

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI

POSGRADO



MAESTRÍA EN ESTADÍSTICA APLICADA

“Calibración el Índice de Calidad del Agua (ICA), Mediante Análisis Estadístico de las Propiedades Físicoquímicas en la Red Hidrológica de la Provincia de Morona Santiago para la Evaluación de la Calidad Ambiental”

Trabajo de titulación previa la obtención del
Título de Magister en Estadística Aplicada

Autor: Luis Patricio Tierra Pérez

Tutor: Patricio Vladimir Méndez Zambrano

Tulcán, 2025

CERTIFICADO DEL TUTOR

Certifico que el maestrante Tierra Pérez Luis Patricio con el número de cédula 0603371733 ha elaborado el trabajo de titulación: “Calibración el Índice de Calidad del Agua (ICA), Mediante Análisis Estadístico de las Propiedades Fisicoquímicas en la Red Hidrológica de la Provincia de Morona Santiago para la Evaluación de la Calidad Ambiental”. Este trabajo se sujeta a las normas y metodología dispuestas en la Codificación del Reglamento de Régimen Académico y de Estudiantes de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi con RESOLUCIÓN No. 171-CSUP-2023, por lo tanto, autorizo su presentación para la sustentación respectiva.

.....
Mgst. Patricio Vladimir Méndez Zambrano
TUTOR

Tulcán, julio de 2025

AUTORÍA DE TRABAJO

El presente trabajo de titulación constituye un requisito previo para la obtención del título de Magister en Estadística Aplicada.

Yo, Tierra Pérez Luis Patricio con cédula de identidad número 0603371733 declaro: que la investigación es absolutamente original, auténtica, personal y los resultados y conclusiones a los que he llegado son de mi absoluta responsabilidad.

.....

Tierra Pérez Luis Patricio

AUTOR

Tulcán, julio de 2025

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Tierra Pérez Luis Patricio declaro ser autor/a de los criterios emitidos en el trabajo de titulación: “Calibración el Índice de Calidad del Agua (ICA), Mediante Análisis Estadístico de las Propiedades Fisicoquímicas en la Red Hidrológica de la Provincia de Morona Santiago para la Evaluación de la Calidad Ambiental ” y eximo expresamente a la Universidad Politécnica Estatal del Carchi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

.....

Tierra Pérez Luis Patricio

AUTOR

Tulcán, julio de 2025

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, expreso mi gratitud a Dios por su infinita misericordia y por las abundantes bendiciones recibidas, así como a la Virgen Santísima por su amor y protección incondicional.

A mi esposa, mi brazo derecho y soporte incondicional, con quien he compartido momentos de alegría, tristeza, sacrificios y esfuerzos. Siempre ha estado a mi lado brindándome su apoyo constante.

A mi tutor, quien, con paciencia, conocimiento y dedicación, me ha guiado en este proceso. Su guía ha sido fundamental para alcanzar este punto. Y a esos amigos que, a lo largo de todo, han sido ese refugio y alivio, gracias por cada palabra de aliento y cada momento compartido

Luis Patricio

DEDICATORIA

Mi proyecto de investigación la dedico a toda mi familia, que siempre con su apoyo incondicional han sido mi inspiración para seguir cumpliendo con mis metas trazadas, mi amada mamacita María Leonor que desde el cielo siempre será mi ángel de la guarda que camina junto a mí, cuidándome, guiándome y bendiciéndome, a mi querido padre que con su ejemplo nos supo enseñar que cuando se quiere se puede.

Luis Patricio.

INDICE

RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPITULO I	1
PROBLEMA	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. Preguntas de Investigación o Hipótesis	2
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. JUSTIFICACIÓN	3
CAPITULO II	5
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	5
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	5
2.2. MARCO TEÓRICO	9
2.2.1. Calidad del Agua	9
2.2.2. Contaminación Hídrica.....	11
2.2.3. Sostenibilidad Hídrica	11
2.2.4. Situación Actual en Morona Santiago	12
2.2.5. Características Químicas del Agua	12
2.2.5.1. Estándares Internacionales.....	12
2.2.5.2. En la práctica	13
2.2.6. Características Biológicas.....	14
2.2.6.1. Dimensiones Biológicas.....	14
2.2.6.2. Impacto en la Biodiversidad Acuática	14
2.2.7. Índice de calidad del Agua (ICA).....	15

2.2.8.	Limitaciones de los Enfoques para Evaluar la Calidad del Agua	18
2.2.8.1.	Análisis estadístico de Parámetros Físicoquímicos	18
2.2.8.2.	Contaminación del Agua	19
2.2.8.3.	Principales Contaminantes	19
2.2.9.	Relación de Conceptos con Teorías y Enfoques Relevantes	21
2.2.10.	Contaminación Hídrica	22
2.2.11.	Análisis Crítico de Teorías Existentes	22
2.2.12.	Aplicación al Contexto del Estudio:	23
2.2.13.	Formulación de Hipótesis Teóricas	23
2.3.	MARCO LEGAL	24
2.3.1.	Marco Internacional	24
2.3.2.	Marco Nacional	25
2.3.2.1.	Constitución de la República del Ecuador	25
2.3.2.2.	Código Orgánico del Ambiente	25
2.3.2.3.	Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN 1108:2011)	26
CAPITULO III		28
MARCO METODOLÓGICO		28
4.3.	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO/GRUPO DE ESTUDIO	28
4.3.1.	Descripción del Área de Estudio	28
4.3.2.	Grupo de Estudio	32
4.4.	Enfoque y Tipo de Investigación	33
4.4.1.	Enfoque	33
4.4.2.	Tipo de Investigación	34
4.4.2.1.	Investigación Exploratoria	34
4.4.2.2.	Investigación Descriptiva	35
4.4.2.3.	Investigación Correlacional	36
Definición y operacionalización de variables.....		36

4.4.2.	Definición de variables	36
	VI: Parámetros fisicoquímicos	36
	VD: Calidad del Agua.	36
4.4.3.	Operacionalización de Variables.....	37
4.5.	Procedimientos	38
4.5.2.	Primera Fase: Caracterización de la calidad del agua de la red hidrológica de la Provincia de Morona Santiago, mediante el estudio de sus propiedades fisicoquímicas.	38
4.5.3.	Segunda Fase: Descripción de las variaciones espaciales y temporales de los parámetros fisicoquímicos del agua de la red hidrológica de la Provincia de Morona Santiago.....	39
4.5.3.1.	Análisis de Componentes Principales (PCA):	39
4.5.3.2.	Cálculo de los componentes principales:	40
4.5.3.3.	Varianza explicada por cada componente principal:	41
4.5.3.4.	Selección del número de componentes principales:	41
4.5.3.5.	Análisis de Clústers K-means:	41
4.5.3.6.	Distancia entre puntos:	42
4.5.3.7.	Kruskal-Wallis Test:	44
4.5.4.	Tercera Fase: Análisis de los niveles de cumplimiento de los parámetros de calidad del agua de la red hidrológica de la Provincia de Morona Santiago en relación con los estándares nacionales e internacionales considerando datos de los últimos cinco años (2018-2023).....	46
4.5.5.	Cuarta Fase: La calibración del Índice de Calidad del Agua (ICA)	47
	Instrumentos científicos de medición	52
4.6.	Consideraciones Bioéticas	53
4.7.	Base de Datos	54
CAPITULO IV.....		55
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		55
5.3.	Resultados.....	55

5.3.2.	Análisis estadístico.	55
5.3.2.1.	Interpretación de la Tabla de Resumen Estadístico	55
5.3.2.2.	Graficas de los Parámetros Estadísticos.....	57
5.3.3.	Resultados del Test Kruskal-Wallis.....	60
5.3.3.1.	Interpretación.....	61
5.3.4.	Análisis de Componentes Principales PCA para evaluar el estado índice de calidad del agua de la red hidrográfica de Morona Santiago	61
5.3.4.1.	Interpretación del Biplot de PCA	62
5.3.4.2.	Auto valores del Análisis de Componentes Principales (PCA).	63
5.3.4.3.	Gráfico de Scree del PCA	64
5.3.4.4.	Gráfica de contribución de las variables al componente 1	65
5.3.4.5.	Gráfica de contribución de las variables al componente 2	66
5.3.4.6.	Reducción de la Dimensionalidad	68
5.3.4.7.	Identificación de Variables Clave	68
5.3.4.8.	Eliminación de Redundancia.....	68
5.3.4.9.	Visualización y Exploración de Datos	68
5.3.4.10.	Preparación para Análisis Posteriores	69
5.3.5.	Análisis de clústeres K-means	69
5.3.6.	Calidad del agua de la red hidrográfica de Morona Santiago	71
5.3.7.	Clasificación del agua por año	73
5.3.8.	Calibración del Índice de la Calidad del Agua	76
5.4.	Discusión	80
5.4.2.	Calidad del Agua en la Red Hidrográfica de Morona Santiago.....	80
2.1.1.	Análisis estadístico y calibración del ICA	81
5.4.3.	Cumplimiento de estándares y normativas	83
5.4.4.	Comparación con otras investigaciones.....	83
CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES		84

Conclusiones	84
Recomendaciones:	86
ANEXOS	87
REFERENCIAS	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación ICA-NSF	15
Tabla 2 Usos del agua según su ICA.....	17
Tabla 3 Limitaciones del ICA	18
Tabla 4 Requisitos específicos	26
Tabla 5 Puntos de muestreo con sus respectivas coordenadas	30
Tabla 6 <i>Operacionalización de variables</i>	37
Tabla 7 <i>Parámetros y pesos relativos del ICA desarrollado de Brown et al., 1970...</i>	49
Tabla 8 <i>Categorías de calidad del agua para ICA (Acuerdo Ministerial 097-A).</i>	49
Tabla 9 <i>Valores límites (VMP - Valor Máximo Permitido) establecidos por el Acuerdo Ministerial 097-A</i>	50
Tabla 10 <i>Parámetros y peso específico que constituyen el ICA-NSF</i>	52
Tabla 11 Análisis Estadístico.	55
Tabla 12 <i>Auto valores del Análisis de Componentes Principales (PCA).</i>	63
Tabla 13 <i>Parámetros de colores en el heatmap para los diferentes niveles de calidad</i>	72
Tabla 14 <i>Clasificación del agua por año</i>	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Provincia de Morona Santiago y sus cantones	28
Figura 2. Ríos y estaciones de monitoreo de la red hidrológica de Morona Santiago	29
Figura 3 Estaciones de muestreo en la red hídrica de Morona Santiago	32
Figura 4 Gráficas Estadísticas.....	58
Figura 5 Análisis de Componentes Principales PCA	62
Figura 6 Scree del PCA.....	64
Figura 7 Gráfica de contribución de las variables al componente 1	65
Figura 8 Gráfica de contribución de las variables al componente 2	67
Figura 9 Análisis de Clúster.....	69
Figura 10 Índice de Calidad del Agua para la Red Hidrológica de Morona Santiago	71

RESUMEN

La investigación realizada en la provincia de Morona Santiago tuvo como objetivo calibrar el Índice de Calidad del Agua (ICA) mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos clave, con el fin de proporcionar una evaluación precisa de la calidad del agua en la región. Se evaluaron parámetros como el pH, oxígeno disuelto, nitratos, fosfatos, coliformes fecales, y sólidos totales. Utilizando técnicas estadísticas como el Análisis de Componentes Principales (PCA) y el análisis de clústeres, se logró identificar los factores más relevantes que influyen en la calidad del agua y agrupar los puntos de muestreo según sus características fisicoquímicas. Los resultados indicaron que los niveles elevados de coliformes fecales es de 0,11 % y fosfatos de 0,53% de los pesos totales, superaron los límites establecidos por las normativas ambientales, lo que refleja una fuerte influencia de las actividades humanas, particularmente la agricultura y la deficiente gestión de aguas residuales en varias zonas de la provincia. Estos dos parámetros fueron identificados como los principales indicadores de contaminación en la región, debido a la relación directa con el uso intensivo de fertilizantes y la falta de tratamiento adecuado de desechos orgánicos. El oxígeno disuelto mostró variaciones, con niveles adecuados en algunas áreas y críticos en otras, lo que afecta la biodiversidad acuática. La calibración del ICA ajustó los pesos de los parámetros para reflejar con mayor precisión las condiciones locales del agua, proporcionando una herramienta más confiable para la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos. La investigación concluye que es fundamental implementar un sistema de monitoreo continuo y mejorar la infraestructura de saneamiento en la región para mitigar los impactos negativos en la calidad del agua, preservar los ecosistemas acuáticos y garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos, especialmente en zonas vulnerables a la contaminación agrícola.

Palabras Clave: Índice de calidad del agua, Calibrar, Parámetros Fisicoquímicos, Técnicas Estadísticas, Indicadores.

ABSTRACT

The research conducted in the province of Morona Santiago aimed to design the Water Quality Index, using statistical techniques applied to the physicochemical parameters of the hydrological network of the province of Morona Santiago, in order to assess environmental quality. Parameters such as pH, dissolved oxygen, nitrates, phosphates, fecal coliforms, and total solids were considered, along with statistical techniques like Principal Component Analysis and cluster analysis. The results reveal that the elevated levels of fecal coliforms are 0.11% and phosphates are 0.53% of the total weights, exceeding the limits established by environmental regulations, which reflects a strong influence of human activities, particularly agriculture and poor wastewater management in various areas of the province. These two parameters were identified as the main indicators of pollution in the region, due to the direct relationship with the intensive use of fertilizers and the lack of adequate treatment of organic waste. Dissolved oxygen showed variations, with adequate levels in some areas and critical levels in others, which affects aquatic biodiversity. The calibration of the Water Quality Index was adjusted to the weights of the parameters to reflect with greater precision in the local water conditions, providing a most reliable tool for decision-making in the management of water resources. It is concluded that it is essential to implement a continuous monitoring system and improve the sanitation infrastructure in the region, to mitigate the negative impacts on water quality, conserve aquatic ecosystems, and ensure the sustainability of water resources, especially in areas vulnerable to agricultural contamination.

Keywords: Calibration, Indicators, Water Quality Index, Physicochemical Parameters, Statistical Technique

CAPITULO I

PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La calidad del agua, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se refiere a las condiciones en las que existe el agua en cuanto a sus propiedades físicas, químicas y biológicas. La calidad del agua se define por parámetros específicos como el pH, el oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), que son esenciales para determinar su aptitud para diversos usos humanos y ambientales (Organización Mundial de la Salud, 2018, p. 1). Por ejemplo, el pH debe mantenerse entre 6.5 y 8.5 para ser compatible con la vida acuática, mientras que niveles adecuados de oxígeno disuelto son cruciales para la supervivencia de organismos acuáticos (Tito, 2020).

En Ecuador, los recursos hídricos son fundamentales para la provisión de agua y la satisfacción de diversas necesidades de la sociedad. Sin embargo, estudios han mostrado que los ríos ecuatorianos presentan altas concentraciones de fósforo, nitrógeno, DBO y coliformes, debido a actividades humanas como la agricultura, ganadería y el vertido de aguas residuales (Méndez *et al.*, 2020). En la provincia de Morona Santiago, cuerpos de agua como ríos y lagos también han evidenciado contaminación por estas actividades. Según datos recientes del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (2023), se ha reportado un aumento del 15% en la presencia de contaminantes en los principales afluentes de la región, lo que ilustra la gravedad del problema.

Debido a esta problemática, se hace necesario un monitoreo periódico de las propiedades fisicoquímicas del agua, ya que la falta de control puede resultar en la degradación de los ecosistemas acuáticos, afectando la biodiversidad y la calidad del agua para consumo humano. La ausencia de un monitoreo constante también compromete la capacidad de respuesta ante eventos de contaminación y dificulta la implementación de políticas de conservación (Brito, 2022, p. 18).

Para evaluar la calidad del Agua, existen diversas metodologías, como el Índice de Contaminación del Agua (ICA), el Índice de Estado Trófico y el Índice de Calidad del Agua (ICA). Sin embargo, en Ecuador, el ICA es una de las herramientas más utilizadas, pues permite sintetizar múltiples parámetros fisicoquímicos en una sola métrica que facilita la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico. La calibración del ICA es esencial para garantizar que los pesos asignados a cada parámetro reflejen con mayor precisión las condiciones locales del agua. No obstante, es importante reconocer sus limitaciones, como la posible falta de adaptación a condiciones específicas de cada cuenca hidrográfica y la dependencia de los datos disponibles. Ajustar el ICA mediante análisis estadísticos puede mejorar su aplicabilidad y utilidad para la gestión ambiental.

En Morona Santiago, estudios previos han utilizado el ICA para evaluar la calidad del agua en ríos como el Copueno y el Tutanangoza, mostrando variaciones significativas en los niveles de contaminantes (Méndez *et al.*, 2020, p. 4). Sin embargo, se requiere una actualización de estos estudios para determinar la evolución de la calidad del agua en la región y su impacto en los ecosistemas y comunidades locales.

En consecuencia, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo puede realizarse la calibración del Índice de Calidad del Agua (ICA) mediante un análisis estadístico de las propiedades fisicoquímicas en la red hidrográfica de la provincia de Morona Santiago, durante el período 2018-2024, con el fin de evaluar de manera precisa la calidad ambiental del agua para mitigar la contaminación y promover la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región?

1.2. Preguntas de Investigación o Hipótesis

- ¿Cuál es la calidad del agua en la red hídrica de Morona Santiago durante los últimos años?
- ¿Cuáles son los pesos ideales de los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua para su calibración a partir de los datos recolectados en el año de 2019 hasta 2023?

- ¿Qué técnicas estadísticas en la actualidad son apropiadas para calibrar el Índice de Calidad de Agua (ICA) en Morona Santiago?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Construir el índice de calidad del agua (ICA), mediante técnicas estadísticas de los parámetros fisicoquímicos en la red hidrológica de la provincia de Morona Santiago para la evaluación de la calidad ambiental.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar la estructura de correlación entre los parámetros fisicoquímicos del agua mediante técnicas multivariadas (ACP y HCA), para identificar las variables más influyentes en la calidad del recurso hídrico.
- Evaluar el desempeño de los componentes seleccionados en el cálculo del ICA, ajustando los pesos y umbrales de los parámetros conforme a su relevancia estadística y ambiental.
- Validar el índice calibrado del agua utilizando métodos de comparación con índices convencionales, con el fin de verificar su estabilidad, sensibilidad y aplicabilidad en el periodo (2019-2023).

1.4. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación es crucial para optimizar la gestión de los recursos hídricos en la provincia de Morona Santiago, ya que se enfoca en la evaluación cuantitativa de la calidad del agua superficial mediante la aplicación de técnicas estadísticas avanzadas, incluyendo la prueba de Kruskal-Wallis, el Análisis de Componentes Principales (PCA) y el Análisis de Clústeres K-means, complementadas con el uso de datos históricos. La calibración del Índice de Calidad del Agua (ICA) permitirá desarrollar una herramienta técnica robusta, basada en evidencia científica, para el monitoreo continuo y la toma de decisiones informadas. Este índice facilitará la caracterización precisa de las propiedades fisicoquímicas del agua en la red

hidrológica de la provincia, permitiendo la identificación de tendencias espaciales y temporales en su calidad y optimizando los procesos de monitoreo y evaluación ambiental.

Este estudio aborda problemáticas críticas de contaminación hídrica en la provincia de Morona Santiago, originadas por actividades antropogénicas, y proporciona una herramienta basada en datos cuantitativos para la toma de decisiones. La implementación del Índice de Calidad del Agua (ICA) permitirá mitigar impactos negativos en la salud pública y los ecosistemas acuáticos, optimizando la gestión del recurso hídrico y garantizando su disponibilidad en condiciones óptimas para diversos usos, incluyendo el consumo humano y las actividades productivas.

La investigación contribuirá a llenar vacíos en el conocimiento sobre la dinámica de la calidad del agua en la región, generando datos que facilitarán la modelización de variaciones espaciales y temporales. Se aplicarán técnicas estadísticas replicables en estudios similares, impulsando el desarrollo de metodologías innovadoras en evaluación ambiental. Este enfoque se alinea con los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo 2021-2025, particularmente con el eje de “Transición ecológica y sostenibilidad ambiental” y se enmarca en la línea de investigación del programa de Ingeniería Ambiental: Gestión de los recursos naturales y biodiversidad definida por la UPEC en relación con el objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6: Agua limpia y saneamiento, proporcionando una base científica para la formulación de políticas públicas orientadas a la conservación y mejora de los recursos hídricos.

Los resultados beneficiarán tanto a instituciones gubernamentales como a comunidades locales, fortaleciendo el manejo sostenible de los ecosistemas acuáticos. Además, se espera un impacto positivo en la calidad del agua, la reducción de riesgos sanitarios y la optimización del uso del recurso.

CAPITULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Según Pardo *et al.* (2012), en su artículo *titulado A water quality index for rivers: An example from Spain*, mediante análisis estadístico, se centraron en la creación de un índice adaptado para evaluar la calidad del agua en un contexto específico. Pardo y su equipo desarrollaron un Índice de Calidad del Agua para ríos, integrando parámetros fisicoquímicos como la temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y nutrientes (nitratos y fosfatos). Utilizaron técnicas de análisis multivariado y métodos estadísticos como el análisis de componentes principales para determinar la relación entre estos parámetros y su impacto en la calidad del agua. Este trabajo ha permitido adaptar el ICA a diferentes ecosistemas acuáticos, proporcionando una herramienta útil para la gestión y monitoreo de la calidad del agua en ríos, y demostrando cómo el análisis estadístico puede ayudar a identificar las variables más críticas en cada contexto (p. 184). Bajo este contexto, este análisis es importante en esta investigación ya que permite identificar patrones y relaciones entre las propiedades fisicoquímicas del agua en la red hidrológica de Morona Santiago. Esto ayuda a seleccionar los parámetros más críticos y a reducir la redundancia en los datos, optimizando la calibración del Índice de Calidad del Agua (ICA). Además, asegura que el ICA esté adaptado al contexto específico del ecosistema, proporcionando una herramienta precisa para evaluar la calidad ambiental y orientar la gestión de recursos hídricos de manera eficiente.

Un antecedente significativo en el desarrollo del Índice de Calidad del Agua (ICA) mediante análisis estadístico, es el de Kumar y Gupta quienes se enfocaron en el uso de un índice para evaluar la calidad del agua en lagos y embalses, ellos propusieron un Water Quality Index que combina varios parámetros fisicoquímicos, como turbidez, oxígeno disuelto, conductividad, y nutrientes (Kumar & Gupta, 2014, pp. 18-23). Utilizaron métodos estadísticos para asignar pesos a cada parámetro basándose en su relevancia para la salud ecológica y humana. También aplicaron el análisis de varianza para identificar diferencias significativas en la calidad del agua entre

diferentes estaciones de muestreo. Este enfoque ha facilitado la identificación de problemas de calidad del agua en cuerpos de agua específicos, promoviendo acciones de gestión adecuadas y ayudando a concienciar sobre la importancia de la calidad del agua para la salud pública y la biodiversidad (p. 186).

Según Caho y López (2017), en su artículo titulado como: *Determinación del Índice de Calidad de Agua para el sector occidental del humedal Torca-Guaymaral empleando las metodologías UWQI y CWQI*, indican el cambio en el tiempo:

La calidad del agua se deteriora durante la temporada menos lluviosa (temporada seca); sin embargo, debido a la ocurrencia del fenómeno El Niño, se debe implementar un plan de monitoreo continuo para evitar que estos eventos enmascaren otros efectos que por cuenta de los vertimientos se puedan presentar. Así, el método ICA-IDEAM simplifica la interpretación, la determinación de tendencias (declinación, estabilidad o recuperación) y la toma de decisiones sobre cuerpos de agua porque utiliza la ecuación sumatoria o la suma ponderada, por lo que su aplicación a estudios específicos es muy importante. Sin embargo, tiene la desventaja de ser menos sensible a las fluctuaciones extremas en la calidad del agua ya que su uso se limita a la evaluación de la calidad del agua en fuentes de agua superficiales que experimentan cambios drásticos, imprevisibilidad de sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, como ocurre durante el fenómeno El Niño. El ICA utilizado por IDEAM es una excelente herramienta para reportar tendencias y tomar decisiones ya que refleja las condiciones de un cuerpo de agua de forma sencilla y específica (p. 47).

Es así que, el Índice de Calidad del Agua (ICA) puede simplificar la interpretación de la calidad del agua, incluso en condiciones complejas como las causadas por el fenómeno El Niño en Morona Santiago. Adaptar el ICA mediante análisis estadísticos permite considerar las fluctuaciones extremas y la imprevisibilidad de las propiedades fisicoquímicas locales, haciendo que sea una herramienta clave para el monitoreo continuo y la toma de decisiones en la gestión ambiental. Esto refuerza la importancia de calibrar el índice para reflejar tendencias específicas y mejorar la evaluación de la calidad ambiental en esta área.

Según Tavassoli y Mohammadi (2017), quien desarrolló un índice basado en varias variables fisicoquímicas, como pH, sólidos disueltos, y concentración de oxígeno disuelto. Propuso un método para clasificar la calidad del agua mediante el uso de un índice que pondera diferentes parámetros fisicoquímicos. Utilizó análisis estadístico para determinar el peso relativo de cada variable en función de su impacto en la calidad del agua. Esto permitió establecer un enfoque sistemático para evaluar la calidad del agua en ríos y cuerpos de agua superficiales. Este modelo ha servido de base para desarrollos posteriores del ICA, donde se han integrado más parámetros y métodos estadísticos, como el análisis multivariado y el uso de técnicas de normalización, para obtener un índice más representativo de la calidad ambiental del agua (p. 37).

Según un estudio de (Gutiérrez *et al*, 2018) sobre la red hidrológica del río Bogotá en Colombia menciona que:

En la calibración del ICA utilizando análisis estadísticos avanzados y herramientas de modelado, permite identificar las principales fuentes de contaminación y ajustar el índice a las características ambientales locales. Se aplicaron también análisis de correlación y regresión para ajustar los parámetros del ICA y optimizar su utilidad en la gestión hídrica. Ambos estudios destacan el uso del análisis estadístico para optimizar la aplicación del ICA en la gestión de recursos hídricos locales en América Latina (p.45)

Esto indica que el análisis estadístico permite calibrar el ICA, ajustándolo a las características locales permitiendo identificar fuentes de contaminación y optimizando su aplicación para la gestión eficiente de los recursos hídricos.

Según Cude (2001) en su artículo titulado: *Water Quality Index a Tool For Evaluating Water Quality Management Effectiveness*, propuso un conjunto de diez parámetros, incluyendo oxígeno disuelto, pH, nitratos, y coliformes fecales, entre otros, utilizando un enfoque estadístico para asignar pesos a cada parámetro, reflejando su importancia en la evaluación de la calidad del agua. El índice de Cude ha sido ampliamente adoptado y adaptado en diversas regiones, proporcionando una herramienta estandarizada para evaluar la calidad del agua de manera accesible y

comprensible para la población y los responsables de la gestión ambiental (pp. 125-137).

Un estudio realizado por Pérez *et al.* (2021), en el río Guayas en Ecuador evaluó la calidad del agua utilizando un Índice de Calidad del Agua adaptado. Los autores seleccionaron varios parámetros fisicoquímicos, como pH, oxígeno disuelto, sólidos totales, nitratos y coliformes fecales. Utilizaron análisis estadístico, incluyendo el análisis de varianza (ANOVA) y métodos de normalización, para determinar la influencia de cada parámetro en la calidad general del agua. Este estudio proporcionó un índice práctico y accesible para la gestión del agua en la región, facilitando la identificación de problemas de calidad y promoviendo acciones de conservación y restauración en el ecosistema del río (pp. 1-15). Este estudio resalta cómo el análisis estadístico se aplica en la evaluación de la calidad del agua, contribuyendo al desarrollo de índices que son críticos para la gestión sostenible de recursos hídricos.

En tanto que Calleja *et al.* (2021), en su trabajo denominado: *Guía para la evaluación del estado de las aguas superficiales y subterráneas*, explican que:

El fin principal de la planificación y gestión hidrológica es lograr buenas masas de agua, ya que de esta manera se garantizan otros objetivos, como asegurar la calidad del agua, proteger la biodiversidad de los ríos, lagos y humedales, combatir la degradación y la contaminación, proteger, restaurar los ecosistemas y conservar los recursos del subsuelo. Por lo tanto, es importante que la evaluación de la condición sea precisa y confiable, ya que define las actividades que se deben realizar durante el ciclo de planificación, al mismo tiempo que permite determinar las condiciones de concesión, los límites de emisión, las sanciones para acciones de daños, así como de recuperación, entre otros. (p.76)

Estos autores subrayan la importancia de evaluar con precisión la condición de los cuerpos de agua para planificar y gestionar efectivamente los recursos hídricos. Automatizar y sistematizar el monitoreo mediante herramientas informáticas, complementaría la calibración del ICA mejorando la protección de la calidad del agua.

Un estudio realizado por Rojas *et al.* (2022) en el río Bogotá en Colombia evaluó la calidad del agua utilizando un Índice de Calidad del Agua adaptado. Los autores seleccionaron parámetros fisicoquímicos como oxígeno disuelto, pH, turbidez, nitratos y coliformes fecales. Utilizaron análisis estadístico, incluyendo el análisis de componentes principales (PCA) y técnicas de normalización, para asignar pesos a los diferentes parámetros en el índice. El estudio proporcionó una herramienta útil para la gestión y monitoreo de la calidad del agua en el río Bogotá, contribuyendo a la toma de decisiones en políticas ambientales y promoviendo la conciencia sobre la calidad del agua entre las comunidades locales (pp. 6-14). Este trabajo resalta la importancia del ICA en el contexto de la gestión de recursos hídricos en Latinoamérica, ofreciendo un enfoque específico para abordar problemas locales.

Según Armas *et al.* (2020), en su artículo titulado: *Calibración del Índice de Calidad del Agua y el análisis estadístico de las propiedades fisicoquímicas en la provincia de Cañar, Ecuador*, evaluaron la calidad del agua mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA) y aplicaron análisis multivariados como el análisis de componentes principales (PCA) para identificar las variables más influyentes en la red hidrológica. Propiedades como la conductividad eléctrica, el pH, el oxígeno y los sólidos disueltos totales fueron clave en su análisis.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Calidad del Agua

La calidad del agua se define como el conjunto de atributos físicas, químicas y biológicas del agua que dictaban su idoneidad para un propósito determinado. Para evaluar la calidad del agua, se utilizan parámetros operativos comunes que incluyen el pH, la turbidez, el oxígeno disuelto, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y la presencia de contaminantes y microorganismos patógenos. La evaluación de esta calidad se llevaba a cabo mediante parámetros operativos estandarizados, entre los que se encontraban el pH, que indicaba la acidez o alcalinidad; la turbidez, que reflejaba la claridad; el oxígeno disuelto, vital para la vida acuática; la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), que señalaba la cantidad de materia orgánica biodegradable; y la presencia de contaminantes y microorganismos patógenos,

indicadores de riesgos potenciales para la salud (Diego *et al.*, 2023, pp. 12-15). Esta evaluación se consideraba esencial para verificar si el agua cumplía con las normas y exigencias establecidas para su uso en diversas actividades, tales como el consumo humano, donde la pureza era primordial; la agricultura, que requería agua con ciertas características para el riego; la industria, que utilizaba agua en numerosos procesos; y la recreación, donde la calidad del agua influía en la seguridad y el disfrute. La determinación de la calidad del agua se realizaba mediante la medición de parámetros fisicoquímicos, biológicos y microbiológicos. Estos parámetros debían mantenerse dentro de unos límites aceptables con el objetivo de prevenir efectos adversos tanto en el medio ambiente como en la salud humana. Se reconocía que cualquier desviación de estos rangos podía tener consecuencias negativas, subrayando la importancia de una monitorización y gestión adecuadas de la calidad del agua.

Desde una perspectiva teórica, la calidad del agua se entiende como un indicador del estado de los recursos hídricos y su capacidad para mantener la salud de los ecosistemas y la seguridad humana. La teoría del desarrollo sostenible, por ejemplo, considera la calidad del agua como un recurso esencial que debe gestionarse de manera responsable para garantizar su disponibilidad a largo plazo (Henry, 2024, p1). Además, la teoría de la resiliencia ecosistémica sugería que los ecosistemas acuáticos tenían la capacidad de resistir y recuperarse de perturbaciones, siempre y cuando se mantuvieran dentro de ciertos límites de calidad del agua (AC Sostenibilidad, 2022, pp. 33-45).

Baeza (2016) planteó que, en su estado natural, el agua era un recurso limitado y vulnerable, cuya calidad podía verse alterada significativamente por las actividades humanas. En este contexto, una gestión apropiada de la calidad del agua no solo garantizaba la salud de los ecosistemas acuáticos, sino también la seguridad del agua destinada al consumo humano y otros usos. En este sentido, la teoría del desarrollo sostenible y la teoría de la resiliencia ecosistémica proporcionaban un marco teórico sólido para comprender cómo las acciones humanas y las condiciones ambientales influían en la calidad del agua. En este sentido, la teoría del desarrollo sostenible y la teoría de la resiliencia ecosistémica proporcionaban un marco teórico sólido para comprender cómo las acciones humanas y las condiciones ambientales influían en la calidad del agua (ENCA, 2016, pp. 11-28). También plantea que, en su estado natural,

el agua es un recurso limitado y vulnerable, y las actividades humanas pueden alterar significativamente su calidad (p.23). Además, la teoría de la resiliencia ecosistémica sugiere que los ecosistemas acuáticos pueden resistir y recuperarse de perturbaciones, siempre y cuando se mantengan dentro de ciertos límites de calidad del agua (AC Sostenibilidad, 2022, pp. 33-45).

2.2.2. Contaminación Hídrica

La contaminación hídrica se define como la introducción de sustancias nocivas en cuerpos de agua, lo que altera su calidad y la vuelve inadecuada para el consumo humano, la vida acuática y otros usos. Esta contaminación se manifiesta cuando componentes químicos o de otra naturaleza superan los niveles considerados naturales, impidiendo que el agua cumpla con su función original (Ecuador Chequea, 2023, p.83). Entre los contaminantes más comunes se encuentran los metales pesados, pesticidas, residuos industriales, plásticos y microorganismos patógenos entre otros (Portillo, 2024, p-1) .

Desde una perspectiva teórica, la contaminación hídrica se entiende como un fenómeno que altera el equilibrio natural de los ecosistemas acuáticos y pone en riesgo la salud humana y ambiental. La teoría de la resiliencia ecosistémica sugiere que los ecosistemas acuáticos tienen la capacidad de resistir y recuperarse de perturbaciones, siempre y cuando se mantengan dentro de ciertos límites de calidad del agua (Ortiz, 2024, p.3). Además, los conceptos de sostenibilidad hídrica enfatizan la necesidad de gestionar los recursos hídricos de manera que se satisfagan las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas (Paco G.Y., 2024, p. 67-69).

2.2.3. Sostenibilidad Hídrica

La sostenibilidad hídrica se refiere a la gestión y uso responsables de los recursos hídricos para garantizar su disponibilidad a largo plazo (Paco G.Y., 2024, pp.1-5). Este concepto abarca estrategias de conservación, gestión de recursos y uso eficiente del agua. En el estudio, aplicar estos conceptos puede ayudar a desarrollar políticas

y prácticas que aseguren la calidad del agua y su disponibilidad para futuras generaciones.

2.2.4. Situación Actual en Morona Santiago

La provincia de Morona Santiago enfrenta serios problemas de contaminación hídrica. Un estudio reciente reveló que el 70.2% del agua consumida en la región contiene la bacteria *Escherichia coli* (*E. coli*), lo que representa un grave riesgo para la salud pública. Además, la minería ilegal ha causado la destrucción de playas, bosques y cascadas en el río Santiago, exacerbando la contaminación y afectando negativamente a los ecosistemas locales. La escasez de lluvias y la deforestación también han contribuido a la disminución de los niveles de agua en los ríos, afectando tanto el suministro de agua para consumo humano como el turismo.

2.2.5. Características Químicas del Agua

Las características químicas del agua se refieren a la presencia y concentración de diversos compuestos químicos disueltos en el agua, que pueden ser de origen natural o antropogénico. Estos compuestos incluyen metales pesados, nutrientes, y otros contaminantes que pueden afectar la calidad del agua y su idoneidad para diferentes usos. Muchos compuestos químicos hidrosolubles pueden ser de origen natural o industrial y dependiendo de su composición y concentración pueden ser beneficiosos o perjudiciales para la salud. Entre los componentes más adecuados está el aluminio, propio del agua, el cual en altas concentraciones hace que el agua tenga un pH bajo. También está el mercurio un metal pesado tóxico y muy nocivo para los humanos. El plomo se puede encontrar en las aguas subterráneas, sin embargo, la presencia en aguas superficiales es causada por desechos industriales y tuberías de plomo. Otra posible causa es el hierro, presente en cantidades muy pequeñas en el agua natural que no causa problemas de salud, pero afecta a la turbidez y el color del agua (Cuadra, 2020, p. 23).

2.2.5.1. Estándares Internacionales

Muchos compuestos químicos hidrosolubles pueden ser beneficiosos o perjudiciales para la salud, dependiendo de su composición y concentración. Los estándares internacionales, como los establecidos por la Organización Mundial de la Salud

(OMS), definen los límites permisibles de estos compuestos para asegurar la seguridad del agua (Tito, 2020, p12).

- **Aluminio:** En altas concentraciones, el aluminio puede reducir el pH del agua, haciéndola más ácida. La OMS recomienda que el nivel de aluminio en el agua potable no exceda 0.2 mg/L.
- **Mercurio:** Este metal pesado es altamente tóxico y puede causar graves problemas de salud. La OMS establece un límite máximo de 0.006 mg/L para el mercurio en el agua potable
- **Plomo:** El plomo puede encontrarse en aguas subterráneas y superficiales debido a desechos industriales y tuberías de plomo. La OMS recomienda que el nivel de plomo en el agua potable no exceda 0.01 mg/L.
- **Hierro:** Aunque el hierro en pequeñas cantidades no causa problemas de salud, puede afectar la turbidez y el color del agua. La OMS sugiere un límite de 0.3 mg/L para el hierro en el agua potable

2.2.5.2. En la práctica

- **Flúor:** En cantidades adecuadas, el flúor es esencial para la nutrición humana, pero en concentraciones muy altas puede ser perjudicial para la estructura ósea. La OMS establece un límite de 1.5 mg/L para el flúor en el agua potable (Tito, 2020).
- **Nitratos:** Los altos niveles de nitrato en el agua pueden indicar desechos biológicos o escorrentía de campos fertilizados. Los efluentes ricos en nitratos pueden degradar la calidad del agua al fomentar el crecimiento excesivo de algas. Beber agua con cantidades excesivas de nitratos (MCL = 10 mg/L) puede causar metahemoglobinemia infantil o síndrome del bebé azul (Hach, n.d.).

Estos parámetros químicos son esenciales para evaluar y gestionar la calidad del agua en situaciones reales. Por ejemplo, en Morona Santiago, la presencia de metales pesados y nutrientes en el agua puede afectar tanto la salud humana como la biodiversidad acuática. La implementación de estándares internacionales y el monitoreo regular de estos parámetros son cruciales para asegurar la calidad del agua y proteger los ecosistemas locales.

2.2.6. Características Biológicas

El análisis de los parámetros biológicos del agua se enfoca en la presencia de microorganismos como bacterias, virus, hongos y protozoarios. Estos organismos, en altas concentraciones, pueden ser indicadores de contaminación por desechos orgánicos, lo que representa un riesgo para la salud humana y el medio ambiente (Quintero & Rivas, 2020). Los coliformes fecales son uno de los principales indicadores biológicos utilizados para evaluar la calidad del agua, ya que su presencia indica contaminación por materia fecal (Rojas & Espinoza, 2019).

La presencia de estos organismos no solo afecta el consumo humano, sino que también influye en el equilibrio del ecosistema acuático, donde la biodiversidad puede verse alterada por la proliferación excesiva de microorganismos patógenos, afectando tanto la fauna como la flora acuática (Salazar & Molina, 2021).

2.2.6.1. Dimensiones Biológicas

- **Floraciones de Algas Tóxicas:** Las floraciones de algas tóxicas, como las cianobacterias, pueden liberar toxinas que afectan la calidad del agua y representan un riesgo para la salud humana y animal. Estas floraciones son promovidas por altos niveles de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, y pueden causar la muerte de peces y otros organismos acuáticos debido a la disminución del oxígeno disuelto (Wang *et al.*, 2025). Tal es el caso del lago Erie, las floraciones de *Microcystis aeruginosa* han causado problemas significativos de calidad del agua y riesgos para la salud pública (Costa & Holmes, 2024, p. 11).
- **Virus Emergentes:** Los virus emergentes en cuerpos de agua, como los circovirus acuáticos, pueden causar enfermedades en peces y otros organismos acuáticos, afectando la biodiversidad y la productividad de los ecosistemas acuáticos (Jacquet *et al.*, 2010). Estos virus pueden propagarse rápidamente en condiciones de alta densidad de población y estrés ambiental, lo que subraya la importancia de la vigilancia y gestión de la calidad del agua (pp. 98-105).

2.2.6.2. Impacto en la Biodiversidad Acuática

La presencia de microorganismos patógenos no solo afecta el consumo humano, sino que también influye en el equilibrio del ecosistema acuático. La proliferación excesiva de estos organismos puede alterar la biodiversidad acuática, afectando tanto la fauna

como la flora. Por ejemplo, las floraciones de algas tóxicas pueden desplazar a las especies nativas y reducir la diversidad biológica, mientras que los virus emergentes pueden causar mortalidades masivas en poblaciones de peces y otros organismos acuáticos (BiologyInsights Team, 2025, p.1).

Estos cambios pueden tener efectos en cascada en la estructura y función de los ecosistemas acuáticos, afectando la disponibilidad de recursos y la estabilidad del ecosistema (Stock *et al.*, 2021, pp.115-117).






2.2.7. Índice de calidad del Agua (ICA)

El Índice de Calidad del Agua (ICA) es una métrica que cuantifica el impacto de la calidad del agua en la salud humana, sin considerar su uso específico. Para su cálculo, se emplean diversos parámetros ponderados mediante ecuaciones matemáticas específicas. Por medio de una expresión numérica que varía de 0 a 1 o de 0 a 100, el ICA evalúa el nivel de calidad del agua en función de la entrada de datos, lo que permite registrar de manera clara y adaptable la puntuación de calidad (Amaya, 2018, p.87).

El valor del ICA se clasifica en:

Tabla 1

Clasificación ICA-NSF

Rango	Color
Excelente: 91-100	
Buena: 71-90	
Regular: 51 -70	
Mala: 26-50	
Pésima: 0- 25	

Fuente:(Amaya, 2018)

Aunque el ICA es un método simple, conciso y legítimo, para demostrar la jerarquía de los datos de laboratorio generados con frecuencia, no suministran la información que mejora la calidad del agua. Sin embargo, el ICA presenta varias limitaciones,

incluyendo su incapacidad para capturar todas las variaciones y riesgos específicos de diferentes regiones, lo que puede llevar a una representación incompleta de la calidad del agua (García-Ubaque *et al.*, 2018). El ICA es un resumen de datos que no proporciona información detallada para mejorar la calidad del agua, además de que su aplicación puede ser subjetiva y sesgada debido a las fórmulas utilizadas (Torres *et al.*, 2009).

Debido a estas limitaciones y no es universalmente aplicable debido a las diversas condiciones ambientales en las cuencas de los ríos, generando críticas de algunos científicos por su metodología, lo que puede socavar su credibilidad como herramienta de gestión. A pesar de ello es un método simple, conciso y legítimo, para demostrar la jerarquía de los datos de laboratorio generados con frecuencia, mejorando la comunicación con el público y sensibilizando sobre el estado de la calidad del Agua.

La tabla 2 muestra el uso del agua según el ICA:

Tabla 2

Usos del agua según su ICA

ICA	Usos					Ejemplo
	Agua Potable	Agrícola	Pesca y Vida Acuática	Industrial	Recreativo	
91-100	No requiere purificación para consumo	No requiere purificación para riego	Pesca y vida acuática abundante	No se requiere purificación	Cualquier tipo de deporte acuático	En el río Upano, Morona Santiago, se ha encontrado que el agua en ciertos tramos cumple con estos estándares, permitiendo su uso directo para consumo humano y actividades recreativas sin necesidad de tratamiento adicional (Jiménez, 2022)
71-90	Purificación menor requerida	Purificación menor para cultivos que requieren de alta calidad de agua	Pesca y vida acuática abundante	Purificación menor para industrias que requieran alta calidad de agua para operación	Cualquier tipo de deporte acuático	En el río Cauca, Colombia, el agua ha sido clasificada en este rango en áreas rurales, donde se utiliza para riego y actividades industriales con tratamientos menores
51-70	Tratamiento potabilizador necesario	Utilizable en mayoría de cultivos	Límite para peces muy sensitivos y dudosa la pesca sin riesgos de salud	No se requiere tratamiento para la mayoría de las industrias de operación	Restringir los deportes de inmersión, precaución se si ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias	En el río Santiago, Ecuador, el agua ha sido clasificada en este rango, requiriendo tratamiento antes de su uso para consumo humano y limitando su uso recreativo debido a la posible presencia de bacterias (Guevara, 2018, p. 18)
26-50	Inaceptable para consumo	Uso en cuerpos muy resistentes o tratamientos necesarios para la mayoría de los cultivos	Vida acuática limitada a especies muy resistentes e inaceptables para actividad pesquera	Tratamiento para mayoría de usos	Dudosa para contacto con el agua. Evitar contacto	En el río Magdalena, Colombia, ciertas áreas han mostrado niveles de calidad del agua en este rango, limitando su uso a cultivos muy resistentes y requiriendo tratamiento significativo para usos industriales
0-25	Inaceptable para consumo	Inaceptable para riego	Inaceptable para vida acuática	Inadecuada para cualquier industria	Contaminación visible, evitar cercanía. Inaceptable para recreación	En el río Machángara, Ecuador, se han identificado tramos con calidad de agua en este rango, donde la contaminación es visible y se desaconseja cualquier tipo de contacto o uso recreativo (Pauta et al., 2019, p4)

Fuente:(Amaya, 2018)

En la tabla 3 se observa las limitaciones que marca el Índice de Calidad del Agua:

Tabla 3

Limitaciones del ICA

Limitaciones	
Falta de datos locales confiables	Muchas bases de datos utilizadas para evaluar la calidad del agua carecen de una resolución espacial y temporal adecuada, lo que dificulta la aplicación precisa de estos modelos en zonas con monitoreo deficiente.
Dificultad en la integración de variables socioeconómicas	Modelos como DPSIR pueden no captar completamente los impactos culturales y socioeconómicos de la calidad del agua en comunidades indígenas y rurales, que dependen del recurso hídrico para actividades tradicionales.
Limitaciones en la representación de la variabilidad geográfica	Los modelos tienden a generalizar las condiciones ambientales, lo que puede no reflejar adecuadamente la heterogeneidad de la red hidrológica de Morona Santiago, donde existen variaciones significativas en la calidad del agua debido a la geología, la climatología y la actividad humana.
Desafíos en la aplicación de medidas correctivas	Aunque estos modelos identifican presiones e impactos, la implementación de soluciones efectivas depende de la voluntad política, la disponibilidad de recursos y la gobernanza ambiental efectiva.

Fuente: (Hernández *et al.*, 2016).

2.2.8. Limitaciones de los Enfoques para Evaluar la Calidad del Agua

A pesar de su utilidad, tanto el ACV como el modelo DPSIR presentan limitaciones en su aplicación a regiones específicas como Morona Santiago:

2.2.8.1. Análisis estadístico de Parámetros Físicoquímicos

El análisis estadístico de parámetros físicoquímicos se refiere al estudio y evaluación de las características físicas y químicas del agua, utilizando métodos estadísticos para

interpretar y presentar los datos recopilados. Este tipo de análisis es fundamental para la gestión y monitoreo de la calidad del agua en diferentes ecosistemas, ya que permite identificar tendencias, evaluar la efectividad de las políticas ambientales y detectar posibles contaminantes (Cáceres, 2020, p.123).

2.2.8.2. Contaminación del Agua

La contaminación del agua ocurre cuando componentes químicos, biológicos y físicos ingresan a cuerpos de agua como ríos, lagos y acuíferos en concentraciones que alteran sus condiciones naturales y afectan su calidad. En la provincia de Morona Santiago, la contaminación del agua está influenciada por actividades como la minería, la agricultura y los asentamientos humanos, lo que genera variaciones en los parámetros fisicoquímicos como la concentración de metales pesados (plomo, arsénico, mercurio), el aumento de la materia orgánica y las fluctuaciones del pH y oxígeno disuelto (INAMHI, 2021; OMS, 2017) . Estos cambios pueden comprometer el cumplimiento de los estándares nacionales e internacionales de calidad del agua, afectando su disponibilidad para consumo, riego y mantenimiento de ecosistemas acuáticos.

Así, comprender la magnitud y las fuentes de contaminación en la red hidrológica de Morona Santiago es fundamental para caracterizar su calidad, analizar sus variaciones espacio - temporales y evaluar su cumplimiento con normativas ambientales, objetivos clave de este estudio.

2.2.8.3. Principales Contaminantes

Según (Garcés 2021), menciona que los principales contaminantes son:

- a) **Material orgánico:** es la cantidad de materia orgánica activa en las aguas residuales, la cual está determinada por la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), cuanto más materia orgánica haya en las aguas residuales, mayor será la DBO. Un estudio realizado en el río Machángara, Ecuador, encontró que las aguas residuales industriales aumentan significativamente la DBO, afectando la calidad del agua y la vida acuática. A largo plazo, altos niveles de DBO

pueden reducir el oxígeno disuelto en el agua, causando la muerte de peces y otros organismos acuáticos.

- b) **Sólidos suspendidos:** se trata del volumen de lodos generados en la planta de tratamiento, el cual está directamente relacionado con el contenido total de sólidos en suspensión en las aguas residuales. Las aguas residuales provenientes de actividades industriales y las aguas pluviales pueden exhibir niveles superiores de sólidos en suspensión en comparación con las aguas residuales de origen doméstico. La eficacia del proceso de tratamiento está determinada por el grado de eliminación de la suspensión en la instalación de tratamiento, junto con el Índice de Demanda Bioquímica de Oxígeno. En un estudio en el río Cauca, Colombia, se observó que las descargas industriales aumentan los sólidos suspendidos, afectando la transparencia del agua y la fotosíntesis de las plantas acuáticas. A largo plazo, esto puede llevar a la sedimentación y la alteración de los hábitats acuáticos.

- c) **Nutrientes vegetales:** Las aguas residuales domésticas contienen compuestos de nitrógeno y fósforo, nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, cantidades excesivas de nitratos y fosfatos pueden provocar la proliferación de algas, un fenómeno conocido como eutrofización. En el lago San Pablo, Ecuador, se ha documentado que la eutrofización causada por aguas residuales domésticas y agrícolas ha llevado a la disminución de la biodiversidad acuática y la calidad del agua. A largo plazo, la eutrofización puede causar zonas muertas donde el oxígeno es insuficiente para la vida acuática.

- d) **Microbios:** Las aguas residuales domésticas contienen millones de microorganismos por galón, incluyendo bacterias coliformes del tracto digestivo humano. Estas bacterias se utilizan como indicadores de contaminación fecal. Un estudio en el río Guayas, Ecuador, encontró altos niveles de coliformes fecales, indicando contaminación reciente por aguas residuales. La presencia de estos microbios a tiempo prolongado puede causar enfermedades transmitidas por el agua, como diarrea y cólera, afectando la salud pública (Garcés, 2021, p.43).

2.2.9. Relación de Conceptos con Teorías y Enfoques Relevantes

Calidad del Agua:

- **Ecología Acuática:** La calidad del agua es fundamental para la ecología acuática, que estudia las interacciones entre los organismos del agua y su entorno, afectando directamente la biodiversidad y la salud de los ecosistemas acuáticos. Por ejemplo, parámetros como el pH y el oxígeno disuelto son cruciales para la supervivencia de estas especies. La teoría de la resiliencia ecosistémica sugiere que los ecosistemas acuáticos pueden resistir y recuperarse de perturbaciones si se mantienen dentro de ciertos límites de calidad del agua (Drnas De Clément, 2020, p.22).
- **Economía Ambiental:** La economía ambiental analiza los costos y beneficios de las políticas ambientales, incluyendo la gestión de los recursos hídricos y la mitigación de la contaminación. La calidad del agua tiene un impacto económico significativo, ya que afecta la productividad agrícola, la salud pública y el turismo. La teoría del desarrollo sostenible enfatiza la necesidad de gestionar la calidad del agua de manera que se satisfagan las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas (Luisa *et al.*, 2008, p. 13).
- **Derecho Ambiental:** El derecho ambiental regula el uso y la protección de los recursos hídricos, estableciendo normas y políticas para prevenir la contaminación y promover la sostenibilidad. Por ende, un agua de calidad es aspecto clave en la legislación ambiental, que busca proteger los cuerpos de agua de la contaminación y asegurar su disponibilidad para diversos usos. Las grandes teorías del derecho ambiental abordan la necesidad de un marco normativo robusto para la gestión sostenible de los recursos hídricos (Ballesteros, 2008, pp. 55-65)

2.2.10. Contaminación Hídrica

- **Ecología Acuática:** La contaminación hídrica altera el equilibrio natural de los ecosistemas acuáticos, afectando la biodiversidad y la salud de los organismos acuáticos. La teoría de la resiliencia ecosistémica es relevante aquí, ya que sugiere que los ecosistemas pueden recuperarse de la contaminación si se eliminan las fuentes de estrés y se restauran las condiciones naturales (Drnas De Clément, 2020)
- **Economía Ambiental:** La contaminación hídrica tiene costos económicos significativos, incluyendo la pérdida de productividad agrícola, el aumento de los costos de tratamiento del agua y los impactos negativos en la salud pública. La economía ambiental utiliza herramientas como el análisis costo-beneficio para evaluar las políticas de mitigación de la contaminación y promover prácticas sostenibles (Luisa *et al.*, 2008)
- **Derecho Ambiental:** El derecho ambiental establece regulaciones para controlar la contaminación y proteger los recursos hídricos. Estas regulaciones incluyen límites para la descarga de contaminantes, requisitos para el tratamiento de aguas residuales y sanciones para las violaciones. Las teorías del derecho ambiental abogan por un enfoque preventivo y de precaución para evitar la contaminación y proteger la calidad del agua (Ballesteros, 2008, p.13).

2.2.11. Análisis Crítico de Teorías Existentes

Análisis de Ciclo de Vida de los Recursos Hídricos (ACV): Esta metodología evalúa los impactos ambientales de un producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. En el contexto de los recursos hídricos, el ACV puede ayudar a identificar las etapas del ciclo del agua que generan mayores impactos ambientales y a desarrollar estrategias para reducir estos impactos.

Modelo DPSIR (Drivers, Pressures, State, Impact, Response): Este modelo conceptualiza las interacciones entre la sociedad y el medio ambiente mediante

cinco componentes: fuerzas impulsoras (drivers), presiones, estado, impactos y respuestas (Michael Allen, 2025, p.1). Es útil para analizar problemas ambientales complejos y desarrollar políticas de gestión sostenible. En el contexto de la calidad del agua, el modelo DPSIR puede ayudar a identificar las causas de la contaminación, evaluar su impacto en los ecosistemas acuáticos y diseñar respuestas adecuadas.

2.2.12. Aplicación al Contexto del Estudio:

ACV: Puede aplicarse para evaluar el impacto de diferentes actividades humanas en la calidad del agua en Morona Santiago, identificando las etapas críticas del ciclo del agua que requieren intervención.

DPSIR: Puede adaptarse para analizar las interacciones entre las actividades agrícolas, industriales y domésticas en la región y su impacto en la calidad del agua, proporcionando un marco para desarrollar políticas de gestión hídrica más efectivas (Michael Allen, 2025, p. 1).

2.2.13. Formulación de Hipótesis Teóricas

2.2.13.1. Hipótesis sobre el Impacto de los Contaminantes

- Las concentraciones elevadas de nitrógeno y fósforo en los ríos de Morona Santiago están significativamente correlacionadas con la escorrentía agrícola y las descargas de aguas residuales (Henry, 2024).
- La presencia de metales pesados en los cuerpos de agua de la región está asociada con actividades mineras y descargas industriales.

2.2.13.2. Modelos Predictivos

- Un modelo basado en regresión múltiple que utiliza datos históricos de calidad del agua (pH, DBO, oxígeno disuelto) para predecir futuras concentraciones de contaminantes en función de las actividades humanas y las condiciones climáticas.
- Un modelo de simulación que integra el modelo DPSIR para evaluar el impacto de diferentes escenarios de gestión hídrica en la calidad del

agua, permitiendo a los gestores tomar decisiones informadas para mitigar la contaminación y promover la sostenibilidad.

2.3. MARCO LEGAL

La calidad del agua en Ecuador está regida por un conjunto normativo que se fundamenta tanto en la Constitución de la República como en regulaciones internacionales y nacionales. Este marco legal establece derechos, deberes y estándares para asegurar la protección y sostenibilidad de los recursos hídricos en el país.

2.3.1. Marco Internacional

A nivel internacional, varios tratados y convenios abordan el derecho al agua y la protección de los recursos hídricos. Entre ellos se destacan:

- La Declaración Universal de los Derechos Humanos (1948), establece el derecho a un nivel de vida adecuado, incluyendo la alimentación, el vestido y la vivienda, así como la mejora continua de las condiciones de vida. Esto implica el acceso al agua potable (Asamblea General de las Naciones Unidas, 1948, p.1)
- La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (2015), adoptada por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2015, incluye el Objetivo de Desarrollo Sostenible, que busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (Naciones Unidas., 2015, p. 4)
- El Convenio de Ramsar (1971): tratado internacional que protege los humedales de importancia mundial, promoviendo su uso racional y su conservación.
- El Protocolo de Kioto (1997): acuerdo que busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, influyendo en la regulación de recursos hídricos debido a su relación con el cambio climático.

Estos instrumentos internacionales proporcionan una base para la legislación nacional, enfatizando la importancia del acceso al agua de calidad como un derecho humano. Sin embargo, es necesario analizar como estos tratados han sido implementados en la legislación ecuatoriana, identificando avances y desafíos en la regulación del agua en el país.

2.3.2. Marco Nacional

2.3.2.1. Constitución de la República del Ecuador

La Constitución ecuatoriana promulgada en 2008, establece principios fundamentales sobre el agua y su calidad. Según el artículo 12, el agua es reconocida como un derecho humano esencial y patrimonio nacional, que debe ser garantizado por el Estado. Esto implica que el acceso al agua de calidad es inalienable, imprescriptible e inembargable (Asamblea Nacional del Ecuador, 2018).

El artículo 14 refuerza el derecho de la población a vivir en un ambiente sano, destacando la importancia de la conservación de los ecosistemas y la biodiversidad. Mientras que, el artículo 71 otorga derechos a la naturaleza, reconociendo su existencia y la necesidad de preservar su integridad y funciones vitales (Asamblea Nacional del Ecuador, 2018)

Para proteger estos derechos, la Constitución establece mecanismos de seguimiento, sanciones por incumplimiento y responsabilidades de diversas instituciones estatales. Además, su inclusión en la Constitución de 2008 correspondió al contexto político y social en el que se reforzó la visión de los derechos naturales y el uso equitativo de los recursos hídricos.

2.3.2.2. Código Orgánico del Ambiente

El Código Orgánico del Ambiente (Ley No. 2008-02) establece normas específicas para la gestión y protección del medio ambiente, incluyendo el agua. Este código enfatiza la responsabilidad del Estado en la promoción del desarrollo sostenible y la protección del patrimonio natural, en concordancia con los artículos de la Constitución que abordan el derecho al agua y la conservación ambiental (Pozo, 2017, p. 35).

2.3.2.3. Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN 1108:2011)

La norma (NTE INEN 1108, 2011), detalla que Código Orgánico del Ambiente, se aplica al agua potable de los sistemas de abastecimiento públicos y privados a través de redes de distribución y tanqueros, por lo que el agua debe cumplir con los requisitos que se establecen en la tabla 4.

Tabla 4

Requisitos específicos

PARAMETRO	UNIDAD	Límite máximo permitido
Características físicas		
Color	Unidades de color aparente (Pt-Co)	15
Turbiedad	NTU	5
Olor	---	no objetable
Sabor	---	no objetable
Inorgánicos		
Antimonio, Sb	mg/l	0,02
Arsénico, As	mg/l	0,01
Bario, Ba	mg/l	0,7
Boro, B	mg/l	0,5
Cadmio, Cd	mg/l	0,003
Cianuros, CN ⁻	mg/l	0,07
Cloro libre residual*	mg/l	0,3 a 1,5 ¹⁾
Cobre, Cu	mg/l	2,0
Cromo, Cr (cromo total)	mg/l	0,05
Fluoruros	mg/l	1,5
Manganeso, Mn	mg/l	0,4
Mercurio, Hg	mg/l	0,006
Níquel, Ni	mg/l	0,07
Nitratos, NO ₃	mg/l	50
Nitritos, NO ₂	mg/l	0,2
Plomo, Pb	mg/l	0,01
Radiación total α *	Bq/l	0,1
Radiación total β **	Bq/l	1,0
Selenio, Se	mg/l	0,01

¹⁾ Es el rango en el que debe estar el cloro libre residual luego de un tiempo mínimo de contacto de 30 minutos

* Corresponde a la radiación emitida por los siguientes radionucleidos: ²¹⁰Po, ²²⁴Ra, ²²⁶Ra, ²³²Th, ²³⁴U, ²³⁸U, ²³⁹Pu

** Corresponde a la radiación emitida por los siguientes radionucleidos: ⁶⁰Co, ⁸⁹Sr, ⁹⁰Sr, ¹²⁹I, ¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb, ²²⁸Ra

Fuente: (NTE INEN 1108, 2011).

La norma ofrece un marco regulatorio detallado, es importante analizar su relevancia en el contexto ecuatoriano, considerando su comparación con estándares internacionales y la capacidad local para cumplir con estos límites. Un estudio comparativo muestra que los estándares de calidad del agua en Ecuador presentan desviaciones significativas respecto a las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y otras normativas internacionales, lo que puede dificultar su implementación efectiva (Orbe *et al.*, 2023)

En la sección sobre radiación (NTE INEN 1108:2011), se mencionan los radionucleidos, pero no se explica en detalle su impacto en la calidad del agua en Ecuador. Según una investigación en la provincia de Chimborazo evaluó las concentraciones de radón en el agua potable y encontró que, aunque los niveles estaban por debajo de los límites recomendados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y la Comunidad Europea de Energía Atómica (EURATOM), la presencia de estos radionucleidos puede representar un riesgo a largo plazo para la salud humana (Elaboudi *et al.*, 2024). La exposición prolongada a radionucleidos puede causar enfermedades cardiovasculares, respiratorias y neurológicas, así como efectos mutagénicos que pueden llevar al cáncer.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

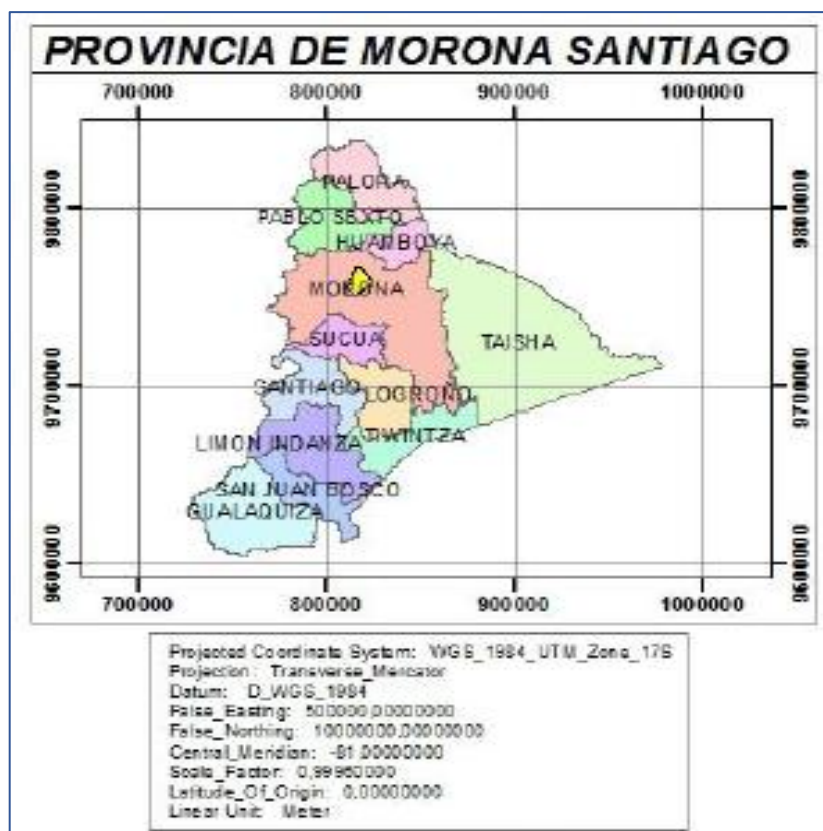
4.3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO/GRUPO DE ESTUDIO

4.3.1. Descripción del Área de Estudio

La presente investigación se desarrolló en la cuenca hidrológica de la provincia de Morona Santiago, donde se realizó la recolección de muestras de agua. Posteriormente, dichas muestras fueron transportadas a los laboratorios de análisis fisicoquímico de la ESPOCH, Sede Morona Santiago, con el propósito de determinar los parámetros de estudio.

Figura 1

Provincia de Morona Santiago y sus cantones



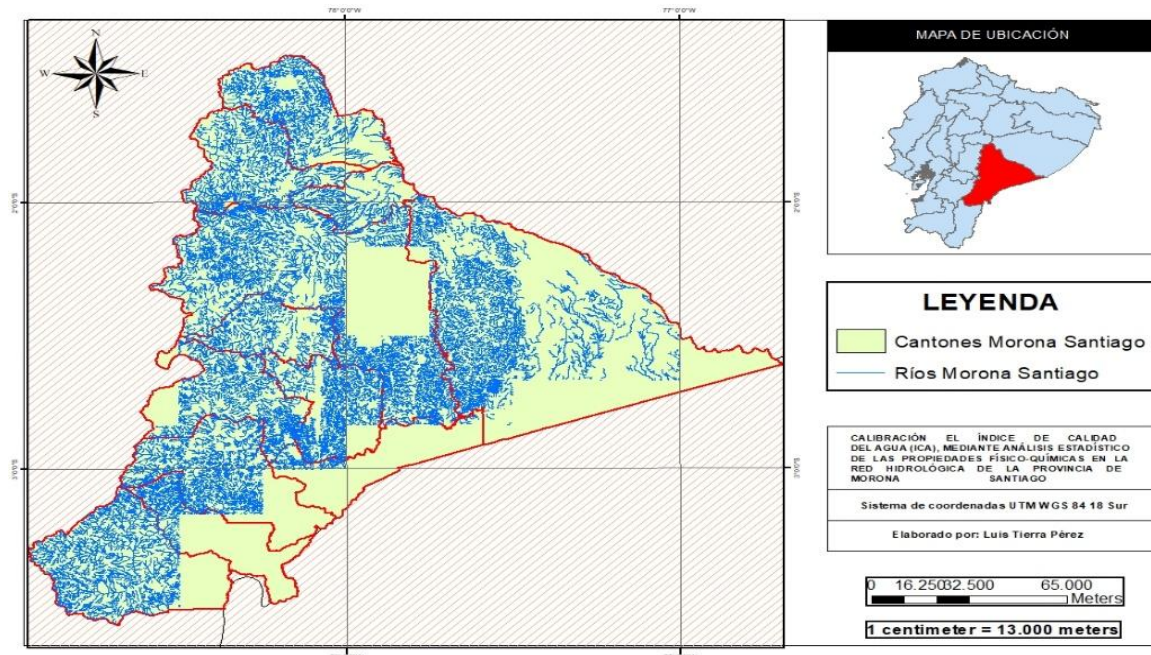
Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

En la región amazónica del Ecuador se ubica la provincia de Morona Santiago, la cual alberga una de las redes hidrológicas más complejas y biodiversas del país. Esta red es fundamental para la ecología, economía y vida social, ya que contribuye en la sostenibilidad ambiental y el bienestar de las distintas comunidades y pueblos indígenas y mestizos. Los ríos de Morona Santiago no solo mantienen una rica biodiversidad, sino que también favorecen de forma significativa la cuenca del Amazonas, uno de los sistemas fluviales más importantes del mundo.

La base de datos de la investigación se generó en el marco del proyecto de vinculación de la ESPOCH sede Morona Santiago, denominado "Sistema de Información Geográfica para El Monitoreo de la Calidad del Agua en la Red Hidrológica de la Provincia de Morona Santiago". En este proyecto, se llevó a cabo un monitoreo cuatrimestral de las variables ambientales durante los años 2018 al 2023, mismo que fue realizado por los estudiantes de la ESPOCH, pertenecientes a la carrera de Ingeniería Ambiental. El monitoreo abarcó 69 estaciones distribuidas en 28 ríos diferentes (Figura 3, Tabla 5), proporcionando un conjunto de datos integral y representativo de la calidad del agua en la provincia.

Figura 2

Ríos y estaciones de monitoreo de la red hidrológica de Morona Santiago



Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

Tabla 5*Puntos de muestreo con sus respectivas coordenadas*

RIO	COORD- X	COORD- Y	PUNTO
HUASAGA	275317,50	9699416,50	P1
HUASAGA	267687,40	9704496,80	P2
HUASAGA	260536,90	9708079,80	P3
HUASAGA	258714,10	9715164,60	P4
HUASAGA	257269,20	9720800,80	P5
CHAPIZA	177784,80	9681258,30	P6
CHAPIZA	178221,80	9689341,60	P7
CHAPIZA	178170,00	9693894,00	P8
CHAPIZA	176461,80	9699526,90	P9
CHAPIZA	170189,00	9701869,70	P10
ZAMORA	785452,20	9649154,60	P11
ZAMORA	784661,90	9735603,40	P12
ZAMORA	782524,20	9637052,60	P13
ZAMORA	780611,40	9633126,60	P14
UPANO	819914,80	9764262,00	P15
UPANO	821124,70	9742271,20	P16
UPANO	823240,90	9753001,20	P17
RIO BLANCO	814064,80	9741347,30	P18
RIO BLANCO	816577,10	9739070,60	P19
YUQUIPA	177755,30	9753823,60	P20
YUQUIPA	169088,80	9752598,10	P21
YUQUIPA	819354,20	9734480,20	P22
PAN DE AZÚCAR	775073,80	9656337,50	P23
KALAGLAS	771340,90	9649302,50	P24
KALAGLAS	771071,20	9643713,00	P25
JURUMBAINO	819002,60	9740893,70	P26
JURUMBAINO	817191,10	9748924,10	P27
TUTANANGOZA	791744,80	9721847,20	P28
TUTANANGOZA	795756,20	9722981,10	P29
TUTANANGOZA	808934,10	9724379,00	P30
RIO MIRIUMI	813007,10	9728045,70	P31
RIO MIRIUMI	813018,10	9728046,20	P32
YUNGANZA	796234,30	9687103,00	P33
YUNGANZA	796234,30	9687103,00	P34
YUNGANZA	796234,30	9687103,00	P35
INDANZA	782166,90	9639567,80	P36
INDANZA	793761,00	9661721,00	P37
LUSHIN	828577,90	9816213,70	P38
LUSHIN	826223,80	9815860,70	P39
SANGAY	828664,80	9795151,40	P40
SANGAY	169632,00	9794158,10	P41

SANGAY	172874,10	9793138,50	P42
TUNA CHIGUAZA	832737,60	9784256,00	P43
PALORA	152497.29	9792213957,00	P44
PALORA	185076.59	9793267.32	P45
RIO PASTAZA	170139,90	9816121,60	P46
RIO PASTAZA	831735,40	9814369,40	P47
RIO CHIWIAS	829339,70	9785291,90	P48
RIO CHIWIAS	832193,80	9784622,80	P49
RIO CUYES	764747,60	9620394,20	P50
RIO CUYES	756339,50	9616850,30	P51
RIO EL IDEAL	766322,80	9620482,50	P52
RIO EL IDEAL	762449,70	9627836,60	P53
RIO MORONA	207432.13	9689682.65	P54
RIO MORONA	214812,00	9691717,00	P55
RIO MUCHINKIN	189239.3	9688758.26	P56
RIO MUCHINKIN	193061.34	9686186.82	P57
NAMANGOZA	138905933,00	9687737079,00	P58
NAMANGOZA	138928186,00	9682016.57	P59
SANTIAGO	821363,30	9663217,10	P60
SANTIAGO	182951,20	9667870,60	P61
MACUMA	232025,40	9738248,10	P62
PANGUIETZA	213354,10	9725365,70	P63
TUNA	70847,60	80815,90	P64
TUNA	831869,90	9785155,30	P65
TUNA	833722,60	9783276,50	P66
WAWAIM GRANDE	170634,60	9780569,50	P67
WAWAIM GRANDE	169639,90	9779799,10	P68
WAWAIM GRANDE	168633,20	9778884,20	P69

Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2023).

Figura 3

Estaciones de muestreo en la red hídrica de Morona Santiago



Fuente: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

4.3.2. Grupo de Estudio

Para esta investigación se tomarán muestras de la red hidrográfica de la provincia de Morona Santiago, para el análisis de sus propiedades fisicoquímicas, las mismas que establecen la calidad del agua en los ríos.

La calibración del Índice de Calidad del Agua se realiza en base a un análisis exhaustivo de los parámetros fisicoquímicos del agua, que contienen: pH, oxígeno

disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), formas de nitrógeno, fosfatos y sólidos totales (ST). La evaluación de estos parámetros se realiza en función de sus concentraciones relativas, mismas que determinan el nivel de calidad del agua y aprueban establecer sus usos adecuados y los tratamientos necesarios.

4.4. Enfoque y Tipo de Investigación

4.4.1. Enfoque

Esta investigación tuvo un enfoque cuantitativo, el cual permitió obtener una comprensión completa del fenómeno investigado y fortalecer la validez de los resultados.(Neill & Cortez Suárez, 2018) que la investigación cuantitativa, también llamada empíri- co-analítico, racionalista o positivista es aquel que se basa en los aspectos numéricos para investigar, analizar y comprobar datos e información. Este enfoque permitió establecer relaciones entre variables mediante el uso de instrumentos estandarizados como encuestas o cuestionaros, y el análisis estadístico de los datos obtenidos.

La investigación cuantitativa se concentra en las mediciones numéricas y utiliza la observación del proceso en forma de recolección de datos y los analiza para llegar a responder las preguntas de investigación (Otero-Ortega & Ortega, 2018). Este enfoque utiliza los análisis estadísticos e inicia con la recolección, la medición de parámetros, la obtención de frecuencias y estadígrafos de población posteriormente plantea un problema de estudio delimitado y concreto. Por último, formula preguntas de investigación sobre cuestiones específicas, revisando lo que se ha investigado anteriormente.

El presente trabajo de investigación adopta un enfoque cuantitativo, pese a que se presentan datos descriptivos dentro de nuestro estudio como la categorización del agua como mala y buena. Este enfoque se da debido a la naturaleza del estudio, que implica la medición y análisis de datos numéricos relacionados con las propiedades fisicoquímicas del agua en la red hidrológica de la provincia de Morona Santiago, permitiendo la recolección de datos cuantificables para realizar un análisis estadístico riguroso que sustente las conclusiones y recomendaciones del estudio.

Al optar por un enfoque cuantitativo, se busca objetividad en la recolección y análisis de datos, permitiendo establecer relaciones causales entre las variables estudiadas y brindar resultados que puedan ser generalizables a nivel de la muestra estudiada. Además, facilita la aplicación de técnicas estadísticas para interpretar los datos recopilados y respaldar las conclusiones del estudio de manera sólida y fundamentada.

A través del uso de la matemática tradicional y con la ayuda software matemáticos y estadísticas se realizará un análisis de componentes principales, el cual permitirá reducir la dimensionalidad de los datos e identificar patrones subyacentes en las propiedades fisicoquímicas medidas. Posterior se desarrollará el análisis de Clúster para agrupar las muestras de agua en categorías según sus características fisicoquímicas, lo que podría ayudar a identificar patrones de calidad del agua en la red hidrológica.

Estas técnicas estadísticas permiten analizar de manera rigurosa los datos recopilados en el estudio, proporcionando insights significativos sobre la calidad del agua en la red hidrológica de la provincia de Morona Santiago y respaldando las conclusiones y recomendaciones obtenidas.

4.4.2. Tipo de Investigación

Aunque el método científico es uno, existen diversas formas de identificar su práctica o aplicación en la investigación, de modo que se puede clasificar y aplicar en el estudio de diversas maneras como se describe a continuación:

4.4.2.1. *Investigación Exploratoria*

Según (Creswell, 2014). Una investigación exploratoria se utiliza cuando el propósito de la investigación es resolver un problema de investigación menos estudiado, sobre el cual se duda mucho o no se ha considerado antes. La investigación exploratoria consiste en proveer una referencia general de la temática, a menudo desconocida, presente en la investigación a realizar. Entre sus propósitos podemos citar la posibilidad de formular el problema de investigación, para extraer datos y términos que nos permitan generar las preguntas necesarias. Así mismo, proporciona la

formulación de hipótesis sobre el tema a explorar, sirviendo de apoyo a la investigación descriptiva (Nelson Morales, n.d.).

La investigación exploratoria se aplicó para abordar el problema del agua en la provincia de Morona Santiago, dado que se disponía de poca información previa sobre la calidad de agua en la región. La recolección de datos iniciales y el análisis estadístico proporcionaron un primer panorama sobre las propiedades fisicoquímicas del agua y su impacto en el entorno ambiental.

4.4.2.2. Investigación Descriptiva

La observación cualitativa se centra en características no numéricas de los sujetos investigados, tiene por objeto indicar los atributos, características y perfiles de personas, grupos o comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno analizado (Guevara *et al.*, 2020). Esta Investigación busca detallar y caracterizar fenómenos específicos y no busca establecer relaciones de causa-efecto, sino que busca describir de manera precisa las características o atributos de un objeto de estudio, que en este caso son los cuerpos de agua de la provincia de Morona Santiago.

Sus principales características son:

- Detallada y sistemática, describe los atributos de un fenómeno, grupo, comunidad o situación, en este caso las propiedades fisicoquímicas del agua.
- Permite resumir y organizar información para que se pueda presentar de manera comprensible, permitiendo generar un perfil completo del objeto de estudio.
- Es útil para estudiar fenómenos a lo largo del tiempo, permitiendo observar tendencias y patrones.

El análisis descriptivo de esta investigación se enfocó en detallar los parámetros del agua (como pH, oxígeno disuelto, sólidos totales, entre otros) y su comportamiento a lo largo del tiempo y espacio en la red hidrológica de Morona Santiago, permitiendo una caracterización detallada de la calidad del agua en la región.

4.4.2.3. Investigación Correlacional

Este tipo de investigación tuvo como objetivo identificar y analizar la relación entre dos o más variables. A diferencia de la investigación descriptiva, la correlacional no solo se limita a describir los fenómenos, sino que busca determinar cómo están relacionadas entre sí (Guevara *et al.*, 2020).

Algunas de sus características son:

- Busca relaciones entre variables que pueden ser positivas, negativas o nulas.
- No establece causalidad, es decir, no afirma que una variable causa a otra, sino que explora si existe algún tipo de relación o vínculo entre ellas.
- Se utilizan herramientas estadísticas, como el análisis de correlación y regresión, para cuantificar el grado de relación entre las variables.

En esta investigación se utilizó la correlación para determinar cómo las diferentes variables fisicoquímicas (como el oxígeno disuelto, el pH, los sólidos totales, etc.) influyen en la calidad del agua y a través de esta relación se calibra el Índice de Calidad del Agua (ICA), optimizando su precisión al reflejar de forma más fiel las condiciones locales del agua en Morona Santiago.

Definición y operacionalización de variables.

4.4.2. Definición de variables

VI: Parámetros fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos son propiedades fisicoquímicas del agua que determinan su calidad, entre ellas tenemos: pH, oxígeno disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), una forma de nitrógeno, fosfatos y sólidos totales (ST).

VD: Calidad del Agua.

- Calidad del agua de la red hidrográfica de Morona Santiago.
- Estado de la red hidrográfica de Morona Santiago.

- Clasificación del agua.

4.4.3. Operacionalización de Variables

Tabla 6

Operacionalización de variables

Variable	Tipo	Dimensión	Indicador	Escala de Medición	Instrumento de Medición
Temperatura	Independiente	Parámetro fisicoquímico	Grados Celsius (°C)	Intervalos	Termómetro digital o de mercurio
Oxígeno disuelto (OD)	Independiente	Parámetro fisicoquímico	Concentración de OD (mg/L)	Intervalos	Oxímetro portátil
pH	Independiente	Parámetro fisicoquímico	Nivel de acidez o alcalinidad	Intervalos	Potenciómetro (pH-metro)
Turbidez	Independiente	Parámetro fisicoquímico	Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT)	Intervalos	Turbidímetro
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	Independiente	Parámetro fisicoquímico	Concentración de DBO5 (mg/L)	Intervalos	Método de incubación de 5 días
Coliformes fecales	Independiente	Parámetro fisicoquímico	Número de organismos por 100 mL de muestra	Ordinal	Técnica de filtración por membrana
Fosfatos (PO ₄ ³⁻)	Independiente	Parámetro fisicoquímico	Concentración de fosfatos (mg/L)	Intervalos	Espectrofotometría UV-Vis
Sólidos totales	Independiente	Parámetro fisicoquímico	Concentración de sólidos totales (mg/L)	Intervalos	Método de gravimetría
Nitratos (NO ₃ ⁻)	Independiente	Parámetro fisicoquímico	Concentración de nitratos (mg/L)	Intervalos	Espectrofotometría UV-Vis
Calidad del agua	Dependiente	Grado de contaminación	Cumplimiento de estándares de calidad	Ordinal	Índice de Calidad del Agua (ICA)

Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024).

4.5. Procedimientos

Para cumplir con los objetivos propuestos en la investigación, se debe ejecutar varias actividades conocidas como procedimiento, el mismo que debe ser riguroso y sistemático, siguiendo una serie de pasos ordenados que aseguren la recopilación, análisis y comparación efectiva de los datos sobre la calidad del agua.

A continuación, se describe las fases del procedimiento utilizado para el desarrollo del estudio.

4.5.2. Primera Fase: Caracterización de la calidad del agua de la red hidrológica de la Provincia de Morona Santiago, mediante el estudio de sus propiedades fisicoquímicas.

Para la caracterización de la calidad del agua, se realizó varias actividades las mismas que se describen a continuación:

Identificación del sitio de muestreo: Se identificó y se seleccionó estratégicamente los puntos de muestreo en los ríos y cuerpos de agua que componen la red hidrológica de la provincia, el objetivo de asegurar una adecuada representatividad de los diversos entornos geográficos y sociales, tales como zonas urbanas, rurales, áreas protegidas (Barreto y Espinoza, 2010).

Recolección de muestras: la recolección de datos se realizó mediante la toma de muestras de agua en diferentes estaciones de monitoreo, siguiendo los protocolos estandarizados de muestreo (Barreto y Espinoza, 2010). Este proceso nos permitió asegurar que se realice la toma de muestras en diferentes momentos del año, como en épocas secas y lluviosas para tener una visión integral.

Parámetros fisicoquímicos: Evaluar los parámetros fisicoquímicos del agua como:

- pH
- Oxígeno disuelto
- Sólidos disueltos totales (SDT)

- Turbidez
- Fosfatos y nitratos
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
- Coliformes fecales
- Temperatura

Equipos y herramientas: Utilizar medidores multiparamétricos en el campo para obtener datos inmediatos (pH, oxígeno disuelto, temperatura), mientras que los parámetros más complejos se analizan en laboratorio (turbidez, DBO, coliformes fecales, fosfatos, etc.) (Cevallos y Molina, 2020).

Base de datos: Se organiza una base de datos centralizada con la información recopilada, que permita una fácil comparación de los valores de las distintas estaciones y su evolución a lo largo del tiempo (Moretto *et al.*, 2012)

4.5.3. Segunda Fase: Descripción de las variaciones espaciales y temporales de los parámetros fisicoquímicos del agua de la red hidrológica de la Provincia de Morona Santiago.

Una vez que se contó con todos los datos recolectados del campo y del laboratorio, se utilizó en el software estadístico RStudio para obtener los parámetros que permitan calibrar el índice de calidad del agua (Contento, 2019).

4.5.3.1. Análisis de Componentes Principales (PCA):

El análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) es una técnica estadística la cual se usa para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos, conservando la mayor cantidad de información posible (Amat, 2017). A continuación, se describen aspectos clave y consideraciones importantes para la aplicación del análisis de componentes principales.

El PCA trata de encontrar un conjunto de variables no correlacionadas llamadas componentes principales que expliquen la mayor parte de la variabilidad presente en los datos originales, antes de realizar este paso, es importante estandarizar los datos

y luego calcular la matriz de covarianza o de correlación, dependiendo de si las variables están en diferentes escalas o no (Amat, 2017).

Una decisión importante en PCA es determinar cuántos componentes principales retener. Esto se puede hacer utilizando criterios como el porcentaje de varianza explicada o el análisis de valores propios; cada componente principal es una combinación lineal de las variables originales. Interpretar estos componentes puede ayudar a entender qué características de los datos explican la mayor variabilidad (Amat, 2017).

El PCA posee una amplia gama de campos, como análisis de datos, reconocimiento de patrones, compresión de imágenes, entre otros. Cuando existen entornos donde los datos pueden contener valores atípicos o estar sujetos a perturbaciones, es importante considerar métodos robustos para mitigar el impacto de estos valores anómalos en los resultados. Además, es crucial validar los resultados y considerar la interpretación de los componentes en el contexto del problema específico que se está abordando (Faster, 2024). Es importante que este análisis asuma una linealidad y normalidad en los datos, por tal razón debe considerar estas limitaciones al aplicar la técnica.

Además, el PCA se basa en una serie de fórmulas matemáticas para calcular los componentes principales y realizar la reducción de dimensionalidad de los datos (Amat, 2017). A continuación, se presentan las fórmulas clave utilizadas en el PCA:

4.5.3.2. Cálculo de los componentes principales:

Los componentes principales se obtienen como combinaciones lineales de las variables originales (Amat, 2017). Dado un conjunto de datos X con n observaciones y p variables:

$$Y = X \cdot V \tag{1}$$

Donde:

X : matriz de componentes principales.

Y : matriz de datos centrada (cada variable centrada en su media).

V : matriz de vectores propios (autovectores) de la matriz de covarianza o correlación de X (Amat, 2017).

4.5.3.3. Varianza explicada por cada componente principal:

La varianza explicada por cada componente principal se calcula como los autovalores asociados a los auto vectores en la matriz (Amat, 2017). La varianza explicada por el i -ésimo componente es:

$$\text{Varianza Explicada}_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \quad (2)$$

Donde λ_i = es el autovalor asociado al i -ésimo componente principal (Amat, 2017).

4.5.3.4. Selección del número de componentes principales:

Una regla común es seleccionar los primeros k componentes principales que expliquen una cantidad significativa de la varianza total, por ejemplo, basándose en un umbral predefinido o en el análisis de valores propios (Amat, 2017).

Estas fórmulas son fundamentales para comprender como se calculan los componentes principales y como se determina la importancia de cada componente en la representación de la variabilidad de los datos originales en el análisis de componentes principales (Amat, 2017).

4.5.3.5. Análisis de Clústers K-means:

El análisis de Clústers, también conocido como análisis de agrupamiento o clustering en inglés, es una técnica de aprendizaje no supervisado en la que se agrupan un conjunto de objetos en subconjuntos homogéneos llamados "Clústers" o "grupos". El objetivo principal del análisis de Clústers es dividir un conjunto de datos en grupos significativos basados en la similitud entre los objetos, de manera que los objetos dentro de un mismo grupo sean más similares entre sí que con los objetos de otros grupos (Clustering, 2021).

Algunas características clave para utilizar el análisis Clústers es que al ser una técnica de aprendizaje no supervisado no se requiere la existencia de etiquetas o categorías predefinidas para los datos. El algoritmo de clustering identifica automáticamente los grupos basándose en la semejanza y la similitud entre los objetos y se determina generalmente utilizando medidas como la distancia euclidiana, la distancia de Manhattan, la correlación, entre otros, y los objetos que presentan mayores similitudes entre sí se colocan en el mismo Clúster. Existen varios algoritmos de Clustering, como K-Means, Clustering jerárquico, DBSCAN, Mean-Shift, etc., cada uno con sus propias ventajas y aplicaciones (Clustering, 2021)

A continuación, se presentan algunos conceptos matemáticos fundamentales utilizados en el análisis de Clústers, centrándome en el enfoque del algoritmo K-Means, uno de los métodos de clustering más comunes:

4.5.3.6. Distancia entre puntos:

En el análisis de Clustering, la medida de distancia entre puntos es fundamental y entre las distancias más comunes utilizadas son la distancia euclidiana y la distancia de Manhattan. Estas distancias son esenciales para calcular la similitud entre puntos y asignar puntos a Clústers basados en su proximidad (Font, 2019).

La distancia euclidiana entre dos puntos $A(x_1, y_1)$ y $A(x_2, y_2)$ en un espacio bidimensional se calcula como:

$$\text{Distancia} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3)$$

- **Centroides y asignación de puntos:**

En el algoritmo K-Means, el objetivo es minimizar la suma de las distancias al cuadrado de cada punto a su centroide más cercano. La asignación de puntos a Clústers se basa en la distancia entre cada punto y los centroides de los Clústers (Font, 2019).

- **Función de costo (Función de inercia):**

El objetivo del algoritmo es minimizar esta función de costo al mover los centroides de manera iterativa; La función de costo en K-Means representa la suma de las distancias al cuadrado de cada punto a su centroide más cercano (Faster, 2024). Se define como:

$$J = \sum_{i=1}^n \min_{\mu_j} \|x_i - \mu_j\|^2 \quad (4)$$

Donde:

n : Es el número de puntos en el conjunto de datos

x_i : Es el i -ésimo punto

μ_j : Es el centroide del Clústers al que se asigna el punto x_i

$\|x_i - \mu_j\|^2$: Representa la distancia al cuadrado entre el punto x_i y el centroide μ_j

- **Actualización de centroides:**

En cada iteración del algoritmo K-Means, se recalculan los centroides de los clusters y se actualizan en cada interacción (Font, 2019). La fórmula para actualizar un centroide μ_j se calcula como el promedio de las coordenadas de los puntos asignados al Clúster j :

$$\mu_j = \frac{1}{S_j} \sum_{x_i \in S_j} x_i \quad (5)$$

Donde:

S_j : es el conjunto de puntos asignados al Clúster j

$|S_j|$: es el número de puntos en el Clúster j

- **Convergencia:**

El algoritmo K-Means converge cuando los centroides ya no cambian significativamente entre iteraciones o cuando se alcanza un número máximo de iteraciones predefinido (Font, 2019).

- **Validación de Clústers:**

Se utilizan medidas como el coeficiente de silueta, el índice Davies-Bouldin, la pureza, entre otros, para evaluar la calidad de los Clústers generados por el algoritmo de Clustering (Rodríguez, 2023).

Estas fórmulas son cruciales para comprender cómo funciona el algoritmo K-Means en el análisis de clustering, desde el cálculo de distancias hasta la actualización de centroides para interactivamente asignar puntos a Clústers y minimizar la función de costo. Otros algoritmos de clustering pueden utilizar fórmulas diferentes dependiendo de su enfoque y objetivo específico (Clustering, 2021).

El uso de esta técnica permitió agrupar los cuerpos de agua en diferentes categorías basadas en la similitud de sus características fisicoquímicas propias. Se identificaron grupos homogéneos en términos de calidad del agua, facilitando la clasificación de las distintas zonas de la red hidrológica (Rodríguez, 2023).

4.5.3.7. Kruskal-Wallis Test:

El test de Kruskal-Wallis es una prueba no paramétrica utilizada para determinar si hay diferencias significativas entre tres o más grupos independientes en una variable continua, cuando los datos no cumplen con los supuestos de normalidad y homocedasticidad requeridos por el análisis de varianza (ANOVA) y es una extensión del test de Mann-Whitney, que se utiliza para comparar dos grupos (DATA, 2024). Esta prueba estadística se utilizó para comparar las medianas de los diferentes grupos de muestreo y determinar si existían diferencias significativas entre ellos; a continuación, se presenta el procedimiento que presenta el test de Kruskal-Wallis:

- **Hipótesis nula y alternativa:**

En este apartado se plantean dos supuestos donde se busca por lo general que se compruebe (H_1), que es la hipótesis del investigador (DATA, 2024).

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencias significativas entre los grupos

Hipótesis alternativa (H_1): Existen diferencias significativas entre al menos dos grupos (DATA, 2024).

- **Rango de los datos:**

Se combinan todos los datos de los grupos y se ordenan de menor a mayor. Se asignan rangos a los datos, sin tener en cuenta la pertenencia a un grupo en particular.

- **Cálculo de la suma de rangos:**

Se calcula la suma de los rangos para cada grupo.

- **Cálculo del estadístico de prueba (H):**

El estadístico de prueba H se calcula con la siguiente fórmula:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \left(\frac{T_j^2}{n_j} - 3(N+1) \right) \quad (6)$$

Donde:

N : número total de observaciones en todos los grupos

T_j : suma de los rangos para el grupo j

n_j : tamaño del grupo j

- **Distribución del estadístico de prueba:**

Bajo la hipótesis nula, el estadístico de prueba sigue una distribución chi-cuadrado con $(k - 1)$ grados de libertad, donde k es el número de grupos (DATA, 2024).

Si el valor p asociado con el estadístico de prueba es menor que un nivel de significancia predefinido, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay diferencias significativas entre al menos dos grupos (Faster, 2024). El test de Kruskal-Wallis es útil cuando se trabaja con datos no paramétricos y se desea comparar múltiples grupos. Al no hacer suposiciones sobre la distribución de los datos, es una herramienta robusta para analizar diferencias entre grupos en situaciones donde no se cumplen los supuestos de los métodos paramétricos tradicionales; a continuación,

se detallan algunas situaciones comunes en las que se aplica la prueba de Kruskal-Wallis:

- Cuando los datos no siguen una distribución normal
- Cuando se tienen tres o más grupos independientes
- Cuando la variable a analizar es ordinal o intervalo
- Cuando se quiere detectar diferencias entre al menos dos grupos
- Cuando no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas
- Cuando se requiere una prueba no paramétrica (Faster, 2024).

4.5.4. Tercera Fase: Análisis de los niveles de cumplimiento de los parámetros de calidad del agua de la red hidrológica de la Provincia de Morona Santiago en relación con los estándares nacionales e internacionales considerando datos de los últimos cinco años (2018-2023).

Comparación de datos: Una vez recolectados y analizados los datos fisicoquímicos de las muestras, se compara cada parámetro con los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales. El uso de software estadístico RStudio facilitó la comparación entre los datos medidos y los estándares de calidad.

Determinación de incumplimientos: Identificar los puntos de muestreo donde se presenten desviaciones significativas de los estándares. Esto implica realizar análisis de tendencias en los puntos donde los parámetros fisicoquímicos exceden los límites permitidos, tanto en el espacio (zonas específicas) como en el tiempo (momentos críticos).

Análisis de causas: Realizar un análisis correlacional para evaluar si los incumplimientos están asociados con ciertas actividades humanas, como la agricultura, la industria o el vertido de aguas residuales, para poder proponer medidas de mitigación basadas en evidencia científica.

4.5.5. Cuarta Fase: La calibración del Índice de Calidad del Agua (ICA)

La calibración del Índice de Calidad del Agua (ICA) es un proceso establecido que pretende ajustar y optimizar la forma en que se evalúa la calidad del agua, asegurando que el índice sea representativo de las condiciones reales de un ecosistema acuático específico; Esto implica la selección, ponderación y validación de los 9 parámetros establecidos para el cálculo del ICA, permitiendo una mayor precisión al momento de determinar la calidad del agua en una región.

- **Calibración del índice de calidad del agua:**

Para la calibración de índice de calidad del agua se ha realizado un procedimiento detallado por pasos de cada una de las actividades desarrolladas, para cumplir con el objetivo general de la investigación.

Paso 1: En primer lugar, se debe realizar la selección de los parámetros a medir, para nuestro estudio se incluyen nueve parámetros clave:

- Oxígeno disuelto (OD)
- Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)
- Sólidos Suspendidos Totales (SST)
- pH
- Temperatura
- Nitratos
- Fósforos
- Turbidez
- Coliformes fecales

Cada uno de estos parámetros se mide en unidades específicas y luego se convierte a una escala estándar de calidad.

Paso 2: Convertir los parámetros en valores de calidad

Cada parámetro se convierte en un valor estándar de calidad utilizando funciones de transformación conocidas como curvas de calidad. Estas curvas son tablas o

ecuaciones que asignan un valor de calidad a cada medida del parámetro, de acuerdo con su influencia en la salud del ecosistema. La fórmula para esta conversión es:

$$q_i = f(x_i) \quad (7)$$

Donde:

q_i : Valor de calidad del parámetro i en una escala de 0 a 100.

$f(x_i)$: Función que convierte la medición x_i (concentración o valor) del parámetro i en un valor de calidad estándar (Gutiérrez y Román, 2018).

Paso 3: Asignación de ponderaciones (W_i)

Los parámetros no contribuyen igualmente al ICA, por lo que se asignan ponderaciones W_i a cada parámetro según su relevancia en la evaluación de la calidad del agua. Estas ponderaciones pueden variar según el contexto local y se determinan mediante análisis expertos o estudios previos. La suma de todas las ponderaciones debe ser 1:

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (8)$$

Donde:

W_i : Ponderación o peso asignado al parámetro i , que refleja su importancia relativa en la calidad del agua.

n : número total de parámetros utilizados en el índice (Gutiérrez y Román, 2018).

Paso 4: Cálculo del ICA

Para evaluar el Índice de Calidad del Agua (ICA), se utilizó el método propuesto originalmente por la National Sanitation Foundation de los Estados Unidos (NSF), el cual utiliza nueve parámetros fisicoquímicos y microbiológicos como: (Coliformes Totales (CT), Potencial de Hidrógeno (pH), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Turbidez (TU), Fosfato (PO₄³⁻), Sólidos Totales Disueltos (SDT), Oxígeno Disuelto (OD), Nitrato (NO₃⁻) y Temperatura (T), a los cuales se les asigna un factor de ponderación según su importancia relativa en la calidad del agua (Robledo, 2022).

Estos parámetros se normalizan a una misma escala mediante diagramas y luego se combinan aritméticamente asignando pesos específicos a cada uno como muestra la tabla 7.

Tabla 7

Parámetros y pesos relativos del ICA desarrollado de Brown et al., 1970

Parámetro	Peso Relativo (ICA Brown et al. 1970)	Unidad
Coliformes fecales (CF)	0,16	(NMP 100 ML-1)
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	0,11	(mg L ⁻¹)
Fosfato (PO ₄ ³⁻)	0,1	(mg L ⁻¹)
Nitrato (NO ₃ ⁻)	0,1	(mg L ⁻¹)
Oxígeno disuelto (OD)	0,17	(mg L ⁻¹)
pH	0,11	-
Sólidos totales disueltos (OD)	0,07	(mg L ⁻¹)
Turbidez (TU)	0,08	NTU
Temperatura (T)	0,1	(°C)

Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

La interpretación del valor del ICA se efectúa dentro de las categorías de calidad del agua, que se clasifican como: muy mala, mala, regular, buena y excelente como indica la tabla 8.

Tabla 8

Categorías de calidad del agua para ICA (Acuerdo Ministerial 097-A).

Valor	Clasificación de la calidad del agua
0-25	Muy Buena
26-50	Mala
51-70	Regular
71-90	Buena
91-100	Excelente

Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

En la tabla 8 se muestran los límites (VMP - Valor Máximo Permitido) establecidos por el Acuerdo Ministerial 097-A mediante el Ministerio de Ambiente para la clasificación

de las aguas dulces en Ecuador (Quito, 2015), con excepción de la variable oxígeno disuelto, para la cual se considera el valor mínimo.

El Acuerdo Ministerial 097-A del Ministerio del Ambiente de Ecuador establece criterios uniformes para la clasificación de aguas dulces; el acuerdo es esencial para proteger el medio ambiente y la salud pública.

Tabla 9

Valores límites (VMP - Valor Máximo Permitido) establecidos por el Acuerdo Ministerial 097-A

Parámetros	Criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces			Tabla 9. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce		
	Simbología	Unidad	Criterio de Calidad	Simbología	Unidad	Límite máximo permisible
Coliformes fecales, NMP 100 mL ⁻¹				NMP	NMP/100 ml	2000
Demanda bioquímica de oxígeno, mg L ⁻¹				DBO ₅	mg/l	100
Fosfato total, mg L ⁻¹ P (ambientes lóticos)				P	mg/l	10
Nitrato, mg L ⁻¹ NO ₃ -N	NO ₃	mg/l	13			
Nitrógeno amoniacal, mg L ⁻¹ NH ₃ -N (pH≤7,5)	NH ₃ -N	mg/l		N	mg/l	30
Nitrógeno amoniacal, mg L ⁻¹ NH ₃ -N (7,5 < pH ≤ 8,0)	NH ₃ -N	mg/l	0.7 - 2.5			
Nitrógeno amoniacal, mg L ⁻¹ NH ₃ -N (8,0 pH ≤ 8,5)	NH ₃ -N	mg/l	10-mar			
Nitrógeno amoniacal, mg L ⁻¹ NH ₃ -N (pH>8,0)	NH ₃ -N	mg/l	1.5 - 4.0			
Oxígeno disuelto, mg L ⁻¹	OD	% de saturación	> 80			
Potencial de Hidrógeno	pH	unidades de pH	6,5 – 9			
Sólidos Totales Disueltos, mg L ⁻¹				SST	mg/l	130

Temperatura	Sustancias Activas al azul de metileno	mg/l	0,5		
Turbidez, uT				unidades nefelométricas de turbiedad	UNT 100
(1)	Aluminio: Si el pH es menor a 6,5 el criterio de calidad será 0,005 mg/l				
(2)	Aplicar la Tabla 2a como criterio de calidad para agua dulce				
(3)	Aplicar la Tabla 2a como criterio de calidad para agua dulce				
(4)	Si sobrepasa el criterio de calidad se debe analizar el diclorofenol cuyo criterio de calidad es 0,2 ug/l				
(5)	Podrán usarse aguas con turbiedades y coliformes fecales ocasionales superiores a los indicados en esta Tabla, siempre y cuando las características de las aguas tratadas sean entregadas de acuerdo con la Norma INEN correspondiente				

Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

La fórmula general para calcular el Índice de Calidad del Agua es la siguiente:

$$ICA = \sum_{i=1}^n W_i \cdot q_i \quad (9)$$

Donde:

ICA: índice de Calidad del Agua.

W_i: Ponderación o peso asignado al parámetro *i*, que refleja su importancia relativa en la calidad del agua.

q_i: valor de calidad del parámetro *i*, convertido a una escala estándar (usualmente de 0 a 100).

n: número total de parámetros utilizados en el índice (Cárdenas Adrián, 2020).

Una vez que se tienen los valores de calidad *q_i* y las ponderaciones *W_i* se puede calcular el índice sumando el producto de estos dos valores para todos los parámetros:

$$ICA = W_1 \cdot q_1 + W_2 \cdot q_2 + W_3 \cdot q_3 + \dots + W_n \cdot q_n \quad (10)$$

Paso 5: Calibración del ICA:

La calibración del ICA implica ajustar las ponderaciones W_i o las curvas de calidad $f(x_i)$ de acuerdo con los resultados obtenidos y a la comparación con los estándares locales o internacionales. Si los valores calculados no reflejan adecuadamente la calidad del agua, se ajustan los valores de W_i o se revisan las curvas de calidad para los 9 parámetros.

Este análisis componentes principales permitió determinar el índice de calidad del agua, de una forma ágil y precisa, una vez obtenido los pesos específicos de cada parámetro de estudio se procede a comparar con pesos estándares que se muestran de la tabla 10.

Tabla 10

Parámetros y peso específico que constituyen el ICA-NSF

Variables	Peso Original (ICA) Bronw et al.1970
Coliformes fecales	0,16
Demanda bioquímica de oxígeno	0,11
Fosfato	0,1
Nitrato	0,1
Oxígeno disuelto	0,17
pH	0,11
Sólidos totales disueltos	0,07
Turbidez	0,08
Temperatura	0,1

Fuente: (ICA Brown *et al.* 1970).

4.5.6. Instrumentos científicos de medición

La calibración de un Índice de Calidad del Agua es un proceso muy importante, para garantizar que los resultados obtenidos reflejen de manera precisa la condición real del agua; se utilizan una variedad de instrumentos y equipos para la medición de parámetros físicos, químicos y biológicos que son fundamentales para evaluar la calidad del agua. Los instrumentos utilizados en la investigación y calibración de un Índice de Calidad del Agua incluyen:

- **Medidores de pH:** Estos instrumentos se utilizan para medir el nivel de acidez o alcalinidad del agua, siendo un parámetro crítico en la evaluación de la calidad del agua (Valerga, 2021).

- **Medidores de oxígeno disuelto:** Tienen la función de medir la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, ya que es esencial para evaluar la capacidad del agua para sostener la vida acuática (Kalstein, 2021).
- **Medidores de conductividad:** Se usan para medir la conductividad eléctrica del agua midiendo la cantidad de sales disueltas presentes en ella.
- **Medidores de turbidez:** son instrumentos usados para indicar la turbidez y la cantidad de partículas suspendidas en el agua.
- **Analizadores de nutrientes:** Son instrumentos usados para medir la concentración de nutrientes como nitratos, fosfatos y otros compuestos en el agua.
- **Medidores de temperatura:** Para medir la temperatura del agua, ya que la temperatura puede influir en varios procesos químicos y biológicos en el agua.
- **Equipos de muestreo de agua:** Para recolectar muestras de agua de manera precisa y representativa para su posterior análisis en laboratorio (Villanueva et al., 2017).

4.6. Consideraciones Bioéticas

Las consideraciones bioéticas son:

- a) **Respeto por la Autonomía:** Asegura que las partes involucradas, especialmente las comunidades locales, sean informadas y tengan derecho a expresar sus opiniones y decisiones de manera libre, sin coerción. Es decir, se incluyó obtener el consentimiento informado de los participantes en cualquier muestreo o recolección de datos en la red hidrográfica de Morona Santiago.
- b) **Protección Ambiental:** Se realizó muestreos y análisis de manera que se minimice el impacto en las aguas locales, utilizando métodos no invasivos y asegurando de esta forma que las actividades de investigación no causen daño al recurso hídrico y al medio ambiente.
- c) **Responsabilidad Social:** La calibración del Índice de Calidad de agua permitió mejorar la calidad de vida de las comunidades locales, asegurando que la investigación tenga un beneficio tangible y positivo.

4.7. Base de Datos

Para la calibración del índice se utilizó una base de datos proporcionada por los estudiantes de Ingeniería Ambiental de la asignatura de calidad del agua, misma que posee 2092 muestras de agua recolectadas en puntos estratégicos durante el período comprendido entre 2018 y 2023 de los principales ríos de la región de Morona Santiago. Los procedimientos de recolección, medición y análisis de las muestras se llevaron a cabo conforme a las pautas establecidas en el Acuerdo Ministerial No. 097-A; cabe aclarar que la base de datos contempla los 9 parámetros de estudio, teniendo valoraciones cuantitativas para cada punto tomado, por otra parte, también describe la calidad del agua de forma cuantitativa para calificarla según la necesidad de uso.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3. Resultados

5.3.2. Análisis estadístico.

Para llevar a cabo un análisis estadístico que permita determinar un Índice de Calidad del Agua a partir de una base de datos, se tuvo que disponer de información detallada y estructurada sobre los parámetros de calidad del agua medidos en distintas muestras.

La tabla 11 muestra el análisis descriptivo de cada uno de los parámetros que se tomó en cuenta para esta investigación y posteriormente se realiza una descripción de su comportamiento en base a la información obtenida.

Tabla 11

Análisis Estadístico.

Variable	Min	Q1	Mediana	Mena	Q3	Max	SD
Temperatura	15.2	19.9	20.8	2.114639	21.9	29.5	1.992758
Ph	4.3	6.7	7.05	7.078147	7.4705	14.24144	0.710422
Oxigeno disueltos	0.33	6.8	7.55	765856	8.5	54	1.532609
Sólidos totales	5	62.93	79	8.468299	96.01	434.5464	44.15447
Nitratos	0.1	3.6	4.7	4.4348	5.7	11.73554	1.886258
Fosfatos	0.01	0.17	0.45	0.468305	0.73	2	0.331984
Turbiedad	0.1	0.95	1.74	2.565117	3.6	16.7	2.193384
DB05	1.01	9.8	11.65	10.93746	13.02188	20.60476	3.49501
Coliformes fecales	21	688	1000	1164.225	1600	3542	707.4782

Fuente: Elaboración propia en base a los parámetros y peso específico que constituyen el ICA-NSF (2017).

5.3.2.1. Interpretación de la Tabla de Resumen Estadístico

La temperatura del agua tiene una variación entre 15.2°C y 29.5°C, con una media de 21.15°C. Mientras que la mayor parte de temperaturas se encuentran entre 19.9°C y

21.9°C, indicando que los valores se concentran alrededor de esta media con una desviación estándar relativamente baja de 1.99°C, lo que sugiere una variabilidad moderada.

El pH del agua presenta valores entre 4.3 y 14.24 con una media de 7.08 y una mediana de 7.05. Entre 6.7 y 7.47 se concentran la mayor parte de valores, mostrando una dispersión moderada con una desviación estándar de 0.71, sugiriendo que la alcalinidad y la acidez son relativamente constantes con algunas excepciones.

Los niveles de oxígeno disuelto oscilan en un rango de 0.33 mg/L y 54 mg/L, con una media de 7.66 mg/L. La mayor parte de valores se concentran entre 6.8 mg/L y 8.5 mg/L, mostrando una variabilidad moderada con una desviación estándar de 1.53 mg/L. En base a estos resultados se dice que los niveles de oxígeno en el agua son adecuados para la vida acuática, aunque existen algunas mediciones extremas.

Los sólidos totales varían ampliamente entre 5 mg/L y 434.55 mg/L, con una media de 84.68 mg/L. Mientras que se observa una concentración de valores entre 62.93 mg/L y 96.01 mg/L, indicando una alta variabilidad con una desviación estándar de 44.15 mg/L. Esto conlleva a fluctuaciones importantes en la cantidad de material disuelto y suspendido en el agua.

La concentración de nitratos en el agua varía entre 0.1 mg/L y 11.74 mg/L, con una media de 4.43 mg/L. La mayoría de los valores están entre 3.6 mg/L y 5.7 mg/L, indicando una variabilidad moderada con una desviación estándar de 1.89 mg/L. Esto sugiere que los niveles de nitratos son generalmente aceptables, aunque algunas mediciones podrían ser motivo de preocupación.

Los niveles de fosfatos están entre 0.01 mg/L y 2 mg/L, con una media de 0.47 mg/L y una desviación estándar de 0.33 mg/L. En este parámetro la mayor parte de valores concentrados están entre 0.17 mg/L y 0.73 mg/L, sugiriendo que, aunque los niveles de fosfatos estén bajos pueden variar significativamente en momentos y lugares diferentes.

La turbiedad mide que tan clara es el agua y según los datos de la tabla varía entre 0.1 NTU y 16.7 NTU, con una media de 2.57 NTU. Una importante concentración se observa entre 0.95 NTU y 3.6 NTU, con una desviación estándar de 2.19, lo que nos indicando una alta variabilidad. Esto indica que la claridad del agua puede variar debido a factores como la erosión o la presencia de partículas suspendidas.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) está en un rango de 1.01 mg/L y 20.6 mg/L, con una media de 10.94 mg/L. Entre 9.8 mg/L y 13.02 mg/L, se concentran la mayor parte mostrándonos una variabilidad moderada con una desviación estándar de 3.50 mg/L. Sugiriendo que la materia orgánica en el agua puede consumir oxígeno que afecta la vida en el agua.

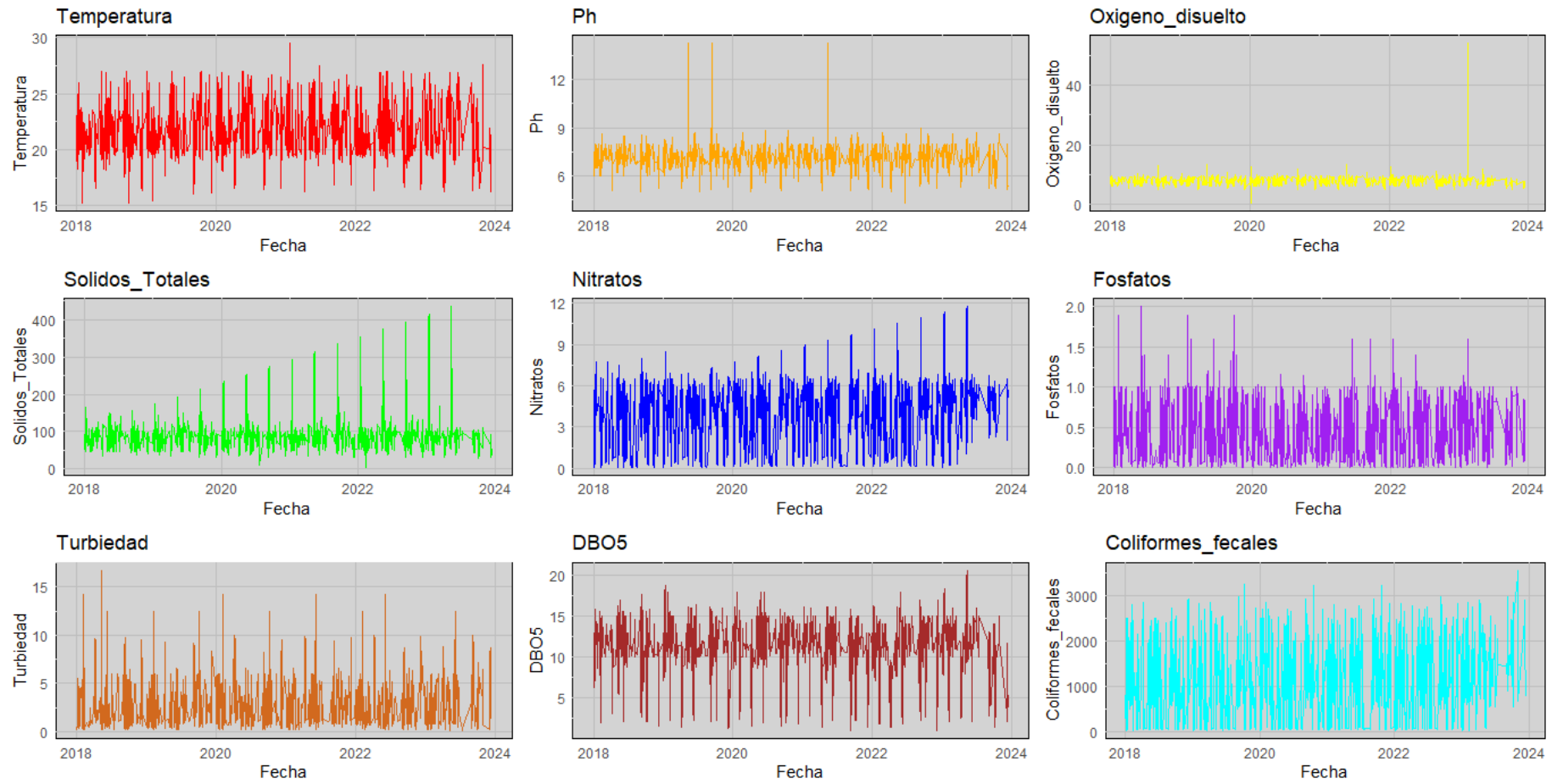
Finalmente, se tiene la concentración de coliformes fecales en un rango de 21 UFC/100 mL y 3542 UFC/100 mL, con una media de 1164.23 UFC/100 mL. concentrándose la mayor parte entre 688 UFC/100 mL y 1600 UFC/100 mL, indicando una alta variabilidad con una desviación estándar de 707.48 UFC/100 mL. Este resultado conlleva a fluctuaciones significativas en la contaminación fecal del agua, que podría tener implicaciones para la salud pública y la calidad del agua.

5.3.2.2. *Graficas de los Parámetros Estadísticos*

A continuación, en la figura 6 se muestra una gráfica para cada parámetro encontrado, con el objetivo de poder interpretarlos de mejor manera.

Figura 4

Gráficas Estadísticas.



Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

La temperatura del agua oscila entre 15.2 y 29.5 grados Celsius, la mayor parte de las observaciones se encuentra en el rango de 19 a 23 grados, con fluctuaciones notables a lo largo del tiempo. Se considera que esta variación se debe a los cambios estacionales y climáticos.

El pH se encuentra entre 4.3 a 14.24, mientras que entre 6 y 8 se encuentra la mayor parte de valores. Existen picos esporádicos que superan los 9, entendiéndose que pudo haber eventos de contaminación o cambios en las condiciones del agua.

Se observa que el oxígeno disuelto esta entre 0.33 y 54 mg/L, y su media aproximadamente de 7.65 mg/L. La mayor parte de observaciones se encuentra entre 6 y 9 mg/L, con cumbres que pueden señalar condiciones anómalas en el agua, como presencia de materia orgánica en descomposición.

Los sólidos totales tienen una amplia gama de valores de 5 a 434.55 mg/L. Se observa una tendencia al alza en los últimos años, posiblemente se deba a un aumento en la sedimentación o en la contaminación del agua. Estos sólidos pueden provenir de fuentes como la erosión del suelo o las descargas industriales.

La concentración de nitratos varía entre 0.1 y 11.74 mg/L. La mayoría de los valores se encuentran entre 3 y 6 mg/L, con algunos picos que podrían indicar eventos de contaminación agrícola o urbana. Los nitratos en altas concentraciones pueden ser perjudiciales para la salud humana y la vida acuática.

Los fosfatos tienen un rango de 0.01 a 2 mg/L, la mayoría de los valores están por debajo de 1 mg/L. pero hay algunos picos ocasionales. Un aumento desmesurado de fosfatos puede provocar eutrofización, afectando la calidad del agua y la biodiversidad.

La Turbiedad se observa entre 0.1 y 16.7 NTU, y por debajo de 5 NTU se concentra la mayor parte de estos valores. Sin embargo, existen picos frecuentes que muestran eventos de alta turbidez, posiblemente debido a lluvias intensas o a las actividades humanas como la construcción y la agricultura. Una elevada turbiedad elevada podría reducir la penetración de la luz en el agua, afectando la fotosíntesis de las plantas acuáticas.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) oscila entre 1.01 y 20.60 mg/L. La concentración mayoritaria está entre 9 y 15 mg/L, con fluctuaciones notables. Cuando se tiene valores muy elevados (carga orgánica elevada) de DBO5, podría disminuir el oxígeno disponible para otros organismos.

La concentración de coliformes fecales esta entre 21 y 3542 col/100 ml. Se observan fluctuaciones significativas a lo largo del tiempo, lo que podría indicar variaciones en la calidad sanitaria del agua. Por otra parte, cuando se tiene altas concentraciones de coliformes fecales pueden indicar contaminación por aguas residuales y representan un riesgo para la salud humana.

5.3.3. Resultados del Test Kruskal-Wallis

Con el análisis del Test Kruskal-Wallis se obtuvo los siguientes resultados:

Temperatura. - El valor p obtenido es 0.7006, lo que indica que no ha existido diferencias significativas en los últimos años con respecto a este parámetro, es decir se ha mantenido constante a lo largo del tiempo.

Ph. - Tiene un valor de p de 0.6645, no se encontraron diferencias en los últimos años, por tal razón el nivel de acidez o alcalinidad del agua no ha experimentado cambios importantes en los años analizados.

Oxígeno Disuelto. – El valor p de 0.2247 muestra que no existe diferencias significativas en las concentraciones de oxígeno disuelto entre los años. Este resultado sugiere que la capacidad del agua para mantener oxígeno ha sido estable durante el período de estudio

Sólidos Totales. - El valor p obtenido es 0.9285, lo que revela que no hay diferencias significativas en los sólidos totales presentes en el agua, por ende, la cantidad de material disuelto o suspendido en el agua ha sido constante durante estos años.

Nitratos. - Con un valor p de 0.0006375, los nitratos mostraron diferencias significativas en las concentraciones, por tal razón ha tenido variaciones notables en

los niveles de nitratos durante el periodo de estudio. Esto implicaría cambios en las fuentes de contaminación en las prácticas agrícolas y de manejo del agua.

Fosfatos. - El valor p de 0.0002406 indica diferencias significativas en las concentraciones de fosfatos, posiblemente por las actividades humanas o naturales que han hecho que se dé una variación significativa a lo largo del tiempo.

Turbiedad. - El valor p de 0.1454 indico que no ha existido diferencias significativas en la turbiedad del agua reflejando que la claridad del agua ha sido relativamente constante durante el período de estudio.

DBO5.- Con un valor p de 0.9141, refleja que no hubo diferencias significativas y que la cantidad de materia orgánica biodegradable en el agua ha sido estable durante estos años.

Coliformes Fecales. - El valor p de 1.252e-05 mostro discrepancias en las concentraciones de coliformes fecales. Los niveles de contaminación fecal fueron muy variados, lo cual podría estar relacionado con cambios en la gestión de aguas residuales o en las fuentes de contaminación.

5.3.3.1. Interpretación

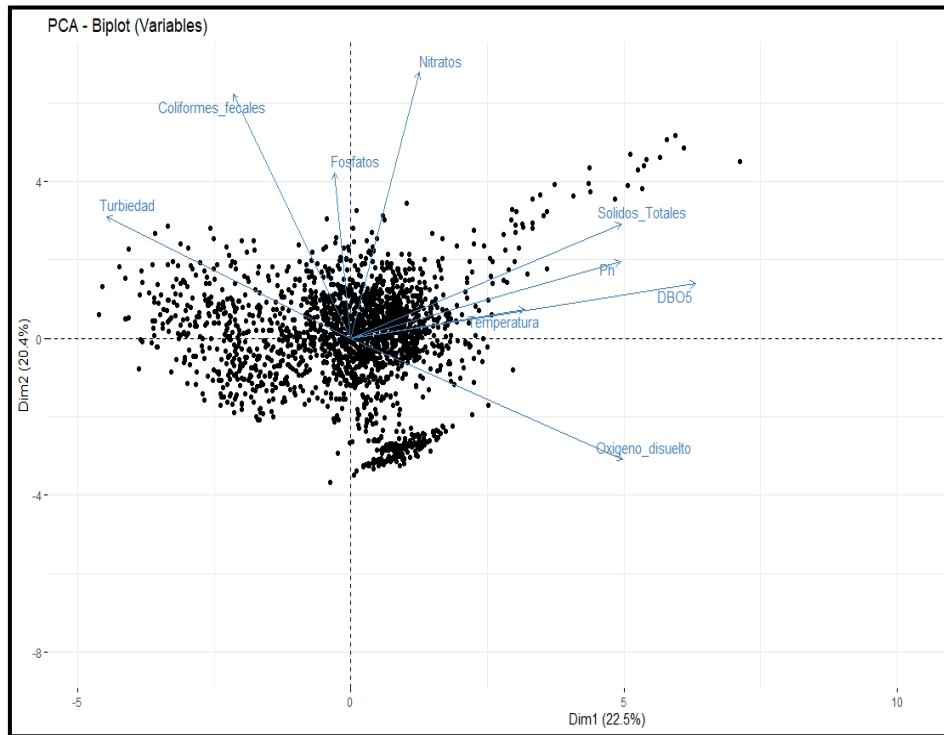
Los resultados de las pruebas de Kruskal-Wallis revelan que seis parámetros de calidad del agua (temperatura, pH, oxígeno disuelto, sólidos totales, turbiedad y DBO5) se han mantenido constantes a lo largo del tiempo, mientras que los niveles de nitratos, fosfatos y coliformes fecales han mostrado variaciones significativas en años.

5.3.4. Análisis de Componentes Principales PCA para evaluar el estado índice de calidad del agua de la red hidrográfica de Morona Santiago

En la siguiente figura se muestra la distribución de clústeres y posterior a ello se realiza la descripción de esta.

Figura 5

Análisis de Componentes Principales PCA



Elaborado por: Luis Tierra (2024).

5.3.4.1. Interpretación del Biplot de PCA

El gráfico Biplot del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostro las relaciones entre las variables y las observaciones en el espacio de los dos primeros componentes principales, Dim1 y Dim2. El Dim1 explica el 22.5% de la varianza total, mientras que Dim2 explica el 20.4%, es decir que juntos capturan una cantidad significativa de la variabilidad en los datos.

En el gráfico, las variables se representan mediante vectores, y las variables como los nitratos y los fosfatos tienen vectores largos y están fuertemente asociados con Dim1, indicando que las variaciones en estas variables son bien capturadas por este componente. Similarmente, coliformes fecales y sólidos totales también están bien representados en Dim1, aunque con una ligera influencia en Dim2. Por otro lado, las variables como la turbiedad y el oxígeno disuelto tienen vectores que se proyectan más en la dirección de Dim2, sugiriendo que este componente captura mejor sus variaciones.

Las relaciones entre las variables también se pudieron interpretar a partir del gráfico. Variables cuyos vectores apuntan en la misma dirección, como nitratos y fosfatos, están positivamente correlacionadas, lo que sugiere que aumentan o disminuyen juntas. Las variables cuyos vectores apuntan en direcciones opuestas, como turbiedad y oxígeno disuelto, están negativamente correlacionadas, indicando que a medida que una aumenta, la otra tiende a disminuir y variables cuyos vectores son aproximadamente perpendiculares no tienen una correlación significativa, como es el caso de temperatura y coliformes fecales.

Las observaciones individuales están dispersas alrededor del origen, con algunas situadas más lejos en la dirección de ciertos vectores. Estas observaciones tienen valores extremos para esas variables, por ejemplo, observaciones alejadas en la dirección del vector de los nitratos probablemente tienen valores altos de nitratos.

5.3.4.2. Auto valores del Análisis de Componentes Principales (PCA).

En la siguiente tabla se detalla los auto valores del análisis del PCA

Tabla 12

Auto valores del Análisis de Componentes Principales (PCA).

	Auto valor	% Varianza	Auto Valor acumulado	% Varianza acumulada
Comp1	1	20.205.079	22.450.087	2.245.009
Comp2	2	18.397.663	20.441.848	4.289.194
Comp3	3	10.273.954	11.415.504	5.430.744
Comp4	4	0.9097939	10.108.821	6.441.626
Comp5	5	0.8150581	9.056.201	7.347.246
Comp6	6	0.7679463	8.532.737	8.200.520
Comp7	7	0.6028932	6.698.813	8.870.401
Comp8	8	0.5743902	6.382.114	9.508.613
Comp9	9	0.4422487	4.913.874	10.000.000

Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

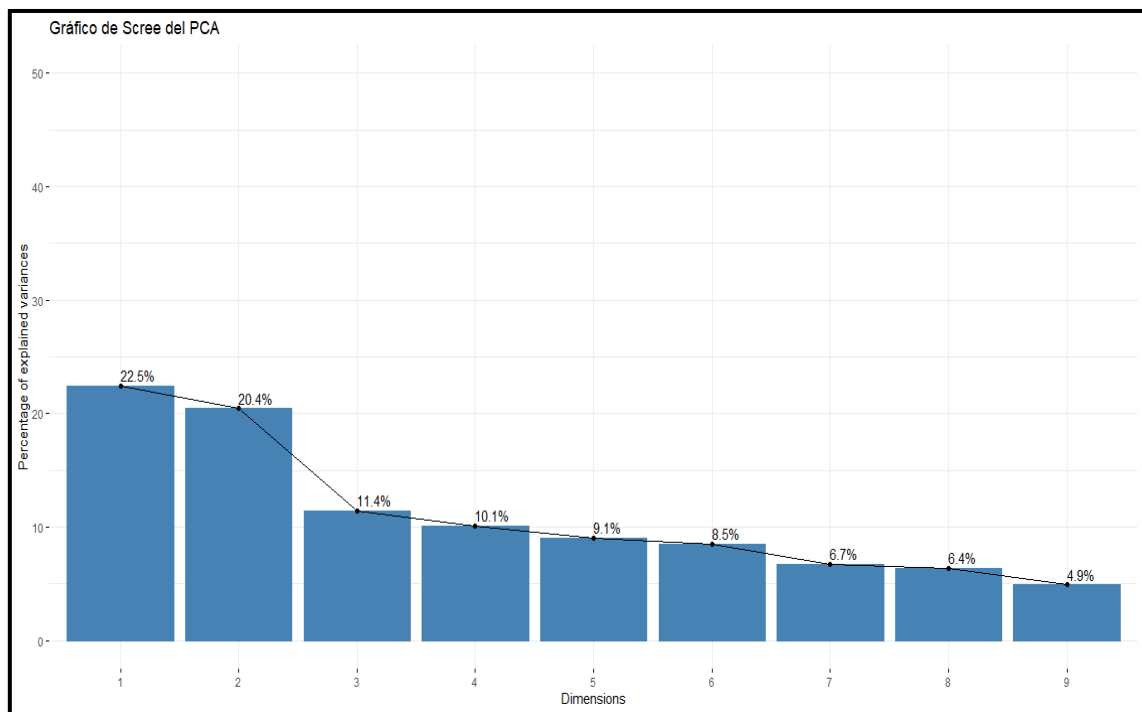
El análisis de PCA ha revelado las principales fuentes de variabilidad en los datos, destacando las variables más influyentes y las relaciones entre ellas. Esto es útil para identificar patrones y reducir la dimensionalidad de los datos para análisis posteriores.

5.3.4.3. Gráfico de Scree del PCA

En la siguiente figura se muestra la tendencia del PCA.

Figura 6

Scree del PCA



Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

El gráfico de Scree muestra la proporción de varianza explicada por cada componente principal en el análisis PCA. Los dos primeros componentes principales explican una parte significativa de la varianza total: el primer componente (Dim1) explica el 22.5% y el segundo componente (Dim2) explica el 20.4%, sugiriendo que juntos capturan la mayor parte de la variabilidad en los datos.

El gráfico también muestra un "codo" alrededor del tercer componente (Dim3), que explica el 11.4% de la varianza, y el cuarto componente (Dim4), que explica el 10.1%.

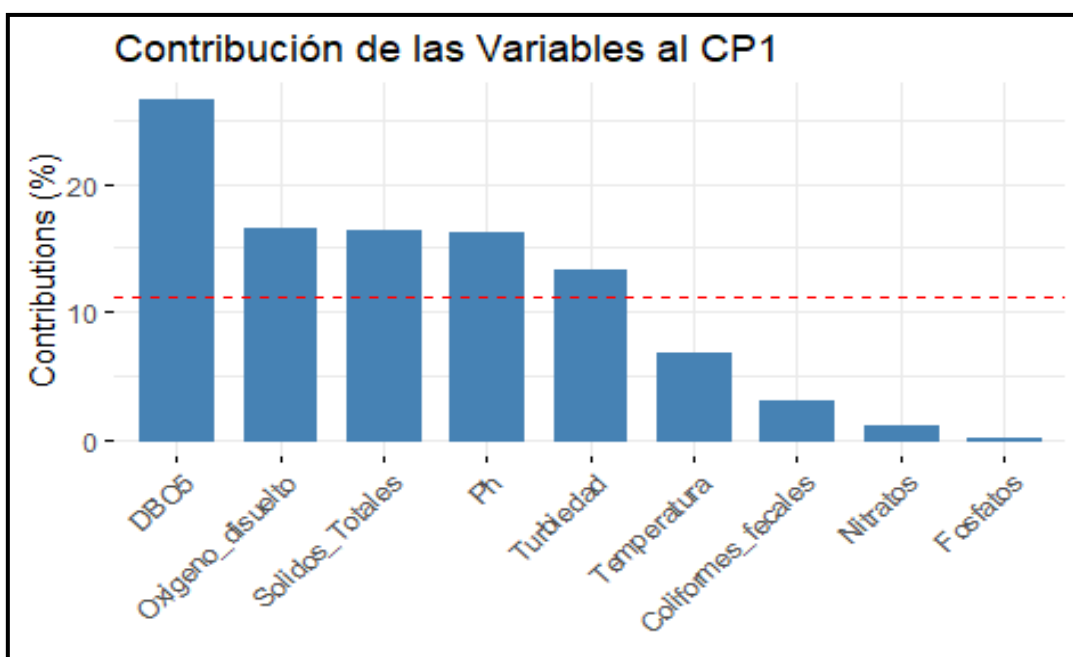
Después de este punto, la varianza explicada por cada componente adicional disminuye notablemente, indicando que los primeros cuatro componentes son los más relevantes.

Los componentes a partir del quinto explican menos del 10% de la varianza cada uno, sugiriendo que tienen una influencia menor en la variabilidad total de los datos. El gráfico de Scree muestra que retener los primeros tres o cuatro componentes principales sería adecuado para capturar la mayoría de la variabilidad en los datos sin perder información significativa.

5.3.4.4. Gráfica de contribución de las variables al componente 1

Figura 7

Gráfica de contribución de las variables al componente 1



Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

El gráfico de contribución de las variables al primer componente principal (CP1) muestra que la DBO5 tiene la mayor contribución, explicando más del 20% de la varianza en este componente. La demanda bioquímica de oxígeno es la variable más influyente en la primera dimensión del análisis de componentes principales (PCA).

Las variables Oxígeno Disuelto, Sólidos Totales, pH y Turbiedad también tienen contribuciones significativas, cada una alrededor del 15%, superando el umbral del 10% representado por la línea roja discontinua. Estas variables son importantes para el primer componente principal, ya que tienen una fuerte influencia en la variabilidad capturada por el CP1.

Por otro lado, Temperatura y Coliformes Fecales muestran contribuciones menores, pero aún notables, alrededor del 10%. Este valor muestra una influencia moderada en el CP1, aunque no son las más influyentes, juegan un papel relevante en la variabilidad de los datos.

Finalmente, Nitratos y Fosfatos tienen las menores contribuciones, significativamente por debajo del umbral del 10%. Esto indica que estas variables tienen una menor influencia en la variabilidad capturada por el primer componente principal del PCA.

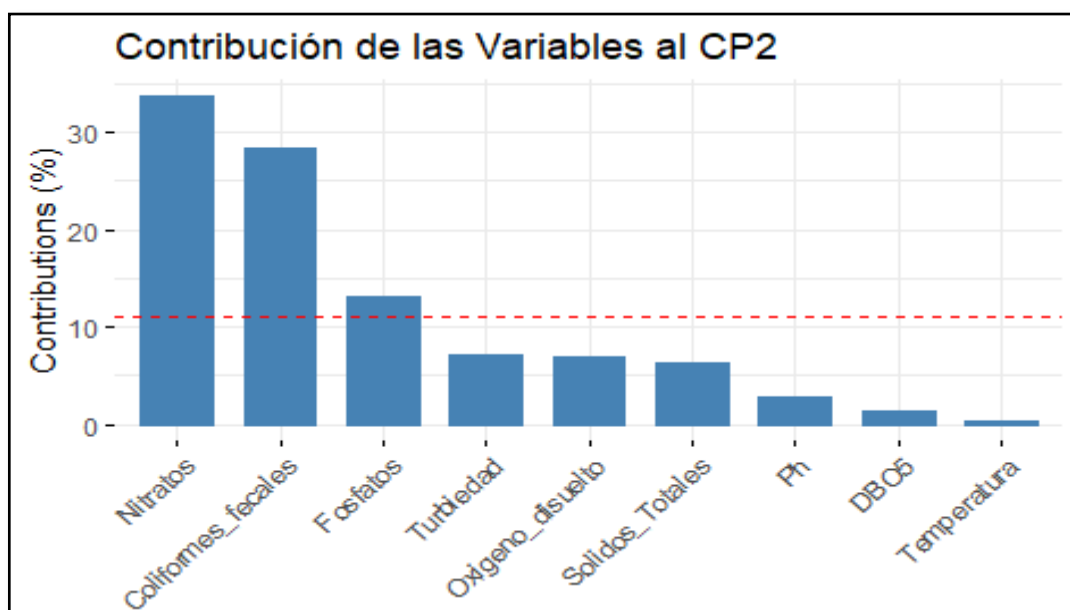
El DBO5, el Oxígeno Disuelto, los Sólidos Totales, el pH y la Turbiedad son las variables más influyentes en el primer componente principal del análisis PCA, mientras que la influencia de los Nitratos y los Fosfatos son bajas.

5.3.4.5. Gráfica de contribución de las variables al componente 2

En la figura 8 se muestra la distribución de la CP2

Figura 8

Gráfica de contribución de las variables al componente 2



Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

El gráfico de contribución de las variables al segundo componente principal (CP2) muestra que los Nitratos tienen la mayor contribución, explicando más del 30% de la varianza en este componente y por ende los nitratos son la variable más influyente en la segunda dimensión del análisis de componentes principales (PCA).

Coliformes Fecales posee una contribución del 25%, superando el umbral del 10% representado por la línea roja discontinua. Esta variable es importante para el CP2, ya que tiene una fuerte influencia en la variabilidad capturada por este componente.

Las variables Fosfatos y Turbiedad tienen contribuciones moderadas, alrededor del 15% y 10% respectivamente. Esto sugiere que también juegan un papel relevante en la variabilidad de los datos capturada por el CP2, aunque no tan influyente como los nitratos y los coliformes fecales.

Por otro lado, Oxígeno Disuelto, Sólidos Totales, pH, DBO5 y Temperatura muestran contribuciones menores, todas menores al 10%. Estas variables tienen una menor influencia en la variabilidad capturada por el segundo componente principal del PCA.

Por tal razón los Nitratos y los Coliformes Fecales son las variables más influyentes en el segundo componente principal del análisis PCA, mientras que las demás variables tienen una influencia mucho menor en este componente.

El análisis de componentes principales (PCA) se realizó por varias razones clave:

5.3.4.6. Reducción de la Dimensionalidad

En el conjunto de datos original, había muchas variables que podían estar correlacionadas entre sí. El PCA ayuda a reducir la cantidad de variables a un conjunto más manejable de componentes principales, capturando la mayor parte de la variabilidad en los datos con un menor número de componentes. Esto simplifica el análisis y facilita la visualización e interpretación de los datos.

5.3.4.7. Identificación de Variables Clave

El PCA ayuda a identificar cuáles variables originales contribuyen más a la variabilidad en los datos. Esto es útil para determinar qué factores son más importantes para monitorear y gestionar en estudios ambientales y de calidad del agua.

5.3.4.8. Eliminación de Redundancia

Las variables originales pueden tener redundancias debido a la alta correlación entre ellas. El PCA transforma las variables originales en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas (componentes principales), eliminando la redundancia y proporcionando una visión más clara de la estructura de los datos.

5.3.4.9. Visualización y Exploración de Datos

Mediante el uso de Biplot y gráficos de Scree, el PCA permite una visualización más clara de las relaciones entre las variables y las observaciones. Esto ayuda a identificar patrones, agrupaciones y tendencias en los datos que no serían fácilmente visibles en el espacio original de las variables.

5.3.4.10. Preparación para Análisis Posteriores

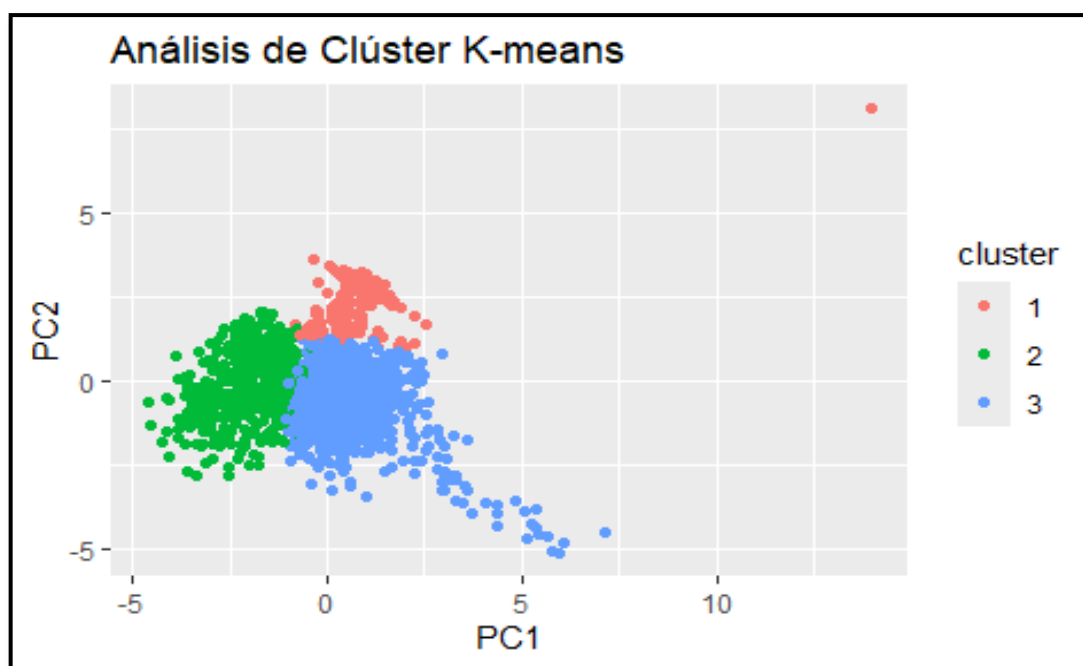
La reducción de dimensionalidad a través del PCA también puede ser un paso preparatorio para otros análisis estadísticos y de modelado, donde un menor número de variables puede mejorar la eficiencia y la precisión de los modelos.

El PCA se realizó con el fin de simplificar el conjunto de datos, identificar las variables más influyentes, eliminar redundancias, y proporcionar una base sólida para análisis posteriores y toma de decisiones en la gestión de la calidad del agua

5.3.5. Análisis de clústeres K-means

Figura 9

Análisis de Clúster



Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

El análisis de clústeres K-means aplicado a los datos medioambientales del agua ha permitido identificar tres grupos distintos de observaciones basadas en las características de las variables medidas. Estas variables incluyen Temperatura, pH, Oxígeno disuelto, Sólidos Totales, Nitratos, Fosfatos, Turbiedad, DBO5, y Coliformes

fecales. A continuación, se presenta una interpretación detallada de los resultados obtenidos.

El Clúster 1, representado en color rojo, agrupa observaciones que comparten características ambientales similares, distinguiéndose claramente de los otros grupos. Las variables que definen este clúster podrían incluir niveles específicos de contaminantes o parámetros físicos y químicos del agua que son significativamente diferentes de los otros clústeres. Este grupo podría representar un perfil específico de calidad del agua, posiblemente influenciado por fuentes de contaminación específicas o condiciones ambientales particulares. Es posible que las observaciones en este clúster correspondan a áreas con un alto impacto de actividades humanas o condiciones naturales adversas.

El Clúster 2, representado en color verde, agrupa observaciones que, aunque similares entre sí, presentan diferencias con respecto a los Clústeres 1 y 3. Este clúster podría estar caracterizado por variaciones en los niveles de pH, oxígeno disuelto, sólidos totales y otros parámetros medidos. El perfil ambiental de este grupo podría indicar áreas con un impacto moderado de contaminación o con características naturales diferentes que influyen en la calidad del agua. Además, podría representar áreas con una mezcla de influencias naturales y antropogénicas.

El Clúster 3, representado en color azul, incluye observaciones que también son similares entre sí, pero distintas de las de los Clústeres 1 y 2. Las características de este clúster podrían reflejar niveles específicos de nitratos, fosfatos, turbiedad y otros parámetros, lo que sugiere un perfil ambiental único. Este grupo podría representar áreas con menos impacto de ciertas fuentes de contaminación o con condiciones naturales más favorables para la calidad del agua.

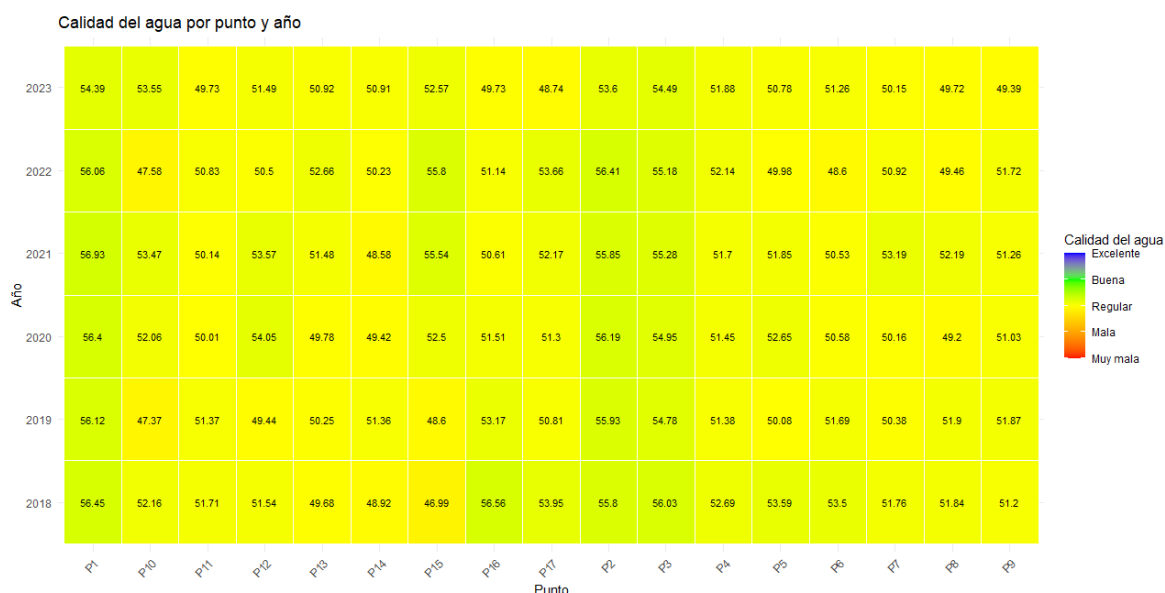
El análisis de clústeres K-means ha proporcionado una visión clara de cómo se agrupan las observaciones basadas en las características ambientales del agua, permitiendo identificar patrones y posibles áreas de interés para la gestión y monitoreo de la calidad del agua.

5.3.6. Calidad del agua de la red hidrográfica de Morona Santiago

En la tabla 15 muestra la calidad del agua de la red hidrográfica de Morona Santiago realizado en el programa de heatmap de diversos puntos (P1, P2, ..., P17) a lo largo de los años 2018 a 2023. La calidad del agua se mide en una escala del 0 al 100, donde los valores más altos indican una mejor calidad del agua. Los colores en el heatmap representan diferentes niveles de calidad.

Figura 10

Índice de Calidad del Agua para la Red Hidrológica de Morona Santiago



Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

El heatmap muestra la calidad del agua en diversos puntos (P1, P2, ..., P17) a lo largo de los años 2018 a 2023. La calidad del agua se mide en una escala del 0 al 100, donde los valores más altos indican una mejor calidad del agua. Los colores en el heatmap representan diferentes niveles de calidad como lo indica la tabla 13.

Tabla 13

Parámetros de colores en el heatmap para los diferentes niveles de calidad

Azul	Verde	Amarillo	Naranja	Rojo
Excelente calidad del agua	Buena calidad del agua	Calidad regular del agua	Mala calidad del agua	Muy mala calidad del agua

Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

Análisis por Año:

En el **año 2018**, la mayoría de los puntos de monitoreo muestran una calidad del agua clasificada como regular (amarillo), aunque la calidad del agua no era crítica en la mayoría de los lugares, tampoco alcanzaba niveles ideales. Se observa que los valores varían entre 46.99 y 56.56, indicando una consistencia en la calidad del agua en la mayoría de los puntos.

En el **Año 2019** los valores de calidad del agua permanecen en su mayoría en la categoría regular, con valores que oscilan entre 48.6 y 56.12. Sin embargo, hay una ligera tendencia a una calidad del agua ligeramente inferior en comparación con 2018.

En el **año 2020**, la calidad del agua muestra una tendencia similar a la de 2019, con la mayoría de los puntos aún en la categoría regular. Los valores oscilan entre 48.92 y 56.4, por ende, hubo mejoras significativas ni deterioros graves.

En el **año 2021**, los valores de calidad del agua continúan mostrando una predominancia la categoría regular, con valores que van desde 48.58 hasta 56.93. Este año muestra una pequeña mejora en algunos puntos en comparación con años anteriores.

En el **año 2022**, se observa una pequeña mejora en algunos puntos de monitoreo, con valores que oscilan entre 48.6 y 56.06. A pesar de que la mayoría de los puntos siguen clasificados como regular, hay un leve incremento en la calidad en algunos puntos.

En el **año 2023**, se observa una ligera disminución en la calidad del agua en comparación con los años anteriores. Los valores varían entre 49.39 y 54.74, indicando que, aunque la mayoría de los puntos permanecen en la categoría regular, la calidad del agua en algunos puntos ha disminuido.

Conclusiones Generales:

Calidad Predominante: La calidad del agua en la mayoría de los puntos de monitoreo ha sido consistentemente clasificada como regular a lo largo de los años. Por tal razón el agua no es ideal, pero tampoco está en condiciones críticas en la mayoría de los lugares.

Tendencias a Largo Plazo: No se observan mejoras significativas en la calidad del agua a lo largo de los años, y en 2023 se nota una ligera disminución en algunos puntos.

Variabilidad: La calidad del agua muestra una cierta variabilidad entre puntos y años, lo que sugiere que diferentes factores pueden estar afectando la calidad del agua en diferentes ubicaciones y tiempos.

5.3.7. Clasificación del agua por año

En la siguiente tabla se muestra la clasificación de la calidad del agua en la red hidrográfica de Morona Santiago durante los años 2018 a 2023. Se presentan los porcentajes correspondientes a las categorías "Bueno", "Malo" y "Regular" para cada año evaluado. Esta clasificación permite observar las variaciones anuales en la calidad del agua según los criterios establecidos.

Tabla 14*Clasificación del agua por año*

	AÑO	BUENO	MALO	REGULAR
1	2018	7.10	22.4	70.5
2	2019	8.45	25.1	66.5
3	2020	7.73	22.4	69.9
4	2021	8.29	20.4	69.9
5	2022	7.71	24.0	68.3
6	2023	2.33	26.4	71.3

Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

Análisis por Año:**Año 2018**

En el año 2018, el 70.5% de los puntos de monitoreo mostraron una calidad de agua clasificada como regular. Esto sugiere que, aunque la mayoría del agua no estaba en condiciones críticas, tampoco era ideal. Un 22.4% de los puntos de monitoreo se clasificaron como mala calidad del agua, por ende, una porción significativa requería atención. Solo el 7.10% de los puntos se clasificaron como buena calidad del agua, mostrando que las condiciones óptimas eran raras.

Año 2019

En 2019, se observó una ligera disminución en la proporción de calidad regular del agua, con un 66.5% de los puntos de monitoreo clasificados en esta categoría. La proporción de calidad mala aumentó a 25.1%, entendiéndose como un deterioro en algunos puntos. La proporción de puntos con buena calidad aumentó ligeramente a 8.45%, indicando una pequeña mejora en algunos lugares.

Año 2020

El año 2020 mostró una leve mejora en la calidad del agua, con el 69.9% de los puntos de monitoreo clasificados como regular. La proporción de calidad mala volvió a 22.4%,

similar a la de 2018. La proporción de puntos con buena calidad del agua fue del 7.73%, mostrando que las condiciones no variaron mucho en comparación con el año anterior.

Año 2021

En 2021, hubo una mejora notable, con el 71.3% de los puntos de monitoreo clasificados como calidad regular. La proporción de puntos con calidad mala disminuyó a 20.4%, y la proporción de buena calidad aumentó a 8.29%. La mejora en ciertos puntos sería una estrategia para mejorar su calidad.

Año 2022

En 2022, la proporción de calidad regular del agua se mantuvo alta en 68.3%, pero hubo un aumento en la proporción de calidad mala a 24.0%. La proporción de buena calidad fue del 7.71%, esto indica una ligera fluctuación en las condiciones del agua similar a los años anteriores.

Año 2023

En 2023, se observó una disminución significativa en la proporción de puntos con buena calidad del agua, bajando a solo 2.33%. La proporción de calidad mala aumentó a 26.4%, mientras que la calidad regular se mantuvo en 71.3%. Un deterioro general en la calidad del agua, con menos puntos alcanzando condiciones óptimas y más puntos mostrando condiciones desfavorables.

En base a este análisis se concluye en este análisis que la tendencia general a lo largo de los años de la calidad del agua se ha mantenido mayoritariamente en la categoría regular, con fluctuaciones menores en las proporciones de buena y mala calidad.

En el 2012 existió una mejora notable en 2021 con una disminución en la proporción de calidad mala y un aumento en la buena calidad.

Mientras que para el año 2023 se observó un deterioro general, con la proporción más baja de puntos con buena calidad del agua y un aumento en los puntos con mala

Con este análisis, la calidad del agua requiere atención continua para mejorar las condiciones en los puntos donde se clasifica como mala y para aumentar la proporción de puntos con buena calidad.

5.3.8. Calibración del Índice de la Calidad del Agua

Para asignar los pesos a cada parámetro utilizando los promedios encontrados, se puede aplicar una ponderación en función de la importancia relativa de cada parámetro en la calidad del agua. Esto se puede hacer de diversas maneras, pero una técnica común es asignar pesos proporcionalmente a la variabilidad o al impacto que cada parámetro tiene en la calidad del agua.

Criterios que se tomaron en cuenta para asignar los pesos basados en la importancia de cada parámetro:

- **Coliformes fecales:** Tiene un peso alto si el agua es para consumo humano, ya que su presencia es un indicador de contaminación bacteriana.
- **Oxígeno disuelto:** Fundamental para la vida acuática, también tiene un peso importante.
- **pH:** El pH es crítico ya que afecta muchos procesos biológicos y químicos.
- **Nitratos:** Indicador importante de contaminación agrícola.
- **Fosfatos:** Relacionados con la eutrofización y el crecimiento de algas.
- **Sólidos Totales:** Afecta la turbidez y puede impactar en la salud de los ecosistemas.
- **Turbiedad:** Indica la claridad del agua, aunque puede no ser tan crucial como otros parámetros.
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5):** Este parámetro mide la cantidad de oxígeno que se necesita para descomponer la materia orgánica en el agua. A mayor valor, peor es la calidad del agua.

- **Temperatura:** Valores extremos de temperatura pueden afectar negativamente a los ecosistemas acuáticos.

Se determino los pesos relativos de cada parámetro fisicoquímico basados en sus promedios inversos, normalizados para que la suma total sea igual a 1.

Tabla 15

Parámetros y pesos relativos del ICA.

Variables	Peso Original	Peso calibrado
	(ICA Brown et al. 1970)	(Tierra Patricio 2024)
Coliformes fecales	0,16	0,11
Demanda bioquímica de oxígeno	0,11	0,01
Fosfatos	0,1	0,53
Nitratos	0,1	0,07
Oxígeno disuelto	0,17	0,06
pH	0,11	0,10
Sólidos totales disueltos	0,07	0,01
Turbidez	0,08	0,09
Temperatura	0,1	0,02

Elaborado por: Luis Patricio Tierra Pérez (2024)

Se realiza la interpretación de los pesos calibrados de cada parámetro de calidad del agua con base a su relevancia en la salud del ecosistema acuático y la seguridad para el uso humano.

- **Fosfatos (Peso: 0.53)**

Los fosfatos tienen el peso más alto, lo que significa que su concentración es crítica para la calidad del agua. El nivel alto de fosfatos puede causar eutrofización, un proceso que desencadena un crecimiento excesivo de algas y, finalmente, reduce los niveles de oxígeno disuelto, afectando gravemente a la vida acuática.

- **Coliformes fecales (Peso: 0.11)**

Los coliformes fecales son un indicador de contaminación biológica, principalmente por desechos humanos o animales. Un peso alto refleja la importancia de este parámetro, especialmente si el agua está destinada a uso potable o recreativo. La presencia de coliformes fecales representa un riesgo directo para la salud pública y es un parámetro clave en la seguridad sanitaria del agua.

- **pH (Peso: 0.10):**

El pH tiene un peso significativo ya que un agua con valores extremos de pH puede ser corrosiva o perjudicial para los organismos acuáticos. El pH influye en la toxicidad de otras sustancias presentes en el agua, como metales pesados. Mantener un pH equilibrado es crucial tanto para la estabilidad de las condiciones acuáticas como para evitar daños estructurales en infraestructuras que interactúan con el agua (tuberías, tanques, etc.).

- **Nitratos (Peso: 0.07):**

Los nitratos son un indicador de contaminación agrícola y también pueden contribuir a la eutrofización. Aunque su peso es moderado, su impacto puede ser significativo a largo plazo en términos de calidad ambiental. Un exceso de nitratos, proveniente principalmente de fertilizantes, debe controlarse para prevenir problemas ecológicos, como el crecimiento de algas que consume oxígeno.

- **Oxígeno disuelto (Peso: 0.06):**

El oxígeno disuelto es esencial para la supervivencia de los organismos acuáticos. Un peso de 0.06 indica que, aunque es fundamental, otros parámetros tienen un impacto más inmediato en la calidad global del agua. Un nivel bajo de oxígeno disuelto puede ser un síntoma de contaminación orgánica y falta de oxigenación adecuada, especialmente en áreas con fosfatos o altos niveles de DBO5.

- **Sólidos Totales (Peso: 0.02):**

Los sólidos totales son un parámetro que afecta principalmente la turbidez del agua, lo que puede influir en la penetración de la luz y la fotosíntesis en cuerpos de agua. Un peso bajo indica que su influencia directa en la calidad global es limitada en comparación con otros contaminantes. Aunque no es prioritario en muchos contextos, es importante monitorear los sólidos totales, sobre todo si el agua es utilizada para procesos industriales o recreativos.

- **Turbiedad (Peso: 0.09):**

La turbiedad mide la cantidad de partículas suspendidas en el agua. Su peso bajo refleja que no tiene un impacto crítico, salvo en situaciones específicas donde el agua muy turbia puede reducir la calidad visual o afectar a organismos que dependen de la luz. Es relevante monitorear la turbiedad si el agua se utiliza para consumo humano o recreación, pero en términos de calidad global, es menos determinante.

En resumen, mediante el índice de calidad del agua, se observa que los fosfatos y los coliformes fecales son los parámetros más relevantes, lo que indica que la contaminación química y biológica son los factores clave que más impactan la calidad del agua en este contexto. El pH y los nitratos también son importantes, mientras que los sólidos totales y la turbiedad tienen menor peso debido a su impacto más indirecto en la calidad general del agua.

5.4. Discusión

5.4.2. Calidad del Agua en la Red Hidrográfica de Morona Santiago

El Índice de Calidad del Agua (ICA) es un método ampliamente utilizado para evaluar la aptitud del agua para diversos usos (Brown *et al.*, 1970; Pesce & Wunderlin, 2000). En esta investigación, la calibración del ICA mostró que la calidad del agua en la provincia de Morona Santiago varía ampliamente según la ubicación y el grado de intervención humana. Los valores obtenidos mostraron que la calidad del agua es de aceptable a buena, aunque existen áreas con niveles de contaminación moderada.

Estudios previos han demostrado que la calidad del agua en ecosistemas tropicales depende de factores ambientales y antropogénicos. Como, por ejemplo, Chapman (1996) afirma que la calidad del agua en ecosistemas fluviales está influenciada por la geología, el clima y las actividades humanas cercanas. Por tal razón los resultados obtenidos en Morona Santiago mostraron que la variabilidad en los parámetros de calidad del agua está fuertemente influenciada por la erosión, la actividad agrícola y las descargas de aguas residuales.

La calibración del Índice de Calidad del Agua en la red hidrográfica de Morona Santiago ha permitido identificar las principales fuentes de contaminación y evaluar la estabilidad de los cuerpos de agua a lo largo del tiempo. Si bien la calidad del agua es mayormente aceptable, existen zonas críticas que requieren una intervención urgente. La implementación de estrategias de conservación y manejo sostenible garantizará la protección de este recurso vital para las comunidades y el ecosistema en general.

El análisis de la calidad del agua revela una alta variabilidad en los parámetros fisicoquímicos, como la turbidez, el pH, los nitratos, los coliformes fecales y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), entre otros. Los resultados de este análisis indicaron que las actividades humanas, como la agricultura y la falta de tratamiento adecuado de las aguas residuales, están afectando significativamente la calidad del agua en esta región. Además, estudios como el de Campos *et al.* (2016) sobre la cuenca del río Amazonas en Brasil, muestran que las áreas rurales con escasa

infraestructura sanitaria presentan niveles elevados de contaminación por coliformes y DBO, lo que coincide con los hallazgos de la presente investigación.

Las observaciones indicaron que el año 2023 muestra una ligera disminución en la calidad del agua en comparación con los años anteriores, lo que podría estar relacionado con factores ambientales, cambios en las prácticas de manejo de agua, o eventos de contaminación específicos durante ese año. Esta ligera disminución en la calidad del agua resalta la necesidad de un monitoreo continuo y de la implementación de estrategias de gestión para abordar cualquier deterioro emergente.

2.1.1. Análisis estadístico y calibración del ICA

La calibración del ICA se basó en la evaluación de parámetros relevantes, cuyos resultados se discuten a continuación:

Temperatura

El análisis estadístico mostró que la temperatura del agua se ha mantenido relativamente constante a lo largo del tiempo, con un valor p de 0.7006, debido a este resultado no hay diferencias significativas entre los diferentes años. Los cuerpos de agua no han experimentado cambios térmicos drásticos, lo cual es un indicador positivo en términos de estabilidad ambiental.

pH

La mayoría de los valores de pH se encuentran dentro del rango aceptable (6.5 - 8.5). Sin embargo, en algunas zonas cercanas a actividades mineras o con alta carga orgánica, se han observado ligeras variaciones que podrían indicar procesos de acidificación o alcalinización.

Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno disuelto es un parámetro crítico para la vida acuática. En cuerpos de agua con alta carga orgánica, se detectaron niveles de OD más bajos, probablemente

debido a la descomposición de materia orgánica, lo que puede afectar el ecosistema acuático.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Se encontraron valores elevados de DBO y DQO en zonas con influencia de descargas domésticas y agrícolas, lo que indica la presencia de materia orgánica y contaminantes químicos que pueden deteriorar la calidad del agua.

Nitratos y Fosfatos

Las concentraciones de nitratos y fosfatos estuvieron dentro de los límites permisibles en la mayoría de los puntos de monitoreo, aunque en áreas con actividad agrícola intensiva se observan aumentos significativos debido al uso de fertilizantes.

Contaminación Microbiológica

Los análisis bacteriológicos revelan la presencia de coliformes totales en ciertos puntos de muestreo, lo cual sugiere una contaminación fecal, posiblemente debido a la falta de tratamiento adecuado de aguas residuales.

Mediante la calibración del Índice de Calidad del Agua (ICA), se ajustaron los pesos relativos de los parámetros evaluados para reflejar de manera más precisa las condiciones específicas de los cuerpos de agua en Morona Santiago. El análisis estadístico aplicado mediante técnicas avanzadas, como el Análisis de Componentes Principales (PCA), permitió reducir la dimensionalidad de los datos y ajustar el ICA para representar mejor los cambios en la calidad del agua.

Este tipo de ajustes no solo mejoraron la precisión del índice, sino que también contribuyeron a identificar los parámetros más críticos en la determinación de la calidad del agua. En investigaciones paralelas, como la de Zhang *et al.* (2020) en sistemas hídricos de China, también se encontró que la utilización de PCA mejora la interpretación de la calidad del agua al identificar las fuentes de contaminación más influyentes.

5.4.3. Cumplimiento de estándares y normativas

La comparación de los datos recolectados con las normativas nacionales e internacionales indicó varios puntos de incumplimiento, especialmente en lo relacionado con los coliformes fecales y la DBO. El Acuerdo Ministerial No. 097-A del Ministerio del Ambiente establece límites claros para estos parámetros, que fueron superados en muchos de los puntos de muestreo analizados. Los resultados fueron coherentes con estudios realizados en otras partes del mundo, como en la cuenca del río Ganges en India, donde se observan patrones similares de exceso en DBO y coliformes fecales debido a la falta de infraestructura para el tratamiento de aguas.

5.4.4. Comparación con otras investigaciones

Investigaciones en cuencas hidrográficas de países vecinos, como Perú y Colombia, muestran patrones similares donde las fuentes de agua cercanas a zonas urbanas y agrícolas suelen estar más afectadas por esta contaminación fecal. Esta situación es preocupante, ya que pone en riesgo la salud de las comunidades locales que dependen del agua para consumo y actividades agrícolas.

En comparación con estudios como el de Oliveira *et al.* (2019) sobre cuerpos de agua en zonas tropicales, los resultados de la presente investigación destacan una mayor vulnerabilidad de los cuerpos de agua en regiones amazónicas debido a la explotación de recursos y la falta de gestión ambiental adecuada. La implementación de estrategias de monitoreo continuo y la inclusión de tecnologías más avanzadas para la detección de contaminantes emergentes se consideran clave para mejorar la calidad del agua a largo plazo. Los resultados obtenidos coinciden con hallazgos de investigaciones en otras regiones de la Amazonía y subrayan la necesidad de fortalecer las políticas de gestión del agua y de las prácticas agrícolas sostenibles para preservar la calidad de los recursos hídricos.

CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante el análisis de los parámetros fisicoquímicos en la red hidrográfica de Morona Santiago revelan una calidad del agua regular a deficiente, especialmente en zonas cercanas a áreas agrícolas y urbanas. Los niveles elevados de coliformes fecales, la alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la presencia de nitratos y fosfatos superan los límites establecidos por las normativas ambientales, indicando una fuerte influencia de la actividad humana en la degradación de la calidad del agua.

La calibración del ICA fue fundamental para adaptar el índice a las condiciones específicas de los cuerpos de agua de la región. El ajuste de los pesos de cada parámetro permitió una evaluación más precisa de la calidad del agua, destacando la importancia de los coliformes fecales, la DBO y los fosfatos como los principales contaminantes. Este enfoque mejoró la representación de la variabilidad en la calidad del agua y facilitó la identificación de los principales factores de contaminación.

El estudio confirma que las actividades agrícolas y la falta de tratamiento adecuado de las aguas residuales son las principales fuentes de contaminación en la región. Los niveles elevados de coliformes fecales y nutrientes, como los nitratos y fosfatos, sugieren la necesidad urgente de implementar medidas de manejo sostenible, tanto en las prácticas agrícolas como en la gestión de aguas residuales.

Al contrastar los resultados con investigaciones similares en regiones tropicales, se evidenció que la cuenca de Morona Santiago enfrenta problemas comunes a otras áreas rurales de América Latina, como la falta de infraestructura sanitaria y la deficiente gestión de residuos. Sin embargo, la región presenta desafíos particulares debido a su geografía y el alto impacto de las actividades humanas en zonas vulnerables.

La investigación destaca la importancia de establecer un sistema de monitoreo continuo de la calidad del agua en la provincia de Morona Santiago. La implementación de tecnologías de monitoreo en tiempo real y la integración de nuevas

metodologías, como el análisis de componentes principales (PCA), pueden mejorar la eficiencia en la detección de contaminantes y permitir una respuesta más rápida ante episodios de contaminación.

Recomendaciones:

Se recomienda implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales en las comunidades rurales y urbanas, incluyendo la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales o la promoción de soluciones descentralizadas, como biofiltros o lechos de grava con el fin de evitar la contaminación.

Para evitar los niveles altos de nitratos y fosfatos se recomienda promover el uso responsable de fertilizantes en las áreas agrícolas y establecer regulaciones para la gestión de residuos agrícolas; se propone también incentivar el uso de fertilizantes orgánicos y la aplicación de técnicas de agricultura de precisión para aplicar fertilizantes de manera más eficiente.

Establecer sistemas de monitoreo continuo de la calidad del agua para evaluar los parámetros críticos y actualizar las regulaciones ambientales para detectar cambios y tomar decisiones rápidas ante posibles contaminaciones.

Desarrollar programas de educación ambiental dirigidos a las comunidades locales sobre la importancia de preservar la calidad del agua para garantizar el éxito de las medidas de gestión de la calidad del agua.

ANEXOS.

Anexo A.

Certificado del abstract por parte de idiomas



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI FOREIGN AND NATIVE LANGUAGES CENTER

ABSTRACT- EVALUATION SHEET				
NAME: Luis Patricio Tierra Pérez				
DATE: Jueves, 10 de julio de 2025				
Topic: "Calibración el Índice de Calidad del Agua (ICA), Mediante Análisis Estadístico de las Propiedades Físicoquímicas en la Red Hidrológica de la Provincia de Morona Santiago para la Evaluación de la Calidad Ambiental. "				
MARKS AWARDED		QUANTITATIVE AND QUALITATIVE		
VOCABULARY AND WORD USE	Use new learnt vocabulary and precise words related to the topic	Use a little new vocabulary and some appropriate words related to the topic	Use basic vocabulary and simplistic words related to the topic	Limited vocabulary and inadequate words related to the topic
	EXCELLENT: 2 <input checked="" type="checkbox"/>	GOOD: 1,5 <input type="checkbox"/>	AVERAGE: 1 <input type="checkbox"/>	LIMITED: 0,5 <input type="checkbox"/>
WRITING COHESION	Clear and logical progression of ideas and supporting paragraphs.	Adequate progression of ideas and supporting paragraphs.	Some progression of ideas and supporting paragraphs.	Inadequate ideas and supporting paragraphs.
	EXCELLENT: 2 <input type="checkbox"/>	GOOD: 1,5 <input type="checkbox"/>	AVERAGE: 1 <input type="checkbox"/>	LIMITED: 0,5 <input type="checkbox"/>
ARGUMENT	The message has been communicated very well and identify the type of text	The message has been communicated appropriately and identify the type of text	Some of the message has been communicated and the type of text is little confusing	The message hasn't been communicated and the type of text is inadequate
	EXCELLENT: 2 <input type="checkbox"/>	GOOD: 1,5 <input type="checkbox"/>	AVERAGE: 1 <input type="checkbox"/>	LIMITED: 0,5 <input type="checkbox"/>
CREATIVITY	Outstanding flow of ideas and events	Good flow of ideas and events	Average flow of ideas and events	Poor flow of ideas and events
	EXCELLENT: 2 <input type="checkbox"/>	GOOD: 1,5 <input type="checkbox"/>	AVERAGE: 1 <input type="checkbox"/>	LIMITED: 0,5 <input type="checkbox"/>
SCIENTIFIC SUSTAINABILITY	Reasonable, specific and supportable opinion or thesis statement	Minor errors when supporting the thesis statement	Some errors when supporting the thesis statement	Lots of errors when supporting the thesis statement
	EXCELLENT: 2 <input checked="" type="checkbox"/>	GOOD: 1,5 <input type="checkbox"/>	AVERAGE: 1 <input type="checkbox"/>	LIMITED: 0,5 <input type="checkbox"/>
TOTAL/AVERAGE	9 - 10: EXCELLENT 7 - 8,9: GOOD 5 - 6,9: AVERAGE 0 - 4,9: LIMITED	TOTAL 9		



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL
CARCHI- FOREIGN AND NATIVE LANGUAGES
CENTER**

**Informe sobre el Abstract de Artículo Científico
o Investigación.**

Autor: Luis Patricio Tierra Pérez

Fecha de recepción del abstract: Jueves, 10 de julio de 2025

Fecha de entrega del informe: Jueves, 10 de julio de 2025

El presente informe validará la traducción del idioma español al inglés si alcanza un porcentaje de: 9 – 10 Excelente.

Si la traducción no está dentro de los parámetros de 9 – 10, el autor deberá realizar las observaciones presentadas en el ABSTRACT, para su posterior presentación y aprobación.

Observaciones:

Después de realizar la revisión del presente abstract, éste presenta una apropiada traducción sobre el tema planteado en el idioma Inglés. Según la rúbrica de evaluación de la traducción en Inglés, ésta alcanza un valor de 9; por lo cual se valida dicho trabajo.

Atentamente



MA. Martha Viveros
Docente responsable del
CIDEN

Anexo A.

Base de datos.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Fecha	Temperatura	Ph	Oxigeno dis.	Solidos_Tota	Nitratos	Fosfatos	Turbiedad	DBO5	Coliformes ft	CALIDAD AGU	Clasificacio	RIO	COORD- X	COORD- Y	PUNTO
8/1/2018	19,60	7,30	9,38	46,02	2,90	0,17	0,86	12,50	2500,00	58,03	Regular	HUASAGA	275317,5	9699416,5	P1
8/1/2018	19,70	7,16	9,56	49,60	6,50	0,89	0,75	13,50	1300,00	50,27	Regular	HUASAGA	267687,4	9704496,8	P2
8/1/2018	20,50	7,56	8,97	45,20	4,30	0,25	0,96	12,60	1000,00	56,97	Regular	HUASAGA	260536,9	9708079,8	P3
8/1/2018	21,30	7,40	8,88	59,60	5,25	0,96	0,82	11,40	800,00	52,22	Regular	HUASAGA	258714,1	9715164,6	P4
8/1/2018	22,10	6,63	6,09	52,63	2,50	0,56	0,89	11,20	600,00	52,85	Regular	HUASAGA	257269,2	9720800,8	P5
10/1/2018	19,90	6,50	7,30	68,95	6,80	0,36	0,79	15,80	700,00	50,79	Regular	CHAPIZA	177784,8	9681258,3	P1
10/1/2018	19,90	6,60	8,45	95,23	6,20	0,45	0,76	14,60	600,00	53,08	Regular	CHAPIZA	178221,8	9689341,6	P2
10/1/2018	21,10	6,70	6,08	94,70	2,10	1,01	0,81	13,70	2500,00	46,50	Malo	CHAPIZA	178170	9693894	P3
10/1/2018	21,20	7,15	7,20	164,23	2,50	0,56	0,91	12,70	700,00	54,04	Regular	CHAPIZA	176461,8	9699526,9	P4
10/1/2018	21,80	7,20	6,56	49,63	6,20	0,36	0,79	15,80	1500,00	48,61	Malo	CHAPIZA	170189	9701869,7	P5
9/5/2018	19,10	6,80	6,05	100,96	4,90	0,86	2,60	12,10	700,00	49,66	Malo	HUASAGA	275317,5	9699416,5	P1
9/5/2018	19,50	6,50	6,08	124,90	3,90	0,56	1,05	13,50	900,00	50,09	Regular	HUASAGA	267687,4	9704496,8	P2
9/5/2018	20,40	6,63	6,90	57,60	3,40	0,25	1,85	16,30	600,00	53,71	Regular	HUASAGA	260536,9	9708079,8	P3
9/5/2018	20,30	7,20	7,10	73,90	5,80	0,19	0,36	16,20	600,00	54,49	Regular	HUASAGA	258714,1	9715164,6	P4
9/5/2018	20,50	6,50	8,50	86,30	6,50	0,63	2,65	15,90	800,00	48,52	Malo	HUASAGA	257269,2	9720800,8	P5
11/5/2018	19,70	6,50	9,26	90,02	5,80	0,96	16,70	14,70	1000,00	47,98	Malo	CHAPIZA	177784,8	9681258,3	P1
11/5/2018	19,90	6,20	6,01	48,26	6,40	0,28	3,59	12,90	1300,00	49,25	Malo	CHAPIZA	178221,8	9689341,6	P2
11/5/2018	21,60	6,30	7,50	52,10	5,20	0,26	2,86	15,20	600,00	52,52	Regular	CHAPIZA	178170	9693894	P3
11/5/2018	20,60	6,20	9,36	54,60	2,90	0,59	1,69	11,60	600,00	53,65	Regular	CHAPIZA	176461,8	9699526,9	P4
11/5/2018	20,20	6,80	8,60	63,20	6,60	0,18	1,63	12,40	600,00	56,75	Regular	CHAPIZA	170189	9701869,7	P5
4/9/2018	19,60	7,10	8,87	61,23	4,90	1,01	1,56	15,80	700,00	51,39	Regular	HUASAGA	275317,5	9699416,5	P1
4/9/2018	19,70	7,30	8,69	97,90	2,30	1,02	1,63	16,10	800,00	52,51	Regular	HUASAGA	267687,4	9704496,8	P2
4/9/2018	20,10	6,50	8,78	98,20	3,60	1,01	1,03	14,50	600,00	50,75	Regular	HUASAGA	260536,9	9708079,8	P3
4/9/2018	20,30	6,38	6,23	52,30	4,80	0,99	0,59	11,30	600,00	48,93	Malo	HUASAGA	258714,1	9715164,6	P4
4/9/2018	20,50	6,98	7,63	83,90	4,50	0,63	0,85	11,90	600,00	53,86	Regular	HUASAGA	257269,2	9720800,8	P5
7/9/2018	19,50	7,02	7,90	94,30	4,90	0,56	0,81	12,20	700,00	54,95	Regular	CHAPIZA	177784,8	9681258,3	P1
7/9/2018	19,90	6,56	7,56	96,01	6,10	0,63	0,94	16,10	600,00	50,33	Regular	CHAPIZA	178221,8	9689341,6	P2
7/9/2018	21,80	6,89	8,36	92,50	6,50	0,42	1,02	13,40	600,00	52,75	Regular	CHAPIZA	178170	9693894	P3
7/9/2018	22,20	6,70	8,20	98,99	6,80	0,26	0,79	12,70	700,00	53,79	Regular	CHAPIZA	176461,8	9699526,9	P4
7/9/2018	22,50	7,10	7,63	81,95	4,90	0,87	0,75	11,20	1500,00	50,54	Regular	CHAPIZA	170189	9701869,7	P5
8/1/2019	19,30	7,20	6,36	54,10	4,80	0,56	2,56	11,80	600,00	53,80	Regular	HUASAGA	275317,5	9699416,5	P1
8/1/2019	19,50	7,50	6,89	62,50	4,70	0,69	2,08	15,60	600,00	51,65	Regular	HUASAGA	267687,4	9704496,8	P2
8/1/2019	19,90	7,10	8,60	62,97	5,80	0,63	2,94	14,20	700,00	53,17	Regular	HUASAGA	260536,9	9708079,8	P3
8/1/2019	20,50	7,40	8,02	49,80	4,60	0,96	2,71	12,90	800,00	51,93	Regular	HUASAGA	258714,1	9715164,6	P4
8/1/2019	21,70	7,10	7,86	76,80	3,50	0,67	1,85	14,20	1000,00	51,83	Regular	HUASAGA	257269,2	9720800,8	P5

Anexo C.

Ríos y estaciones de monitoreo de la red hidrográfica de Morona Santiago

RIO	COORD- X	COORD- Y	PUNTO
HUASAGA	275317,50	9699416,50	P1
HUASAGA	267687,40	9704496,80	P2
HUASAGA	260536,90	9708079,80	P3
HUASAGA	258714,10	9715164,60	P4
HUASAGA	257269,20	9720800,80	P5
CHAPIZA	177784,80	9681258,30	P6
CHAPIZA	178221,80	9689341,60	P7
CHAPIZA	178170,00	9693894,00	P8
CHAPIZA	176461,80	9699526,90	P9
CHAPIZA	170189,00	9701869,70	P10
ZAMORA	785452,20	9649154,60	P11
ZAMORA	784661,90	9735603,40	P12
ZAMORA	782524,20	9637052,60	P13
ZAMORA	780611,40	9633126,60	P14

UPANO	819914,80	9764262,00	P15
UPANO	821124,70	9742271,20	P16
UPANO	823240,90	9753001,20	P17
RIO BLANCO	814064,80	9741347,30	P18
RIO BLANCO	816577,10	9739070,60	P19
YUQUIPA	177755,30	9753823,60	P20
YUQUIPA	169088,80	9752598,10	P21
YUQUIPA	819354,20	9734480,20	P22
PAN DE AZÚCAR	775073,80	9656337,50	P23
KALAGLAS	771340,90	9649302,50	P24
KALAGLAS	771071,20	9643713,00	P25
JURUMBAINO	819002,60	9740893,70	P26
JURUMBAINO	817191,10	9748924,10	P27
TUTANANGOZA	791744,80	9721847,20	P28
TUTANANGOZA	795756,20	9722981,10	P29
TUTANANGOZA	808934,10	9724379,00	P30
RIO MIRIUMI	813007,10	9728045,70	P31
RIO MIRIUMI	813018,10	9728046,20	P32
YUNGANZA	796234,30	9687103,00	P33
YUNGANZA	796234,30	9687103,00	P34
YUNGANZA	796234,30	9687103,00	P35
INDANZA	782166,90	9639567,80	P36
INDANZA	793761,00	9661721,00	P37
LUSHIN	828577,90	9816213,70	P38
LUSHIN	826223,80	9815860,70	P39
SANGAY	828664,80	9795151,40	P40
SANGAY	169632,00	9794158,10	P41
SANGAY	172874,10	9793138,50	P42
TUNA CHIGUAZA	832737,60	9784256,00	P43
PALORA	152497,29	9792213957,00	P44
PALORA	185076,59	9793267,32	P45
RIO PASTAZA	170139,90	9816121,60	P46
RIO PASTAZA	831735,40	9814369,40	P47
RIO CHIWIAS	829339,70	9785291,90	P48
RIO CHIWIAS	832193,80	9784622,80	P49
RIO CUYES	764747,60	9620394,20	P50
RIO CUYES	756339,50	9616850,30	P51
RIO EL IDEAL	766322,80	9620482,50	P52
RIO EL IDEAL	762449,70	9627836,60	P53
RIO MORONA	207432,13	9689682,65	P54
RIO MORONA	214812,00	9691717,00	P55
RIO MUCHINKIN	189239,3	9688758,26	P56
RIO MUCHINKIN	193061,34	9686186,82	P57
NAMANGOZA	138905933,00	9687737079,00	P58
NAMANGOZA	138928186,00	9682016,57	P59

SANTIAGO	821363,30	9663217,10	P60
SANTIAGO	182951,20	9667870,60	P61
MACUMA	232025,40	9738248,10	P62
PANGUIETZA	213354,10	9725365,70	P63
TUNA	70847,60	80815,90	P64
TUNA	831869,90	9785155,30	P65
TUNA	833722,60	9783276,50	P66
WAWAIM GRANDE	170634,60	9780569,50	P67
WAWAIM GRANDE	169639,90	9779799,10	P68
WAWAIM GRANDE	168633,20	9778884,20	P69

Anexo D.

Toma de muestras



Anexo E.

Toma de medidas de los parámetros fisicoquímicos del agua



REFERENCIAS

- AC Sostenibilidad. (2022, junio 15). *La planificación hídrica: concepto clave para la sostenibilidad*.
- Amat, J. (2017). *Análisis de componentes principales (Principal Component Analysis, PCA) y t-SNE*. Cienciadedatos.Net.
https://cienciadedatos.net/documentos/35_principal_component_analysis
- Amaya, C. (2018). *Selección de un índice fisicoquímico de calidad de agua superficial aplicable a arroyos del sur de la provincia de Santa Fe*.
<https://rephip.unr.edu.ar/server/api/core/bitstreams/8ab52095-f50b-4c9c-a497-2b8fc37c1dbc/content>
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (1948). *Declaración Universal de los Derechos Humanos*. <https://www.un.org/es/about-us/universal-declaration-of-human-rights>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2018). *Constitución de la República del Ecuador*.
<https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2008/6716.pdf>
- Ballesteros, M. H. (2008). *Economía ambiental y economía ecológica: Un balance crítico de su relación*. *Economía y sociedad*, 13(33-34), 55-65.
<https://repositorio.una.ac.cr/server/api/core/bitstreams/8d0cadff-3b02-4961-aa93-783187842d83/content>
- Barreto, S. P., & Espinoza, L. G. (2010). *Protocolo de monitoreo de agua: Laboratorio de Calidad Ambiental "Santiago Antúnez de Mayolo"*.
https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/protocols/Protocolo_Agua.pdf
- BiologyInsights Team. (2025). *Algae-bacteria interactions: Impact on aquatic ecosystems*.
- Brito, T. M. A. (2022). *Evaluación de la contaminación por metales pesados del río Cuchipamba, Morona Santiago* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/17637/1/236T0629.pdf>
- Cáceres, T. A. S. (2020). *Análisis geoestadístico de los parámetros físico-químicos de los pozos profundos ubicados en el área urbana del municipio de Tunja para los años 2015–2019*.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/4e1e7f4b-c5dd-4c49-a338-2d3c0f730bc8/content>
- Caho, R. A. C., & López, B. E. A. (2017). Determinación del índice de calidad de agua para el sector occidental del humedal Torca-Guaymaral empleando las metodologías UWQI y CWQI. *Producción + Limpia*, 12(2), 35–49. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a3>
- Calleja, A., González, T. C., Escartín, H. C. M., Magdaleno, F., Núñez, M. J., Aláñez, R. J., Acacio, S. L., & Garrido, S. L. (2021). *Guía para la evaluación del estado de las aguas superficiales y subterráneas* (Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, Ed.).

https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/publicaciones/guia-para-evaluacion-del-estado-aguas-superficiales-y-subterranas_tcm30-514230.pdf

Cárdenas, A. (2020). *Evaluación de la calidad del agua en la microcuenca hidrográfica del río Tutanangoza mediante análisis fisicoquímicos, microbiológicos y la aplicación del ICA-NSF*. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19608/1/UPS-CT008912.pdf>

Cevallos, P. H. I., & Molina, Y. L. (2020). *Evaluación de la calidad del agua provista por la Junta Administradora de Agua Potable del barrio Ascilla Bajo de la parroquia San José de Minas (Bachelor's thesis, Quito, 2020.)*. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20815/1/CD%2010337.pdf>

Clustering. (2021). *Introducción al clustering (I): Algoritmo k-means*. https://jdariasl.github.io/ML_2020/intro.html

Contento, R. R. M. (2019). *Estadística con aplicaciones en R*.

Costa, V. A., & Holmes, E. C. (2024). Diversity, evolution, and emergence of fish viruses. *Journal of Virology*, 98(6). <https://doi.org/10.1128/jvi.00118-24>

Creswell, J. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*.

Cuadra, R. (2020). *Características físicas, químicas y biológicas en el agua potable que deben controlarse*. TSILifeScience. <https://tecnosolucionescr.net/blog/215-caracteristicas-fisicos-quimicas-y-biologicas-en-el-agua-potable-que-deben-controlarse>

Cude, C. G. (2001). Oregon Water Quality Index: A tool for evaluating water quality management effectiveness. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 125–137. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb05480.x>

DATA, tab. (2024). *Prueba de Kruskal-Wallis*. Online Statistics Calculator.

Diego, A., Perazzo, R., Javier, A., María Isabel, L., Pamela, A., Beatriz, G., Javier, P., Mercedes, C., & Ezequiel, L. (2023). *Agua y territorio: hacia la resiliencia adaptativa en la región del conurbano sur de Buenos Aires*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/227238>

Drnas De Clément, Z. (2020). *Grandes teorías y doctrinas del derecho ambiental*. <http://www.eufje.org/images/DocDivers/Rapport%20Pring.pdf>

Ecuador Chequea. (2023, septiembre 11). *36,7% del agua que se consume en vasos contiene la bacteria E. Coli*. <https://ecuadorchequea.com/367-del-agua-que-se-consume-en-vasos-contiene-la-bacteria-e-coli/>

Elaboudi, Z., Madinzi, A., Saadi, R., Laissaoui, A., Kurniawan, T. A., Anouzla, A., & Souabi, S. (2024). A review of radionuclides impacts and remediation techniques. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 2. <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00613-0>

- ENCA. (2016). *Estrategia Nacional de Calidad del Agua*.
https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/05/Estrategia-Nacional-de-Calidad-del-Agua_2016-2030.pdf
- Faster, C. (2024b). *Análisis de componentes principales: El principal detrás de escena descubriendo variables latentes*. <https://fastercapital.com/content/Principal-Component-Analysis--The-Principal-Behind-the-Scenes--Uncovering-Latent-Variables.html>
- Faster. (2024a, junio 14). *Kruskal Wallis Prueba: La clave para comparar múltiples medianas*.
- Font, X. (2019). *Técnicas de clustering*.
- Garcés, M. (2021). *Efecto de las actividades antrópicas sobre las características fisicoquímicas del río Ambato* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato].
- García-Ubaque, C. A., García-Ubaque, J. C., Rodríguez Miranda, J. P., Pacheco-García, R., & García-Vaca, M. C. (2018). Limitaciones del IRCA como estimador de calidad del agua para consumo humano. *Revista de Salud Pública*, 20(2), 204–207.
<https://doi.org/10.15446/rsap.v20n2.65952>
- Guevara Alban, G. P., Verdesoto Arguello, A. E., & Castro Molina, N. E. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas y de investigación-acción). *RECIMUNDO*, 4(3), 163–173.
[https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(3\).julio.2020.163-173](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173)
- Guevara, M. C. (2018). *Evaluación de la calidad del agua mediante macroinvertebrados en el tramo Padre Carollo Paus de la microcuenca hidrográfica del río Blanco, Morona Santiago* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Sede Morona Santiago]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8765/1/33T0187.pdf>
- Gutiérrez, & Román. (2018). *Control estadístico de calidad y seis sigma*.
<https://www.uv.mx/personal/ermeneses/files/2018/05/6-control-estadistico-de-la-calidad-y-seis-sigma-gutierrez-2da.pdf>
- Gutiérrez, F., Peña, J., & Rodríguez, C. (2018). Calibración del índice de calidad del agua en la cuenca del río Bogotá utilizando análisis estadísticos. *Revista Ingeniería y Ambiente*, 15(13), 45–60.
- Hach. (s. f.). *Nitrato y nitrito*. Recuperado el 28 de julio de 2024, de <https://es.hach.com/parameters/nitrate>
- Henry. (2024). *Gestión sostenible de los recursos hídricos: Estrategias para un futuro saludable y equitativo*. <https://institutodelagua.es/recursos-hidricos/gestion-sostenible-de-los-recursos-hidricosrecursos-hidricos/>
- Hernandez, F., Nolasco, E., & Salguero, M. (2016). Determinación del índice de calidad del agua NSF y modelación del cromo hexavalente en la parte alta del río Suquipata, Santa Ana, El Salvador. *Universidad de El Salvador*.
<https://repositorio.ues.edu.sv/server/api/core/bitstreams/7e232864-e890-4fc7-86ff-7ee286ee7176/content>

- INAMHI. (s. f.). *BROCHURE_INAMHI2021-01*. Recuperado el 3 de febrero de 2025, de https://www.inamhi.gob.ec/docum_institucion/BROCHURE_INAMHI2021-01.pdf
- Jacquet, S., Miki, T., Noble, R., Peduzzi, P., & Wilhelm, S. (2010). Viruses in aquatic ecosystems: Important advancements of the last 20 years and prospects for the future in the field of microbial oceanography and limnology. *Advances in Oceanography and Limnology*, 1(1), 97. <https://doi.org/10.4081/aiol.2010.5297>
- Jiménez, T. D. M. (2022). *Evaluación de la calidad de agua del río Lupique de la comunidad Jimbitono, mediante la identificación de macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Sede Morona Santiago]. <http://dspace.espech.edu.ec/bitstream/123456789/17664/1/236T0646.pdf>
- Kalstein. (2021). *Los diferentes tipos de turbidímetros disponibles para uso en laboratorio*. <https://kalstein.ec/los-diferentes-tipos-de-turbidimetros-disponibles-para-uso-en-laboratorio/>
- Kumar, S., & Gupta, V. (2014). Assessment of water quality index of a lake using physicochemical parameters: A case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 3343–3351.
- Luisa, D. M., Soto, Q., Fonseca Hernández, C., Es, C., Francisco, M. J., & Segura, G. (2008). Revisión de las corrientes teóricas sobre el medio ambiente y los recursos naturales. *Digital Universitaria*, 9(3). <http://www.revista.unam.mx/vol.9/num3/art13/int13.htm>
- Méndez, Z. P., Arcos, J., & Cazorla, X. (2020). Determinación del índice de calidad del agua (NSF) del río Copueno ubicado en Cantón Morona. *Dominio de Las Ciencias*, 6. <https://doi.org/10.23857/dc.v6i3.1245>
- Michael Allen. (2025). *DPSIR (Drivers, Pressures, States, Impacts, Responses)*. <https://learningforsustainability.net/mwa/dpsir/>
- Moretto, D. L., Panta, R. E., da Costa, A. B., & Lobo, E. A. (2012). Calibração do índice de qualidade da água (IQA) com base na Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Acta Limnologica Brasiliensia*, 24(1), 29–42. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X2012005000024>
- Naciones Unidas. (2015). *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Neill, D. A., & Cortez Suárez, L. (2018). *Procesos y fundamentos de la investigación científica*. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/12498>
- Nelson Morales, P. (s. f.). *Investigación exploratoria: Tipos, metodología y ejemplos*. [file:///C:/Users/Patricio/Downloads/Investigaci%C3%B3n%20Exploratoria%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Patricio/Downloads/Investigaci%C3%B3n%20Exploratoria%20(2).pdf)
- NTE INEN 1108. (2011). *Agua potable. Requisitos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización.

- OMS. (2017, abril 24). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda*. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>
- Orbe, J., Herrera-Robalino, J. L., Ureña-Callay, G., Telenchano-Ilbay, J., Samaniego-León, S., Fienco-Bacusoy, A., Cando-Veintimilla, A., & Toulkeridis, T. (2023). An evaluation of radon in drinking water supplies in major cities of the Province of Chimborazo, Central Andes of Ecuador. *Water*, 15(12), 22. <https://doi.org/10.3390/w15122255>
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano* (4ª ed.). <http://apps.who.int/>
- Ortiz, P. (2024). *Escasez de agua en los ríos preocupa a ciudades de la Amazonía ecuatoriana*. Colectivo Prodh. <https://www.prodh.org/2024/10/02/escasez-agua-amazonia/>
- Otero-Ortega, A., & Ortega, A. O. (2018). *Enfoques de investigación*. <https://www.researchgate.net/publication/326905435>
- Paco, G. Y. (2024). *Ecuador: sequía y minería ilegal, los problemas que han marcado 2024*. *Eco America*, 1–5. <https://www.ecoticias.com/eco-america/ecuador-sequia-mineria-ilegal-2024>
- Pardo, I., Cobo, J., & Vázquez, M. (2012). A water quality index for rivers: An example from Spain. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(12), 6995–7008.
- Pauta, G., Velasco, M., Gutiérrez, D., Vázquez, G., Rivera, S., Morales, Ó., & Abril, A. (2019). Evaluación de la calidad del agua de los ríos de la ciudad de Cuenca, Ecuador. *MASKANA*, 10(2), 76–88. <https://doi.org/10.18537/mskn.10.02.08>
- Pérez, J., Chicaiza, A., & Quiñonez, M. (2021). Water quality assessment of the Guayas River, Ecuador, using a water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1–15.
- Portillo, G. (2024, octubre 28). *Contaminación hídrica: causas, consecuencias y soluciones*. Renovables Verdes. <https://www.renovablesverdes.com/contaminacion-hidrica/>
- Pozo, H. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*. Registro Oficial Suplemento 983, 1–92. https://www.ambiente.gob.ec/wpontent/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf
- Quintero, J., & Rivas, D. (2020). Indicadores biológicos en la calidad del agua. *Revista de Ciencias Biológicas*, 18(2), 140–152.
- Robledo, H. J. A. (2022). *Evaluación del Índice de Calidad de Agua ICA-NSF en las microcuencas del Parque Nacional Río Dulce como herramienta en la gestión integral del manejo sustentable, Livingston, Izabal, Guatemala, Centroamérica*. *Revista Tecnología En Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.6241>
- Rodríguez, D. (2023, junio 30). *El índice de Davies-Bouldin para estimar los clústeres en k-means e implementación en Python*. Analytics Lane.

- Rojas, A., & Espinoza, L. (2019). Coliformes fecales como indicadores de contaminación. *Revista de Salud Pública*, 13(1), 50–56.
- Rojas, C., Villabona, L., & García, S. (2022). Assessment of water quality in the Bogotá River using a water quality index. *Water*, 14, 6–14.
- Salazar, P., & Molina, G. (2021). Microorganismos y su influencia en la calidad del agua. *Revista de Hidrobiología*, 9(3), 98–92.
- SNET. (2017). *Índice de Calidad del Agua General "ICA"*. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Humanos, 27(5), 1–14. <https://doi.org/10.1119/1.1970348>
- Stock, W., Callens, M., Houwenhuysse, S., Schols, R., Goel, N., Coone, M., Theys, C., Delnat, V., Boudry, A., Eckert, E. M., Laspoumaderes, C., Grossart, H. P., De Meester, L., Stoks, R., Sabbe, K., & Decaestecker, E. (2021). Human impact on symbioses between aquatic organisms and microbes. *Aquatic Microbial Ecology*, 87, 113–138. <https://doi.org/10.3354/AME01973>
- Tavassoli, S., & Mohammadi, F. (2017). Groundwater quality assessment based on WQI and its vulnerability to saltwater intrusion in a coastal city, Iran. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5(6), 86–96. <https://doi.org/10.4236/gep.2017.56010>
- Tito, B. (2020, julio 7). *Parámetros químicos del agua*. https://ingenieriaambiental.net/parametros-quimicos-del-agua/#google_vignette
- Torres, P., Cruz, H., & Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. *Revista Ingenierías*, 8, 79–94. <https://www.redalyc.org/pdf/750/75017199010.pdf>
- Valerga, A. (2021). *¿Qué es un fotómetro? Descubre para qué sirve y cómo usarlo*. Crehana. <https://www.crehana.com/blog/estilo-vida/fotometro-que-es/>
- Villanueva, E., Fernández, M., Viano, E., & Amorín, M. (2017). Fiabilidad en la medición de la temperatura corporal con un termómetro timpánico en pacientes geriátricos. *Gerokomos*, 28(2), 68–72.
- Wang, Y., Guo, C., & He, J. (2025). Aquatic circoviruses: Emerging pathogens in global aquaculture — From discovery to disease management. *Journal of Virology*, 99(1). <https://doi.org/10.1128/jvi.01737-24>
- WHO – Organización Mundial de la Salud. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano* (4ª ed.). <http://apps.who.int/>