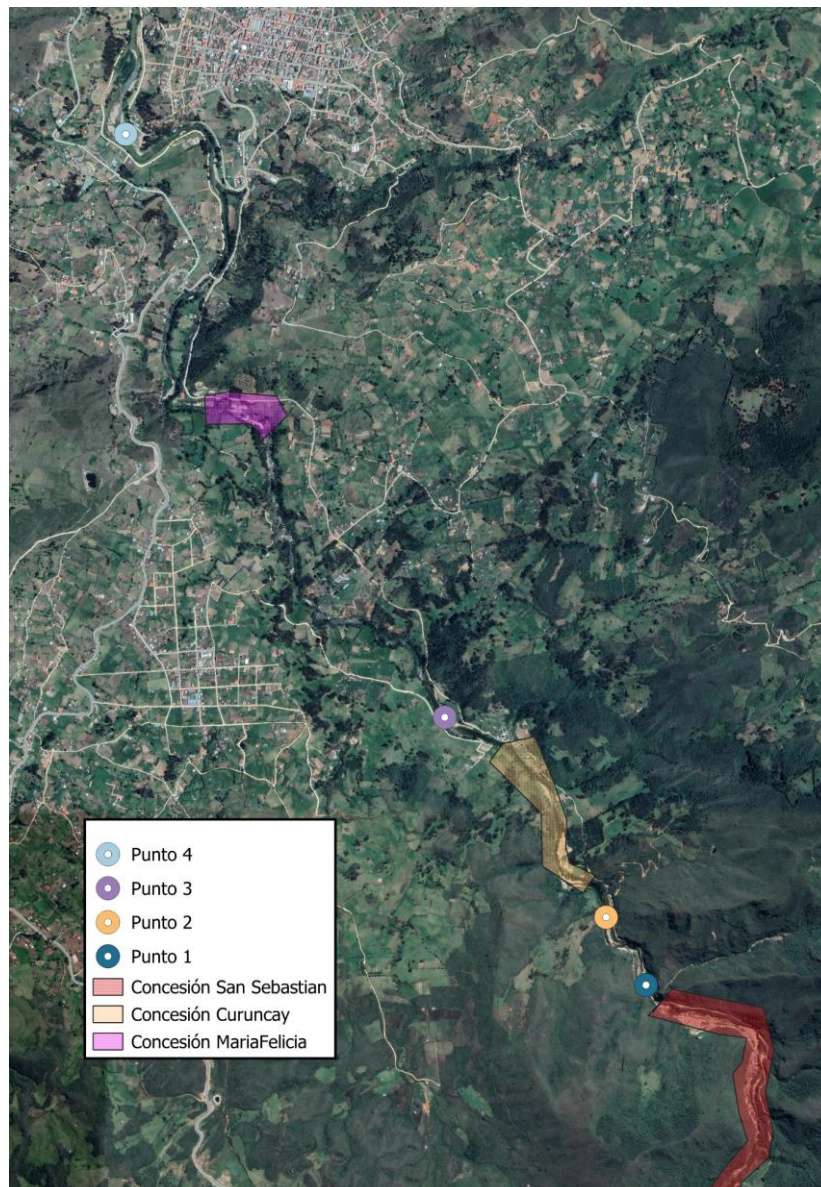


Figura 1. Puntos de muestreo seleccionados para el estudio

Nota: Elaboración propia con el programa QGIS

3.3. Parámetros físico químicos

3.3.2. Determinación de pH

En la determinación del pH se utilizó un pHmetro Boeco Germany pH Meter BT-600, el cual previamente se calibró con soluciones buffer de pH conocido. Posteriormente, las muestras se colocaron en vasos de precipitación etiquetados para evitar confusiones. El electrodo se sumergió en cada una de las muestras,

esperando aproximadamente un tiempo de 20 segundos para que el pH se establezca antes de registrar la lectura; dicho procedimiento se repitió para cada una de las muestras a analizar.

3.3.3. Determinación de turbidez

Se realizó la evaluación de la claridad del agua siguiendo las pautas establecidas por la normativa NTE INEN-ISO 7027:2013. Se empleó un turbidímetro de la marca Hach® para este parámetro, donde se dispusieron 10 ml de la muestra en una cubeta antes de su análisis en unidades de NTU.

3.3.4. Determinación de dureza

De acuerdo a la norma NTE INEN 2169 para determinar la dureza total de una muestra de agua, se preparó una solución estándar de EDTA y se añadió una pequeña cantidad de indicador Negro de Eriocromo a la muestra. La muestra se tituló con la solución de EDTA hasta que el color cambie, lo que indica que todos los iones de calcio y magnesio han sido ligados. La cantidad de EDTA utilizada se relaciona con la dureza total de la muestra en términos de concentración de iones de calcio y magnesio.

3.3.5. Determinación de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)

La metodología empleada para la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se basó a la norma NTE INEN 1202:2013 que incluye la toma de una medición inicial de Oxígeno Disuelto (OD), seguida de una medición final después de un periodo de incubación de cinco días a 20 °C, con el resultado expresado en mg/L. Este procedimiento, conocido como DBO₅, constituye una práctica estándar que indica la cantidad de oxígeno consumida por microorganismos al descomponer materia orgánica en condiciones aeróbicas. Para calcular la DBO inicial, se resta el nivel de oxígeno disuelto al comienzo de la incubación (DBO inicial) del nivel al final de la misma (DBO final).

3.3.6. Determinación de DQO (Demanda Química de Oxígeno)

El procedimiento se basa en el método colorimétrico de reflujo utilizando un espectrofotómetro, siguiendo la metodología y los principios proporcionados por el

equipo HACH DR 2800. Antes de iniciar la preparación de las muestras, se configuró el termoreactor a una temperatura de 150 °C. Se procedió a etiquetar de forma adecuada cada solución de digestión correspondiente a las muestras a analizar, incluyendo un blanco que consistirá en agua destilada. Se tomó una alícuota de 1 mL de la muestra y se añadió a la solución de digestión. Posteriormente, se esperó hasta que el equipo alcance la temperatura preestablecida, momento en el cual emitirá una señal sonora indicando su preparación. Una vez que el equipo estuvo listo, se colocaron los tubos de las soluciones en el termoreactor y se ajusta el tiempo a 2 horas. Al finalizar este periodo, las muestras se dejaron enfriar en una gradilla. Mientras las muestras se enfrían, se encendió y configuró el espectrofotómetro para la lectura de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Finalmente, se procedió a realizar la lectura de cada una de las muestras en el espectrofotómetro.

3.3.7. Determinación de Sólidos disueltos

Para determinar los sólidos disueltos totales (SDT) se utilizó un analizador de conductividad marca Hach sensION156. El método se fundamenta en la medición de la intensidad de la corriente eléctrica que fluye a través de los electrodos inmersos en la muestra cuando se aplica un voltaje constante. La conductividad eléctrica está influenciada por la presencia y la concentración de iones disueltos en el líquido, además de la temperatura. Existe una relación aproximada entre la conductividad eléctrica y la concentración de sólidos disueltos, donde 1 parte por millón (ppm) de SDT es aproximadamente igual a 2 microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de conductividad. Así, dividiendo el valor de conductividad medido (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) entre 2, se obtiene una estimación de la concentración de SDT en ppm (Márquez et al., 2024).

3.3.8. Determinación de Oxígeno disuelto

Inicialmente, se procedió a configurar y montar el equipo de medición para la determinación del oxígeno disuelto, asegurando un ajuste preciso de los parámetros pertinentes. Se aguarda el tiempo necesario para que el dispositivo se establezca correctamente, garantizando una base adecuada para las mediciones. Posteriormente, se introdujo la muestra en un vaso de precipitación hasta que la sonda del equipo esté completamente sumergida en el líquido. Una vez que la muestra se ha estabilizado, se lleva a cabo la lectura correspondiente.

3.3.9. Determinación de Nitratos y Sulfatos

El procedimiento se realizó en función a las directrices y principios establecidos por el equipo de espectrofotometría HACH DR 2800. Para iniciar el proceso, se utilizó una pipeta volumétrica para tomar una alícuota de 10 mL de cada una de las muestras y se añadió a tubos de ensayo debidamente etiquetado. A continuación, se añadió un sobre del reactivo en polvo para nitrato pk100 a cada tubo de ensayo. Se esperó un tiempo de aproximadamente 3 minutos. Posteriormente, se procedió a realizar la lectura de nitratos en el equipo de espectrofotometría previamente configurado. Antes de realizar la lectura de cada una de las muestras, se realiza una lectura inicial del blanco, utilizando la muestra original del agua como referencia. Este mismo procedimiento se repite para el análisis de sulfatos, utilizando sobres de reactivo en polvo para sulfato pk 100 y en la configuración del equipo de espectrofotometría.

3.3.10. Determinación de Alcalinidad

Para el método de determinación de la alcalinidad se realizó en base a la técnica cuantitativa, que consiste en el uso de tiras de control para alcalinidad las cuales cubren un rango de 0 a 240 mg/L. El procedimiento se realizó in situ, como primer paso se sumergió las tiras en la muestra de agua y se comparó el color resultante con una escala para determinar la concentración de alcalinidad. Este procedimiento es una alternativa más simple y rápida en comparación a otros métodos.

3.3.11. Determinación de Coliformes Totales y Fecales

Se realizó mediante la técnica del número más probable (NMP), la cual está incluida en la NTE INEN 1529-6, como primer paso se realizó la preparación de las diluciones en tubos de ensayo en donde ya se encuentra listo 9 ml de medio de cultivo, en este caso se preparó 3 diluciones para cada muestra. Luego, se añadió 1ml de cada dilución a los tubos de ensayo y se realizó una breve agitación de cada uno de los tubos de ensayo. Como último paso se llevaron las muestras al horno a $37,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ y se esperó un tiempo aproximado de 72 horas. Luego de este tiempo se observaron los tubos que tengan presencia de gas lo cual nos indicará como ensayo positivo, para seleccionar la combinación de tres dígitos con que se entra a las tablas de NMP se debe tener en cuenta la siguiente regla: Se selecciona la dilución más alta que presenta resultados positivos en los tubos y luego se escogen las siguientes diluciones.

3.4. Determinación de Concentración de Plomo

Para determinar la concentración de plomo en muestras de agua, se utilizó la digestión de muestra seguida de su lectura en el equipo de espectroscopia de absorción atómica. Las muestras fueron recolectadas en puntos estratégicos del río, almacenadas en recipientes limpios y etiquetadas para evitar contaminación cruzada (Batallas Valarezo et al., 2021).

Se colocó 2 ml de ácido nítrico para evitar que no haya proliferación de microorganismos, se homogeneizó la muestra de agua, se tomó 250 ml y se colocó en un vaso de precipitación, se calentó evitando que el agua hierva, luego, se realizó una digestión ácida con HCL y que se reduzca en un 50 % el volumen. Se tapó con una luna para que no haya evaporación, se colocó en un balón de aforo de 250 ml aforando y recuperando el peso. Posteriormente se pasó a las lecturas en espectrofotómetro Perkin Elmer A Analyst 4000 cuyo límite de detección es 0,025 ppm. El análisis se realizó en el laboratorio de CESEMIN de la Universidad de Cuenca.

3.5. Determinación de la ICA NSF

La determinación del Índice de Calidad del Agua según la metodología de la Fundación Nacional de Sanidad (NSF), para esto se utilizó el software ICATest, donde su cálculo se basa en la evaluación de ocho parámetros básicos previamente calculados para determinar la calidad del agua que son: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), oxígeno disuelto (OD), coliformes fecales, nitratos, pH, sólidos disueltos, Sulfatos y turbidez.

Capítulo IV

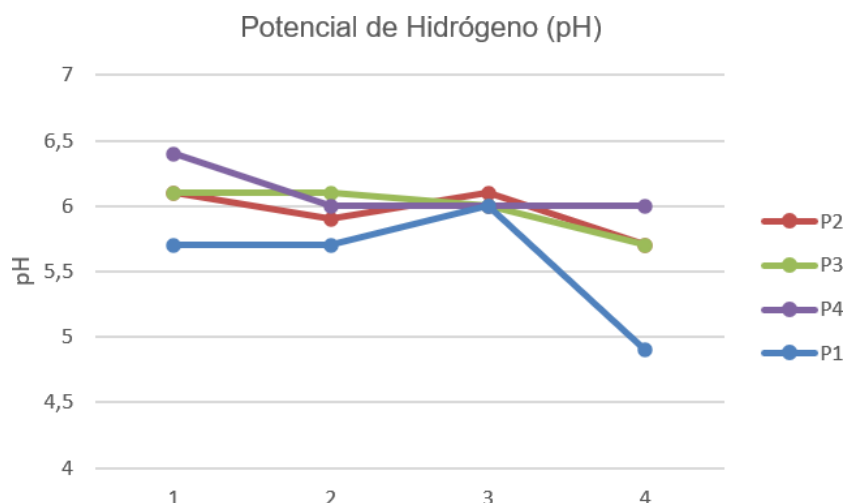
4. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los parámetros fisicoquímicos analizados durante las cuatro semanas de estudio.

4.1. Resultados Parámetros Fisicoquímicos

4.1.1. pH

Figura 2. Valores de pH en las cuatro semanas de muestreo



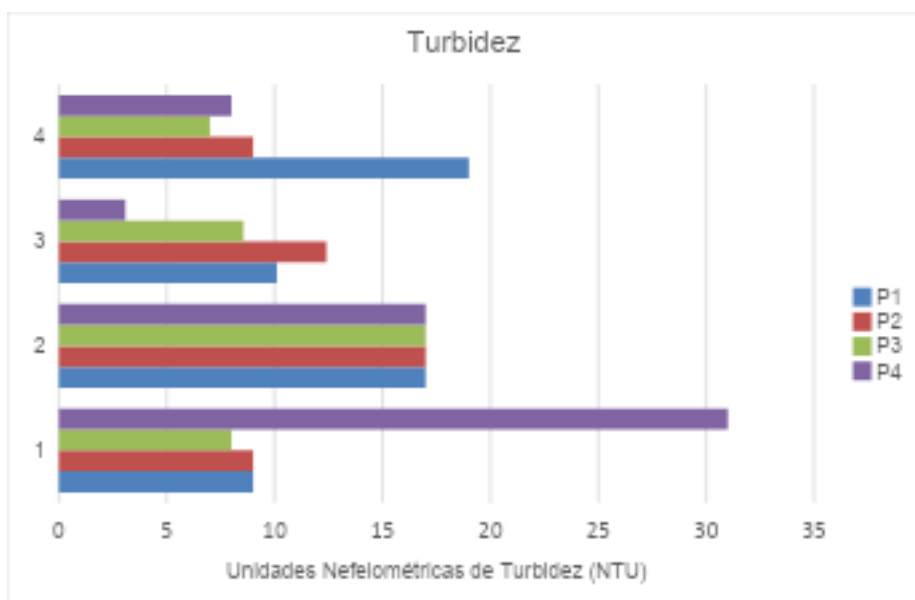
Nota: Elaboración propia.

En la figura 3 se muestran los resultados obtenidos del análisis de pH, estos valores indican que la mayoría de las muestras muestran fluctuaciones relativamente pequeñas en sus valores de pH a lo largo de las semanas. La muestra P1 (Punto cercano a concesiones mineras ilegales) experimenta una variación más pronunciada en la semana 4, donde el pH desciende notablemente. En base a los límites permisibles de pH según el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), que son de 6 a 9, en base a los resultados observados sólo las muestras del P4 (Playa de Zhingate) se mantiene en un pH de 6 a 6.4 cumpliendo con los límites permisibles; mientras que, las muestras del P1, P2 y P3 tienen períodos en los que el pH está por debajo del límite mínimo permisible de 6. Según (Huamaní Ramos & Pacheco Meza,

2019) el cambio del pH se produce principalmente por la capacidad de obstáculo y entradas de sustancias básicas o ácidas en el río.

4.1.2. Turbidez

Figura 3. Valores de Turbidez en los Puntos de Muestreo



Nota: Elaboración propia.

La Figura 4 presenta los resultados de la medición de turbidez en cuatro puntos diferentes del río Santa Bárbara a lo largo de cuatro semanas. La muestra P1, tomada en un punto cercano a concesiones mineras ilegales, muestra una tendencia decreciente en la turbidez, comenzando con un valor de 30 NTU en la semana 1 y disminuyendo consistentemente hasta alcanzar 1 NTU en la semana 4. Esta tendencia podría indicar una reducción en la actividad minera.

Las muestras P2 y P3, correspondientes a puntos cercanos a la concesión minera Curucay y la playa del río Santa Bárbara respectivamente, presentan un comportamiento más variable. Lo cual se puede observar que en la época de lluvias los valores empiezan a disminuir.

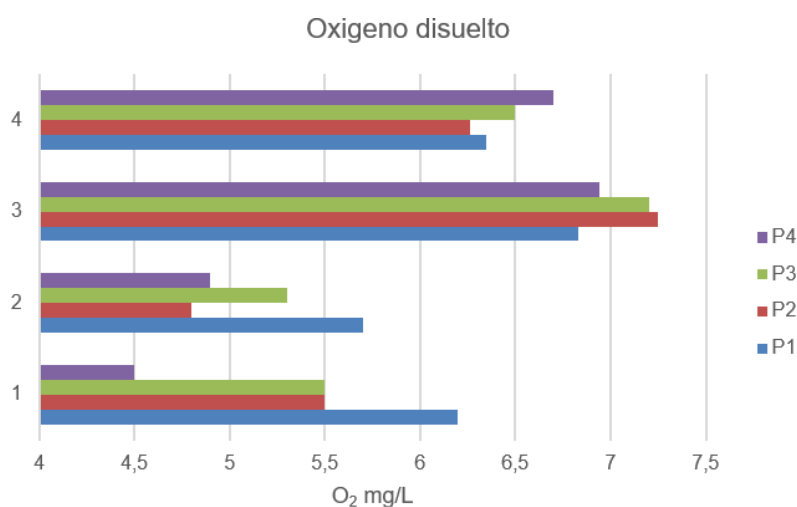
Por otro lado, la muestra P4 exhibe la mayor variabilidad en la turbidez. Inicia con un valor muy alto de 30 NTU en la semana 1, disminuye significativamente a 3.08 NTU en la semana 3, y luego aumenta a 8 NTU en la semana 4. Esta variabilidad podría deberse a eventos específicos como lluvias, actividades agrícolas o ganaderas en la cuenca que incrementa el arrastre de sedimentos al río, o fluctuaciones en las descargas de residuos de actividades cercanas.

En general, los altos valores iniciales de turbidez en P1 y P4 sugieren una influencia significativa de actividades antropogénicas, como la minería en el caso del punto P1, por otro lado, la agricultura y cercanía a una zona urbana en el caso del punto P4, que afectan la calidad del agua del río. La disminución observada en los valores de turbidez hacia la semana 4 en la mayoría de los puntos de muestreo puede indicar una reducción en las fuentes de contaminación o una mejora temporal en las condiciones climáticas del área.

De acuerdo al TULSMA, en este caso según la tabla de criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulce frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuarios no hay un límite permisible en cuanto al parámetro de turbidez. Sin embargo, este parámetro es necesario para el cálculo del índice de calidad del agua.

4.1.3. Oxígeno Disuelto

Figura 4. Valores de Oxígeno Disuelto en los Puntos de Muestreo



Nota: Elaboración propia.

En la figura 5, se muestran los resultados de la medición de oxígeno disuelto, como se puede observar todos los puntos de muestreo en la semana 3 y 4 presentan un aumento de los valores de oxígeno disuelto. El P4 (Playa de Zhingate) muestra los niveles más altos de oxígeno disuelto en comparación con los otros puntos de muestreo, lo que puede indicar menor impacto de actividades mineras o mejores condiciones ambientales. En el P1 (Punto cercano a concesiones mineras ilegales) y P3 (Punto entre las concesiones mineras Curuncay y María Felicia.) tienen niveles

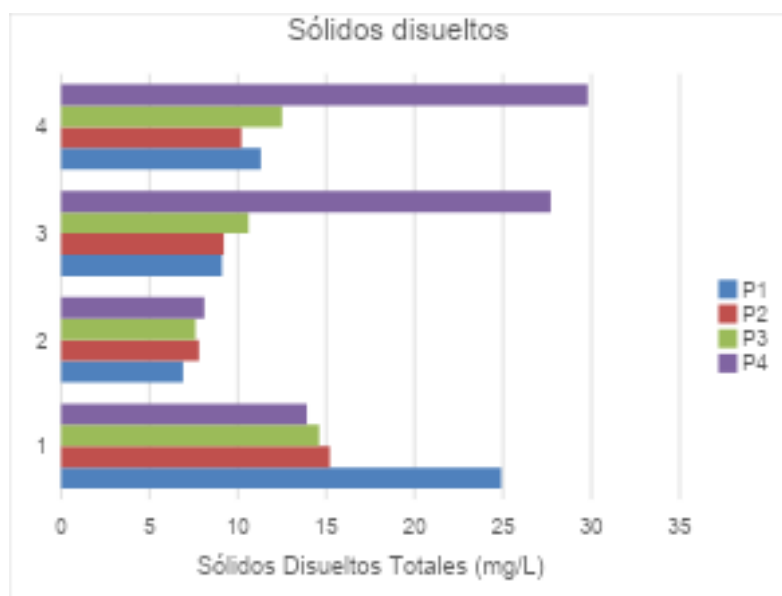
bajos de oxígeno disuelto, lo cual podría estar relacionado con la proximidad a concesiones mineras, especialmente en el caso de P1 que está cerca de concesiones mineras ilegales. De acuerdo con el TULSMA, para la preservación de la flora y fauna, sólo se aceptan niveles de oxígeno disuelto superiores a 6 mg/L. Por lo tanto, en la semana 1 y 2 tenemos valores entre 4.5 a 5.7 que están por debajo del límite establecido.

Investigaciones han demostrado que en aguas estancadas o con bajo movimiento, especialmente cerca de obstáculos como represas o áreas mineras, hay menos intercambio de oxígeno con la atmósfera. Esto resulta en condiciones más anaeróbicas que intensifican el estrés en la vida acuática y reducen la calidad del hábitat para especies sensibles al oxígeno (Chapra et al., 2021)

Según (Posada et al., 2013) un nivel bajo de oxígeno disuelto se puede deber a varios factores como la contaminación orgánica, que aumenta la demanda bioquímica de oxígeno por causa de la biodegradación. Otro factor importante es la temperatura, el bajo movimiento del agua y la contaminación debido a las descargas de aguas residuales o por la presencia de algún tipo de sustancia tóxica.

4.1.4. Sólidos Disueltos

Figura 5. Valores de Sólidos Disueltos en los Puntos de Muestreo



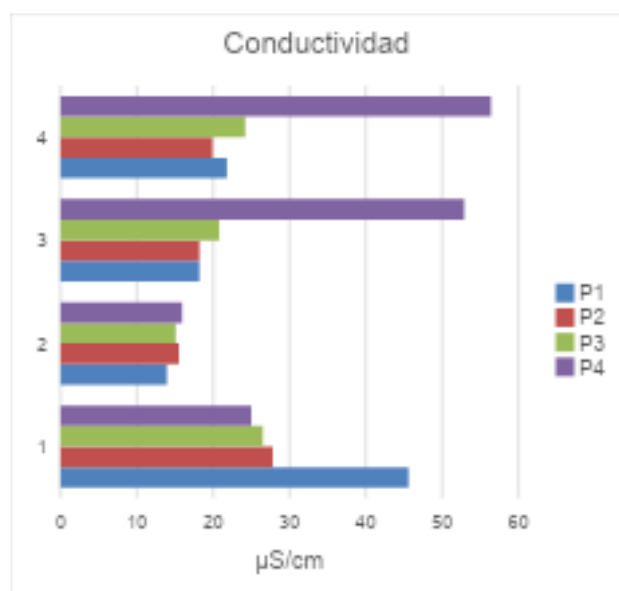
Nota: Elaboración propia.

En la figura 6, se muestran los resultados obtenidos de la medición de sólidos disueltos, como se puede observar el P1 en la primera semana tiene un valor elevado

en comparación a las siguientes semanas donde su valor disminuye significativamente a valores entre 6.9 mg/L y 11.3 mg/L. En cuanto a los puntos P2 y P3 tienen los valores más bajos de sólidos disueltos. El P4 se observa un aumento de sus valores en las últimas semanas. Según TULSMA la cantidad de sólidos disueltos totales deberán estar por debajo de 1000 mg/L, lo que indica que todos los puntos cumplen con los límites permisibles. Si bien dichos valores cumplen con los límites establecidos existen fluctuaciones que se pueden deber a las actividades mineras presentes en la zona en los puntos P1 y P2.

4.1.5. Conductividad

Figura 6. Valores de Conductividad en los Puntos de Muestreo

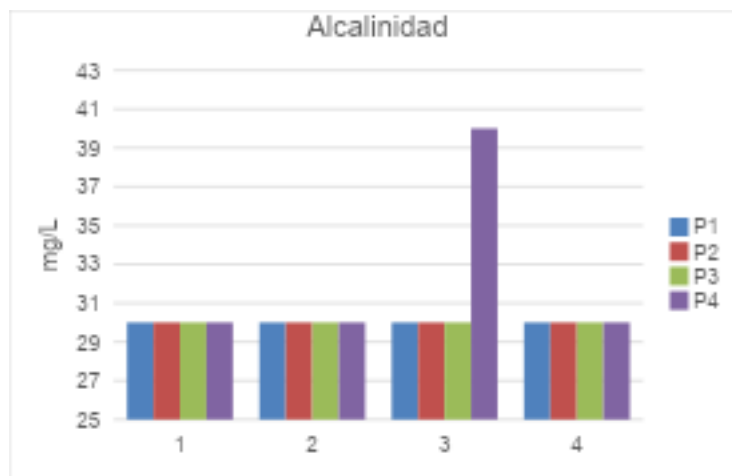


Nota: Elaboración propia.

En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos de la medición de conductividad, estos resultados se observa que en el P1 se muestra una variabilidad en la conductividad, con un valor alto en la semana 1 y una disminución en las siguientes semanas. También se puede observar que, el P2 y P3 tienen una menor variabilidad de su conductividad con valores entre 15 $\mu\text{S/cm}$ y 27 $\mu\text{S/cm}$. En el P4 se observa un gran aumento de sus valores de conductividad en comparación con los otros puntos, llegando hasta una conductividad de 56.4 $\mu\text{S/cm}$. Este parámetro no está regulado en el TULSMA, pero está relacionado con la concentración de sólidos disueltos.

4.1.6. Alcalinidad

Figura 7. Valores de Alcalinidad en los Puntos de Muestreo

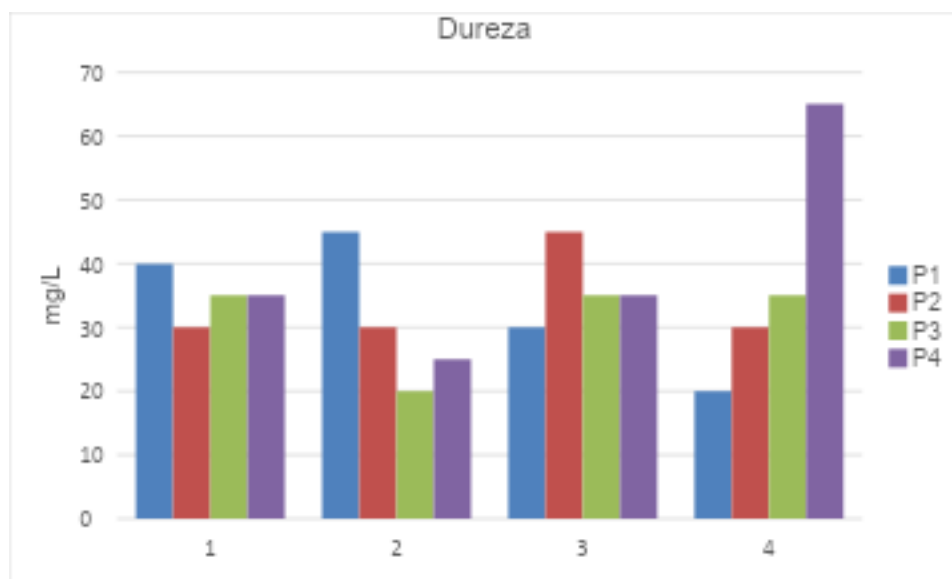


Nota: Elaboración propia.

En la figura 8, se muestran los resultados obtenidos en la medición de alcalinidad, como se observa un valor constante de 30 mg/L en las 4 semanas que se realizó la medición, solo con la excepción del P4, que en la tercera semana se obtuvo un valor de 40 mg/L, el cual se puede considerar como dato atípico. Este parámetro no está regulado en el TULSMA.

4.1.7. Dureza

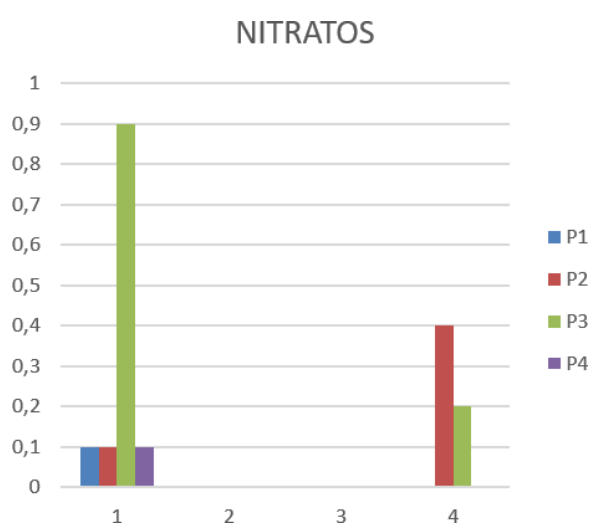
Figura 8. Valores de dureza total en los Puntos de Muestreo



En la figura 9 se muestran los resultados obtenidos en la medición de dureza total, dentro de estos resultados se tienen valores que tienen un comportamiento similar, con excepción del P4 que en la semana 4 que se realizó el análisis aumentó su valor de dureza, aunque existe este aumento todos los valores obtenidos se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos en el TULSMA.

4.1.8. Nitratos

Figura 9. Valores de nitratos totales en los Puntos de Muestreo



Las concentraciones de nitratos en el agua aumentan de manera significativa en ciertos puntos y fechas, especialmente en el punto P3 durante la primera semana y cuarta semana y en el punto P2 durante la cuarta semana. Los valores obtenidos en las muestras de agua del río indican que, en algunos casos, las concentraciones de nitratos pueden aumentar sin salirse de los límites permisibles. Por ejemplo, la primera semana en P3 muestra una concentración de nitratos de 0.9 mg/L, que es significativamente alta en relación al resto, podría indicar una fuente puntual de contaminación. Según los datos presentados, es evidente que, en ciertas semanas y puntos de muestreo, las concentraciones de nitratos aumentan drásticamente. Los picos de nitratos en P1 y P4 podrían estar asociados con el escurrimiento de fertilizantes agrícolas, lo cual es coherente con los hallazgos de estudios previos que señalan la agricultura intensiva como una fuente principal de contaminación por nitratos (Huerta et al., 2023).

En ambientes con bajo flujo y bajas concentraciones de nutrientes como los nitratos, los niveles de oxígeno disuelto (OD) también tienden a reducirse, especialmente en zonas con

alta carga de sedimentos y materia orgánica. La ausencia de nitratos, que en niveles elevados puede fomentar el crecimiento de algas y contribuir a la eutrofización, suele indicar un ecosistema de baja productividad, donde el oxígeno no se reabastece de forma efectiva. En estas condiciones, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se eleva debido a la descomposición bacteriana de la materia orgánica, lo cual agota aún más el OD, un fenómeno acentuado en climas cálidos, donde la solubilidad del oxígeno disminuye y la actividad microbiana se incrementa (Alam et al., 2021).

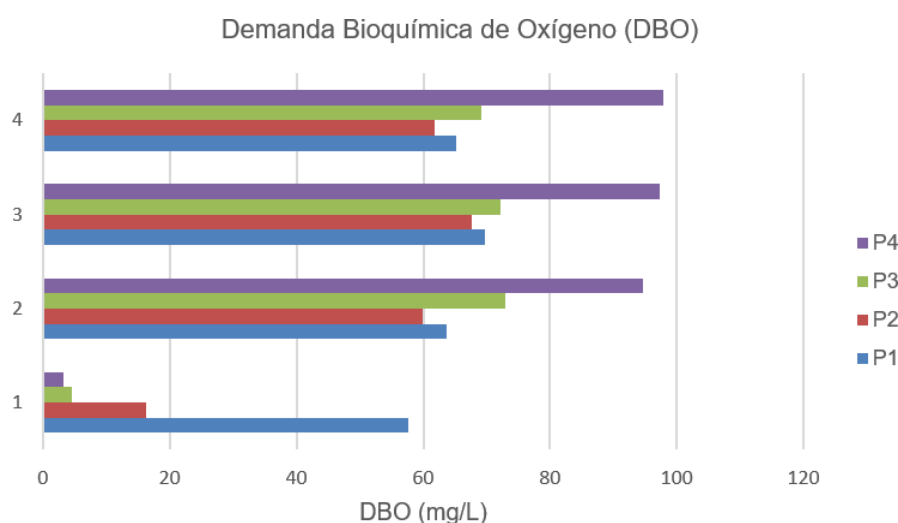
Por otro lado, TULSMA indica que valores para el parámetro Nitrógeno (N-NO_3^-): un rango normal de hasta 5,0 mg/L, un rango aceptable entre 5,0 y 30,0 mg/L, y un rango de alerta para valores superiores a 30 mg/L. En este sentido, las concentraciones obtenidas no superan los límites permitidos por normativa.

4.1.9. Sulfatos

El sulfato no presentó valores de concentración en las muestras tomadas, lo que nos muestra que existe una cantidad mínima que no podía ser detectada por la curva de calibración. La presencia mínima de este reactivo puede deberse a la baja presencia natural de sulfatos, la falta de fuentes antropogénicas cercanas y los procesos naturales de filtración que pueden limitar la presencia de sulfatos en el agua de escorrentía superficial (Huerta et al., 2023). El TULSMA indica que los límites de descarga para los sulfatos (SO_4^{2-}) en un cuerpo de agua dulce son de 1000 mg/L. Dada la inexistencia de valores detectables, este parámetro fisicoquímico se encuentra muy por debajo de ser un punto grave de contaminación, asegurando así la calidad del agua en términos de sulfatos.

4.1.10. DBO

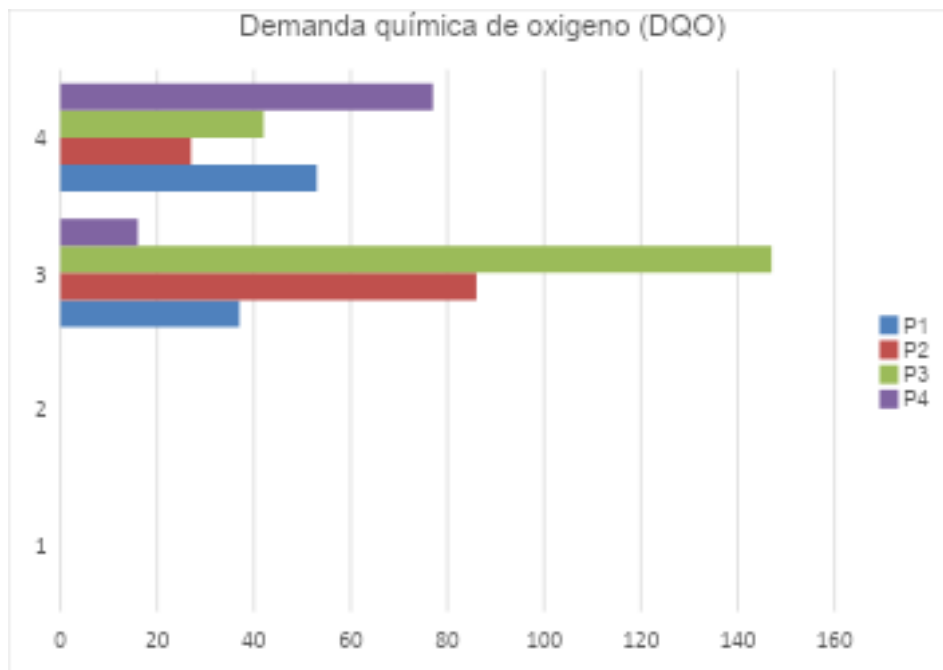
Figura 10. Valores totales en los Puntos de Muestreo



Las concentraciones de DBO en el agua muestran variaciones significativas en diferentes puntos y fechas de muestreo, destacando incrementos notables en P4 durante la tercera y cuarta semana con valores de hasta 97,8 mg/L. Estos picos sugieren la posible presencia de fuentes puntuales de contaminación orgánica, como vertidos industriales o aguas residuales domésticas, especialmente en P3 y P4. Aunque los valores elevados no exceden los límites críticos de la normativa vigente, indican una carga orgánica significativa que podría afectar negativamente la calidad del agua y el oxígeno disponible para la vida acuática. Identificar y controlar estas fuentes de contaminación es crucial para mantener la calidad del agua dentro de los límites permisibles y proteger los ecosistemas acuáticos. Este parámetro no está reglamentado por el TULSMA.

4.1.11. DQO

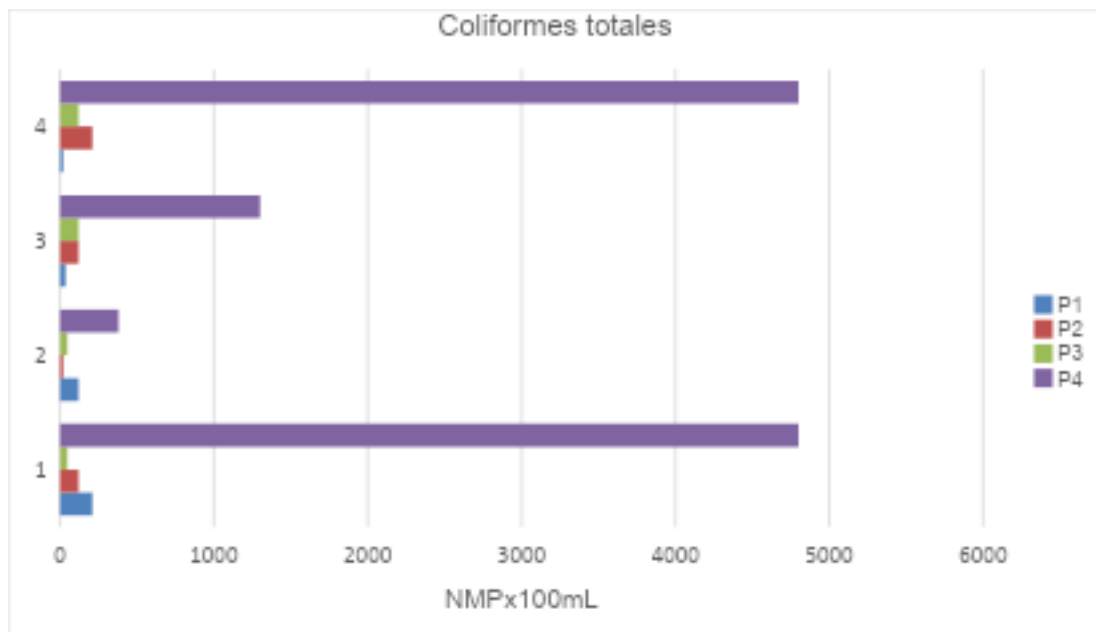
Figura 11. Valores de Demanda química de oxígeno en los Puntos de Muestreo



Las concentraciones de demanda química de oxígeno en los diferentes puntos y fechas de muestreo indican variaciones considerables, con incrementos significativos en puntos específicos como P3 y P4. Estos picos sugieren la presencia de fuentes importantes de materia orgánica y otros compuestos oxidables, potencialmente derivados de descargas industriales o agrícolas. Aunque los valores registrados se mantienen dentro de los límites permisibles según la normativa, la presencia recurrente de concentraciones elevadas en ciertos puntos resalta la necesidad de monitorear y gestionar estas fuentes de contaminación.

4.1.12. Coliformes Totales

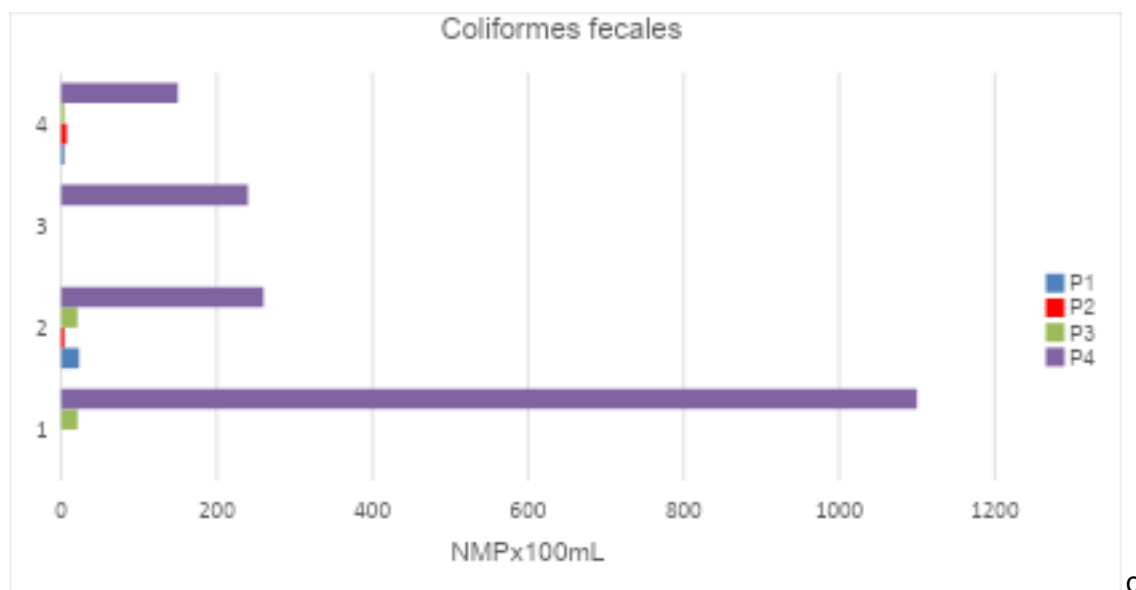
Figura 12. Valores Coliformes Totales los Puntos de Muestreo



Las concentraciones de coliformes totales varían significativamente en diferentes puntos y fechas de muestreo, observándose picos destacados en P4 durante la primera y cuarta semana, alcanzando 4800 NMP/100 ml. Esto sugiere una fuente recurrente de contaminación fecal, posiblemente vinculada con descargas de aguas residuales sin tratar, escorrentía agrícola con estiércol o infiltración de aguas residuales urbanas. Es esencial mantener estas concentraciones por debajo de los límites establecidos para garantizar la seguridad del agua. El TULSMA establece un límite para los Coliformes Totales en NMP/100 ml de 20000, resaltando la importancia del monitoreo continuo y la implementación de medidas efectivas de gestión ambiental para cumplir con estas regulaciones y proteger la salud comunitaria. Por lo tanto, aunque se detecten coliformes, estos se encuentran dentro de los límites permitidos.

4.1.13. Coliformes Fecales

Figura 13. Valores Coliformes Fecales en los Puntos de Muestreo



Los valores muestran una alta presencia de coliformes fecales en los puntos P3 y P4 durante todas las semanas, mientras que en las semanas 2 y 4 se detecta presencia de coliformes en todos los puntos. Esto tiene sentido, ya que los puntos P3 (Playa Río Santa Bárbara) y P4 (Playa de Zhingate) están más cerca de la ciudad y están más expuestos a la contaminación por desechos humanos, entre otros factores. El TULSMA establece un límite de calidad de 2000 NMP/100 mL. Ningún valor supera este límite, lo que indica que la calidad del agua es buena y aceptable.

4.2. Análisis de concentración de Plomo

Las muestras recogidas durante la primera semana fueron analizadas, y los resultados no revelaron la presencia de plomo. De manera similar, los análisis de las muestras recolectadas en la segunda semana también resultaron negativos. En general, las concentraciones de plomo en ninguno de los puntos de muestreo fueron detectables, ya que los valores se mantuvieron por debajo del límite de detección (0,025 ppm).

Según las normativas internacionales, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece un límite máximo de plomo en el agua potable de 0,1 partes por millón (ppm) (OMS, 2017). Por su parte, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos fija un nivel de acción de 0,15 ppm para el plomo en agua potable (EPA, 2020). En el contexto de este estudio, las concentraciones no detectables (N.D.) de plomo en las muestras del río Santa Bárbara están por debajo de estos estándares, lo que indica la ausencia de contaminación

significativa por plomo. A nivel nacional, las normativas ecuatorianas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) también establecen un límite de 0,1 ppm para el plomo en el agua destinada al consumo humano (INEN 1108, 2014). Según el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), el límite máximo permitido para la descarga de plomo (Pb) en ríos es de 0,2 ppm, valor que busca prevenir la contaminación y proteger la calidad del recurso hídrico para diversos usos.

4.3. ICA NSF

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del programa ICATest para los parámetros pH, Oxígeno disuelto, Nitratos, Turbidez, Coliformes fecales y Nitratos.

Tabla 5. Resultados del Análisis del índice de Calidad de Agua P1 Punto cercano a la concesión San Sebastián.

Fecha de Muestreo	Valor del Índice	Calidad	Color
Semana 1 03/03/2024	69.02	Media	
Semana 2 10/03/2024	58.05	Media	
Semana 3 17/03/2024	71.79	Buena	
Semana 4 24/03/2024	60.31	Media	

Fuente: datos obtenidos de ICATest.

Tabla 6. Resultados del Análisis del índice de Calidad de Agua P2 Punto cercano a concesión minera Curucay.

Fecha de Muestreo	Valor del Índice	Calidad	Color
Semana 1 03/03/2024	70.09	Media	
Semana 2 10/03/2024	58.86	Media	
Semana 3 17/03/2024	72.57	Buena	
Semana 4 24/03/2024	64.36	Media	

Fuente: datos obtenidos de ICATest.

Tabla 7. Resultados del Análisis del índice de Calidad de Agua P3 Punto entre las concesiones mineras Curuncay y María Felicia

Fecha de Muestreo	Valor del Índice	Calidad	Color
Semana 1 03/03/2024	69.21	Media	
Semana 2 10/03/2024	57.96	Media	
Semana 3 17/03/2024	72.96	Buena	
Semana 4 24/03/2024	66.81	Media	

Fuente: datos obtenidos de ICATest.

Tabla 8. Resultados del Análisis del Índice de Calidad de Agua P4 Playa de Zhingate.

Fecha de Muestreo	Valor del Índice	Calidad	Color
Semana 1 3/03/2024	56.6	Media	
Semana 2 10/03/2024	50.18	Media	
Semana 3 17/03/2024	60.77	Media	
Semana 4 24/03/2024	60.03	Media	

Fuente: datos obtenidos de ICATest.

Los resultados del Índice de Calidad del Agua (ICA NSF) para el río Santa Bárbara muestran una variabilidad en la calidad del agua en diferentes puntos de muestreo.

En la Tabla 5, correspondiente al punto cercano a la concesión San Sebastián, los valores del índice oscilaron entre 58.05 y 71.79, indicando una calidad del agua media en todos los puntos de muestreo. Aunque la mayoría de los valores muestran una calidad de agua media, durante la tercera semana (17/03/2024) se registra una mejora significativa con un índice de 71.79, clasificado como buena calidad. Esta mejora podría atribuirse a las lluvias asociadas al Fenómeno de El Niño, que estuvo activo en marzo de 2024. Según el Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada (INOCAR), el evento provocó precipitaciones de intensidad variable en varias regiones, incluida Azuay, especialmente cerca de las estribaciones de la cordillera (INOCAR, 2024).

En el punto P2 (Tabla 6), cercano a la concesión minera Curucay, los valores del ICA también varían en un rango similar (58.86 - 72.57). Al igual que en el primer punto, se observa un incremento en la calidad del agua durante la tercera semana, alcanzando una clasificación de "buena". La comparación entre estas tablas señala que, aunque la actividad minera podría estar contribuyendo en cierta medida a la calidad media del agua, no se observa un deterioro significativo en los puntos evaluados. De acuerdo con Quiroz Fernández et al. (2017), el índice de calidad del agua puede experimentar variaciones debido a vertimientos a lo largo del curso del río. Sin embargo, estos cambios también

podrían estar relacionados con la capacidad natural del sistema para recuperar sus propiedades y condiciones originales tras haber sido afectado por agentes contaminantes.

El punto P3 (Tabla 7), ubicado en la Playa del río Santa Bárbara, muestra un comportamiento similar con los puntos anteriores en cuanto a la calidad del agua. En la tercera semana de monitoreo, el índice de calidad alcanzó su valor más alto, con 72,96, el mayor registrado en todos los puntos de muestreo. Este incremento puede estar relacionado con la disminución temporal de actividades contaminantes, lo cual coincide con estudios previos, donde la reducción de vertidos y el aumento de caudal por lluvias pueden facilitar una mayor capacidad de dilución de contaminantes y autodepuración en las zonas afectadas (Pacheco, 2024; Gamarra, 2019). Este comportamiento indica que, a pesar de la contaminación en la zona, el río Santa Bárbara aún presenta una capacidad de recuperación significativa en su calidad de agua (Gamarra, 2019). Además, la presencia de vegetación acuática y la acción de microorganismos en esta área pueden estar contribuyendo a la mejora de los niveles de oxígeno disuelto y la reducción de la materia orgánica (Gamarra, 2019).

Finalmente, en la Tabla 8, correspondiente a la playa de Zhingate, se observa que los valores del ICA fluctúan entre 50.18 y 60.77. De todas las estaciones de muestreo, ésta es la que presenta los valores más bajos. Esto podría apuntar a una fuente continua de contaminación en la zona, quizá causada por vertidos naturales o antropogénicos que tienen un efecto perjudicial sobre la calidad del agua. Otros estudios han identificado el impacto de prácticas como la agricultura, la cría de ganado y los vertidos residuales como uno de los principales contribuyentes al deterioro de la calidad del agua. Indicadores como el Índice de Integridad Biótica (IBI), que indicaron un mal estado de la calidad debido a las actividades antropogénicas en las inmediaciones del río, han demostrado que las actividades humanas, como el vertido de aguas grises y la agricultura intensiva, contribuyen a la mala calidad del agua en el caso del río Carrizal (Chancay & Ureta, 2018).

La mejora de la calidad de agua en la tercera semana, cuando los tres primeros puntos de muestreo (P1, P2 y P3) alcanzan índices categorizados como «buenos», es una evolución notable. Numerosas razones podrían estar relacionadas con esta tendencia. Entre las más probables está el impacto de las lluvias estacionales, que durante la semana 3 habrían impulsado el caudal del río y favorecido la dilución de los contaminantes en el agua. Además, es factible que una breve interrupción de las actividades humanas que contaminan el medio ambiente, como la minería o la agricultura, hiciera posible que mejorara la calidad del agua. También es importante tener en cuenta el potencial de regeneración natural del río

Santa Bárbara, sobre todo en las regiones con mayor caudal de agua y niveles de oxigenación, ya que esto ayuda a la autodepuración del ecosistema acuático.

La literatura científica ha documentado ampliamente este proceso de autodepuración. La dilución de los contaminantes, la sedimentación bacteriana y la actividad de los microorganismos que descomponen los materiales orgánicos son necesarios para los procesos de regeneración natural de los ríos. El aumento del caudal durante las crecidas favorece la autodepuración, lo que eleva la calidad del agua. Se ha observado que las bacterias son esenciales para la descomposición de los contaminantes, que se produce con mayor eficacia en entornos con altas concentraciones de oxígeno y más turbulentos (Luna et al., 2002). Estos factores, al igual que la mayor capacidad de autolimpieza en las zonas de mayor caudal, explican el aumento de la calidad del agua observado en los puntos de muestreo durante la tercera semana.

Capítulo V

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Los análisis de la calidad del agua en los cuatro puntos de muestreo mostraron pequeñas variaciones en algunos parámetros físicoquímicos, considerando que los valores de pH y sólidos disueltos en algunos casos excedieron los límites permisibles establecidos por el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA). A pesar de ello, a lo largo de las cuatro semanas de muestreo, otros indicadores como la turbidez, la dureza y los sólidos disueltos se mantuvieron dentro de los límites normativos, lo que indica que la mayoría de los lugares examinados tenían una calidad de agua aceptable.
- A pesar de las variaciones existentes de algunos parámetros, los valores de dureza, turbidez y sólidos disueltos se mantuvieron en las cuatro semanas de muestreo, dentro de los límites permisibles establecidos por el TULSMA, lo cual es un indicador positivo con relación a la calidad del agua en los puntos de muestreo analizados.
- Se observó una mayor presencia de coliformes fecales en el punto 4, ubicado en el pueblo de Sigsig, en comparación con los otros puntos de muestreo. Esto nos indica una posible contaminación fecal en esta área, lo cual puede estar relacionado con actividades antropogénicas locales, como el manejo inadecuado de aguas residuales o de la ganadería, cerca de la zona de muestreo.
- Los resultados del Índice de Calidad de Agua (ICA-NSF) reflejan una variabilidad en la calidad del agua en los diferentes puntos de muestreo. Esto se debe tanto a las actividades humanas, la minería y la agricultura, como a factores naturales como las precipitaciones estacionales, que favorecen la dilución de contaminantes. Durante la semana de mayor caudal, el río Santa Bárbara mostró un notable potencial de autodepuración. En este periodo, la calidad del agua mejoró en tres de los cuatro lugares evaluados, alcanzando índices de buena calidad. Este fenómeno está respaldado por la literatura científica, que destaca el papel de la sedimentación bacteriana y la actividad de microorganismos en la regeneración de los ecosistemas acuáticos.
- Los niveles de plomo en el agua estuvieron por debajo del límite de detección del método utilizado y de los estándares nacionales e internacionales, lo que sugiere

que la actividad minera no ha causado contaminación por plomo en el río Santa Bárbara durante el período evaluado.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar estudios adicionales más detallados de la calidad del agua con enfoque más cercano a las zonas mineras existentes en zonas más alejadas donde se realizó este estudio y durante un periodo de tiempo más extenso.
- Se recomienda realizar un análisis de otros contaminantes como el cadmio, mercurio y arsénico, los cuales también son comunes en zonas mineras.
- Si bien no se observan impactos críticos en las áreas cercanas a las concesiones mineras, es fundamental continuar con un monitoreo constante para evitar que la actividad minera se convierta en una fuente de contaminación significativa en el futuro.

Referencias

- Alam, M. S., Han, B., Gregg, A., & Pichtel, J. (2021). Nitrate and biochemical oxygen demand change in a typical Midwest stream in the past two decades. *H2Open Journal*, 3(1), 519-536. <https://doi.org/10.2166/h2oj.2020.054>
- APHA (American Public Health Association). (2022). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2014). *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua*. Registro Oficial Suplemento 305 de 06-ago.-2014. Quito, Ecuador.
- Azcue, J. M., & Nriagu, J. O. (2006). Arsenic and metal contamination of water resources: Occurrence, impact, and remediation. *Journal of Water and Health*, 4(1), 129-157.
- Batallas Valarezo, M., Preciado Alvarado, M., & Pesantez Franco, F. (2021). Evaluación de cadmio y plomo en almendras de cacao por espectroscopia de absorción atómica. *Ciencia Unemi*, 14(37), 49–59. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol14iss37.2021pp49-59p>
- Chapra, S.C., Camacho, L.A., & McBride, G.B. (2021). Impact of Global Warming on Dissolved Oxygen and BOD Assimilative Capacity of the World's Rivers: Modeling Analysis. *Water*, 13(17), 2408. Disponible en: [https://doi.org/10.3390/w13172408​:contentReference\[oaicite:0\]{index=0}](https://doi.org/10.3390/w13172408​:contentReference[oaicite:0]{index=0})
- Célleri, R., Crespo, P., Mosquera, G., Ochoa-Sánchez, A., & Pesántez, J. (2023). *Hidrología de los páramos en el Ecuador*. USFQ Press.
- Guerrero Legarreta, M. (2023). *El agua*. 1-178.
- COPOE, UDA. (2005). Caracterización territorial de las subcuencas de los ríos: Collay, Cuenca, Jadán, Juval, Magdalena, Mazar, Paute, Pindilig, Pulpito y Santa Bárbara pertenecientes a la cuenca hidrográfica del río Paute mediante imágenes satélite. UDA. IERSE. 58 p. Ecuador.
- Chancay, R. A., & Ureta, J. A. (2018). Relación entre las actividades antropogénicas y la calidad de agua del río Carrizal, sitio El Limón, utilizando bivalvos como bioindicadores. *Revista de Ciencias Agropecuarias ALLPA*, 1(1), 14-19.

- Charron, D., Fleury, M., Lindsay, L. R., Ogden, N., & Schuster, C. J. (2008). The impacts of climate change on water-, food-, vector- and rodent-borne diseases. *Human Health in a Changing Climate*, 171-194.
- Chen, H., Rücker, A. M., Su, Q., Blosser, G. D., Liu, X., Conner, W. H., & Chow, A. T. (2020). Dynamics of dissolved organic matter and disinfection byproduct precursors along a low elevation gradient in woody wetlands—an implication of hydrologic impacts of climate change on source water quality. *Water Research*, 115908.
- Das, N., Mahanta, C., & Kumar, M. (2020). Water quality under the changing climatic condition: a review of the Indian scenario. En *Emerging Issues in the Water Environment during Anthropocene* (pp. 31-61). Springer, Singapore.
- Delpla, I., Jung, A. V., Baures, E., Clement, M., & Thomas, O. (2009). Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environment International*, 35(8), 1225-1233.
- Duarte, Z. V. M., Pérez, H. V. S., Hernández, A. E., & Villanueva, M. A. (2020). Estudio exploratorio de la acumulación de plomo y cobre en *Prosopis laevigata* en depósitos mineros Exploratory study of lead and copper accumulation in *Prosopis laevigata* in mine tailings. 7(2), 1–7. <https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2311>
- Espinoza, K., Pozo, W., Macas, V., & Sánchez, J. (2022). Situación actual del Río Jubones en el Ecuador, un análisis de los metales traza, calidad y parámetros fisicoquímicos del agua. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 4(2), 292–307.
- ETAPA EP. (2023). *Conservación y manejo de áreas protegidas municipales*.
- Fernandes, A. (2023, noviembre 28). Ciclo del Agua: Qué es y Cuáles son sus Etapas. *Enciclopedia Significados*. <https://www.significados.com/ciclo-del-agua/>
- Fernández, L. S. Q., Kulich, E. I., & Gutiérrez, C. M. (2017). Aplicación del índice de calidad de agua en el río Portoviejo, Ecuador. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38(3), Article 3.
- Gamarra, M. C. (2019). *Determinación de la capacidad de autodepuración del río Huallaga; en el tramo que comprende el Puente Joaquín Garay, hasta el Puente Rancho, con*

base al balance de oxígeno disuelto - Amarilis - Huánuco, 2019. Universidad de Huánuco.

Garay, J., G. Ramírez, J. Betancourt, B. Marín, B. Cadavid, L. Panizzo, L. Lesmes, J.E. Sánchez, H. Lozano y A. Franco. 2003. Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos: aguas, sedimentos y organismos. INVEMAR.

Huamaní Ramos, J. L., & Pacheco Meza, H. (2019). *Sistema electrónico para la caracterización en tiempo real del potencial de hidrógeno del río Opamayo en el valle de Pampas-Tayacaja.*

Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2014). *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108: Agua para consumo humano. Requisitos.*

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2015). *NTE INEN 1529-6: Control microbiológico de los alimentos. Determinación de microorganismos coliformes por la técnica del número más probable.*

Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada. (2024, marzo 7). *Análisis de situación por evento ENOS Nro. 010-2024.* Comité ERFEN.

Luna, D. S., Salusso, M. M., & Moraña, L. B. (2002). *Procesos de Autodepuración en Ríos y Embalses del Noroeste Argentino (Salta y Tucumán).* Congreso Regional de Ciencia y Tecnología NOA 2002, Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Catamarca.

Lojano Guapacasa, L. E., & Lucero Mosquera, G. A. (2011). *Estado de la calidad físico-químico, bacteriológico y biológico del agua, de la subcuenca del río Santa Bárbara, en una estación climática, cantones Sigsig, Chordeleg y Gualaceo, provincia del Azuay – Ecuador.* Universidad del Azuay(08089).

Martínez Gavilanes, J. M. (2012). Diagnóstico del inventario de recursos hídricos en la provincia del Azuay. Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado de dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/3680.

Márquez, E. Y. C., Astocaza, L. L. H., Huamaní, M. L. C., Huamán, W. S., Suazo, J. M. A., & Contreras, C. M. B. (2024). Sólidos totales disueltos en agua superficial para

- consumo humano en San Juan de Pillo, Perú. *Revista Alfa*, 8(24), Article 24.
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i24.310>.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). *Guidelines for drinking-water quality*. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>.
- Pacheco, Z. (2024). *Autodepuración natural del río Huaura*. Universidad Técnica, Tesis.
- Patil, P. N., Sawant, D. V., & Deshmukh, R. N. (2012). Physico-chemical parameters for testing of water—A review. *International journal of environmental sciences*, 3(3), 1194-1207.
- Peña, E. P. (2007). Calidad de Agua- Oxígeno Disuelto. Escuela Superior Politecnica Del Litoral.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6162/5/Investigacion.pdf>
- Perez Lopez, J., & Mariscal Larrubia, A. (1999). Coagulación y floculación. Cap. 11 de *Estudio sanitario del agua*. Pérez López. J. A. y Espigares García M. (eds). Editorial Universidad de Granada, Granada, pp. 205-224.
- Quiroz Fernández, L. S., Izquierdo Kulich, E., & Menéndez Gutiérrez, C. (2017). Aplicación del índice de calidad de agua en el río Portoviejo, Ecuador. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38(3), 41-51.
- Rafael, M. G. (2019). *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos: Tratamiento y control de calidad de aguas*. Ediciones Díaz de Santos.
- Ramos-Ortega, L. M., Vidal, L. A., Vilardy, S., & Saavedra-Díaz, L. (2008). Análisis de la contaminación microbiológica (coliformes totales y fecales) en la bahía de Santa Marta, Caribe colombiano. *Acta Biológica Colombiana*, 13(3), 85-96.
- Rea Toapanta, A. R. (2017). Política minera y sostenibilidad ambiental en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 4(2), 41-52.
<https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.68>.

- Robledo-Hernandez, J. A. (2022). Evaluación del Índice de Calidad de Agua ICA-NSF en las microcuencas del Parque Nacional Río Dulce como herramienta en la gestión integral del manejo sustentable, Livingston, Izabal, Guatemala, Centroamérica. *Revista Tecnología en Marcha*, 36(1), Pág. 106-116.
<https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.6241>.
- Rodríguez Miranda, J. P., Serna Mosquera, J. A., & Sánchez Céspedes, J. M. (2016). Índices de calidad en cuerpos de agua superficiales en la planificación de los recursos hídricos. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 8(1), 159-167.
<https://doi.org/10.22335/rict.v8i1.306>
- Rusydi, A. F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019>
- Saravia Solares, P. C. A. (2017). Determinación De Los Índices De Calidad Del Agua Ica-Nsf Para Consumo Humano De Los Ríos Teocinte Y Acatán, Que Abastecen La Planta De Tratamiento De Agua Santa Luisa Zona 16, Guatemala. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 12(1), 13–18. <https://doi.org/10.36829/08asa.v12i1.1424>.
- Severiche, C. A., & González, H. (2012). Evaluación analítica para la determinación de sulfatos en aguas por método turbidimétrico modificado. *Ingenierías USBMed*, 3(2), Article 2. <https://doi.org/10.21500/20275846.269>
- Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., Mora-Alvarado, D., Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 35-46. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>
- Smith, L. S., & Sainato, C. M. (2016). Mining pollution: The case of the Baguio Mining District, the Philippines. *Journal of Environmental Protection*, 7(6), 820-832.
- Strang, V. (2020). *The Meaning of Water*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003087090>
- Tarras-Wahlberg, N. H., Flachier, A., Lane, S. N., & Sangfors, O. (2001). Heavy metal leaching from mine tailings as affected by atmospheric acidification and climate change. *Water, Air, & Soil Pollution*, 130(1-4), 165-170.

- TULSMA. (2017). *Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*, TULSMA. Registro Oficial Edición Especial 2 de 31-Mar.-2003, 3399, 407. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>
- Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobhal, R. (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of water resources*, 1(3), 34-38.
- Universidad de las Américas. (2024). *Agua y ciudad: Hacia una política integral y sostenible del recurso hídrico en Cuenca – Ecuador*. Quito: Universidad de las Américas.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2020). *National Primary Drinking Water Regulations for Lead and Copper*. <https://www.federalregister.gov/d/2023-26148>
- Villamar Marazita, K., Zambrano Anchundia, J., Aguilar, C., Filian, K., Flores, N., Romero Crespo, P., & Garcés, D. (2023). Heavy metal pollution assessment in surface and groundwater in the Ponce Enríquez mining area, Ecuador. <https://laccei.org/LACCEI2023-BuenosAires/meta/FP493.html>
- Valencia, F. (2017). *Zonificación de contaminación por metales pesados en San Bartolomé*. Eje 2 Recursos naturales, ambiente y cambio climático Ponencia 11. 133–138. Universidad del Azuay.

Anexos

Anexo A. Ubicación de la Muestra - Punto 4 (Playa de Zhingate)



Anexo B. Ubicación de la Muestra - Punto 2 (Punto entre las concesiones mineras Curuncay y Maria Felicia)



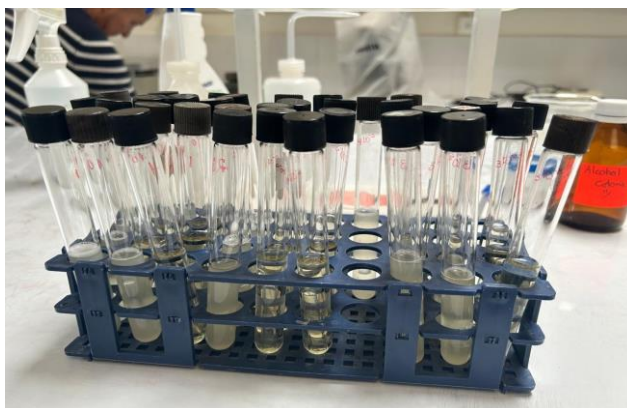
Anexo C. Ubicación de la Muestra - Punto 3 (Punto cercano a la concesión Curuncay.)



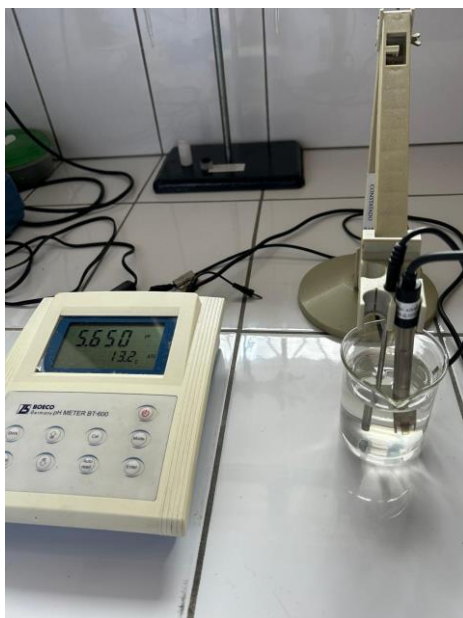
Anexo D. Ubicación de la Muestra - Punto 1 (Punto cercano a la concesión San Sebastián)



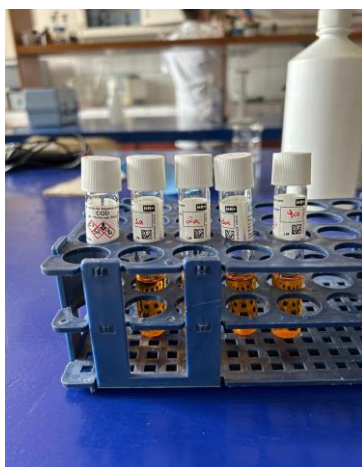
Anexo E. Fotografía de Muestras para Determinación de Coliformes Totales



Anexo F. Lectura de pH en Muestras de Agua



Anexo G. Fotografía de Muestras para Determinación de DQO



Anexo H. Determinación de Oxígeno Disuelto en Muestras de Agua.



Anexo I. Equipo para Determinación de Sólidos Disueltos y Conductividad.



Anexo J. Fotografía del Cambio de Color en Titulación para Determinación de Dureza



Anexo K. Fotografía del Proceso de Determinación de DBO.



Anexo L. Fotografía del Proceso de Determinación de Sólidos Disueltos.



Anexo L. Muestras Preparadas para Determinación de DBO.



Anexo M. Muestra Positiva de Coliformes Fecales.



Anexo N. Tabla de sistema de siembra: número más probable e intervalo de confianza

Numero de tubos que dan una reacción positiva con			NMP en 100mL	Limite de confianza al 95%	
3 tubos de 10ml	3 tubos de 1ml	3 tubos de 0,1ml		Limite inferior	Limite superior
0	0	1	3	< 0,5	9
0	1	0	3	< 0,5	13
1	0	0	4	< 0,5	20
1	0	1	7	1	21
1	1	0	7	1	23
1	1	1	11	3	36
1	2	0	11	3	36
2	0	0	9	1	36
2	0	1	14	3	37
2	1	0	15	3	44
2	1	1	20	7	89
2	2	0	21	4	47
2	2	1	28	10	149
3	0	0	23	4	120
3	0	1	39	7	130
3	0	2	64	15	379
3	1	0	43	7	210
3	1	1	75	14	230
3	1	2	120	30	380
3	2	0	93	15	380
3	2	1	150	30	440
3	2	2	210	35	470
3	3	0	240	36	1300
3	3	1	460	71	2400
3	3	2	1100	150	4800

Anexo O. *Parámetros Fisicoquímicos de Cuatro Puntos de Muestreo en el Río Santa Bárbara durante 4 semanas.*

MUESTREO 03 de marzo 2024				
Parámetros fisicoquímicos	P1	P2	P3	P4
<i>Ph</i>	5.7	6.1	6.1	6.4
<i>Turbidez (NTU)</i>	9	9	8	31
<i>Oxígeno disuelto (mg/L)</i>	6.2	5.5	5.5	4.5
<i>Sólidos disueltos (mg/L)</i>	24.9	15.2	14.6	13.9
<i>Conductividad (μS/cm)</i>	45.6	27.8	26.5	25
<i>Alcalinidad</i>	30	30	30	30
<i>Dureza</i>	40	30	35	35
<i>Nitratos</i>	0.1	0.1	0.9	0.1
<i>Sulfatos</i>	0	0	0	0
<i>DBO</i>	57.6	16.3	4.6	3.3
<i>DQO</i>	0	0	0	0
<i>Coliformes totales (NMPx100mL)</i>	210	120	47	4800
<i>Coliformes fecales</i>	Negativo	Negativo	21	1100

Nota: Elaboración propia

Muestreo 10 de marzo 2024				
Parámetros fisicoquímicos	P1	P2	P3	P4
<i>pH</i>	5.7	5.9	6.1	6
<i>Turbidez (NTU)</i>	17	17	17	17
<i>Oxígeno disuelto (mg/L)</i>	5.7	4.8	5.3	4.9
<i>Sólidos disueltos (mg/L)</i>	6.9	7.8	7.6	8.1
<i>Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)</i>	13.94	15.51	15.09	15.93
<i>Alcalinidad</i>	30	30	30	30
<i>Dureza</i>	45	30	20	25
<i>Nitratos</i>	0	0	0	0
<i>Sulfatos</i>	0	0	0	0
<i>DBO</i>	63.76	59.84	72.91	94.6
<i>DQO</i>	0	0	0	0
<i>Coliformes totales (NMP x 100mL)</i>	120	20	47	380
<i>Coliformes fecales</i>	23	4	21	260

Nota: Elaboración propia

MUESTREO 17 de marzo 2024				
Parámetros fisicoquímicos	P1	P2	P3	P4
<i>pH</i>	6	6.1	6	6
<i>Turbidez (NTU)</i>	10.1	12.4	8.55	3.08
<i>Oxígeno disuelto (mg/L)</i>	6.83	7.25	7.2	6.94
<i>Sólidos disueltos (mg/L)</i>	9.1	9.2	10.6	27.7
<i>Conductividad ($\mu S/cm$)</i>	18.2	18.2	20.8	52.9
<i>Alcalinidad</i>	30	30	30	40
<i>Dureza</i>	30	45	35	35
<i>Nitratos</i>	0	0	0	0
<i>Sulfatos</i>	0	0	0	0
<i>DBO</i>	69.7	67.6	72.1	97.3
<i>DQO</i>	37	86	147	16
<i>Coliformes totales (NMPx100mL)</i>	36	120	120	1300
<i>Coliformes fecales</i>	Negativo	Negativo	Negativo	240

Nota: Elaboración propia

MUESTREO 24 de marzo 2024				
Parámetros fisicoquímicos	P1	P2	P3	P4
<i>pH</i>	4.9	5.7	5.7	6
<i>Turbidez (NTU)</i>	19	9	7	8
<i>Oxígeno disuelto (mg/L)</i>	6.35	6.26	6.5	6.7
<i>Sólidos disueltos (mg/L)</i>	11.3	10.2	12.5	29.8
<i>Conductividad ($\mu S/cm$)</i>	21.8	19.9	24.2	56.4
<i>Alcalinidad</i>	30	30	30	30
<i>Dureza</i>	20	30	35	65
<i>Nitratos</i>	0	0.4	0.2	0
<i>Sulfatos</i>	0	0	0	0
<i>DBO</i>	65.2	61.7	69.1	97.8
<i>DQO</i>	53	27	42	77
<i>Coliformes totales (NMPx100mL)</i>	20	210	120	4800
<i>Coliformes fecales</i>	4	7	4	150

Nota: Elaboración propia