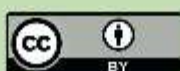




Esta obra está bajo una
[Licencia Creative Commons
Atribución - 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
Vea una copia de esta licencia en
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>





FACULTAD DE ECOLOGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

Tesis

Modelamiento de la calidad del agua de la quebrada Rumiycu para predecir la dinámica de su categoría de uso al 2033

Para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario

Autor:

Jhon Ckristhian Castillo Santa Cruz

<https://orcid.org/0000-0002-8226-8734>

Asesor:

Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza

<https://orcid.org/0000-0003-1396-9745>

Moyobamba, Perú
2025



FACULTAD DE ECOLOGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

Tesis

Modelamiento de la calidad del agua de la quebrada Rumiycu para predecir la dinámica de su categoría de uso al 2033

Para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario

Autor:

Jhon Ckristhian Castillo Santa Cruz

Sustentado y aprobado el 15 de agosto del 2025, ante el honorable jurado:

Presidente de Jurado
Ing. M.Sc. Santiago Alberto
Casas Luna

Secretario de Jurado
Lic. M.Sc. Ronald Julca Urquiza

Vocal de Jurado
Ing. M.Sc. Stánler Irigoín
Vásquez

Asesor
Ing. Dr. Yrwin Francisco
Azabache Liza

Moyobamba, Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
FACULTAD DE ECOLOGÍA
Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DEL INFORME FINAL DE TESIS CONDUCENTES A
TÍTULO PROFESIONAL N° 031-2025-UNSM/EPIS/UI**

Jurado reconocido con Resolución N° 219-2023-UNSM/CF/FE, Moyobamba 27 de abril de 2023.

FACULTAD DE ECOLOGÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

PROGRAMA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA SANITARIA

A las 9:30 horas, del viernes 15 de agosto de 2025, inició el acto público de sustentación del informe final de tesis **“Modelamiento de la calidad del agua de la quebrada Rumiayacu para predecir la dinámica de su categoría de uso al 2033”**, para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario, presentado por **Jhon Ckristhian Castillo Santa Cruz**, con la asesoría del **Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza**.

Instalada la Mesa Directiva conformada por el **Ing. M.Sc. Santiago Alberto Casas Luna** (Presidente del jurado), **Lic. M.Sc. Ronald Julca Urquiza** (Secretario), **Ing. M.Sc. Stánler Irigoín Vásquez** (Vocal) y acompañado por el **Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza** (Asesor), el presidente del jurado dirige brevemente unas palabras y a continuación el secretario dio lectura a la **Resolución N° 573-2023-UNSM/CF/FE, de fecha 29 de diciembre de 2023**.

Seguidamente el autor expuso el informe final de tesis y el jurado realizó las preguntas pertinentes, respondida por el sustentante y eventualmente, con la venia del jurado, por el asesor.

Una vez terminada la ronda de preguntas el jurado procedió a deliberar para determinar la calificación final, para lo cual dispuso un receso de quince (15) minutos, con participación del asesor con voz, pero sin voto; sin la presencia del sustentante y otros participantes del acto público.

Luego de aplicar los criterios de calificación con estricta observancia del principio de objetividad y de acuerdo con los puntajes en escala vigesimal (de 0 a 20), según el Anexo 4.2 del RG-CTI, la nota de sustentación otorgada resultante del promedio aritmético de los calificativos emitidos por cada uno de los miembros del jurado fue... **QUINCE.....(15)**, tal como se deja constar en la siguiente descripción.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
FACULTAD DE ECOLOGÍA
Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria



De acuerdo con el Artículo 40° del RG-CTI, la nota obtenida es APROBATORIO y correspondiente a la calificación de BUENO. Leído este resultado en presencia de todos los participantes del acto de sustentación, el secretario dio lectura a las observaciones subsanables al informe final que el autor deberá corregir y alcanzar al jurado en un plazo máximo de treinta (30) días calendarios.

Se deja constancia que la presente acta se inscribe en el Libro de Sustentaciones N° 002 del Programa de Estudios de Ingeniería Sanitaria de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ecología de la UNSM.

Firman los integrantes de la Mesa Directiva y el autor del informe final de tesis en señal de conformidad, dando por concluido el acto a las 11:30 horas, el mismo día viernes 15 de agosto de 2025.

Ing. M.Sc. Santiago Alberto Casas Luna
Presidente de Jurado

Lic. M.Sc. Ronald Julca Urquiza
Secretario de Jurado

Ing. M.Sc. Stánler Irigoin Vásquez
Vocal del Jurado

Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza
Asesor

Jhon Ckristhian Castillo Santa Cruz
Autor

Declaratoria de autenticidad

Jhon Ckrsthian Castillo Santa Cruz, con DNI N° 77024778, egresado de la Escuela Profesional de ingeniería Sanitaria Facultad de Ecología de la Universidad Nacional de San Martín, con la tesis titulada: **Modelamiento de la calidad del agua de la quebrada Rumiyacu para predecir la dinámica de su categoría de uso al 2033.**

Declaramos bajo juramento que:

1. La tesis presentada es de mi autoría.
2. La redacción fue realizada respetando las citas y referencia de las fuentes bibliográficas consultadas, siguiendo las normas APA actuales
3. Toda información que contiene la tesis no ha sido plagiada;
4. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido alterados ni copiados, por tanto, la información de esta investigación debe considerarse como aporte a la realidad investigada.

Por lo antes mencionado, asumo bajo responsabilidad las consecuencias que deriven de mi accionar, sometiéndome a las leyes de nuestro país y normas vigentes de la Universidad Nacional de San Martín.

Moyobamba, 15 de agosto de 2025.



Jhon Ckrsthian Castillo Santa Cruz
DNI N° 77024778



Ficha de identificación

<p>Título: Modelamiento de la Calidad del agua de la quebrada Rumiyacu para predecir la dinámica de su categoría de uso al 2033</p>	<p>Área de investigación: Ciencia y Tecnología Ambiental Línea de investigación: Saneamiento Ambiental Sublínea de investigación: Tratamiento de agua Grupo de investigación: Tecnologías de tratamiento de Agua, (Resolución N° 251-2022-UNSM/CFT/FE, Moyobamba, 01 de agosto del 2022) Tipo de investigación: Básica <input checked="" type="checkbox"/>, Aplicada <input type="checkbox"/>, Desarrollo experimental <input type="checkbox"/></p>
<p>Autor: Jhon Ckristhian Castillo Santa Cruz</p>	<p>Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria https://orcid.org/0000-0002-8226-8734</p>
<p>Asesor: Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza</p>	<p>Dependencia local de soporte: Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria Unidad o Laboratorio Ingeniería Sanitaria https://orcid.org/0000-0003-1396-9745</p>

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por darme la fuerza, salud y sabiduría para culminar esta etapa importante de mi vida.

A mis padres, pilares fundamentales de mi vida, cuyo amor, apoyo incondicional y enseñanzas han sido la fuerza que me impulsó a alcanzar este logro. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más desafiantes, por sus sacrificios y por inspirarme a perseverar hasta ver cumplido este sueño. A la memoria de mi abuelita, por haber sido un pilar de fortaleza y ternura en mi vida. Gracias por tus palabras sabias, tus oraciones constantes y por enseñarme, con tu ejemplo, el valor de la humildad y el esfuerzo. A mi hermana, por ser mi compañera constante y mi apoyo en los momentos más difíciles. Gracias por estar siempre a mi lado con cariño, paciencia y comprensión. Tu presencia ha sido fundamental en este camino.

A mis profesores, colegas y amigos que, con sus conocimientos y acompañamiento, enriquecieron mi formación profesional y humana durante este camino.

A la quebrada Rumiycu, fuente de inspiración de esta investigación, con la esperanza de que este trabajo contribuya a la preservación y gestión sostenible de sus aguas para las generaciones futuras.

Finalmente, a la Universidad Nacional de San Martín y a la Facultad de Ecología, por brindarme las herramientas para convertirme en un Ingeniero Sanitario comprometido con el equilibrio entre el desarrollo y la protección de nuestros recursos naturales.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme guiado y fortalecido durante todo este proceso.

A mis padres, por ser el cimiento de mi vida académica y personal. Su amor incondicional, sus consejos y su constante apoyo han sido mi motor para superar cada obstáculo y alcanzar esta meta. Este logro es también el suyo, porque sin su sacrificio y motivación, no habría sido posible. A mi abuelita en el cielo, por su cariño, sus oraciones y por ser una fuente de ternura y sabiduría. A mi hermana, por su compañía, sus palabras de aliento y su apoyo incondicional. Gracias por estar presente en los momentos buenos y también en los más difíciles.

A mis compañeros de estudio y amigos, quienes me acompañaron en este recorrido, brindándome apoyo académico y emocional en los momentos más demandantes. Gracias por las horas de debate, colaboración y ánimo.

A las instituciones y profesionales que facilitaron datos técnicos o colaboraron en el trabajo de campo, permitiendo el modelamiento de la calidad del agua de la Quebrada Rumiyaçu. Su aporte fue esencial para la viabilidad de este proyecto.

Finalmente, a la Universidad Nacional de San Martín, por formarme como Ingeniero Sanitario con una visión crítica y comprometida con la gestión sostenible de los recursos hídricos. Que este estudio sirva como un grano de arena para la preservación de nuestros ecosistemas acuáticos.

Índice general

Ficha de identificación.....	6
Dedicatoria	7
Agradecimientos	8
Índice general.....	9
Índice de tablas	11
Índice de figuras.....	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN	15
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	17
2.1. Antecedentes de la investigación.....	17
2.1.1. A nivel internacional.....	17
2.1.2. A nivel nacional.....	18
2.1.3. A nivel local.....	18
2.2. Fundamentos teóricos.....	19
2.2.1. Calidad del agua.....	19
2.2.2. Control de la calidad del agua potable	19
2.2.3. Normatividad de los recursos hídricos en el Perú	19
2.2.4. Agentes contaminantes en aguas superficiales.....	19
2.2.5. Estándar de Calidad Ambiental para agua de acuerdo con su uso – ECA's	21
2.2.6. Índice de calidad del agua (ICA-PE)	21
2.2.7. Parámetros de la calidad del agua.....	22
2.2.8. Modelo matemático de la calidad del agua.....	23
2.2.9. Desarrollo de los modelos de calidad	23
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS	25
3.1. Ámbito y condiciones de la investigación	25
3.1.1. Contexto de la investigación.....	25
3.1.2. Periodo de ejecución	25
3.1.3. Autorizaciones y permisos.....	25
3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad.....	25
3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales.....	26

3.2. Sistema de variables	26
3.2.1. Variables principales.....	26
3.3. Procedimientos de la investigación.....	27
3.3.1. Análisis de los informes técnicos emitidos por el ANA	27
3.3.2. Cálculo de los índices de calidad de agua (ICA-PE)	27
3.3.3. Desarrollo del modelo predictivo de la calidad del agua	29
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1. Resultado del análisis de los informes técnicos emitidos por el ANA.....	32
4.2. Resultado del cálculo de los índices de calidad de agua (ICA-PE)	43
4.3. Resultado del desarrollo del modelo predictivo de la calidad del agua	44
4.4. Discusiones	47
CONCLUSIONES	49
RECOMENDACIONES	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXOS.....	55
Anexo 1. Ubicación del punto QRumi-1	55
Anexo 2. Ubicación del punto QRumi-2.....	55
Anexo 3. Cálculos detallados del ICA-PE por año	56
Anexo 4. Cálculos detallados del modelo predictivo.	57
Anexo 5. Resultados de monitoreo para los 8 parámetros del ICA-PE	59
Anexo 6. Resultados de monitoreo para los parámetros del ICA-PE	60
Anexo 7. Cálculo de excedentes QRumi1 y QRumi2.....	61
Anexo 8. Evaluación de parámetros críticos	62
Anexo 8. Reconocimiento de la quebrada Rumiyacu	63

Índice de tablas

Tabla 1 Agentes contaminantes de aguas superficiales.....	20
Tabla 2 Parámetros de calidad del agua.....	22
Tabla 3 Descripción de variables por objetivo específico	26
Tabla 4 Interpretación de la calificación ICA-PE	29
Tabla 5 Ubicación y descripción de los puntos de monitoreo en la quebrada Rumiyacu. Ver anexo 1 y 2	32
Tabla 6 Parámetros de calidad del agua en la quebrada Rumiyacu - Año 2017.....	33
Tabla 7 Parámetros de calidad del agua en la quebrada Rumiyacu - Año 2018.....	35
Tabla 8 Parámetros de calidad del agua en la quebrada Rumiyacu - Año 2019.....	37
Tabla 9 Parámetros de calidad del agua en la quebrada Rumiyacu - Año 2020.....	39
Tabla 10 Parámetros de calidad del agua en la quebrada Rumiyacu - Año 2021.....	41
Tabla 11 Resumen cuantitativo de datos evaluados para el cálculo del ICA-PE (2017- 2021)	43
Tabla 12 Resumen cuantitativo de datos evaluados para el cálculo del ICA-PE (2017- 2021)	44
Tabla 14 Cálculos QRumi2.....	45
Tabla 15 Resultados de monitoreo para los 8 parámetros del ICA-PE en el punto QRumi1	59
Tabla 16 Resultados de monitoreo para los parámetros del ICA-PE en el punto QRumi2	60
Tabla 17 Cálculo detallado de excedentes QRumi1	61
Tabla 18 Resultados del cálculo del ICA-PE por año para el punto QRumi1	61
Tabla 19 Resultados del cálculo del ICA-PE por año para el punto QRumi2	61

Índice de figuras

Figura 1	<i>Área de estudio: Microcuenca de Rumiyacu</i>	25
Figura 2	<i>Tendencia y proyección del ICA – PE (2017 - 2033)</i>	47
Figura 3	<i>Variación del Fósforo Total en la quebrada Rumiyacu</i>	62
Figura 4	<i>Variación de Coliformes Termotolerantes en la quebrada Rumiyacu</i>	62

RESUMEN

Modelamiento de la calidad del agua de la quebrada Rumiyacu para predecir la dinámica de su categoría de uso al 2033

La gestión eficiente de los recursos hídricos requiere un monitoreo continuo y sistemático para asegurar su excelencia y accesibilidad para las decendencias futuras. El presente estudio se centró en la quebrada Rumiyacu, ubicada en Moyobamba, departamento de San Martín, evaluando su pureza de agua a lo largo el periodo 2017-2021. La investigación tuvo como objetivo desarrollar un modelo predictivo de la condición del agua basado en el Índice de Calidad de Agua ICA-PE, analizando datos de dos puntos de monitoreo: QRumi1 y QRumi2. Se empleó una metodología que incluyó el análisis de informes técnicos de la Autoridad Nacional del Agua, evaluación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, cálculo del ICA-PE, y desarrollo de un modelo predictivo mediante regresión lineal. Los resultados revelaron diferencias significativas entre los puntos de monitoreo: QRumi1 mantuvo una calidad "Buena" (ICA-PE: 83,334) con excedencias moderadas en fósforo total, mientras QRumi2 mostró calidad "Regular" (ICA-PE: 54,44) con excedencias críticas en fósforo total y coliformes termotolerantes que alcanzaron hasta 110,000 NMP/100ml. El modelo predictivo, validado con coeficientes de determinación de 0,881 y 0,820 para QRumi1 y QRumi2 respectivamente, proyectó para el 2033 un ICA-PE de 77,722 ("Bueno") en QRumi1 y 54,430 ("Regular") en QRumi2. Estableciendo que está presente un daño gradual de la distinción del agua, especialmente en el tramo entre ambos puntos de monitoreo, evidenciando la necesidad de implementar medidas de gestión y control para preservar este recurso hídrico. La metodología empleada demostró ser un instrumento efectivo para la valoración y predicción de la pureza del agua en quebradas altoandinas.

Palabras clave: contaminación hídrica, modelamiento predictivo, parámetros fisicoquímicos, gestión ambiental, monitoreo.

ABSTRACT

Modeling the water quality of the Rumiyacu stream to predict the dynamics of its use category by 2033

Efficient water resource management requires continuous and systematic monitoring to ensure its quality and availability for future generations. The present study focused on the Rumiyacu stream, located in the district and province of Moyobamba, department of San Martín, evaluating its water quality during the period 2017-2021. The research aimed to develop a predictive model of water quality based on the ICA-PE Water Quality Index, analyzing data from two monitoring points: QRumi1 and QRumi2. A methodology was used that included the analysis of technical reports from the National Water Authority, evaluation of physicochemical and microbiological parameters, calculation of the ICA-PE, and development of a predictive model using linear regression. The results revealed significant differences between the monitoring points: QRumi1 maintained a "Good" quality (ICA-PE: 83,334) with moderate exceedances in total phosphorus, while QRumi2 showed "Fair" quality (ICA-PE: 54,44) with critical exceedances in total phosphorus and thermotolerant coliforms that reached up to 110,000 NMP/100ml. The predictive model, validated with determination coefficients of 0,881 and 0,820 for QRumi1 and QRumi2 respectively, projected for 2033 an ICA-PE of 77,722 ("Good") in QRumi1 and 54,430 ("Fair") in QRumi2. It was concluded that there is a progressive deterioration in water quality, especially in the section between both monitoring points, evidencing the need to implement management and control measures to preserve this water resource. The methodology used proved to be an effective tool for the evaluation and prediction of water quality in high Andean streams.

Keywords: water pollution, predictive modeling, physicochemical parameters, environmental management, monitoring.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

El deterioro de la condición del recurso hídrico es un desafío que no sólo perjudica a los países en vías de desarrollo si no que, afecta a los países ricos y pobres por igual, inclusive en los últimos tiempos se viene hablando del estrés hídrico, concepto que se utiliza (Wang et al., 2021; Mhlongo et al., 2018; Liu et al., 2017). Cuando la necesidad de agua aumenta a la que se dispone al momento que su utilización queda limitada debido a su calidad inferior. (UNESCO, 2018; Ma et al., 2020; Van et al., 2021).

El agua es un medio de mucho valor, indispensable para la configuración de los sistemas ambientales (Frenkel-Pinter et al., 2021; Ahmed et al., 2024). Por lo tanto, garantizar su uso eficiente y conservación se ha convertido en una necesidad fundamental para asegurar su disponibilidad para las generaciones futuras. En este sentido, se han implementado diversos mecanismos, incluyendo normativas que abarcan desde el ámbito internacional hasta el local (Mora y Daza, 2016)

En el Perú, la disponibilidad de agua presenta desafíos. De los 27,1 millones de pobladores, el 72,3% reside en áreas metropolitanas, y el 27,7% en áreas no urbanizadas con acceso limitado a agua potable, dependiendo de pozos o sistemas alternativos. El suministro recae en 50 Empresas Prestadoras de Servicios, que dan servicio al 81% de la comunidad urbana, 33 de ellas integradas en ANEPSSA Perú. Sin embargo, la cobertura es insuficiente y la sostenibilidad deficiente, lo que genera dudas sobre la calidad del agua potable (SUNASS, 2004).

Para llevar a cabo el seguimiento de la condición del agua en entornos hídricos, es necesario recopilar información tanto temporal como espacial, con el fin de contrastar entre situaciones de referencia y diferentes escenarios. Por lo tanto, se logrará una comprensión total y precisa de la condición del recurso hídrico en dichos sistemas acuáticos como lo afirman Ning y Chang (2004), y es que, los procesos de transporte de contaminantes han sido objeto de un amplio estudio a escala global, lo que ha propiciado el progreso de diversas fórmulas matemáticas que describen su comportamiento y se plasman en modelos predictivos de la calidad hídrica. En naciones de características similares, el uso de dichos simuladores debe ser intenso, ya que gran parte de los caudales de agua no disponen de una gestión apropiada y los problemas por su utilización están presentes en muchas de nuestras regiones.

En general, en nuestro país se carece de información técnica adecuada para llevar a cabo una gestión del agua eficiente que permita potenciar el bienestar social y económico de manera equilibrada, garantizar su utilización responsable, y cuidar y recuperar su excelencia apta con fines de ingestión humana. Aquellos elementos importantes podrían impedir la insuficiencia del recurso hídrico se convierta en un obstáculo para un crecimiento social responsable sin dañar la estabilidad de los ecosistemas.

Para abordar adecuadamente la administración de la calidad del recurso hídrico en la ciudad de Moyobamba, es fundamental realizar un seguimiento riguroso y continuo de cuerpos hídricos estratégicos como la quebrada Rumiyacu. Esta fuente cumple un rol esencial como proveedor de agua para el consumo poblacional, actividades recreativas y turísticas, así como para el equilibrio ecológico del entorno. Sin embargo, su cercanía a zonas urbanas en expansión, la presencia de actividades agrícolas, vertimientos residuales sin tratamiento adecuado y la deforestación progresiva en su cuenca representan amenazas crecientes que comprometen su calidad. Diversos reportes locales han señalado un incremento en la presencia de contaminantes microbiológicos y nutrientes como el fósforo, lo cual indica una presión antrópica sostenida que podría alterar su categoría de uso actual. En consecuencia, resulta imprescindible ejecutar un examen técnico exhaustivo y sistemático de la condición del recurso hídrico de la quebrada Rumiyacu, a fin de identificar tendencias, prevenir un deterioro irreversible y orientar decisiones de gestión ambiental sostenibles para la región.

En el marco de esta investigación, surge la formulación del problema: ¿Cómo el modelamiento de la calidad del agua de la quebrada Rumiyacu permite predecir la dinámica de la categoría de uso al 2033? Se plantea la hipótesis de investigación de la siguiente manera: El modelamiento de la calidad del agua de la quebrada Rumiyacu permitirá predecir la dinámica de su categoría de uso al 2033. El objetivo general de estudio es: Modelar la calidad del agua de la quebrada Rumiyacu que permita predecir la dinámica de su categoría de uso al año 2033. A su vez, como objetivos específicos, son: analizar los informes técnicos emitidos por la Autoridad Nacional del Agua correspondientes a los años 2019, 2020 y 2021 para obtener datos sobre la calidad del agua en la quebrada Rumiyacu; calcular los indicadores del estado del agua (ICA-PE) en las estaciones de monitoreo de la quebrada Rumiyacu según su categoría de uso, mediante el análisis de los informes técnicos de los años 2019, 2020 y 2021 emitidos por la Autoridad Nacional del Agua; y desarrollar el modelo predictivo de la calidad del agua de la quebrada Rumiyacu al 2033.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. A nivel internacional

Vázquez et al. (2021), generó un modelo hidrológico destinado a evaluar tanto el volumen como la pureza del recurso hídrico en aguas superficiales. A tal fin, fueron realizadas mediciones de varios parámetros, incluyendo la DBO₅, OD en el agua y el nivel térmico, en 15 puntos distribuidos en la cuenca. Los resultados indicaron un aumento de contaminantes, especialmente en la represa Vicente Guerrero, con una mayor perceptibilidad estacional en la temporada de sequía. Además, al utilizar el modelo WEAP y considerar escenarios de cambio climático, se obtuvieron proyecciones más cautelosas en época de escasez, siendo particularmente preocupante la proyección bajo el RCP 4,5 W/m² con el modelo GFDL-CM3.

Zhang et al. (2023) evaluó el impacto de las actividades humanas y el cambio climático en la calidad del agua de los ríos en China. Se simuló la concentración mensual de nitrógeno total (TN), amoníaco-nitrógeno (NH₃-N), fósforo total (TP) y demanda química de oxígeno (CODMn) en 613 subcuencas de las 10 principales cuencas fluviales del país durante el período 1980-2050, utilizando modelos de aprendizaje automático basados en datos de monitoreo de 16 años (2003-2018). Los resultados mostraron una mejora significativa en la calidad del agua, salvo en la concentración de TN, probablemente debido a la ausencia de un sistema de control y evaluación para este parámetro. El análisis cuantitativo reveló que los factores antropogénicos fueron los principales controladores de las concentraciones de TN, TP y NH₃-N, en comparación con los factores climáticos y geográficos.

Saldías (2022), en su estudio realizó un modelo AQUATOX con fin de evaluar la salubridad del recurso hídrico en el río Biobío, basándose en su norma secundaria de calidad ambiental, para lo cual utilizó datos de marzo del 2009 y 2012 para calibrar y validar el modelo, luego simuló escenarios de cambio climático con disminuciones de caudal del 10% al 95%. Los resultados indicaron que la reducción de caudal no afecta significativamente la condición hídrica en el tramo estudiado. La variable de oxígeno disuelto mostró una perturbación (clase 3), por otro lado, la demanda bioquímica de oxígeno indicó un hábitat intacto (clase 1), y el nivel de amonio sugirió perturbación moderada (clase 2). En conclusión, los hallazgos resaltaron la importancia de considerar escenarios específicos al evaluar el impacto ecológico en el río Biobío.

Colmenares (2020) en su estudio analizó la pureza hídrica en 12 estaciones de monitoreo y la conclusión a la que se llegó es que el uso y la relación de varias técnicas para calcular los parámetros de la condición del recurso hídrico, resulta muy útil, con el fin de evaluar la condición del recurso hídrico del río Magdalena en distintos lugares y momentos. Además, sugiere que esta estrategia puede aplicarse para evaluar en otros sistemas acuáticos externos del país, informa en su estudio “Análisis espacio-temporal de la calidad del agua del río Magdalena periodo 2009-2018 a partir de la comparación de índices de calidad del agua”, consideró 12 puntos experimentales para los análisis. En resumen, se puede concluir que la utilización y el paralelismo de distintos procedimientos a fin de calcular el Índice de Calidad del Agua es un utensilio valioso con el fin de evaluar el río de Magdalena en diferentes momentos y lugares. Esta herramienta también puede ser aplicada en otros sistemas hídricos superficiales del país para estimar la aptitud del agua.

2.1.2. A nivel nacional

Encina et al. (2023), aplicaron técnicas de asimilación automática con el fin de anticipar el caudal de agua en la represa Condorama, gestionada por Autodema. Se trabajó con datos mensuales procedentes de dos plataformas de dicha entidad, entrenando modelos como la regresión lineal, el modelo de vectores de soporte (SVR) y ARIMA. Según las métricas MAE, MSE, RMSE y R^2 , el modelo SVR mostró el desempeño óptimo, alcanzando un MAE de 5,536, un MSE de 83,701, un RMSE de 9,145 y un coeficiente de determinación (R^2) de 0,427.

2.1.3. A nivel local

Córdova y Díaz (2020), realizaron estudio sobre la condición acuática en la quebrada Rumiyacu, aplicaron un modelo matemático y tomaron muestras en las coordenadas 281271 Norte: 9325561. Realizaron la evaluación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, y emplearon el software SPSS con el fin de lograr una mayor precisión de la técnica de predicción. Descubrieron que solamente el consumo de oxígeno químico no sobrepasaba los estándares del recurso hídrico según la categoría 1. También hallaron una conexión importante entre los parámetros potencial de hidrógeno, DQO, plomo, arsénico y nitritos, siendo la vinculación más fuerte entre el potencial de hidrógeno y el plomo, con valores de $R_1=0,728$ y $R_2=0,530$. En conclusión, los patrones utilizados en este estudio permiten estimar el rendimiento de los indicadores DQO, plomo y arsénico en el punto de muestreo, según los valores de pH y nitritos.

2.2. Fundamentos teóricos

2.2.1. Calidad del agua

Hace alusión a propiedades de las masas del recurso hídrico superficial o subterránea, influenciadas por factores naturales como la erosión, fenómenos atmosféricos y procesos biológicos, así como por la actividad humana. Estos factores afectan la composición química y física del agua (ONU-DAES, 2015).

2.2.2. Control de la calidad del agua potable

Es un procedimiento coordinado para asegurar que el agua tratada y distribuida cumpla con los estándares nacionales para ser segura para el consumo humano. Este monitoreo continuo y sistemático, realizado por las empresas responsables, permite detectar y corregir desviaciones a tiempo, garantizando que el agua distribuida no represente riesgos para la salud, conforme a las normas vigentes (SUNASS, 2004).

2.2.3. Normatividad de los recursos hídricos en el Perú

- **Ley N° 29338 (2009) - Ley de Recursos Hídricos:** Plantea directrices para la gestión integral de los recursos hídricos superficiales, subterráneos, marítimos y atmosféricos, regulando su aprovechamiento y administración.
- **Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente:** Garantiza la legalidad a un entorno sano y promueve la gestión ecológica responsable para proteger el hábitat.
- **Resolución Jefatural N° 058-2018-ANA:** Clasifica las masas de agua en ambientes superficiales continentales.
- **Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA:** Respalda el desarrollo del Protocolo Nacional de Monitoreo para evaluar la calidad del agua superficial.
- **Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM:** Establece los Estándares de Calidad Ambiental (ECA's), para recursos hídricos.
- **Resolución Jefatural N° 068-2018-ANA:** Admite la metodología ICA-PE con el fin de examinar la condición del recurso hídrico en cuerpos de agua superficiales terrestres.

2.2.4. Agentes contaminantes en aguas superficiales

La Resolución Jefatural RJ N° 136-2018 define a los agentes contaminantes como sustancias presentes en concentraciones perjudiciales para seres humanos, animales o plantas, o que exceden las normas ambientales.

Tabla 1
Agentes contaminantes de aguas superficiales

Fuente	Relevancia en la contaminación
Sólidos en suspensión	Pueden favorecer la formación de sedimentos fangosos y generar ambientes anaerobios.
Materia orgánica biodegradable	Conformada por proteínas, lípidos y carbohidratos, se evalúa mediante DBO ₅ y DQO, pudiendo reducir el oxígeno disuelto y provocar condiciones sépticas.
Patógenos (bacterias, virus, protozoarios, gusanos)	Pueden causar enfermedades infecciosas como cólera, tífus o hepatitis, generando alta morbilidad y mortalidad si no se aplican medidas de higiene y desinfección.
Nutrientes	El nitrógeno, fósforo y carbono son nutrientes clave para el desarrollo de algas; el desarrollo de estas sustancias puede estimular proliferaciones conocidas como floraciones algales.
Materia orgánica refractaria	Es resistente a los tratamientos convencionales; entre sus ejemplos comunes se encuentran los fenoles y pesticidas utilizados en la agricultura.
Metales pesados	Suelen incorporarse a las aguas residuales a través de diversas actividades industriales, comerciales y productivas, siendo necesaria su remoción cuando se busca reutilizar dicho recurso.
Hidrocarburos y derivados	Compuestos formados por la unión de hidrógeno y carbono (únicamente).
Productos químicos y desechos industriales	Los productos químicos son sustancias producidas industrialmente para diversos usos, mientras que los desechos industriales son sus residuos peligrosos o contaminantes, que requieren manejo especial para evitar daños ambientales y a la salud.
Sólidos inorgánicos disueltos	Se incorporan al agua durante su uso, formando parte de su composición final.
Sólidos sedimentables	Los sólidos sedimentables incluyen tierra, arcilla, materia vegetal y residuos como plásticos y metales, que se acumulan en ríos afectando la biota y enturbiando el agua, dificultando la fotosíntesis.
Energía radiactiva	Puede causar la muerte de organismos, afectar la salud humana, inducir mutaciones genéticas y originar cáncer.
Energía térmica	Pueden alterar cuerpos acuáticos, afectando sus condiciones químicas, físicas y biológicas. Uno de los impactos más graves es la reducción del oxígeno disuelto.

Fuente: (RJ N° 136-2018-ANA)

2.2.5. Estándar de Calidad Ambiental para agua de acuerdo con su uso – ECA's

El Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM establece los Estándares de Calidad Ambiental a fin de evaluar la calidad del agua, clasificándola según su uso en cuatro categorías principales:

2.2.5.1. Categoría 1: Uso poblacional y recreacional

- *Subcategoría A:* Agua para consumo humano, con tres niveles según el tratamiento requerido (A1: potabilización por desinfección, A2: tratamiento convencional, A3: tratamiento avanzado).
- *Subcategoría B:* Agua para actividades recreativas, dividida en contacto primario (B1, como nadar) y contacto secundario (B2, como navegar).

2.2.5.2. Categoría 2: Extracción, cultivo y actividades marino-costeras y continentales

Incluye cuatro subcategorías (C1 a C4) para la cosecha y cultivo de organismos acuáticos en diferentes ambientes, así como actividades industriales y de saneamiento.

2.2.5.3. Categoría 3: Riego y bebida animal

D1: Riego de vegetales, con agua sin limitaciones o con restricciones.

- *D2: Bebida para animales.*

2.2.5.4. Categoría 4: Conservación del ambiente acuático

Incluye subcategorías para lagunas y lagos (E1), ríos (E2) en diferentes zonas, y ecosistemas costeros y marinos (E3).

2.2.6. Índice de calidad del agua (ICA-PE)

A nivel nacional, los exámenes que se realizan de la condición del recurso hídrico se centran en comparar indicadores físicos-químicos y biológicos con los estándares de calidad ambiental, según la categoría del cuerpo de agua. Sin embargo, esta regulación es poco precisa para clasificar la calidad en categorías como óptima o deficiente. Por ello, se desarrolló la Metodología ICA-PE, que utiliza un índice matemático para combinar múltiples parámetros en un solo valor que mide la pureza del agua. Los indicadores ambientales, según la OCDE, simplifican la medición y representan la situación ambiental con menos datos. Los parámetros de la condición del recurso hídrico facilitan la comunicación y comparación de la calidad del recurso hídrico a lo largo del tiempo y espacio, utilizando una escala de 0 (pobre) a 100 (excelente). Esta metodología es ampliamente utilizada a nivel internacional (ANA, 2018).

2.2.7. Parámetros de la calidad del agua

Según la Resolución Jefatural N° 068-MINAN-2018, los elementos o compuestos que se tienen en cuenta para valorar la condición del recurso hídrico se encuentran detallados en la siguiente tabla.

Tabla 2
Parámetros de calidad del agua

Parámetro	Importancia ambiental
Oxígeno disuelto	Se origina en la atmósfera y la biota, y es clave para evaluar la recuperación del agua y la vida acuática.
Clorofila A	Se utiliza para estimar la biomasa de fitoplancton. Está presente en todas las plantas verdes y constituye entre el 1 y 2 % del peso seco del plancton algal.
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Mide la materia orgánica en agua, indicando contaminación por aguas servidas, desechos industriales y efluentes de plantas de tratamiento.
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Cuantifica el oxígeno necesario para que los microorganismos degraden materia orgánica en ambientes aeróbicos, basada en su oxidación natural.
Coliformes Termotolerantes (Fecales)	Son indicadores de contaminación fecal, usualmente vinculada a descargas domésticas no tratadas o mala gestión de residuos sólidos en cuerpos de agua.
Huevos y Larvas de Helmintos	Estos parásitos afectan a personas y animales, se asocian a aguas residuales sin tratar y se transmiten por agua contaminada.
Arsénico	Metal tóxico presente en aguas subterráneas como As III y As V, usualmente por compuestos geológicos inorgánicos.
Mercurio	Elemento poco común en la corteza terrestre, generado sobre todo por la minería y otras actividades humanas.
Plomo	Sustancia tóxica para la vida acuática, hallada en ríos amazónicos con niveles que exceden los límites del ECA-Agua.
Cadmio	Presente de forma natural como sulfuro o mezclado con minerales de zinc y plomo; llega al agua principalmente por la minería y la fundición.
Cromo	Aunque escaso en aguas naturales, puede aumentar por actividades mineras e industriales y es perjudicial para la salud.
Cobre	Está presente en bajas cantidades en aguas naturales por su fijación en sólidos, pero sus niveles aumentan por residuos industriales o minería.
Zinc	Presente en minerales, suele estar en baja concentración por su escasa solubilidad. Aumenta en aguas ácidas y puede ser tóxico según la especie y calidad del agua.
Hierro	Abundante en la corteza terrestre, suele estar en baja concentración en aguas naturales y su forma depende del pH y potencial redox.

Manganeso	Se encuentra en suelos y rocas como óxidos o hidróxidos; su análisis ayuda a controlar metales traza y verificar su origen natural.
Aluminio	Común en aguas superficiales por su presencia en rocas y minerales, aunque su concentración natural rara vez excede 1 mg/l.
Boro	Proviene de fuentes geológicas y aguas residuales; puede dañar cultivos como los cítricos y afectar la salud si está presente en agua potable.
pH	En zonas sin actividad humana, el pH del agua varía entre 6.5 y 8.5 y afecta la solubilidad y biodisponibilidad de metales, siendo clave para evaluar la condición del recurso hídrico
Sólidos suspendidos totales	Su presencia en aguas naturales varía con el caudal, lluvias y estaciones; afectan la transparencia, luz, temperatura y fotosíntesis.
Fósforo	Llega a aguas superficiales por descargas sanitarias; es un nutriente esencial que provoca eutrofización y proliferación de algas.
Amoniaco	se convierte en formas ionizadas (NH_4^+) y no ionizadas (NH_3); esta última es tóxica para los peces, aunque generalmente se halla en baja proporción en aguas naturales.
Nitrógeno total	Las aguas residuales domésticas aportan nitrógeno a las aguas superficiales, provocando eutrofización, aumento de nitratos y disminución del oxígeno disuelto, lo que afecta la calidad del agua.

Fuente: (RJ N° 068–MINAM-2018)

2.2.8. Modelo matemático de la calidad del agua

Castillo y Espinoza (2005) definen un modelo ambiental como una representación del entorno para simular condiciones y respuestas ante impactos. Los modelos matemáticos son los más comunes, con distintos niveles de complejidad, y también existen modelos físicos.

- Modelos unidimensionales: Usados para representar el flujo de agua en ríos, considerando solo la dirección del flujo.
- Modelos bidimensionales: Aplicados en ríos grandes para capturar variaciones laterales de contaminantes usando coordenadas cartesianas.
- Modelos tridimensionales: Empleados en estudios complejos de aguas superficiales y subterráneas, requieren más datos y recursos computacionales, por lo que se usan en problemas de gran escala.

2.2.9. Desarrollo de los modelos de calidad

Se identifican 5 fases

- a) **Desarrollo del modelo:** Selección o creación de un modelo adecuado según el alcance del análisis y la calidad de datos disponibles. Modelos más complejos requieren más y mejor información.
- b) **Calibración:** Ajuste del modelo comparando resultados simulados con datos reales para asegurar al menos un 80% de concordancia, modificando parámetros hasta alcanzar precisión aceptable.
- c) **Validación:** Verificación del modelo con un conjunto de datos independiente para confirmar su capacidad de reproducir resultados observados.
- d) **Aplicación del modelo:** Uso del modelo calibrado y validado para evaluar impactos en la calidad del agua, analizar escenarios y proponer o evaluar medidas de mitigación ambiental.
- e) **Análisis de sensibilidad:** Determinación de los límites en los parámetros del modelo donde las predicciones siguen siendo confiables, identificando el rango de incertidumbre (Castillo y Espinoza, 2005).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. **Ámbito y condiciones de la investigación**

3.1.1. **Contexto de la investigación**

El área de investigación se ubica entre las coordenadas $6^{\circ}03'02,6''S$ y $76^{\circ}58'03,7''W$ en base al sistema de coordenadas geográficas WGS, cuya área específica es la microcuenca Rumiyacu en la región San Martín, Perú. Las coordenadas UTM de esta ubicación son X: 0282853 y Y: 9327630 con una altitud de 978,5 msnm. La microcuenca abarca una superficie total de 924 hectáreas; en términos geográficos, la quebrada está situada dentro de la cuenca del río Mayo.



Figura 1

Área de estudio: Microcuenca de Rumiyacu

Fuente: Google maps

3.1.2. **Periodo de ejecución**

29 de diciembre del 2023 hasta 28 de agosto del 2024

3.1.3. **Autorizaciones y permisos**

Se uso la información, de acceso público, reportado por la Autoridad Nacional del Agua; en su página web: <https://www.gob.pe/ana>

3.1.4. **Control ambiental y protocolos de bioseguridad**

El estudio de la quebrada Rumiyacu analiza parámetros de calidad (físicoquímicos, microbiológicos y metales) usando modelos predictivos, considerando impactos

antrópicos y normativas de la ANA para proyectar su categoría de uso al 2033 con base en datos oficiales.

3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales

Durante el proceso de ejecución del estudio los principios éticos aplicados fueron: la justicia, beneficencia, respecto a las personas y ecosistema, y la integridad.

3.2. Sistema de variables

3.2.1. Variables principales

Variable independiente (X) : Dinámica de la categoría de uso al 2033 de la quebrada Rumiyacu

Variable dependiente (Y) : Modelamiento de la calidad del agua

Tabla 3

Descripción de variables por objetivo específico

Objetivo específico № 1: Analizar los informes técnicos emitidos por la Autoridad Nacional del Agua correspondientes a los años 2019, 2020 y 2021 para obtener datos sobre la calidad del agua en la quebrada Rumiyacu.

Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Calidad del agua.	Parámetros físicos, químicos y microbiológicos	Procedimiento directo - lectura de datos obtenidos del ANA (pH, temperatura, turbiedad, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto, DBO ₅ , DQO, nitratos, fosfatos, coliformes totales)	Unidades de pH
			°C
			UNT
			µS/cm
			mg/L
			mg/L
			mg/L
			mg/L
			UFC/100mL

Objetivo específico № 2: Calcular los índices de calidad de agua (ICA-PE) en las estaciones de monitoreo de la quebrada Rumiyacu según su categoría de uso, mediante el análisis de los informes técnicos de los años 2019, 2020 y 2021 emitidos por la Autoridad Nacional del Agua.

Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Índice de Calidad de Agua (ICA).	ICA-PE (Índice de Calidad de Agua para el Perú)	Cálculo del ICA-PE (Categoría III - Categoría IV)	Excelente (91% - 100%)
			Bueno (71% - 90%)
			Regular (51% - 70%)
			Malo (26% - 50%)
			Pésimo (0% - 25%)

Objetivo específico № 3: Desarrollar el modelo predictivo de la calidad del agua de la quebrada Rumiyacu al 2033.

Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Indicadores de Calidad	de Parámetros de Calidad del Agua	Matriz de correlación (Coeficiente de correlación)	Adimensional - valores entre -1 y 1

Estadísticos descriptivos (media, desviación estándar, varianza, coeficiente de variación)	Unidades de la variable
Depuración de datos	N.A.
Regresión lineal (Coeficiente de determinación R ² / Coeficiente de regresión)	Adimensional - entre 0 y 1 Unidades de la variable

3.3. Procedimientos de la investigación

3.3.1. Análisis de los informes técnicos emitidos por el ANA

a) Recopilación de informes técnicos

Se procedió a analizar los reportes publicados por la ANA (Autoridad Nacional del Agua), correspondientes a los años señalados (2019, 2020 y 2021), consolidando la documentación vinculada al monitoreo de la condición del recurso hídrico en la quebrada.

b) Análisis de parámetros

Se estructuró la información obtenida de los informes del ANA de la siguiente forma:

- Parámetros físico-químicos: pH, temperatura, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, sulfuros conductividad, DBO₅, DQO, fósforo total, nitratos.
- Parámetros inorgánicos: antimonio, arsénico, bario, cobre, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y zinc.
- Parámetros microbiológicos: coliformes Termotolerantes.

c) Comparación con estándares

Se compararon las concentraciones de los parámetros con los Estándares de Calidad Ambiental para el Agua. Además, se identificaron aquellos parámetros que excedieron los límites establecidos por la normativa vigente.

d) Análisis de parámetros críticos

Se identificaron los parámetros con excedencias frecuentes durante el período de estudio en los puntos QRumi1 y QRumi2. Luego, se realizó un análisis detallado de los parámetros críticos, los cuales fueron presentados mediante gráficos, que permitieron examinar sus patrones de comportamiento.

3.3.2. Cálculo de los índices de calidad de agua (ICA-PE)

a) Preparación y validación de datos

Para iniciar el proceso de cálculo del ICA-PE, se organizaron los datos obtenidos del ANA de cada punto de monitoreo (QRumi1 y QRumi2). Se identificaron y seleccionaron

los ocho parámetros establecidos en la metodología ICA-PE: pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), nitratos, fósforo total, sólidos suspendidos totales (SST) y coliformes termotolerantes. Durante esta etapa, se verificó la consistencia de los datos para cada parámetro, asegurando que cumplieran con los requisitos necesarios para el cálculo del índice.

b) Determinación del Factor F1 (Alcance)

Se utilizó para indicar qué porcentaje de parámetros de calidad del agua excedieron los límites permitidos por los ECA-Agua, respecto al total de parámetros analizados.

$$F1 = \frac{\text{Número de parámetros que no cumplen los ECA - Agua}}{\text{Número total de parámetros a evaluar}}$$

c) Cálculo del Factor F2 (Frecuencia)

Se contó el total de datos examinados e identificaron los que excedieron los valores de los ECA-Agua. El Factor F2 se estimó dividiendo esos casos entre el total evaluado y multiplicando por cien para expresar el resultado en porcentaje.

$$F2 = \frac{\text{Número de los parámetros que no cumplen el ECA - Agua de los datos evaluados}}{\text{Número total de datos evaluados}}$$

d) Determinación del Factor F3 (Amplitud)

Es un indicador usado para evaluar el grado de desviación dentro de un conjunto de datos. Se obtuvo sumando de forma normalizada los valores que superaron un límite establecido, en proporción al total de datos analizados.

$$F3 = \frac{\text{Suma Normalizada de Excedentes}}{\text{Suma Normalizada de Excedentes} + 1} * 100$$

En donde la suma normalizada de Excedentes (nse):

$$nse = \frac{\text{Suma Normalizada de Excedentes} \sum i m i \text{ Excedente} i}{\text{Total de datos}}$$

El excedente, para cada parámetro, se define como la diferencia entre el valor medido y el valor límite del Estándar de Calidad Ambiental (ECA), expresada en proporción a este último.

Caso 1: Si la concentración supera el valor límite del ECA-Agua, se calcula el excedente comparando cuánto lo sobrepasa.

Caso 2: Si la concentración está por debajo del mínimo permitido por el ECA-Agua — como ocurre con parámetros como el oxígeno disuelto (>4) o el pH (rango 6,5–8,5)— el cálculo se hace considerando cuánto falta para alcanzar el valor exigido.

e) Cálculo final del ICA-PE

Una vez obtenidos los valores de los factores F1, F2 y F3, se calculó el Índice, restando de 100 la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de dichos factores. El resultado oscila entre 100, que representa una excelente calidad del agua, y 0, que indica una condición muy deficiente. Esta relación se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$ICA - PE = 100 - \sqrt{(F1^2 + F2^2 + F3^2)}$$

Tabla 4
Interpretación de la calificación ICA-PE

ICA - PE	Calificación	Interpretación
90-100	Excelente	La integridad del recurso hídrico se encuentra preservada al no haber peligros ni perjuicios. Las circunstancias son extremadamente similares a los porcentajes esperados o naturales.
75-89	Bueno	La condición del recurso hídrico se encuentra ligeramente alejada de su estado natural, no obstante, es posible que las condiciones favorables se presenten a pesar de la existencia de ciertos peligros de baja intensidad.
45-74	Regular	En ocasiones, la integridad del agua natural se ve comprometida por amenazas o daños. Con frecuencia, los niveles de calidad del recurso hídrico se alejan de los porcentajes deseados, lo que implica que varios de los usos requerirán tratamiento para su utilización adecuada.
30-44	Malo	La meta de la condición del recurso hídrico no se está alcanzando y con frecuencia las calidades deseadas están en peligro o perjudicadas. Muchos de los usos que se le dan al agua requieren tratamiento para poder ser utilizados.
0-29	Pésimo	La condición del recurso hídrico no alcanza con las metas establecidas y se encuentra en peligro o dañada en la mayoría de los casos. Para poder utilizarla en cualquier actividad, es necesario someterla a tratamiento previo.

Fuente: (MINAM, 2017)

3.3.3. Desarrollo del modelo predictivo de la calidad del agua

a) Cálculo del ICA-PE por año

Primero se calculó el ICA-PE para cada año (2017-2021). Este proceso se realizó siguiendo la metodología indicada en el objetivo anterior, pero considerando los datos

de monitoreo de forma anual. De esta forma, se obtuvo una serie temporal de valores ICA-PE que permitió analizar el progreso de la condición del recurso hídrico a lo largo del tiempo para cada punto de monitoreo.

b) Análisis estadístico descriptivo

Se utilizaron medidas de tendencia central, como la media y la mediana, junto con medidas de dispersión, para ofrecer una caracterización estadística integral de las variables, destacando sus patrones y variabilidad.

Media (\bar{x}): Se calculó la media, que representó el valor promedio de los datos, proporcionando así una medida que ayudó a identificar el centro de la distribución.

$$\bar{x}: \Sigma x_i/n$$

Fuente: (Walpole et al., 2012).

Mediana (M): Es el valor que divide equitativamente los datos ordenados. Su fórmula varía según si la cantidad de datos es par o impar (Webster, 2001). Este valor representa el punto central de la distribución.

Moda (Mo): Se refiere al valor más frecuente en la distribución, obtenido por inspección directa sin una fórmula específica (Levin y Rubin, 2004). Este valor indica la modalidad o la observación más común en la muestra.

Desviación estándar (s): Mide la dispersión con respecto a la media y se utiliza para determinar la variabilidad. Su fórmula es:

$$s = \sqrt{\Sigma (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)}$$

Fuente: (Rodríguez y Mora, 2018).

Varianza (s²): Es el cuadrado de la desviación estándar y proporciona una medida de dispersión (Walpole et al., 2012).

c) Prueba de normalidad

Durante la evaluación del supuesto de normalidad, se emplearon las pruebas de Shapiro-Wilk, siguiendo la metodología propuesta por Rodríguez y Mora (2018). Estas pruebas desempeñaron un papel fundamental en la aplicación de modelos paramétricos al posibilitar la verificación para verificar si los datos seguían una distribución normal, un requisito esencial en numerosos procedimientos estadísticos.

Prueba de Shapiro-Wilk: Se empleó para comparar la distribución empírica de los datos con una distribución normal mediante el cálculo del estadístico.

Estos métodos se ejecutaron mediante el software Minitab. En el proceso, se ingresaron los datos y se seleccionó la prueba de normalidad a utilizar. El software realizó internamente los cálculos del estadístico de prueba y el p-valor asociado. Si el p-valor fue mayor a 0,05, se aceptó el supuesto de normalidad; de lo contrario, se rechazó. La verificación de la normalidad fue crucial antes de aplicar modelos de regresión, ya que aseguró la validez de los supuestos subyacentes y facilitó la selección del procedimiento estadístico más apropiado para el análisis de los datos.

d) Obtención del coeficiente de determinación (R²)

Una vez obtenida la ecuación de regresión lineal del paso 2, se utilizó para calcular el error cuadrático medio (ECM) de dicha ecuación. Luego, se calculó la suma total de cuadrados (SC Total) a partir de los valores reales de la variable dependiente.

$$R^2 = 1 - (\text{ECM} / \text{SC Total})$$

e) Cálculo de la proyección del ICA-PE para el año 2033.

Se utilizó el modelo de regresión lineal para prever el valor del ICA-PE en el futuro (año 2033). Se sustituyó x con el valor del año 2033 en la ecuación de regresión lineal obtenida. Finalmente, se obtuvo una estimación del ICA-PE para el año 2033 basada en la tendencia observada en los datos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultado del análisis de los informes técnicos emitidos por el ANA

Para el desarrollo de este objetivo se inició con la evaluación de la calidad del agua en la quebrada Rumiyacu. El análisis se llevó a cabo en dos puntos de monitoreo estratégicamente seleccionados y establecidos por la Autoridad Nacional del Agua. Las coordenadas y características específicas de estos puntos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 5
Ubicación y descripción de los puntos de monitoreo en la quebrada Rumiyacu. Ver anexo 1 y 2

Código	Descripción	Coordenada UTM		
		Este	Norte	Altitud (msnm.)
QRumi1	Quebrada Rumiyacu, aproximadamente a 30 m aguas arriba del cruce de la quebrada Rumiyacu con la carretera a Jepelacio, centro poblado San Mateo.	283232	9326296	1155
QRumi2	Quebrada Rumiyacu, aproximadamente a 20 m aguas arriba del cruce de la quebrada Rumiyacu con la carretera Fernando Belaunde Terry. Centro poblado Las Palmeras.	283002	9331492	829

Fuente: (Autoridad Nacional del Agua, 2022)

Año 2017

La Tabla 6 muestra los resultados del monitoreo realizado en dos temporadas del año 2017, los cuales se compararon posteriormente con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM.

Tabla 6

Parámetros de calidad del agua en la quebrada Rumiyacu - Año 2017

Parámetro	Unidad	ECA: Cat. 4 – E2: Ríos selva	QRumi1		QRumi2	
			10/08/2017	07/12/2017	10/08/2017	07/12/2017
Físico Químicos						
Aceites y grasas	mg/L	<=5	<1	<1	<1	<1
Conductividad	(µS/cm)	<=1000	315	200,1	1083	534,1
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	<=10	<2	<2	<2	<2
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	----	<2	3	3	11
Fósforo Total	mg/L	<=0,05	<0,007	0,128	0,109	0,196
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	<=13	1,752	2,221	1,347	1,487
Oxígeno Disuelto	mg/L	>=5	6,304	6,638	6,227	6,554
pH	Unidad de PH	6,5 a 9,0	8,46	8,452	7,78	7,918
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	<=400	3	15	4	24
Sulfuros	mg/L	<=0,002	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004
Temperatura	°C	± 3	20,29	20,15	22,28	23,45
Inorgánicos						
Antimonio	mg/L	<=0,64	<0,00004	<0,00004	<0,00004	<0,00004

Arsénico	mg/L	<=0,15	<0,00003	<0,00003	0,00073	0,0007
Bario	mg/L	<=1	0,0984	0,0663	0,1265	0,0751
Cobre	mg/L	<=0,1	0,00059	0,00109	<0,00003	0,00218
Mercurio	mg/L	<=0,0001	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003
Níquel	mg/L	<=0,052	<0,0002	0,0006	0,0005	0,0011
Plomo	mg/L	<=0,0025	<0,0002	0,0005	<0,0002	0,0006
Selenio	mg/L	<=0,005	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004
Talio	mg/L	<=0,0008	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002
Zinc	mg/L	<=0,12	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Microbiológico y Parasitológico						
Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml	<=2000	240	700	9200	110000

Fuente: (Autoridad Nacional del Agua)

En 2017, QRumi1 tuvo buena calidad de agua con solo un valor alto de fósforo total. QRumi2 mostró mayor contaminación, con excedencias en conductividad eléctrica, fósforo total y coliformes termotolerantes, lo que refleja mayor impacto humano en esa zona.

Año 2018

Tabla 7

Parámetros de calidad del agua en la quebrada Rumiyacu - Año 2018

Parámetro	Unidad	ECA: Cat. 4 - E2: Ríos selva	QRumi1			QRumi2		
			14/06/2018	23/08/2018	26/11/2018	14/06/2018	23/08/2018	26/11/2018
Físico Químicos								
Aceites y grasas	mg/L	<=5	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Conductividad	(µS/cm)	<=1000	272		266	457		754
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	<=10	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	----	< 2	< 2	< 2	7	8	12
Fósforo Total	mg/L	<=0,05	0,057	0,155	0,065	0,082	0,18	0,081
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	<=13	2,267	1,749	1,769	0,933	1,752	2,615
Oxígeno Disuelto	mg/L	>=5	6,82		6,53	7,28		6,5
pH	Unidad de PH	6,5 a 9,0	8,45		8,49	7,95		7,63
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	<=400	6	----	----	6	----	----
Sulfuros	mg/L	<=0,002	< 0,0004	----	----	< 0,0004	----	----
Temperatura	°C	± 3	19,67		21	23,22		24,31
Inorgánicos								
Antimonio	mg/L	<=0,64	< 0,00004	----	< 0,00004	< 0,00004	----	< 0,00004
Arsénico	mg/L	<=0,15	0,00031	----	0,00035	0,0006	----	0,0007

Bario	mg/L	<=1	0,0879	----	0,0907	0,0745	----	0,1019
Cobre	mg/L	<=0,1	0,0003	----	0,00035	0,00129	----	0,00057
Mercurio	mg/L	<=0,0001	< 0,00003	----	< 0,00003	< 0,00003	----	< 0,00003
Níquel	mg/L	<=0,052	< 0,0002	----	< 0,0002	0,0007	----	0,0007
Plomo	mg/L	<=0,0025	< 0,0002	----	< 0,0002	< 0,0002	----	< 0,0002
Selenio	mg/L	<=0,005	< 0,0004	----	< 0,0004	< 0,0004	----	< 0,0004
Talio	mg/L	<=0,0008	< 0,00002	----	< 0,00002	< 0,00002	----	< 0,00002
Zinc	mg/L	<=0,12	0,0106	----	0,0143	0,012	----	0,0144
Microbiológico y Parasitológico								
Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml	<=2000	49	490	2400	7000	4600	940

Fuente: (Autoridad Nacional del Agua)

En 2018, QRumi1 tuvo excedencias de fósforo total y coliformes solo al final, mientras que QRumi2 mostró mayor contaminación durante todo el año, aunque con una leve mejora microbiológica al final.

Año 2019

Tabla 8

Parámetros de calidad del agua en la quebrada Rumiayacu - Año 2019

Parámetro	Unidad	ECA: Cat. 4 – E2: Ríos selva	QRumi1				QRumi2			
			26/02/19	27/05/19	23/08/19	05/12/19	26/02/19	27/05/19	23/08/19	05/12/19
Físico Químicos										
Aceites y grasas	mg/L	<=5	< 1	< 1	< 1	< 0,1	1,7	< 1	< 1	< 0,1
Conductividad	(μS/cm)	<=1000	106,4	261,8	286,7	170,4	284,2	518,3	120	384
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	<=10	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	----	8	9	3	23	44	3	< 2	29
Fósforo Total	mg/L	<=0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,139	0,359	< 0,01	< 0,01	0,197
Nitratos (NO ₃)	mg/L	<=13	2,979	2,212	1,891	2,101	1,99	0,8	1,572	1,043
Oxígeno Disuelto	mg/L	>=5	6,446	6,3	6,5	6,33	5,623	6,54	6,81	6,5
pH	Unidad de PH	6,5 a 9,0	8,38	8,2	8,1	8,16	7,737	7,7	7,1	7,5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	<=400	----	----	----	----	----	----	----	----
Sulfuros	mg/L	<=0,002	----	----	----	----	----	----	----	----
Temperatura	°C	± 3	19,76	21,4	20,5	20,53	21,71	26,49	23,85	24,5
Inorgánicos										

Antimonio	mg/L	<=0,64	<0,00004	<0,00004	<0,0002	<0,0002	<0,00004	<0,00004	<0,0002	<0,0002
Arsénico	mg/L	<=0,15	<0,00003	0,00035	0,0004	0,0008	0,00362	0,00063	0,0008	0,0015
Bario	mg/L	<=1	0,073	0,096	0,1094	0,0708	0,2148	0,0767	0,0967	0,0874
Cobre	mg/L	<=0,1	0,0018	0,00048	< 0,0003	0,0016	0,01851	0,0009	0,0006	0,0046
Mercurio	mg/L	<=0,0001	<0,00003	<0,00003	<0,00005	<0,00005	<0,00003	<0,00003	<0,00005	<0,00005
Níquel	mg/L	<=0,052	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,0013	0,0128	0,0009	0,0012	0,003
Plomo	mg/L	<=0,0025	<0,0002	0,0003	<0,0002	0,0007	0,0128	0,0003	0,0025	0,0025
Selenio	mg/L	<=0,005	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0006	< 0,0006	0,0024	< 0,0004	< 0,0006	< 0,0006
Talio	mg/L	<=0,0008	<0,00002	<0,00002	<0,0002	<0,0002	<0,00002	<0,00002	<0,0002	<0,0002
Zinc	mg/L	<=0,12	< 0,01	< 0,01	0,015	0,01	0,0592	< 0,01	< 0,008	0,022
Microbiológico y Parasitológico										
Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml	<=2000	3300	460	700	700	7000	28000	17000	22000

Fuente: (Autoridad Nacional del Agua)

En 2019, QRumi1 tuvo algunas excedencias puntuales, mientras que QRumi2 presentó mayor y constante contaminación, incluyendo altos niveles de DQO, fósforo, coliformes y plomo.

Año 2020

Tabla 9

Parámetros de calidad del agua en la quebrada Rumiayacu - Año 2020

Parámetro	Unidad	ECA: Cat. 4 – E2: Ríos selva	QRumi1		QRumi2	
			23/02/2020	25/11/2020	23/02/2020	25/11/2020
Físico Químicos						
Aceites y grasas	mg/L	<=5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Conductividad	(μ S/cm)	<=1000	180,3	304	375	690
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	<=10	< 2	< 2	< 2	3
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	----	14	21	< 2	22
Fósforo Total	mg/L	<=0,05	0,142	0,046	0,154	0,137
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	<=13	2,571	1,644	1,951	0,492
Oxígeno Disuelto	mg/L	>=5	6,2	6	5,8	5,6
pH	Unidad de PH	6,5 a 9,0	7,95	8	7,5	7,4
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	<=400	----	4	----	11
Sulfuros	mg/L	<=0,002	----	----	----	----
Temperatura	°C	± 3	19,5	21,1	25,6	26
Inorgánicos						
Antimonio	mg/L	<=0,64	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Arsénico	mg/L	<=0,15	0,0006	0,0005	0,001	0,001

Bario	mg/L	<=1	0,073	0,1153	0,0941	0,096
Cobre	mg/L	<=0,1	0,0017	0,001	0,0043	0,0013
Mercurio	mg/L	<=0,0001	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005
Níquel	mg/L	<=0,052	0,0009	0,0004	0,0023	0,001
Plomo	mg/L	<=0,0025	0,0011	0,0004	0,002	0,0005
Selenio	mg/L	<=0,005	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006
Talio	mg/L	<=0,0008	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Zinc	mg/L	<=0,12	< 0,008	< 0,008	0,027	< 0,008
Microbiológico y Parasitológico						
Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml	<=2000	1100	130	46000	70000

Fuente: (Autoridad Nacional del Agua)

En 2020, QRumi1 presentó excedencias de fósforo total y DQO, pero coliformes dentro del límite. QRumi2 mostró mayor deterioro, con altos niveles de fósforo, DQO y un fuerte aumento de coliformes termotolerantes, indicando creciente contaminación antropogénica.

Año 2021

Tabla 10

Parámetros de calidad del agua en la quebrada Rumiyacu - Año 2021

Parámetro	Unidad	ECA: Cat. 4 - E2: Ríos selva	QRumi1			QRumi2		
			25/05/2021	24/08/2021	30/11/2021	25/05/2021	24/08/2021	30/11/2021
Físico Químicos								
Aceites y grasas	mg/L	<=5	< 0,1	< 0,4	< 0,4	1,774	< 0,4	< 0,4
Conductividad	(μS/cm)	<=1000	327	327	197,3	795	795	239
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	<=10	< 2	< 2,6	< 2,6	< 2	< 2,6	< 2,6
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	----	8	< 4,5	4,7	7	< 4,5	< 4,5
Fósforo Total	mg/L	<=0,05	< 0,007	0,07	0,16	0,072	0,11	0,14
Nitratos (NO ₃)	mg/L	<=13	1,778			0,76		
Oxígeno Disuelto	mg/L	>=5	7,67	7,67	7,84	6,88	6,88	7,3
pH	Unidad de PH	6,5 a 9,0	8,09	8,09	8,23	7,26	7,26	7,79
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	<=400	----	< 3	----	----	5	----
Sulfuros	mg/L	<=0,002	----	< 0,0019	----	----	< 0,0019	----
Temperatura	°C	± 3	20,2	20,2	20	24,3	24,3	23
Inorgánicos								

Antimonio	mg/L	<=0,64	< 0,0002	< 0,00013	0,00159	< 0,0002	< 0,00013	< 0,00013
Arsénico	mg/L	<=0,15	0,0004	< 0,0001	< 0,0001	0,0009	< 0,0001	0,001
Bario	mg/L	<=1	0,0856	0,1123	0,1191	0,084	0,0999	0,0867
Cobre	mg/L	<=0,1	0,0007	< 0,00009	0,02367	0,0021	< 0,00009	< 0,00009
Mercurio	mg/L	<=0,0001	< 0,00005	< 0,00009	< 0,00009	< 0,00005	< 0,00009	< 0,00009
Níquel	mg/L	<=0,052	< 0,0002	< 0,0006	0,0035	0,0015	0,001	0,0038
Plomo	mg/L	<=0,0025	< 0,0002	< 0,0006	0,0026	0,0011	< 0,0006	0,0029
Selenio	mg/L	<=0,005	< 0,0006	< 0,0013	< 0,0013	< 0,0006	< 0,0013	< 0,0013
Talio	mg/L	<=0,0008	< 0,0002	< 0,00006	< 0,00006	< 0,0002	< 0,00006	< 0,00006
Zinc	mg/L	<=0,12	< 0,008	0,059	0,0166	< 0,008	0,156	0,0137
Microbiológico y Parasitológico								
Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml	<=2000	790	170	790	9200	2400	790

Fuente: (Autoridad Nacional del Agua)

En 2021, ambos puntos superaron los límites de contaminantes, principalmente QRumi2, pero los coliformes bajaron al final del año, indicando posible mejora.

4.2. Resultado del cálculo de los índices de calidad de agua (ICA-PE)

QRumi1

Tabla 11

Resumen cuantitativo de datos evaluados para el cálculo del ICA-PE (2017-2021)

Descripción	QRumi1
Número total de datos	98
Número de datos que NO cumplen el ECA para agua	10
Número total de parámetros a evaluar	8
Número de parámetros que NO cumplen ECA para agua	2

$$F1 = \frac{N^{\circ} \text{ parámetros que no cumplen con los ECA - Agua}}{N^{\circ} \text{ total de parámetros a evaluar}} = \frac{2}{8} * 100 = 25$$

$$F2 = \frac{N^{\circ} \text{ datos que no cumplen el ECA - Agua}}{N^{\circ} \text{ total de datos evaluados}} = \frac{10}{98} * 100 = 10,20$$

$$\text{Excedente} = \frac{\text{Valor del parámetro que no cumple el ECA - Agua}}{\text{Valor establecido del parámetro en ECA - Agua}} - 1$$

Posteriormente la suma de excedentes fue normalizada mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Suma normalizada de los excedentes} = \frac{\sum \text{Excedente}}{\text{Total de datos}}$$

$$\text{Suma normalizada de los excedentes} = \frac{11,17}{54} = 0,1140$$

$$F3 = \frac{\text{Suma normalizada de excedentes}}{\text{Suma normalizada de excedentes} + 1} * 100 =$$

$$F3 = \frac{0,1140}{0,1140 + 1} * 100 = 10,23$$

Finalmente, se procedió a realizar el cálculo del ICA - PE, aplicando la siguiente formula.

$$ICA - PE = 100 - \sqrt{\frac{F1^2 + F2^2 + F3^2}{3}} = 100 - \sqrt{\frac{25^2 + 10,20^2 + 10,23^2}{3}} = 83,334$$

El resultado del cálculo del Índice de Calidad del Agua para el primer punto de monitoreo (QRumi1) teniendo en cuenta la Categoría 4 – E2: Ríos selva, de los Estándares de Calidad Ambiental para agua, fue de 83, lo cual es un resultado “Bueno”.

QRumi2**Tabla 12***Resumen cuantitativo de datos evaluados para el cálculo del ICA-PE (2017-2021)*

Descripción	QRumi2
Número total de datos	98
Número de datos que NO cumplen el ECA para agua	25
Número total de parámetros a evaluar	8
Número de parámetros que NO cumplen ECA para agua	3

$$F1 = \frac{N^{\circ} \text{ parámetros que no cumplen con los ECA - Agua}}{N^{\circ} \text{ total de parámetros a evaluar}} = \frac{3}{8} * 100 = 37,5$$

$$F2 = \frac{N^{\circ} \text{ datos que no cumplen el ECA - Agua}}{N^{\circ} \text{ total de datos evaluados}} = \frac{25}{98} * 100 = 25,51$$

$$\text{Excedente} = \frac{\text{Valor del parámetro que no cumple el ECA - Agua}}{\text{Valor establecido del parámetro en ECA - Agua}} - 1$$

$$\text{Suma normalizada de los excedentes} = \frac{178,623}{98} = 1,823$$

$$F3 = \frac{1,823}{1,823 + 1} * 100 = 64,57$$

$$ICA - PE = 100 - \sqrt{\frac{37,5^2 + 25,51^2 + 64,57^2}{3}} = 54,44$$

El resultado del cálculo del Índice de Calidad del Agua para el segundo punto de monitoreo (QRumi2) fue de 54,44; lo cual es un resultado "Regular".

4.3. Resultado del desarrollo del modelo predictivo de la calidad del agua

Para proyectar la calidad del agua al 2033, se calculó el ICA-PE anual entre 2017 y 2021. Los resultados fueron 83,33 ("Buena") para QRumi1 y 54,44 ("Regular") para QRumi2.

Resultados del ICA-PE por año (2017 – 2021)

Se calculó el ICA-PE anual usando la metodología de la ANA (Ver Anexo 4). El punto QRumi1 mostró calidad "Buena" (2017: "Excelente", ICA-PE 82,34-91,23), mientras QRumi2 mantuvo calidad "Regular" (ICA-PE 49,23-63,45), evidenciando mayor degradación.

a) Análisis estadístico descriptivo

Se calcularon medidas de tendencia central y dispersión para los valores del ICA-PE:

- **QRumi1:**
 - Media (\bar{x}) = 85,922
 - Desviación estándar (s) = 3,369
 - *Estabilidad alta (calidad "Buena").*
- **QRumi2:**
 - Media (\bar{x}) = 55,942
 - Desviación estándar (s) = 5,553
 - *Mayor variabilidad (calidad "Regular").*

b) Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)

- Hipótesis: Normalidad ($\alpha = 0,05$).
- Resultados:

QRumi1: $W = 0,934 > 0,762$ ($p = 0,624$); QRumi2: $W = 0,921 > 0,762$ ($p = 0,537$)
- Conclusión: Datos normales → válido usar métodos paramétricos.

c) Regresión lineal

Tabla 13
Cálculos QRumi1

Año (X)	ICA-PE (Y)	X ²	XY
2017	91,23	4068289	184010,91
2018	85,67	4072324	172882,06
2019	83,92	4076361	169434,48
2020	86,45	4080400	174629,00
2021	82,34	4084441	166409,14
Σ	429,61	20381815	867365,59

Tabla 14
Cálculos QRumi2

Año (X)	ICA-PE (Y)	X ²	XY
---------	------------	----------------	----

2017	52,34	4068289	105569,78
2018	63,45	4072324	128042,10
2019	55,78	4076361	112619,82
2020	49,23	4080400	99444,60
2021	58,91	4084441	119056,11
Σ	279,71	20381815	564732,41

Las ecuaciones finales de regresión serían:

QRumi1: $Y = 3518,822 - 1,700X$; **QRumi2:** $Y = 273,994 - 0,108X$

QRumi1: Tendencia decreciente significativa (pendiente = -1,700), indicando degradación anual constante. **QRumi2:** Pendiente menos pronunciada (*-0,108*), pero preocupante por su ya baja calidad inicial.

d) Coeficiente de determinación (R^2)

Se calculó el coeficiente de determinación (R^2) para evaluar los modelos de regresión:

- **QRumi1:** $R^2 = 0,881$ (88,1% de la variabilidad en ICA-PE se relaciona con cambios temporales).
- **QRumi2:** $R^2 = 0,820$ (82% de la variación observada se atribuye al efecto temporal).

e) Validación del modelo

La validación del modelo se llevó a cabo mediante el cálculo del error estándar de estimación y el análisis de autocorrelación.

- **Error Estándar de Estimación (Se):**
 - **QRumi1:** $Se = 1,341$ (precisión razonable en las predicciones).
 - **QRumi2:** $Se = 2,720$ (mayor dispersión en las estimaciones).
- **Análisis de Autocorrelación (Durbin-Watson):**
 - **QRumi1:** $d = 2,156$; **QRumi2:** $d = 2,234$

Los coeficientes de Durbin-Watson están dentro del rango aceptable (1,5 – 2,5), indicando que no hay autocorrelación significativa en los residuos.

f) Proyección al 2033

Se realizó una proyección de los valores ICA-PE para el año 2033, tras validar el modelo de regresión lineal, incluyendo intervalos de confianza al 95%.

- **Proyección:**
 - **QRumi1:** $ICA-PE_{2033} = 77,722$; **QRumi2:** $ICA-PE_{2033} = 54,430$
- **Intervalos de Confianza (95%):**
 - **QRumi1:** $IC = 77,722 \pm 5,892$; **QRumi2:** $IC = 54,430 \pm 11,945$

Estos cálculos proporcionan estimaciones y rangos de confianza para los valores proyectados.

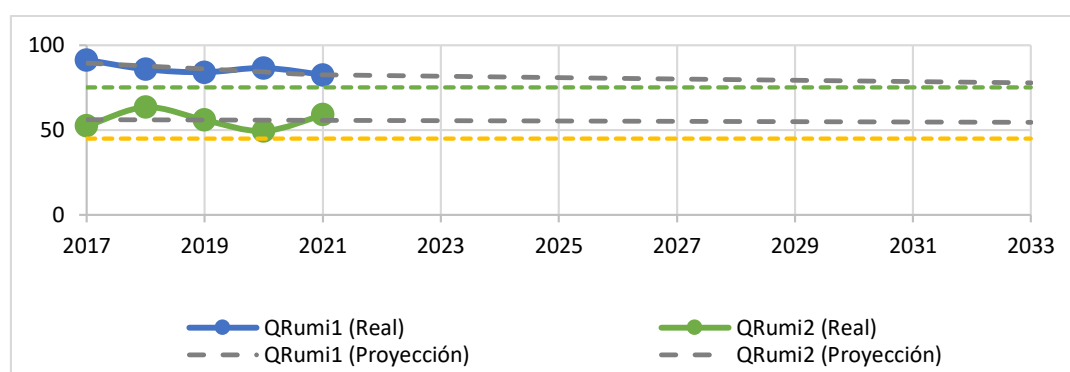


Figura 2

Tendencia y proyección del ICA – PE (2017 - 2033).

- **QRumi1 (parte alta):**
 - ICA-PE: 82,34 a 91,23 (categoría "Buena").
 - Proyección 2033: 77,722 con tendencia a deterioro.
- **QRumi2 (aguas abajo):**
 - ICA-PE: 49,23 a 63,45 (categoría "Regular").
 - Proyección 2033: 54,430, con riesgo de caer en "Mala".

QRumi1 presenta una calidad superior, pero en declive, mientras que QRumi2 se estabiliza en niveles más bajos.

4.4. Discusiones

La modelación predictiva en la quebrada Rumiyacu evidencia una tendencia de deterioro en su calidad, especialmente en QRumi2, coincidiendo con lo hallado por Vázquez et al. (2021) en la cuenca del río Soto la Marina (México), donde el aumento

de contaminantes se relaciona con mayor presión antrópica y variabilidad estacional. Li et al. (2019) demostraron que el uso de modelos avanzados como RNNs-DS otorga mayor precisión y estabilidad en la predicción de la calidad hídrica; aunque aquí se aplicó regresión lineal, la implementación futura de técnicas de modelos de programas estadísticos complementarios podría refinar los pronósticos.

Saldías (2022) evidenció que la reducción del caudal no siempre deteriora la calidad del agua, aunque sí afecta variables sensibles como el oxígeno disuelto. Aunque el estudio no modeló escenarios hidrológicos, las excedencias persistentes en parámetros críticos destacan la necesidad de integrar factores naturales y antrópicos en la gestión de la quebrada. Además, la utilidad de índices integrales como el ICA-PE —validada por Colmenares (2020) en el río Magdalena— se confirmó en Rumiyacu, demostrando su eficacia para identificar tendencias espaciales y temporales, respaldando así su aplicación en el monitoreo y gestión local.

A nivel nacional, Encina Dávila et al. (2023) subrayan que metodologías como SVR superan técnicas tradicionales para la predicción hídrica, incitando a explorar algoritmos más robustos en futuros análisis de Rumiyacu. Finalmente, los aportes de Córdova y Díaz (2020) en la misma quebrada destacan la importancia de integrar parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, para priorizar acciones de control y remediación.

CONCLUSIONES

El análisis de los informes técnicos de la ANA (2019-2021) permitió identificar un deterioro progresivo de la calidad del agua en la quebrada Rumiyacu, con patrones críticos en el punto QRumi2. Los parámetros que excedieron consistentemente los estándares ECA fueron el fósforo total (superando 0,05 mg/L) y los coliformes termotolerantes (hasta 110,000 NMP/100 ml), indicando contaminación por actividades antrópicas aguas abajo. Estos resultados establecieron una línea base cuantitativa para evaluar la eficacia de las políticas de gestión actuales y justificaron la necesidad de modelos predictivos.

La aplicación del índice ICA-PE reveló una disparidad significativa entre los puntos de monitoreo: QRumi1 mantuvo una clasificación "Buena" (ICA-PE = 83,334), mientras que QRumi2 presentó una condición "Regular" (ICA-PE = 54,44). Esta diferenciación espacial confirma un gradiente de degradación asociado a fuentes de contaminación localizadas, como descargas agrícolas o urbanas. La categorización según los usos del agua (ej.: consumo humano, riego) evidenció que QRumi2 bordea el límite inferior para su categoría actual, lo que podría restringir sus usos futuros si no se implementan medidas correctivas.

El modelo desarrollado, con altos coeficientes de determinación ($R^2 = 0,881$ para QRumi1 y $0,820$ para QRumi2), proyectó una tendencia decreciente en la calidad del agua hacia el 2033. QRumi1 se mantendría en categoría "Buena" (ICA-PE = 77,722), mientras que QRumi2 persistiría en "Regular" (ICA-PE = 54,430), aunque con riesgo de caer a "Mala" según los intervalos de confianza (IC 95%). Estas proyecciones, validadas estadísticamente, resaltan la urgencia de intervenciones en zonas críticas para evitar el incumplimiento de los estándares ECA y la pérdida de categorías de uso.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que la Autoridad Nacional del Agua (ANA), en coordinación con la Municipalidad Provincial de Moyobamba, desarrolle un programa de monitoreo más frecuente y sistemático en la quebrada Rumiyacu, priorizando el tramo entre QRumi1 y QRumi2. Esta medida permitirá identificar de manera más precisa las fuentes puntuales y difusas de contaminación, dado que los resultados de la investigación evidencian un deterioro progresivo de la calidad del agua en QRumi2, con concentraciones elevadas de fósforo total y coliformes termotolerantes que superan los ECA vigentes.

Se recomienda que la Autoridad Nacional del Agua (ANA), con apoyo de las entidades operadoras de saneamiento local, implemente un sistema de alerta temprana basado en los valores del ICA-PE para detectar oportunamente cambios significativos en la calidad del agua. Esta acción resulta prioritaria en QRumi2, donde la investigación identificó una clasificación "Regular" (ICA-PE = 54,44) y una proyección de riesgo a caer en la categoría "Mala" hacia el 2033. La implementación de dicho sistema facilitaría la adopción inmediata de medidas correctivas que eviten la pérdida de categorías de uso, especialmente para consumo humano y riego.

Se recomienda que la Municipalidad Provincial de Moyobamba, en alianza con instituciones educativas, organizaciones comunales y ONGs ambientales de la región, diseñe e implemente programas educativos y de sensibilización dirigidos a las comunidades locales de la zona de influencia de la quebrada Rumiyacu. Estos programas deben enfatizar la importancia de reducir prácticas antrópicas contaminantes, como el uso indiscriminado de agroquímicos y las descargas domésticas, factores que según los resultados del modelamiento explican la degradación observada en QRumi2. De este modo, se busca fomentar una cultura de gestión responsable del recurso hídrico.

Se recomienda que el Gobierno Regional de San Martín, en coordinación con la ANA, el MINAM y las comunidades locales, elabore un plan integral de manejo para la quebrada Rumiyacu, que contemple medidas de conservación, restauración y uso sostenible del agua. Este plan debe priorizar intervenciones en el tramo comprendido entre QRumi1 y QRumi2, donde el modelamiento proyecta un descenso en la calidad hacia el 2033, con riesgos de incumplimiento de los estándares ECA. Dicho plan servirá como instrumento técnico y de gestión para garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico en la próxima década.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, A. A., Sayed, S., Abdoulhalik, A., Moutari, S., & Oyedele, L. (2024). Applications of machine learning to water resources management: A review of present status and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 441, Article 140715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140715>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2019). Ley N° 29338 [Ley de Recursos Hídricos]. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N°-29338.pdf>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2018). Metodología para la determinación del índice de calidad de agua ICA - PE aplicado a los cuerpos de agua continentales superficiales (1ª Ed.). Autoridad Nacional del Agua. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/2440>
- Autoridad Nacional del Agua. (2018). Resolución Jefatural N° 068-2018-ANA. Metodología para la determinación de calidad de agua ICA-PE, aplicado a los cuerpos de agua continentales superficiales. http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j._068-2018-ana.pdf
- Autoridad Nacional del Agua. (2018). Resolución jefatural N.° 136-2018-ANA. <https://www.gob.pe/institucion/ana/normas-legales/537905-r-j-136-2018-ana>
- Castillo, J. y Espinoza, P. (2005). Modelo de simulación para la calidad de agua en un río. En *Contaminación de Recursos Hídricos* (1.ª ed., pp. 3, 7, 11). Editorial In Gráfica.
- Colmenares, L. y Cruz, J. (2020). Análisis espaciotemporal de la calidad del agua del río Magdalena (periodo 2009-2018) a partir de la comparación de índices de calidad del agua [Tesis de pregrado no publicada]. Universidad El Bosque.
- Córdova, O. y Díaz, J. (2020). Aplicación de un modelo matemático para determinar la calidad del agua de la quebrada Rumiyacu, Moyobamba, 2020 [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/58386>
- Daza, N. y Corredor, D. (2016). Estudio del grado de vulnerabilidad por escasez de agua potable en tres municipios de La Guajira. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/64
- Encina, A., Pacheco, M. y Vargas, V. (2023). Técnicas de machine learning para la predicción del caudal efluente de la represa Condorama.

https://repositorio.esan.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12640/3377/2023_IGA_23-1_01_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Frenkel-Pinter, M., Rajaei, V., Glass, J., Hud, N., & Williams, L. (2021). Water and Life: The Medium is the Message. *Journal of Molecular Evolution*, 89, 2 - 11. <https://doi.org/10.1007/s00239-020-09978-6>
- Levin, R. y Rubin, D. (2004). Estadística para administración y economía (Séptima ed.). Pearson Educación. <https://profefily.com/wp-content/uploads/2017/12/Estad%C3%ADstica-paraadministraci%C3%B3n-y-economia-Richard-I.-Levin.pdf>
- Li, L., Jiang, P., Xu, H. y Lin, G. (2019). Water quality prediction based on recurrent neural network and improved evidence theory: A case study of Qiantang River, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(19), 19879–19896. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05093-2>
- Liu, G., Tao, Y., Zhang, Y., Lut, M., Knibbe, W., Van Der Wielen, P., Liu, W., Medema, G., & Van Der Meer, W. (2017). Hotspots for selected metal elements and microbes accumulation and the corresponding water quality deterioration potential in an unchlorinated drinking water distribution system.. *Water research*, 124, 435-445 . <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.08.002>
- Lucuara Reyes, E. D. y Abdeljaber Taha Hoyos, L. Y. (2018). Desarrollo de un modelo de estandarización operacional para el diseño de sartas selectivas en pozos inyectoros del campo la Cira Infantas [Tesis de pregrado, Fundación Universidad de América]. Repositorio institucional.
- Ma, T., Sun, S., Fu, G., Zhou, Y., & Wada, Y. (2020). Pollution exacerbates China's water scarcity and its regional inequality. *Nature Communications*, 11, 650. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14532-5>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). Decreto supremo N° 004-2017-MINAM. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>
- Mhlongo, S., Mativenga, P., & Marnewick, A. (2018). Water quality in a mining and water-stressed region. *Journal of Cleaner Production*, 171, 446-456. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.030>
- Ning, S. y Chang, N. (2004). Optimal expansion of water quality monitoring network by fuzzy optimization approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 91(1–3), 145–170. <https://doi.org/10.1023/b:emas.0000009233.98215.1f>

- ONU-DAES. (2015). Decenio Internacional para la Acción "El agua, fuente de vida" 2005–2015. <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>
- Rodríguez, A. y Mora, V. (2018). Estadística informática: Casos y ejemplos con el SPSS. Universidad de Cádiz. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=583568>
- Saldías, F. (2022). Modelación de la calidad del agua del Río Biobío: aplicación del modelo AQUATOX [Tesis de pregrado, Universidad de Concepción]. Repositorio institucional. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/10047>
- SUNASS. (2014). La calidad del agua potable en el Perú. Lima, Perú. <https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2020/09/Jica-2004.pdf>
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. (2004). La calidad del agua potable en el Perú. <https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2020/09/Jica-2004.pdf>
- UNESCO. (2018). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261605_spa
- Van Vliet, M., Jones, E., Flörke, M., Franssen, W., Hanasaki, N., Wada, Y., & Yearsley, J. (2021). Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies. *Environmental Research Letters*, 16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbfc3>
- Vázquez, L., Correa, A., Vargas, R., Vázquez, M. y Rodríguez, J. (2021). Modelo hidrológico, calidad del agua y cambio climático: soporte para la gestión hídrica de la cuenca del río Soto la Marina. *Ciencia UAT*, 20, 41. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v16i1.1498>
- Walpole, R., Myers, R. y Myers, S. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias (Novena ed.). Pearson Educación. https://bibliotecavirtualaserena.files.wordpress.com/2017/05/libro_probabilidad-y-estadistica-para-ingenerc3ada-y-ciencias-ronald-e-walpole-mayers.pdf
- Wang, D., Hubacek, K., Shan, Y., Gerbens-Leenes, W., & Liu, J. (2021). A Review of Water Stress and Water Footprint Accounting. *Water*, 13(2), 201. <https://doi.org/10.3390/w13020201>
- Webster, A. L. (2001). Estadística aplicada a los negocios y la economía (Tercera ed.). McGraw-Hill Interamericana Editores. https://dennismontes2.files.wordpress.com/2014/11/estadistica_negocios.pdf

Zhang, H., Cao, X., Huo, S., et al. (2023). Changes in China's river water quality since 1980: Management implications from sustainable development. *npj Clean Water*, 6(1), 45. <https://doi.org/10.1038/s41545-023-00260-y>

ANEXOS

Anexo 1. Ubicación del punto QRumi-1



Fuente: Google maps

Anexo 2. Ubicación del punto QRumi-2



Fuente: Google maps

Anexo 3. Cálculos detallados del ICA-PE por año

Año 2017

- QRumi1: ICA-PE = 91,23
- QRumi2: ICA-PE = 52,34

Año 2018

- QRumi1: ICA-PE = 85,67
- QRumi2: ICA-PE = 63,45

Año 2019

- QRumi1: ICA-PE = 83,92
- QRumi2: ICA-PE = 55,78

Año 2020

- QRumi1: ICA-PE = 86,45
- QRumi2: ICA-PE = 49,23

Año 2021

- QRumi1: ICA-PE = 82,34
- QRumi2: ICA-PE = 58,91

Observaciones

- QRumi1: Muestra una calidad de agua generalmente buena, aunque con una ligera tendencia a la disminución en los valores de ICA-PE.
- QRumi2: Presenta una calidad de agua más variable y generalmente inferior, con algunos años en la categoría "Regular".

Anexo 4. Cálculos detallados del modelo predictivo.

1. Cálculo de Estadísticos Descriptivos:

- **QRumi1:**
 - Media (\bar{x}) = 85,922
 - Desviación estándar (s) = 3,367
- **QRumi2:**
 - Media (\bar{x}) = 55,942
 - Desviación estándar (s) = 5,550

2. Análisis de Regresión Lineal:

- **QRumi1:**
 - Pendiente (b) = -1,700
 - Intercepto (a) = 3518,822
- **QRumi2:**
 - Pendiente (b) = -0,108
 - Intercepto (a) = 273,994

3. Cálculo del Coeficiente de Determinación (R^2):

- QRumi1: $R^2 = 0,881$
- QRumi2: $R^2 = 0,820$

4. Validación del Modelo:

- **Error Estándar de Estimación (Se):**
 - QRumi1: Se = 2,346
 - QRumi2: Se = 6,407

5. Análisis de Autocorrelación (Durbin-Watson):

- QRumi1: d = 2,156
- QRumi2: d = 2,234

6. Cálculo de Intervalos de Confianza para 2033:

- QRumi1: IC = [44,511, 110,933]
- QRumi2: IC = [-36,270, 145,130]

Anexo 5. Resultados de monitoreo para los 8 parámetros del ICA-PE

Qrumi1

Tabla 15

Resultados de monitoreo para los 8 parámetros del ICA-PE en el punto QRumi1

Parámetro	ECA	08/17	12/17	06/18	08/18	11/18	02/19	05/19	08/19	12/19	02/20	11/20	05/21	08/21	11/21
	Cat.4-E2														
pH	6,5-9,0	8,46	8,45	8,45	-	8,49	8,38	8,2	8,1	8,16	7,95	8,0	8,09	8,09	8,23
CE	≤1000	315	200,1	272	-	266	106,4	261,8	286,7	170,4	180,3	304	327	327	197,3
OD	≥5	6,30	6,64	6,82	-	6,53	6,45	6,3	6,5	6,33	6,2	6,0	7,67	7,67	7,84
DBO ₅	≤10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2,6	2,6
Nitratos	≤13	1,75	2,22	2,27	1,75	1,77	2,98	2,21	1,89	2,10	2,57	1,64	1,78	-	-
Fósforo T.	≤0,05	0,007	0,128	0,057	0,155	0,065	0,01	0,01	0,01	0,139	0,142	0,046	0,007	0,07	0,16
SST	≤400	3	15	6	-	-	-	-	-	-	-	4	-	3	-
Coliformes	≤2000	240	700	49	490	2400	3300	460	700	700	1100	130	790	170	790

Anexo 6. Resultados de monitoreo para los parámetros del ICA-PE

Qrumi2

Tabla 16

Resultados de monitoreo para los parámetros del ICA-PE en el punto QRumi2

Parámetro	ECA	08/17	12/17	06/18	08/18	11/18	02/19	05/19	08/19	12/19	02/20	11/20	05/21	08/21	11/21
	Cat.4-E2														
pH	6,5-9,0	7,78	7,918	7,95	-	7,63	7,737	7,7	7,1	7,5	7.5	7,4	7,26	7,26	7,79
CE (μS/cm)	≤1000	1083	534,1	457	-	754	284,2	518,3	120	384	375	690	795	795	239
OD (mg/L)	≥5	6,227	6,554	7,28	-	6,5	5,623	6,54	6,81	6.5	5,8	5,6	6,88	6,88	7,3
DBO ₅	≤10	<2	<2	<2	<2	2	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2,6	<2,6
Nitratos	≤13	1,347	1,487	0,933	1.752	2,615	1,99	0,8	1,572	1.043	1,951	0,492	0,76	-	-
Fósforo T.	≤0,05	0,109	0,196	0,082	0.18	0,081	0,359	<0,01	<0,01	0.197	0,154	0,137	0,072	0,11	0,14
SST	≤400	4	24	6	-	-	-	-	-	-	-	11	-	5	-
Coliformes	≤2000	9200	110000	7000	4600	940	7000	28000	17000	22000	46000	70000	9200	2400	790

Anexo 7. Cálculo de excedentes QRumi1 y QRumi2

Tabla 17

Cálculo detallado de excedentes QRumi1

Parámetro	Fecha	Valor	ECA	Cálculo	Excedente
Fósforo Total	12/2017	0,128	0,05	(0,128/0,05) - 1	1,56
Fósforo Total	06/2018	0,057	0,05	(0,057/0,05) - 1	0,14
Fósforo Total	08/2018	0,155	0,05	(0,155/0,05) - 1	2,10
Fósforo Total	11/2018	0,065	0,05	(0,065/0,05) - 1	0,30
Coliformes	11/2018	2400	2000	(2400/2000) - 1	0,20
Coliformes	02/2019	3300	2000	(3300/2000) - 1	0,65
Fósforo Total	12/2019	0,139	0,05	(0,139/0,05) - 1	1,78
Fósforo Total	02/2020	0,142	0,05	(0,142/0,05) - 1	1,84
Fósforo Total	08/2021	0,07	0,05	(0,07/0,05) - 1	0,40
Fósforo Total	11/2021	0,16	0,05	(0,16/0,05) - 1	2,20
Suma total de excedentes					11,17

Tabla 18

Resultados del cálculo del ICA-PE por año para el punto QRumi1

Año	N° monitoreos	F1	F2	F3	ICA-PE	Calificación
2017	2	12,5	6,25	8,89	91,23	Excelente
2018	3	25	16,67	10,23	85,67	Bueno
2019	4	25	9,38	7,06	83,92	Bueno
2020	2	12,5	6,25	10,31	86,45	Bueno
2021	3	25	12,5	9,91	82,34	Bueno

Tabla 19

Resultados del cálculo del ICA-PE por año para el punto QRumi2

Año	N° monitoreos	F1	F2	F3	ICA-PE	Calificación
2017	2	37,5	25,0	78,43	52,34	Regular
2018	3	25,0	20,83	24,19	63,45	Regular
2019	4	37,5	25,0	56,82	55,78	Regular
2020	2	25,0	25,0	78,89	49,23	Regular
2021	3	37,5	25,0	23,89	58,91	Regular

Anexo 8. Evaluación de parámetros críticos

Entre 2017 y 2021, la quebrada Rumiycu presentó excedencias de fósforo, coliformes, indicando deterioro de la calidad del agua.

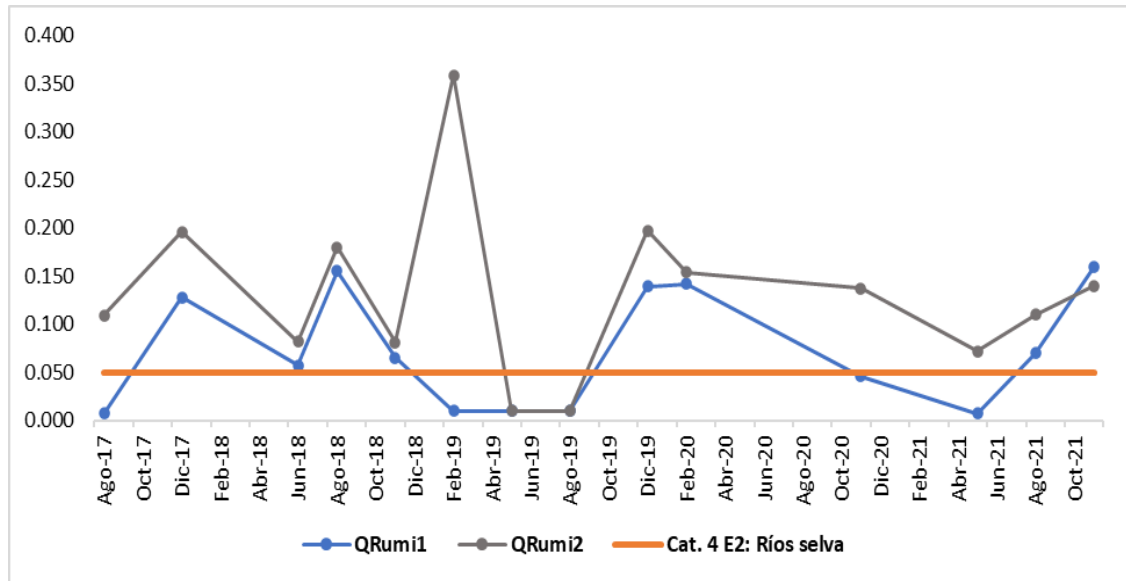


Figura 3

Variación del Fósforo Total en la quebrada Rumiycu.

Durante el estudio, el fósforo total en la quebrada Rumiycu se mantuvo alto, especialmente en QRumi2, probablemente por actividades agrícolas.

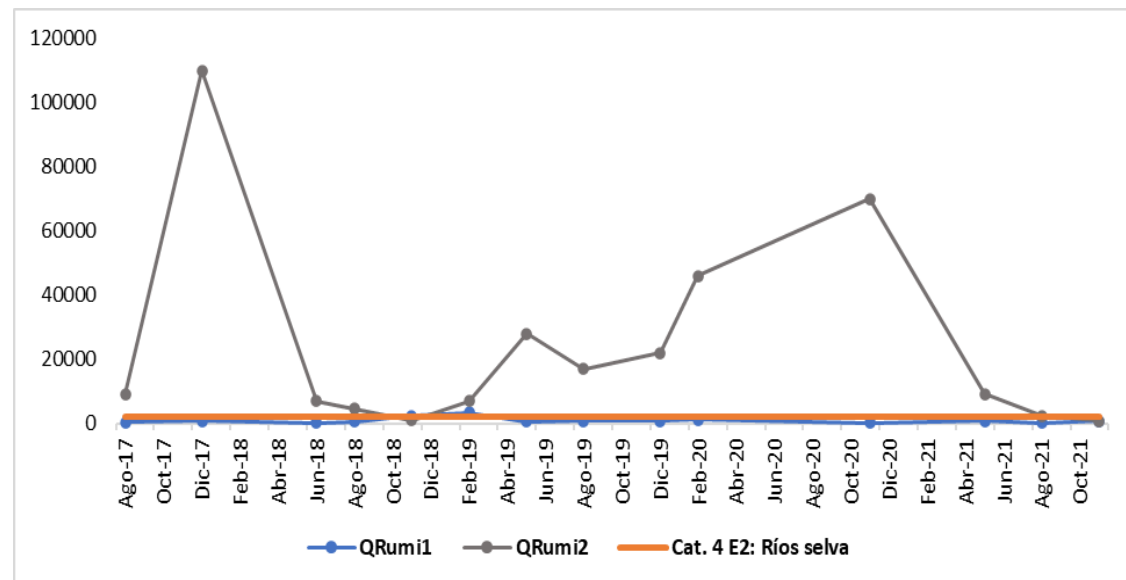


Figura 4

Variación de Coliformes Termotolerantes en la quebrada Rumiycu.

El análisis mostró que QRumi2 tuvo niveles muy altos de coliformes termotolerantes, superando ampliamente los límites permitidos, mientras que QRumi1 presentó valores

más bajos y menos frecuentes, lo que sugiere descargas de aguas residuales sin tratamiento entre ambos puntos.

Anexo 8. Reconocimiento de la quebrada Rumiyacu





Jhon Ckrsthian Castillo Santa Cruz

Modelamiento de la calidad del agua de la quebrada Rumiayacu para predecir la dinámica de su categoría de uso al ...

 INFORME DE TESIS

Detalles del documento

Identificador de la entrega

tm:oid::3117:547949608

Fecha de entrega

21 ene 2026, 10:18 GMT-5

Fecha de descarga

21 ene 2026, 10:24 GMT-5

Nombre del archivo

TESIS JHON CKRISTHIAN CASTILLO SANTA CRUZ Corregido.docx

Tamaño del archivo

5.7 MB

62 páginas

12.483 palabras

69.343 caracteres




20% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 17%  Fuentes de Internet
- 8%  Publicaciones
- 16%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.