

DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR THE ANALYSIS OF WATER QUALITY IN RIVERS

Ivanna Maria Caballero, Ingeniero Industrial y de Sistemas^{1,2}, Aldo Fernando Zavala, Ingeniero Industrial y de Sistemas^{1,3}, and Maria Elena Perdomo, Máster en Ingeniería Industrial^{1,4}

¹Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC) San Pedro Sula, Honduras, Honduras C.A,

²ivannacaballero@unitec.edu ³aldofernando16@unitec.edu, ⁴maria_perdomo@unitec.edu

Abstract— The Bermejo River, located in the San Pedro Sula region of Honduras, is a vital resource for the city and its economy, playing a crucial role in commercial activities and meeting basic needs, particularly in communities lacking proper access to water infrastructure. Despite its significance, there is a notable lack of information regarding the water quality in this river. This research aims to develop a detailed method that serves as a guide for future water quality analyses in rivers including Bermejo. The necessary procedures for sample collection are outlined, along with strategically selected sampling points. Parameters to be assessed include the presence of detergents and chlorine, indicators of fecal contamination, chemical oxygen demand, dissolved oxygen concentration, presence of fats and oils, pH levels, and fecal coliforms. The designated sampling points for this study are point a, located at coordinates 15°31'56.6"N 88°00'51.8"W, and point b, at 15°30'46.2"N 87°59'33.5"W. Once data is collected and results of tests for each parameter are analyzed, the Canadian council of ministers of the environment water quality index (CCME WQI) is applied. The results yielded a score of 29.51, indicating that the water quality falls into the lowest category, considered poor. This study provides a systematic initial insight into the water quality of the Bermejo River and establishes the groundwork for future research and monitoring. The findings underscore the need for interventions and policies addressing pollution sources and promoting improvements in the water quality of this crucial resource for the community.

Keywords: Honduras, water quality, method, urban river, water parameters.

DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS RÍOS

Ivanna Maria Caballero, Ingeniero Industrial y de Sistemas^{1,2}, Aldo Fernando Zavala, Ingeniero Industrial y de Sistemas^{1,3}, and Maria Elena Perdomo, Master en Ingeniería Industrial^{1,4}

¹Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC) San Pedro Sula, Honduras, Honduras C.A.,
²ivannacaballero@unitec.edu ³aldofernando16@unitec.edu, ⁴maria_perdomo@unitec.edu

Abstract— *The Bermejo River, located in the San Pedro Sula region of Honduras, is a vital resource for the city and its economy, playing a crucial role in commercial activities and meeting basic needs, particularly in communities lacking proper access to water infrastructure. Despite its significance, there is a notable lack of information regarding the water quality in this river. This research aims to develop a detailed method that serves as a guide for future water quality analyses in rivers including Bermejo. The necessary procedures for sample collection are outlined, along with strategically selected sampling points. Parameters to be assessed include the presence of detergents and chlorine, indicators of fecal contamination, chemical oxygen demand, dissolved oxygen concentration, presence of fats and oils, pH levels, and fecal coliforms. The designated sampling points for this study are point a, located at coordinates 15°31'56.6"N 88°00'51.8"W, and point b, at 15°30'46.2"N 87°59'33.5"W. Once data is collected and results of tests for each parameter are analyzed, the Canadian council of ministers of the environment water quality index (CCME WQI) is applied. The results yielded a score of 29.51, indicating that the water quality falls into the lowest category, considered poor. This study provides a systematic initial insight into the water quality of the Bermejo River and establishes the groundwork for future research and monitoring. The findings underscore the need for interventions and policies addressing pollution sources and promoting improvements in the water quality of this crucial resource for the community.*

Keywords: Honduras, water quality, method, urban river, water parameters.

I. INTRODUCCIÓN

El Río Bermejo es un elemento vital en la geografía y la economía de San Pedro Sula, Honduras, ya que atraviesa la ciudad y provee de agua a gran parte de la población. A pesar de la importancia del Río Bermejo, existe una falta de información clara y actualizada sobre su estado actual y los posibles factores de degradación, los cuales pueden deteriorar la calidad del agua y generar riesgos para la salud de las personas y el medio ambiente.

Esta situación dificulta la toma de decisiones y la implementación de medidas de prevención y restauración. Por ello, se hace necesario el desarrollo de un método de análisis de

la calidad del agua del Río Bermejo, que permita evaluar sus características físicas, químicas y biológicas, y compararlas con los estándares de calidad establecidos por la normativa vigente.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A. Precedentes

La contaminación del agua resultante de las actividades humanas se ha convertido en un tema de preocupación global. La situación ha empeorado en casi todos los ríos de África, Asia y América Latina desde la década de 1990. La deterioración del agua superficial en países menos desarrollados se debe principalmente a la contaminación relacionada con la población urbana en lugar de la contaminación agrícola o industrial. Por lo tanto, la evaluación de la calidad del agua de los ríos urbanos en una amplia gama de ciudades de bajos ingresos desempeña un papel clave en la gestión ambiental. [1]



Fig. 1. Año de publicación de los estudios. Fuente: Elaboración propia.

El Río Bermejo, que juega un papel crucial en la región de San Pedro Sula, Honduras, ha suscitado creciente interés debido a la falta de información clara sobre la calidad de su agua en los últimos años. A pesar de su importancia vital en el suministro de agua, la promoción de la biodiversidad y las actividades recreativas, no se dispone de datos concluyentes sobre el estado actual del agua, lo que genera incertidumbre sobre su posible deterioro. La posibilidad de cambios en la calidad del agua podría derivarse de diversas fuentes que aún no se han identificado claramente. La necesidad de comprender la situación actual del Río Bermejo es crucial para garantizar su seguridad y sostenibilidad a largo plazo como recurso hídrico. En este contexto de incertidumbre, surgen preguntas de investigación clave que buscan arrojar luz sobre la calidad del agua y su conformidad con los estándares establecidos por organizaciones internacionales.

B. Definición del problema.

El Río Bermejo, situado en la región noroeste de Honduras, es un elemento crucial en la geografía y economía de la zona. Con una longitud de aproximadamente 241 kilómetros. Sin embargo, el río enfrenta desafíos ambientales, como la contaminación y la erosión de las riberas, lo que subraya la importancia de su gestión sostenible para garantizar su bienestar continuo y su contribución a las comunidades locales y al entorno natural.

Es fundamental destacar que la degradación de la calidad del agua del Río Bermejo representa una amenaza latente para el equilibrio ecológico de la región, así como para la salud y el bienestar de las comunidades locales. La detección de contaminantes químicos y biológicos en el agua plantea incertidumbres acerca de la seguridad de su uso, tanto para el consumo humano como para actividades recreativas. Además, en un contexto global de cambio climático y aumento de la presión sobre los recursos hídricos, la preservación y restauración de la calidad del agua del Río Bermejo se convierte en una prioridad ineludible. La resolución de este problema no solo es esencial para la protección del medio ambiente y la salud pública, sino que también contribuirá al desarrollo sostenible y al bienestar general de la región de San Pedro Sula, asegurando la disponibilidad de un recurso vital para las generaciones presentes y futuras.

III. ESTADO DEL ARTE

A. Ríos

Los ríos, esenciales en la configuración global de paisajes y ecosistemas, son cursos de agua continuos que varían en tamaño, desde arroyos hasta majestuosos ríos. Transportan agua dulce desde montañas hasta océanos, siendo cruciales en áreas urbanas para el desarrollo y la calidad de vida. Además, regulan el clima urbano. Un río es una corriente natural con caudal variable, naciendo y desembocando en el mar. A lo largo de su curso, puede experimentar cambios geográficos. Los ríos de flujo libre respaldan ecosistemas diversos, ofreciendo servicios sociales y económicos esenciales. [2]

B. Impacto Humano y Contaminación de Ríos

Debido al aumento de la población, la acelerada urbanización y el crecimiento de las actividades comerciales e industriales, los ríos continúan siendo aprovechados y controlados para cubrir las demandas crecientes de la sociedad en electricidad, riego, provisión de agua y prevención de inundaciones. [3] Los metales pesados pueden ser liberados al ambiente acuático como resultado de actividades humanas tales como zinc (Zn), arsénico (As), cobre (Cu), plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), níquel (Ni) y cromo (Cr). [4]

En países con altos niveles de pobreza, por ejemplo, Honduras, Nicaragua, Indonesia, India, se observa como la urbanización sucede a un ritmo acelerado debido a la gran cantidad de migraciones de personas buscando mejores oportunidades económicas. Debido a la misma pobreza de estos países, muchas de estas personas no cuentan con acceso a agua y a servicios de saneamiento adecuados. [5] En muchas zonas no existe la infraestructura para gestionar los desechos de las diferentes actividades humanas. Como consecuencia, hay una disposición inadecuada de desechos, y productos químicos, los cuales tienen un impacto negativo en el ecosistema acuático.



Fig. 2. Ubicación geográfica de los países de estudio. Fuente: Elaboración propia

C. Cambios Climáticos y Efectos Hidrológicos

Cabe considerar por otra parte que el cambio climático también tiene graves implicaciones en términos ambientales, ecológicos, y sociales. Un efecto significativo de este es el cambio en el ciclo hidrológico. Puede causar eventos extremos como sequías, tormentas e inundaciones. [6] El cambio climático provoca cambios en los patrones espaciales y temporales de la precipitación, lo que presenta desafíos en la gestión de recursos hídricos a nivel regional y local. [7] Estos cambios en los patrones de lluvia pueden influir en la contaminación de los cuerpos de agua ya que se ve afectada la cantidad y la calidad del agua que ingresa a los ríos, y los eventos extremos pueden arrastrar contaminantes de diversas fuentes. La existencia de obstáculos físicos construidos por el ser humano, las variaciones climáticas, como las intensas precipitaciones, y la entrada de sustancias químicas a través del escurrimiento en los afluentes pueden modificar la composición del sedimento, lo que a su vez altera la base sobre la que se

encuentra el agua, disminuye los niveles de oxígeno en el agua y afecta negativamente su calidad.[8] La evaluación de la calidad del agua en ríos, especialmente en áreas urbanas, juega un papel esencial en la salvaguardia de la salud pública y la preservación del entorno ambiental. Esto es especialmente relevante dado que estos cuerpos de agua a menudo sirven como fuentes de abastecimiento para el consumo humano. Además, esta evaluación es fundamental para el desarrollo de una planificación urbana sostenible, al proporcionar datos esenciales que respaldan la toma de decisiones informadas y una gestión adecuada de los recursos hídricos en contextos urbanos.

D. Evaluación y Manejo de la Calidad del Agua

Un estudio de calidad del agua es una herramienta fundamental para determinar los procesos y tratamientos necesarios para transformar un río en una fuente viable de abastecimiento de agua potable para una determinada región. Este tipo de investigación proporciona datos esenciales que permiten evaluar la viabilidad y la necesidad de implementar medidas específicas para garantizar la potabilidad del agua extraída del río y su seguridad para el consumo humano. Los resultados de dicho estudio son cruciales para la toma de decisiones informadas en la planificación y gestión de recursos hídricos. En un estudio realizado en el Río Gambia ubicado en África se lograron identificar focos de contaminación, en su mayoría ubicados en las áreas urbanas y desembocaduras del río. El estudio sugiere que existe un tratamiento adecuado para hacer del río una fuente de agua potable para la región destacando la importancia de un constante monitoreo de la calidad del agua, específicamente en las zonas urbanas.[9]

En este contexto de monitoreo de la calidad del agua, es necesario no solo comprender las diversas técnicas disponibles, sino también aplicar un riguroso proceso de recolección de datos. Para llevar a cabo un muestreo, se obtienen muestras del agua que será analizada, y es esencial trasladarlas de inmediato a un laboratorio. Allí, mediante el uso de un fotómetro, se determinarán las concentraciones de nitrato, nitrito, amonio y fosfatos. En el sitio de recolección, se efectúan mediciones directas de las propiedades fisicoquímicas, incluyendo la saturación de oxígeno en el agua, la temperatura, el electroconductividad y el pH. [10] El momento óptimo para efectuar estas muestras es al concluir la temporada de lluvias, para evitar posibles alteraciones en las muestras debido a precipitaciones o erosión. [11] Los puntos de muestreo pueden variar según los objetivos de investigación y las preguntas que se buscan responder, por ejemplo en el estudio de [12] se busca realizar una comparación entre cuatro áreas principales, que son área fluvial, área urbana, área forestal y área agrícola. Otro método para seleccionar los puntos de es por el tipo de desembocaduras y por como los afluentes se encuentran. Los puntos de muestreo en un río pueden ubicarse en el inicio y en el final del río, y en áreas de salida de afluentes como de aguas residuales. [10] Para determinar de manera efectiva la condición de la calidad del agua de los ríos, es esencial elegir una técnica apropiada. Existen varios enfoques y métodos para medir la calidad del agua, tales como la teoría de grafos, modelos basados en hidrología e hidráulica, índices relacionados con el paisaje y el método basado en índices compuestos. [13] Al gestionar un

estudio de la calidad del agua superficial, es fundamental prestar atención a ciertos parámetros críticos de contaminación. Estos incluyen la temperatura del agua, el pH, los sólidos en suspensión y disueltos, la turbidez, el nivel de oxígeno disuelto, los compuestos derivados del fósforo y nitrógeno, así como la demanda bioquímica y química de oxígeno. [14]

TABLA I. METODOLOGÍAS DE ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA ENCONTRADOS EN REVISIÓN LITERARIA.

Metodología aplicada	Estudios citados
Índice de calidad	[1], [11], [15]–[17]
Procesamiento de imágenes	[13], [18]
Técnicas de microscopía electrónica	[19]
Análisis de variación	[12], [20]
Análisis multivariable	[5], [21]–[23]
Funciones de distribución de probabilidad	[24]

Elaboración propia.

IV. METODOLOGÍA

A. Enfoque

La metodología que se empleará en este proyecto de investigación será de carácter cuantitativo. El enfoque cuantitativo se basa en una serie de pasos que se siguen de manera secuencial y rigurosa. En primer lugar, se inicia con una revisión exhaustiva de la literatura existente, a partir de la cual se construye un marco teórico o perspectiva que guiará el estudio. A continuación, se formulan las preguntas de investigación y se identifican las variables pertinentes en el proceso. [25]

B. Alcance

Para el presente estudio, se ha determinado que el alcance más apropiado es el alcance descriptivo. [25] A través de un enfoque descriptivo, buscamos recopilar datos precisos y relevantes que nos permitan caracterizar y evaluar la situación actual de la calidad del agua en el Río Bermejo. Esta información será esencial para contribuir al conocimiento existente y proporcionar una base sólida para futuros análisis y decisiones relacionadas con la gestión de recursos hídricos en la región.

C. Variables de estudio

La variable independiente se considera como la supuesta causa en una relación entre variables, la condición antecedente que se cree que influye en el resultado. Por otro lado, la variable dependiente es el efecto provocado por esta causa, el consecuente que se busca analizar. [25] Siguiendo esta definición de las variables, en el contexto de esta investigación se ha determinado que la variable dependiente será la calidad del agua en el Río Bermejo. En este estudio, las variables independientes son aquellos factores que se evaluarán para determinar su efecto en la calidad del agua en el Río Bermejo.

Estos factores son la presencia de grasas y aceites, presencia de detergentes y cloro, señales de contaminación fecal, la cantidad de oxígeno necesario para descomponer materia orgánica, cantidad de oxígeno disuelto y niveles de pH.

D. Técnicas y Herramientas

En el desarrollo del presente proyecto de investigación, se implementaron diversas técnicas y herramientas para garantizar la rigurosidad y precisión en el análisis de datos y la planificación estratégica. Entre estas, Microsoft Excel fue utilizado como la herramienta principal para el manejo, procesamiento y análisis estadístico de los datos recopilados. Microsoft Visio, por su parte, facilitó la elaboración de diagramas de flujo y la representación gráfica de los procesos, permitiendo así una mejor comprensión de las interrelaciones y la dinámica operativa del sistema estudiado. Asimismo, Microsoft Project se utilizó para la planificación detallada del proyecto, asegurando una gestión eficaz del tiempo y de los recursos. Finalmente, se contó con el apoyo del Laboratorio Agroindustrial de Centroamérica, cuyas instalaciones y equipamiento de vanguardia fueron esenciales para la realización de pruebas empíricas y la validación de resultados, fortaleciendo el componente práctico de la investigación. Estas herramientas combinadas permitieron una aproximación holística al estudio, abarcando desde la concepción teórica hasta la aplicación práctica de los hallazgos.

TABLA II. TÉCNICAS APLICADAS EN LA INVESTIGACIÓN.

Instrumentos aplicados	Descripción
Microsoft Excel	En esencia, Excel proporciona una solución potente y versátil para la manipulación de datos y la generación de valiosos conocimientos a partir de ellos. [26]
Microsoft Project	Microsoft Project es una herramienta de software que se destaca por su capacidad para facilitar la gestión colaborativa de proyectos. Una de sus principales funcionalidades es la generación de diagramas de Gantt, que representan visualmente las actividades planificadas a lo largo de un periodo de tiempo específico. [27]
Microsoft Visio	Microsoft Visio es una herramienta de software de gran utilidad que se emplea para la creación de diversos tipos de representaciones visuales, tales como diagramas, gráficos y esquemas. [28]
Laboratorios Agroindustriales	Laboratorios Agroindustriales de Centroamérica es una empresa especializada en la realización de estudios de suelos y agua, con un enfoque en la determinación de su microbiología a través de exámenes físicos y químicos. [29]

Elaboración propia.

E. Materiales

TABLA III. TABLA DE MATERIALES E INSTRUMENTOS UTILIZADOS.

Materiales utilizados	Descripción
Jeringa de 5mL	Instrumento de laboratorio utilizado para medir y transferir volúmenes precisos de líquidos.
Prueba rápida de conteo aeróbico	Prueba para evaluar la concentración de microorganismos aeróbicos en muestras ambientales o de productos, proporcionando resultados en un tiempo reducido.
Prueba rápida de conteo de E. Coli	Permiten evaluar la calidad microbiológica de un producto o una muestra de agua, identificando la presencia de microorganismos indicadores de contaminación fecal y sanitaria.
Beaker	Utilizado para contener, mezclar, calentar o medir líquidos.
pH Metro	Para medir la acidez o alcalinidad de una solución mediante la determinación del valor de pH.
Tiras de pH	Se utilizan para realizar pruebas rápidas y sencillas del pH en líquidos.
Incubadora	Se utiliza para mantener condiciones controladas de temperatura para promover el crecimiento de microorganismos.

Elaboración propia.

F. Metodología de Estudio

La investigación se estructura alrededor de una serie de tareas organizadas de manera secuencial, donde la administración metódica de estas es esencial para lograr el objetivo principal del estudio. Se expone seguidamente un diagrama de flujo que ilustra las actividades fundamentales:

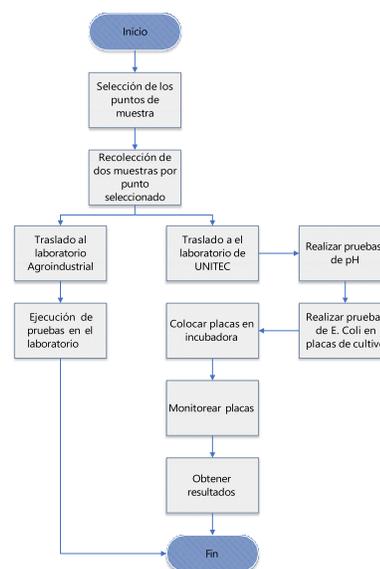


Fig. 3. Diagrama de flujo del proceso de metodología de estudio. Fuente: Elaboración propia

G. Recoleta de Muestras

La investigación en el Río Bermejo se centró en el análisis integral de la calidad del agua, iniciando con la recolección estratégica de muestras para evaluar sus características fisicoquímicas y biológicas. Las muestras, tomadas con rigurosas medidas de esterilidad y conservación, se analizaron en menos de 24 horas en el Laboratorio Agroindustrial de Centroamérica y UNITEC, realizando pruebas de oxígeno disuelto, contaminantes orgánicos e inorgánicos, y microorganismos patógenos. Los datos obtenidos permitirán entender el estado del agua y cumplir con el objetivo del proyecto. La logística incluyó transporte especializado tanto para la recolección como para el análisis de las muestras, asegurando la calidad y precisión de los resultados.

H. Índice de la Calidad del Agua

El índice de calidad del agua se determina mediante factores de ponderación, curvas de calificación y factores de calidad del agua. [30] El índice de calidad del agua se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$WQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732}$$

F1 (Alcance): El % de variables que exceden el valor permitido.

$$F_1 = \left[\frac{\text{número de variables fallidas}}{\text{número de variables totales}} \right] \times 100$$

F2 (Frecuencia): El % de pruebas individuales para cada variable que superó el valor permitido.

$$F_2 = \left[\frac{\text{número de pruebas fallidas}}{\text{número de pruebas totales}} \right] \times 100$$

F3 (Amplitud): El grado (desviación) en que la prueba fallida superó el valor permitido.

$$F_3 = \left[\frac{\text{nse}}{0.01\text{nse} + 0.01} \right] \times 100$$

En donde $\text{nse} = \frac{\sum \text{desviaciones}}{\text{número de pruebas totales}}$ y $\text{desviaciones} =$

$$\frac{\text{pruebas fallidas}}{\text{valor objetivo}} - 1$$

V. RESULTADOS

A. Definición de parámetros para el método

En el caso del Río Bermejo se ha definido que es necesario realizar una combinación de parámetros físicos, químicos y microbiológicos, lo cual permitirá obtener una evaluación integral de la calidad del agua en el Río Bermejo. Es fundamental tener en cuenta que la elección de estos parámetros se basa en la revisión de la literatura y la comprensión de la

dinámica única del Río Bermejo. Se determinó que los parámetros esenciales a medir en el Río Bermejo son grasas y aceites, presencia de detergentes y cloro, señales de contaminación fecal, la cantidad de oxígeno necesario para descomponer materia orgánica, cantidad de oxígeno disuelto y los niveles de pH.

B. Puntos de muestreo

En la selección de puntos de muestreo, se optó por una cuidadosa elección de dos ubicaciones representativas del tramo del Río Bermejo bajo estudio. El punto A, situado en las coordenadas 15°31'56.6"N 88°00'51.8"W, y el punto B, en 15°30'46.2"N 87°59'33.5"W, fueron designados estratégicamente para capturar variaciones potenciales en la calidad del agua a lo largo de la longitud del río. Estas coordenadas se eligieron con el objetivo de abarcar distintas condiciones ambientales y posibles fuentes de contaminación, brindando una perspectiva más completa de la salud del ecosistema fluvial en el área de estudio.

C. Metodología de muestreo y análisis

La toma de muestras se llevó a cabo con el apoyo del Laboratorio Agroindustriales, especializado en análisis de calidad del agua. Se implementó un riguroso protocolo para garantizar la integridad de las muestras, utilizando botellas de muestreo previamente limpias y libres de contaminantes. Cada muestra, con un volumen aproximado de 2 litros, fue recolectada estratégicamente a una distancia de al menos 1 metro de la orilla y a una altura intermedia, siguiendo un enfoque de recolección en sentido contrario a la corriente para minimizar la posible influencia de contaminantes locales. Después de recolectar estas, las muestras se deben realizar antes de pasar 8 horas.

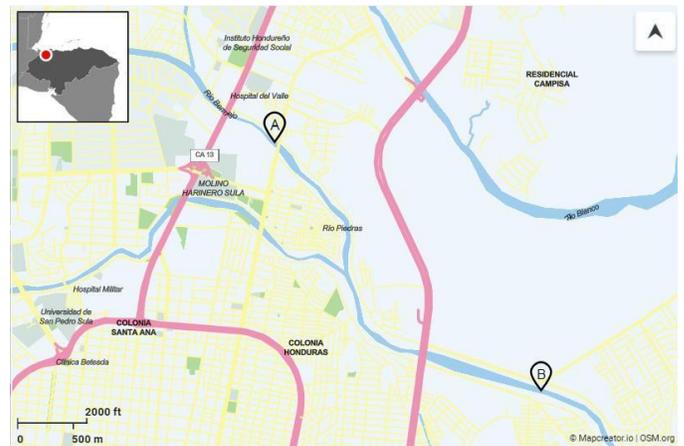


Fig. 4. Puntos de muestreo seleccionados en el Río Bermejo. Fuente: Elaboración propia

D. Resultados analíticos

Con las muestras en posesión, se llevaron a cabo rigurosas pruebas de laboratorio para analizar los parámetros seleccionados y obtener resultados detallados. La interpretación de los datos se realiza en consonancia con las Directrices sobre la Calidad del Agua Recreativa, Volumen 1: Aguas Costeras y Dulces. Este enfoque proporciona un marco normativo robusto

VI. CONCLUSIONES

para evaluar la idoneidad del agua en términos de salud ambiental y potencial recreativo. A continuación, se presentan los resultados detallados de cada parámetro, seguidos de un análisis en relación con las pautas establecidas en las directrices mencionadas. [31]

Tabla.IV. *Puntos de muestreo seleccionados en el Río Bermejo. Fuente: Elaboración propia*

	Coliformes Fecales	Cloro Residual	Demanda Química de Oxígeno	Detergentes	Grasas y Aceites (Hexano)	Oxígeno Disuelto	E. Coli	Coliformes Totales
	NMP/100mL	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	NMP/100mL	NMP/100mL
Punto A 6 nov-2023	4000	0.01	18	0.1	1.4	5.1	4100	31300
Punto B 6-Nov-2023	54000	0.01	40	0.1	1	5.3	0	105800
Punto A 22-nov-2023	17000	0.01	5	0.1	0.7	5.3	30700	221200
Punto B 22-Nov-2023	54000	0.01	5	0.1	1.1	5.2	100600	199100
Limite	<200NMP/100mL	<4mg/L	<20mg/L	<0.5m g/L	<10m g/L	>5	<126NMP/100mL	<200NMP/100MI

Con los datos obtenidos de los resultados del laboratorio, se puede calcular el valor del índice:

$$WQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{55.56^2 + 44.44^2 + 99.21^2}}{1.732} \right) = 29.51$$

Pobre: (0-44)

Marginal: (45-64)

Aceptable: (65-79)

Buena: (80-94)

Excelente: (95-100)

E. Análisis de los resultados

En este artículo, se resalta la necesidad crítica de continuar y profundizar la investigación sobre la calidad del agua del Río Bermejo. El estudio actual, aunque revelador, tuvo una duración limitada de solo 10 semanas, lo que subraya la importancia de un seguimiento a largo plazo para obtener una comprensión más precisa y detallada de la situación. Durante un periodo de dos semanas dentro del marco del estudio, se registraron precipitaciones en los puntos de muestreo, lo que pudo haber alterado los valores de las muestras tomadas el 6 de noviembre de 2023. Este factor ambiental resalta la necesidad de un estudio más extenso y continuo que pueda adaptarse y tomar en cuenta las variaciones estacionales y meteorológicas para una evaluación más precisa de la calidad del agua.

Los resultados actuales han superado los valores máximos establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para E. coli y coliformes totales en fuentes de agua naturales, indicando una contaminación bacteriana preocupante [31].

1. La identificación de los parámetros más relevantes para evaluar la calidad del agua del Río Bermejo ha proporcionado una comprensión crucial de los factores que impactan directamente en su calidad. Esta selección informada sienta las bases para un análisis integral y preciso de la salud del recurso hídrico.
2. El diseño detallado de procedimientos para la toma de muestras, teniendo en cuenta la compleja ubicación geográfica del Río Bermejo, asegura la representatividad y validez de los datos recopilados. Estos procedimientos optimizados facilitarán futuras evaluaciones, asegurando la consistencia y comparabilidad de los resultados a lo largo del tiempo.
3. La evaluación de la calidad del agua del Río Bermejo en relación con los estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud revela que [indique si cumple o no] con los criterios internacionales de calidad. Este análisis proporciona una perspectiva esencial sobre la seguridad del agua para el consumo humano y destaca áreas específicas que pueden requerir atención y mejora para cumplir con los estándares internacionales.

VII. REFERENCIAS

- [1] I. A. Kimirei, C. Yu, Q. Shen, and Q. Gao, "Assessment of urban river water pollution with urbanization in East Africa," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 27, pp. 40812–40825, Jun. 2022, doi: 10.1007/s11356-021-18082-1.
- [2] G. Grill et al., "Mapping the world's free-flowing rivers," *Nature*, vol. 569, no. 7755, Art. no. 7755, May 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1111-9.
- [3] S. Jumani et al., "River fragmentation and flow alteration metrics: a review of methods and directions for future research," *Environ. Res. Lett.*, vol. 15, no. 12, p. 123009, Dec. 2020, doi: 10.1088/1748-9326/abcb37.
- [4] N. T. Anh, L. D. Can, N. T. Nhan, B. Schmalz, and T. L. Luu, "Influences of key factors on river water quality in urban and rural areas: A review," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 8, p. 100424, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.csee.2023.100424.
- [5] K. A. Capps, C. N. Bentsen, and A. Ramírez, "Poverty, urbanization, and environmental degradation: urban streams in the developing world," *Freshw. Sci.*, vol. 35, no. 1, pp. 429–435, Mar. 2016, doi: 10.1086/684945.
- [6] G. Poveda and D. Alvarez, "El Colapso de la Hipótesis de Estacionariedad por Cambio y Variabilidad Climática: Implicaciones para el Diseño Hidrológico en Ingeniería," *Rev. Ing. Univ. Los Andes Bogotá En Imprinta*, Jan. 2012, doi: 10.16924/revinge.36.12.
- [7] S. M. M. Palacios and F. R. M. Chamorro, "CAUDALES ECOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO Y LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA," *Rev. UNIMAR*, vol. 31, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2013.
- [8] S. Malik, A. Cohen, S. E. MacAvoy, and V. P. Connaughton, "The Importance of Assessing Water Quality in Tributaries: A Case Study in an Urban Waterway Using Zebrafish (Danio rerio)," *Water*, vol. 15, no. 13, Art. no. 13, Jan. 2023, doi: 10.3390/w15132372.
- [9] Y.-A. Boussouga, F. Sacher, and A. I. Schäfer, "Water quality of The Gambia River: A prospective drinking water supply," *Sci. Total Environ.*, vol. 878, p. 162794, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162794.
- [10] K. Stepniewski and M. Łaszewski, "Spatial and Seasonal Dynamics of Inorganic Nitrogen and Phosphorous Compounds in an Orchard-Dominated Catchment with Anthropogenic Impacts," *Sustainability*, vol. 13, no. 20, Art. no. 20, Jan. 2021, doi: 10.3390/su132011337.
- [11] S. Chrea, L. Tudesque, and R. Chea, "Comparative assessment of water quality classification techniques in the largest north-western river of Cambodia (Sangker River-Tonle Sap Basin)," *Ecol. Indic.*, vol. 154, p. 110759, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110759.
- [12] M. M. Yaqoob et al., "The Impacts of Land Use and Seasonal Effects on Phytoplankton Taxa and Physical-Chemical Variables in the Tigris River within the City of Mosul," *Water*, vol. 15, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2023, doi: 10.3390/w15061062.
- [13] H. Yao, Y. Jiang, X. Li, and J. Su, "Evaluation of river connectivity using a composite index method and its impact on nutrients dynamics in large rivers,"

- Ecol. Indic., vol. 155, p. 110961, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110961.
- [14] N. Gupta, P. Pandey, and J. Hussain, "Effect of physicochemical and biological parameters on the quality of river water of Narmada, Madhya Pradesh, India," *Water Sci.*, vol. 31, no. 1, pp. 11–23, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.wsj.2017.03.002.
- [15] A. M. Abdel-Satar, M. H. Ali, and M. E. Goher, "Indices of water quality and metal pollution of Nile River, Egypt," *Egypt. J. Aquat. Res.*, vol. 43, no. 1, pp. 21–29, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.ejar.2016.12.006.
- [16] X. Cao, J. Zhang, H. Meng, Y. Lai, and M. Xu, "Remote sensing inversion of water quality parameters in the Yellow River Delta," *Ecol. Indic.*, vol. 155, p. 110914, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110914.
- [17] P. D. Jacques, E. P. Viglio, and D. de Oliveira d'El Rei Pinto, "Environmental Geochemical Analysis in the Yanomami Indigenous Land, Mucajaí River Basin, State of Roraima, Brazil," *Toxics*, vol. 11, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2023, doi: 10.3390/toxics11100861.
- [18] C.-H. Chiang and J.-G. Juang, "Application of UAVs and Image Processing for Riverbank Inspection," *Machines*, vol. 11, no. 9, Art. no. 9, Sep. 2023, doi: 10.3390/machines11090876.
- [19] L. Hong et al., "Spatial–Temporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Shiwuli River," *Water*, vol. 15, no. 13, Art. no. 13, Jan. 2023, doi: 10.3390/w15132330.
- [20] T. Shahady and J. J. Montero-Ramírez, "End-Point Predictors of Water Quality in Tropical Rivers," *Pollutants*, vol. 3, no. 4, Art. no. 4, Dec. 2023, doi: 10.3390/pollutants3040032.
- [21] G. Ioele et al., "Assessment of Surface Water Quality Using Multivariate Analysis: Case Study of the Crati River, Italy," *Water*, vol. 12, no. 8, Art. no. 8, Aug. 2020, doi: 10.3390/w12082214.
- [22] V. K. Kushwah et al., "Assessment of the Surface Water Quality of the Gomti River, India, Using Multivariate Statistical Methods," *Water*, vol. 15, no. 20, Art. no. 20, Jan. 2023, doi: 10.3390/w15203575.
- [23] K. Sazawa et al., "Effects of paddy irrigation-drainage system on water quality and productivity of small rivers in the Himi region of Toyama, Central Japan," *J. Environ. Manage.*, vol. 342, p. 118305, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118305.
- [24] L. Lin, Y. Zhang, X. Qian, and Y. Wang, "Hydrochemical Characteristics and Human Health Risk Assessment of Surface Water in the Danjiang River Source Basin of the Middle Route of China's South-to-North Water Transfer Project," *Water*, vol. 15, no. 12, Art. no. 12, Jan. 2023, doi: 10.3390/w15122203.
- [25] R. Hernández Sampieri and C. F. Collado, *Metodología de Investigación*. 2014.
- [26] "Excel Definition," Corporate Finance Institute. Accessed: Dec. 20, 2023. [Online]. Available: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/excel/excel-definition-overview/>
- [27] "Project Management Software | Microsoft Project." Accessed: Dec. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en/microsoft-365/project/project-management-software>
- [28] "Flowchart Maker and Diagramming Software | Microsoft Visio." Accessed: Dec. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en/microsoft-365/visio/flowchart-software>
- [29] "Laboratorios AgroIndustriales:: Confiabilidad en sus análisis." Accessed: Dec. 20, 2023. [Online]. Available: <https://agroindustriales.hn/laboratorios-agroindustriales/empresa.html>
- [30] S. Prabagar, S. Thuraisingam, and J. Prabagar, "Sediment analysis and assessment of water quality in spacial variation using water quality index (NSFWQI) in Moragoda canal in Galle, Sri Lanka," *Waste Manag. Bull.*, vol. 1, no. 2, pp. 15–20, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.wmb.2023.05.002.
- [31] WHO, *GUIDELINES ON RECREATIONAL WATER QUALITY*. 2021. [Online]. Available: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/342625/9789240031302-eng.pdf?sequence=1>