



ESTRATEGIA PEDAGÓGICA PARA EL DESARROLLO DE COMPETENCIAS AMBIENTALES EN LA FORMACIÓN DE INGENIEROS

PEDAGOGICAL STRATEGY FOR THE DEVELOPMENT OF ENVIRONMENTAL COMPETENCIES IN THE TRAINING OF ENGINEERS

Sedolfo Carrasquero-Ferrer^{1*}

E-mail: scarrasquero@uteg.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4725-963X>

Abraham Sornoza¹

E-mail: ae.sornoza.cing@uteg.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2753-4710>

Guillermo Benites¹

E-mail: gi.benites.cing@uteg.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9836-2474>

Pedro Aguirre¹

E-mail: py.aguirre.cing@uteg.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5930-6262>

Gabriel Vaca-Suárez¹

E-mail: gvaca@uteg.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5552-1848>

¹ Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador

*Autor para correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Hamaty Segrera, L.I., Díaz Quiñones, J.A., Ramos Rangel, Y., & Fernández Castillo E (2026) Instrumento para la descripción de creencias en relación al cáncer de cuello de útero. *Revista Conrado*, 22(111), e5294.

RESUMEN

Este estudio analiza la aplicación de los índices de calidad del agua (ICA) como estrategia pedagógica para el desarrollo de competencias ambientales y pensamiento crítico en estudiantes de ingeniería. La investigación se desarrolló bajo un enfoque aplicado-educativo, con un diseño de campo y alcance descriptivo, involucrando a 42 estudiantes de ingeniería de la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, Ecuador. Se empleó una base de datos correspondiente a 18 pozos de agua subterránea, en los cuales se evaluaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. A partir de estos datos, se calcularon tres índices de calidad del agua: ICA aritmético ponderado (ICA-AP), ICA del Consejo Canadiense de ministros del Ambiente (ICA-CCME) y el índice de Bhargava (ICA-Bhargava). Los resultados evidenciaron una marcada variabilidad en la calidad del agua, destacándose concentraciones elevadas de cloruros en algunos pozos, así como la presencia de coliformes totales y fecales, lo que indica posibles fuentes de contaminación de origen antrópico. La comparación entre índices mostró diferencias en la clasificación de los pozos, siendo el ICA-Bhargava el más restrictivo, seguido por el ICA-CCME, mientras que el ICA-AP tendió a sobreestimar la calidad del agua.

Desde el enfoque pedagógico, la implementación de la estrategia didáctica permitió fortalecer competencias relacionadas con el análisis de datos, la interpretación ambiental y el pensamiento crítico. Los resultados de la evaluación evidenciaron una alta percepción positiva por parte de los estudiantes, especialmente en dimensiones como aprendizaje activo e interpretación ambiental. Se concluye que el uso de índices de calidad del agua, basado en datos reales, constituye una herramienta efectiva para la formación de ingenieros, al integrar conocimientos teóricos con habilidades prácticas orientadas a la toma de decisiones.

Palabras clave:

Índices de calidad del agua, Aprendizaje Activo, Ingeniería Ambiental, Pensamiento Crítico, Aguas Subterráneas

ABSTRACT

This study analyzes the application of water quality indices (WQI) as a pedagogical strategy for developing environmental competencies and critical thinking in engineering students. The research followed an applied-educational approach with a descriptive field design, involving 42



undergraduate engineering students from the Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil.

A real dataset from 18 groundwater wells was used, including physicochemical and microbiological parameters. Based on these data, three water quality indices were calculated: the weighted arithmetic index (WQI-AP), the Canadian Council of Ministers of the Environment index (CCME-WQI), and the Bhargava index (Bhargava-WQI). The results revealed significant variability in groundwater quality, with elevated chloride concentrations and the presence of total and fecal coliforms in several wells, indicating potential anthropogenic contamination sources. Comparative analysis showed differences among indices, with Bhargava-WQI providing the most restrictive assessment, followed by CCME-WQI, while WQI-AP tended to overestimate water quality. From a pedagogical perspective, the implementation of the strategy enhanced key competencies such as data analysis, environmental interpretation, and critical thinking. Student perception results indicated a high level of acceptance, particularly in active learning and environmental understanding dimensions. The findings suggest that the use of water quality indices based on real data represents an effective educational tool for engineering training, promoting the integration of theoretical knowledge and practical skills for informed decision-making.

Keywords:

Water Quality Indices, Active Learning, Environmental Engineering, Critical Thinking, Groundwater

INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos desempeñan un papel esencial en el bienestar de las sociedades, el equilibrio de los ecosistemas y el desarrollo de diversas actividades productivas (Zhou et al., 2025). Dentro de estos, el agua subterránea constituye una fuente estratégica de abastecimiento, particularmente en zonas donde las fuentes superficiales son escasas o presentan alta variabilidad (Kumar et al., 2023). Sin embargo, este tipo de recurso es susceptible a procesos de contaminación tanto de origen natural como derivados de actividades humanas, lo que puede afectar su calidad y limitar su uso para consumo humano y otros fines (Alexakis, 2024). Es por ello que el seguimiento sistemático y la evaluación de la calidad del agua se han consolidado como componentes clave en la gestión ambiental y en el ejercicio profesional de la ingeniería.

En el contexto de este marco, los índices de calidad del agua (ICA) se han establecido como instrumentos ampliamente utilizados para la síntesis y simplificación de los datos derivados de varios parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en un valor indicativo singular (Dwivedi & Dubey, 2023). Esta metodología mejora la comprensión del estado de los recursos hídricos y permite la presentación de los hallazgos de una manera accesible tanto para los expertos como para los responsables políticos, así como para la población en general, lo que fomenta estrategias de gestión más eficaces. Existen numerosas metodologías para el cálculo de estos índices, como el índice aritmético ponderado, el índice desarrollado por el Consejo Canadiense de ministros de Medio Ambiente (CCME) y el índice de Bhargava, cada uno de los cuales muestra una variabilidad en sus respuestas según los parámetros incorporados, en particular en lo que respecta a los factores microbiológicos.

A pesar de su uso generalizado en los ámbitos técnico y científico, se ha explorado mínimamente la utilidad potencial de los ICA como recurso educativo en la educación superior. En la preparación de los futuros ingenieros, es cada vez más imperativo integrar metodologías pedagógicas que trasciendan los enfoques convencionales y fomenten el desarrollo de competencias como el análisis crítico, la interpretación de la información y la capacidad de resolución de problemas. Estas habilidades son vitales para hacer frente a los intrincados desafíos ambientales, en los que la toma de decisiones requiere el examen de datos empíricos y la comprensión de los sistemas interconectados (Vallejo y Bustamante, 2024; Kumar et al., 2023).

En este contexto, la integración de los ICA en los marcos educativos representa una alternativa valiosa para unir el conocimiento teórico con las aplicaciones prácticas a través de metodologías de aprendizaje activo. Utilizar datos auténticos permite a los estudiantes mejorar sus capacidades relacionadas con el análisis de la información, la interpretación de los resultados, la identificación de posibles fuentes de contaminación y la evaluación de los recursos hídricos de acuerdo con las normas reglamentarias. Del mismo modo, la yuxtaposición de varios índices ayuda a cultivar una perspectiva crítica con respecto a sus implicaciones y limitaciones, así como a reconocer la incertidumbre inherente asociada a los procesos de evaluación ambiental (Rocha et al., 2024).

Desde este punto de vista, los índices de calidad del agua pueden considerarse no solo como instrumentos

técnicos para la evaluación ambiental, sino también como recursos educativos que facilitan el aprendizaje significativo y la mejora de las competencias. Su aplicación contribuye a la formación de profesionales expertos en sintetizar el conocimiento teórico con la experiencia práctica, mejorando así su capacidad para tomar decisiones informadas en el ámbito de la ingeniería ambiental (Chaves Fortes et al., 2023).

Esta investigación busca analizar la implementación de índices de calidad del agua como una estrategia pedagógica diseñada para desarrollar las competencias ambientales y el pensamiento crítico entre los estudiantes de ingeniería, basándose en la utilización de datos auténticos de aguas subterráneas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se enmarcó en un nivel aprehensivo, con un alcance descriptivo y un diseño de campo con enfoque aplicado-educativo. La metodología implementada se estructuró en cinco etapas fundamentales, orientadas a integrar el análisis de la calidad del agua subterránea con una estrategia didáctica en la formación de estudiantes de ingeniería. La investigación contó con la participación de 42 estudiantes de la asignatura de Gestión Ambiental, pertenecientes al tercer semestre del área de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, Ecuador.

Diseño de la estrategia didáctica

En esta fase se diseñó una estrategia didáctica basada en el aprendizaje activo, orientada a la comprensión integral de la calidad del agua mediante la aplicación de ICA. La experiencia pedagógica se fundamentó en el enfoque de aprendizaje basado en problemas (ABP), en el cual los estudiantes abordaron una situación real relacionada con la evaluación de la calidad de aguas subterráneas.

Para ello, se estructuró una secuencia didáctica que integró conocimientos de química ambiental, microbiología y análisis de datos. El diseño de la actividad incluyó los siguientes componentes:

- Planteamiento del problema: análisis de la calidad del agua subterránea en pozos de abastecimiento.
- Suministro de datos reales: base de datos proveniente de un estudio previo (Casillas, 2018).
- Guía de trabajo: desarrollo del cálculo del ICA paso a paso. Interpretación de resultados: clasificación de la calidad del agua y análisis de posibles fuentes de contaminación.
- Discusión crítica: reflexión sobre implicaciones ambientales y sanitarias.

Esta fase permitió estructurar una experiencia de aprendizaje que promueve el desarrollo de competencias como el pensamiento crítico, análisis de información ambiental y toma de decisiones, vinculando la teoría con la práctica.

Validación y depuración de la base de datos

Los datos fueron obtenidos de Casillas (2018), quién realizaron la caracterización de aguas subterráneas de 18 pozos ubicados en el sector La Macanilla, Parroquia Potreritos, Municipio La Cañada de Urdaneta, Estado Zulia, Venezuela. La ubicación geográfica de los 18 pozos estudiados se muestra en la Figura 1. Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados fueron color, turbidez, pH, alcalinidad, dureza, cloruros, fosfatos, sulfatos, hierro, así como coliformes totales y fecales, los cuales fueron medidos siguiendo los procedimientos establecidos en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2022).

Se llevó a cabo un proceso de validación y depuración de la información, con el fin de garantizar su calidad y confiabilidad para el análisis. Este proceso comprendió:

- revisión de la consistencia interna de los datos
- identificación y tratamiento de valores atípicos
- eliminación de registros incompletos o inconsistentes
- estandarización de unidades de medida

Finalmente, los datos fueron organizados en matrices estructuradas, facilitando su posterior procesamiento y análisis.

Cálculo de los Índices de Calidad del Agua (ICA)

Se determinaron tres índices de calidad del agua, seleccionados en función de su ámbito de aplicación, su pertinencia para muestras de agua subterránea, su relación con el consumo humano y la variedad de parámetros que integran (Marín et al. 2023).

- Índice de calidad de agua aritmético ponderado (ICAP-AP)

Para la evaluación de la calidad del agua subterránea, se empleó el índice de calidad de agua aritmético ponderado (ICA-AP), el cual permite integrar múltiples parámetros fisicoquímicos en un valor único representativo de la calidad del recurso hídrico. El cálculo del índice se basó en la selección de parámetros relevantes para agua destinada al consumo humano, incluyendo pH, sólidos disueltos totales (SDT), sodio, cloruros, dureza total, sulfatos y nitratos. Estos parámetros fueron elegidos en función de su importancia relativa en la evaluación de la calidad del agua y su impacto en la salud humana.

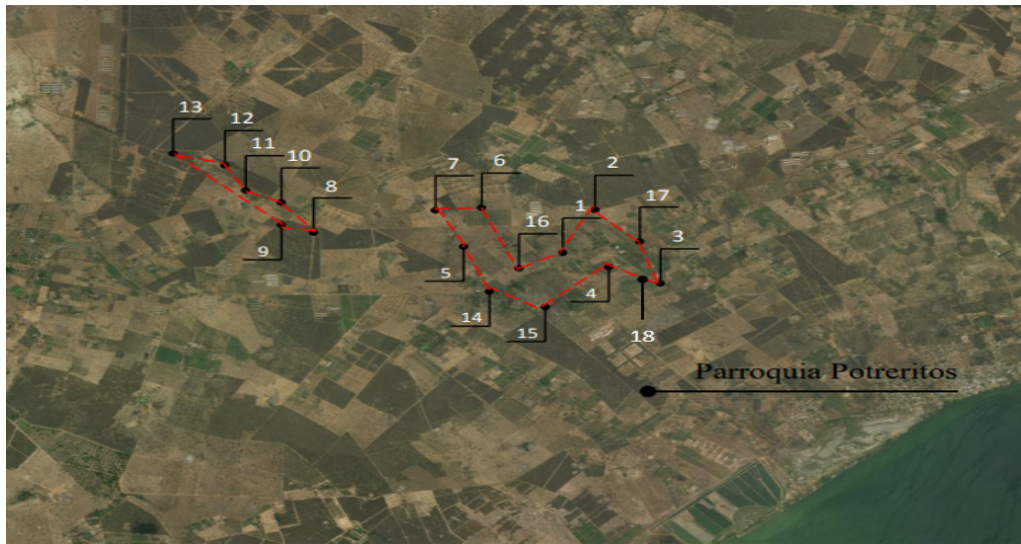


Figura 1. Ubicación de los 18 pozos estudiados

A cada parámetro se le asignó un peso relativo (w_i) en función de su importancia en la calidad del agua para consumo humano, utilizando una escala de 1 a 5. Los parámetros considerados más críticos, como los sólidos disueltos totales (SDT) y nitratos ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$), recibieron un valor de 5; sodio y cloruros un valor de 4; dureza total y sulfatos un valor de 3; y el pH, por su menor impacto relativo, un valor de 1. Posteriormente, se calculó el peso relativo normalizado (W_i) para cada parámetro mediante la ecuación (1):

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \text{E (1)}$$

donde:

- W_i es el peso relativo del parámetro
- w_i es el peso asignado al parámetro
- n es el número total de parámetros considerados

Para cada parámetro, se determinó una calificación de calidad (q_i), la cual representa la relación entre la concentración medida y el valor límite permisible establecido para agua de consumo humano, de acuerdo con normativas internacionales (OMS, 2018). Esta se calculó mediante la ecuación 2:

$$q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) * 100 \quad \text{E (2)}$$

donde:

- q_i es la calificación de calidad del parámetro
- C_i es la concentración medida del parámetro
- S_i es el valor estándar o límite permisible

El subíndice de cada parámetro (SI) se obtuvo multiplicando el peso relativo por su correspondiente calificación de calidad, de acuerdo a la ecuación 3:

$$SI_i = W_i * q_i$$

donde:

- SI_i es el subíndice del parámetro
- W_i es el peso relativo
- q_i es la calificación de calidad

El valor final del índice de calidad del agua se determinó como la suma de los subíndices de todos los parámetros evaluados (Ecuación 4):

$$ICA = \sum_{i=1}^n SI_i \quad E(4)$$

La interpretación de los valores del ICA-Aritmético ponderado se realizó empleando 5 categorías de calidad de agua: excelente (< 50), buena (50-100), pobre (100-200), muy pobre (200-300) y no apta para consumo humano (> 300).

- Índice de Calidad de Agua CCME (ICA-CCME)

De igual manera, se aplicó el índice de calidad de agua del Consejo Canadiense de ministros del Ambiente (*Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME-WQI*), ampliamente reconocido por su robustez metodológica y su capacidad para evaluar el cumplimiento de estándares de calidad del agua. Este índice permite integrar múltiples parámetros fisicoquímicos mediante la evaluación de tres factores fundamentales: alcance (F1), frecuencia (F2) y amplitud (F3), los cuales reflejan el grado de incumplimiento de los valores establecidos por normativas de referencia para agua destinada al consumo humano (CCME, 2017; OMS, 2018).

Para el cálculo del ICA-CCME se incluyeron variables representativas de la calidad del agua subterránea, tales como pH, turbidez, color, sólidos disueltos totales (SDT), dureza total, cloruros, sulfatos, sodio, nitratos ($NO_2^- + NO_3^-$), hierro total y manganeso total, en concordancia con los lineamientos metodológicos del índice.

El valor del ICA-CCME se determinó mediante la ecuación 5:

$$ICA - CCME = 100 - \frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,732} \quad E(5)$$

donde los factores F1, F2 y F3 representan:

El factor F1 corresponde al porcentaje de variables que no cumplen con los valores límite establecidos por la normativa de referencia (Ecuación 6).

$$F1 = \left(\frac{\text{Número de variables fuera de norma}}{\text{Número total de variables}} \right) * 100 \quad E(6)$$

El factor F2 representa la proporción de mediciones individuales que exceden los límites permisibles:

$$F2 = \left(\frac{\text{Número de pruebas fuera de norma}}{\text{Número total de pruebas}} \right) * 100 \quad E(7)$$

El factor F3 cuantifica la magnitud con la cual los valores exceden los límites establecidos. Su cálculo se realizó en tres etapas:

(i) Determinación de excursiones

Para cada valor que excede el límite permisible, se calculó la excursión (Ecuación 8),

- Cuando el valor supera el límite máximo:

$$\text{Excursión} = \left(\frac{C_1}{S_i} \right) - 1 \quad E(8)$$

- Cuando el límite corresponde a un valor mínimo (Ecuación 9),

$$\text{Excursión} = \left(\frac{S_1}{C_i} \right) - 1 \quad E(9)$$

(ii) Cálculo del valor nse

El valor nse (*normalized sum of excursions*) se obtuvo de acuerdo a la ecuación 10:

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Excursiones}}{\text{Número total de pruebas}} \quad E(10)$$

(iii) Cálculo de F3

Finalmente, el factor F3 se determinó mediante la siguiente función (ecuación 11):

$$F3 = \frac{nse}{0,01 * nse + 0,01} \quad E(11)$$

La interpretación de los valores del ICA-CCME se realizó empleando 5 categorías de calidad de agua: excelente (95-100), buena (80-94), justa (60-79), marginal (45-59) y mala (0-44) (Tyagi et al., 2013). Para la evaluación del cumplimiento normativo, se utilizaron como referencia los valores guía establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018).

- Índice de Calidad de Agua de Bhargava (ICA-Bhargava)

Con el propósito de incorporar la influencia de parámetros microbiológicos y mejorar la sensibilidad en la evaluación de la calidad del agua para consumo humano, se aplicó el índice de calidad de agua de Bhargava, el cual constituye una alternativa metodológica que integra variables fisicoquímicas y biológicas mediante funciones de sensibilidad. Este índice surge como una evolución de los modelos iniciales que plantean el uso de curvas ponderadas para evaluar la calidad del agua. Sin embargo, debido a la dificultad en la asignación de pesos adecuados, Bhargava desarrolló un enfoque simplificado basado en funciones de sensibilidad, permitiendo una representación más racional de la influencia de cada parámetro en la calidad del agua.

El ICA-Bhargava se fundamenta en la evaluación de cada parámetro mediante una función de sensibilidad (f_i), la cual toma valores entre 0 y 1, representando el grado de afectación del parámetro sobre la calidad del agua. Este enfoque elimina la necesidad de asignar ponderaciones explícitas, incorporando directamente la importancia relativa de cada variable en función de su impacto.

Los parámetros considerados se agrupan en tres categorías principales:

- Físicos: pH, color, turbidez
- Químicos: sólidos disueltos totales (SDT), cloruros, dureza total, sulfatos, sodio, hierro y manganeso
- Biológicos: bacterias coliformes totales (BCT) y fecales (BCF)

Para cada parámetro, se determinó la concentración relativa (C), definida como la relación entre la concentración medida y el valor máximo permisible establecido por normativas de referencia (OMS, 2018) de acuerdo a la ecuación 11:

$$C = \frac{C_i}{C_{ml}} \quad E(11)$$

donde:

- C_i es la concentración medida del parámetro
- C_m es el valor máximo permisible

Las funciones de sensibilidad (f_i) se calcularon en función del tipo de parámetro y su impacto en la salud humana. Estas funciones permiten diferenciar el peso implícito de cada variable sin necesidad de ponderaciones explícitas:

- Parámetros microbiológicos (alto impacto)

$$f_i = e^{-16(C-1)} \quad E(12)$$

- Parámetros tóxicos (metales)

$$f_i = e^{-4(C-1)} \quad E(13)$$

- Parámetros estéticos (color, turbidez)

$$f_i = e^{-2(C-1)} \quad E(14)$$

- Parámetros fisicoquímicos generales

$$f_i = e^{-2(C-1)} \quad E(15)$$

Este enfoque permite que los parámetros con mayor impacto sanitario, como los coliformes, tengan una influencia más significativa en el valor final del índice.

El valor del índice se obtuvo mediante la media geométrica de las funciones de sensibilidad de todos los parámetros considerados:

$$ICA - Bhargava = (\prod_{i=1}^n f_i)^{\frac{1}{n}} * 100 \quad E(16)$$

donde:

- f_i es la función de sensibilidad del parámetro
- n es el número total de parámetros

La interpretación de los valores del ICA-Bhargava se realizó empleando 5 clases de calidad de agua: I excelente (90-100), II buena (89-65), III media (64-35), IV inadecuada (11-34) y V muy mala (10-1)

Los resultados de los índices de calidad del agua fueron procesados utilizando el software **IBM SPSS Statistics**, versión 26.0, el cual permitió realizar el análisis estadístico descriptivo y comparativo de los datos obtenidos. A través de esta herramienta se llevaron a cabo los cálculos de medidas de tendencia central, dispersión y distribución de frecuencias, así como el análisis de los resultados derivados de la escala Likert.

- Implementación pedagógica

La estrategia pedagógica fue implementada en un grupo de 42 estudiantes del tercer semestre del área de Ciencias de la Ingeniería. Los participantes fueron organizados en equipos de trabajo con el objetivo de fomentar el aprendizaje colaborativo y el intercambio de ideas durante el desarrollo de la actividad.

Durante esta fase, los estudiantes trabajaron con un conjunto de datos reales de calidad de agua subterránea, a

partir de los cuales desarrollaron actividades orientadas a: i) el cálculo de índices de calidad de agua (ICA) para los diferentes pozos analizados, ii) la interpretación de los resultados obtenidos en función de los rangos de clasificación establecidos, y iii) la identificación de posibles fuentes de contaminación asociadas a los parámetros evaluados.

El rol del docente se centró en la facilitación del proceso de aprendizaje, promoviendo la participación activa de los estudiantes, el análisis crítico de la información y la discusión de los resultados. Asimismo, se incentivó la formulación de hipótesis y la toma de decisiones fundamentadas en evidencia, con el fin de fortalecer la comprensión integral de la problemática ambiental abordada.

• Evaluación de competencias

En la fase final, se evaluó la efectividad de la estrategia didáctica mediante un enfoque cualitativo y cuantitativo, orientado a analizar el desarrollo de competencias en los estudiantes. Para ello, se consideraron los siguientes aspectos: i) los resultados obtenidos en el cálculo e interpretación de los índices de calidad de agua, ii) la observación del proceso de resolución de problemas durante la actividad, y iii) la capacidad de los estudiantes para interpretar la información desde una perspectiva ambiental.

Se midió la percepción de los estudiantes sobre la actividad adaptando el cuestionario realizado por Carrasquero (2023), con 10 preguntas (Tabla 1). El cuestionario fue validado a través de la técnica de juicio de expertos.

Tabla 1. Dimensiones e ítems del instrumento de evaluación de la percepción de los estudiantes

Dimensión	Pregunta
Comprensión conceptual	La actividad me permitió comprender el concepto de calidad del agua.
Comprensión conceptual	Entendí cómo se calculan los índices de calidad del agua (ICA).
Análisis de datos	La actividad mejoró mi capacidad para analizar datos ambientales.
Análisis de datos	Pude interpretar correctamente los resultados obtenidos en los índices de calidad del agua.
Pensamiento crítico	La comparación entre diferentes índices me ayudó a desarrollar pensamiento crítico.
Pensamiento crítico	Fui capaz de analizar las diferencias entre los resultados de los distintos índices.
Interpretación ambiental	Pude identificar posibles fuentes de contaminación a partir de los datos analizados.
Interpretación ambiental	Comprendí las implicaciones ambientales y sanitarias de la calidad del agua evaluada.
Aprendizaje activo	El uso de datos reales facilitó mi aprendizaje.
Aprendizaje activo	Considero que esta metodología es más efectiva que una clase tradicional.

Escala de respuesta: 1 = Totalmente en desacuerdo; 2 = En desacuerdo; 3 = Neutral; 4 = De acuerdo; 5 = Totalmente de acuerdo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La (Tabla 2) presenta un resumen de los principales parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados para el área de estudio, incluyendo valores máximos, mínimos, promedio y desviación estándar. Asimismo, se contrastan estos resultados con los límites máximos permisibles establecidos en normativas de referencia, lo que permite identificar el grado de cumplimiento de la calidad del agua. Los resultados estadísticos de los parámetros evaluados evidencian una marcada heterogeneidad en la calidad del agua subterránea, reflejada en la amplitud de los rangos, valores máximos elevados y desviaciones estándar significativas en varios indicadores clave.

En relación con el pH, los valores oscilaron entre 6,57 y 7,97 (Tabla 3), indicando condiciones predominantemente neutras a ligeramente alcalinas. Este comportamiento es típico de aguas subterráneas en contacto con materiales carbonatados y sugiere una adecuada capacidad amortiguadora del sistema, asociada a la presencia de bicarbonatos y carbonatos. La presencia de estas especies químicas desempeña un papel fundamental en la regulación del



equilibrio ácido-base, proporcionando al sistema una elevada capacidad amortiguadora frente a variaciones externas, tales como la infiltración de aguas ácidas o la incorporación de contaminantes. Este efecto buffer es especialmente relevante en ambientes subterráneos, donde los tiempos de residencia del agua favorecen el establecimiento de equilibrios geoquímicos estables.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua subterránea y su comparación con límites normativos

Parámetro	Unidades	LMP	Referencia	Máximo	Mínimo	Promedio	DE
Color	UC Pt-Co	(5–15)	(1)	25	5	13	17,68
Turbidez	UNT	(1–5)	(1)	4,34	2,23	3,06	2,49
pH	—	(6–8,5)	(1)	7,55	6,65	6,99	1,27
Alcalinidad total	mg/L	(50–200)	(2)	300	181	207	161,22
Dureza total	mg/L	(250–500)	(1)	470	108	226	316,78
Dureza cálcica	mg/L	<100	(2)	91	46	69	49,5
Cloruros	mg/L	(250–300)	(1)	691,79	24,66	240,99	647,51
Sulfato	mg/L	<500	(3)	0,507	0,122	0,23	0,436
Fosfato	mg/L	<25	(2)	0,58	0,25	0,418	0,339
Coliformes totales	NMP/100 mL	Ausencia	(1)	280	Ausencia	46	15
Coliformes fecales	NMP/100 mL	Ausencia	(1)	9	Ausencia	6	1

LMP: Límite máximo permisible; UC-Pt-Co: Unidades de color platino cobalto; DE: Desviación Estándar; (1) Tomado de las Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable 36.395 (1998) (2) Tomado de los valores guía recomendados por las Normas Sanitarias de Costa Rica (Ministerio de Salud de Costa Rica, 2015) (3) Tomado de los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018).

Asimismo, los valores observados indican condiciones favorables para la solubilidad y movilidad de diversos elementos químicos. En rangos de pH cercanos a la neutralidad, muchos metales presentan menor solubilidad, lo que reduce su biodisponibilidad y potencial toxicidad. Sin embargo, este mismo rango puede favorecer la persistencia de ciertos contaminantes microbiológicos, lo que resalta la necesidad de evaluar el pH en conjunto con otros parámetros de calidad del agua (Samira y Azzeddine, 2024).

La alcalinidad total presentó valores entre 154 y 300 mg CaCO₃/L, lo que confirma la capacidad buffer del agua y sugiere una fuerte influencia de procesos de disolución de minerales carbonatados (Alves et al., 2021). De manera similar, la dureza total mostró un rango amplio (108 a 470 mg CaCO₃/L), clasificando estas aguas desde moderadamente duras hasta muy duras. Este comportamiento se encuentra estrechamente relacionado con la dureza cálcica, cuyos valores alcanzan hasta 190 mg CaCO₃/L, evidenciando una predominancia de calcio como catión principal, posiblemente derivado de la interacción agua-roca.

Los valores de cloruros presentaron una variabilidad considerable (25 a 692 mg/L), destacando concentraciones elevadas en algunos pozos (por ejemplo, pozos 14, 15 y 16). Estas altas concentraciones pueden asociarse a procesos de intrusión salina, contaminación antrópica (aguas residuales o lixiviados), o evaporación en zonas con baja recarga hídrica (Colmenero-Chacón et al., 2023).

En cuanto a los sulfatos, las concentraciones fueron relativamente bajas (0,122 a 0,507 mg/L), lo que sugiere una limitada influencia de procesos de oxidación de sulfuros o aporte de fuentes industriales. Este comportamiento indica que el sistema no presenta una carga significativa de compuestos sulfatados (Chen et al., 2024). Los ortofosfatos presentaron valores entre 0,230 y 0,577 mg/L, lo cual podría estar asociado a aportes difusos provenientes de actividades agrícolas o infiltración de aguas residuales domésticas (Cardoso et al., 2025).



Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del agua subterránea en los pozos evaluados

Pozo	Color real	Turbidez	pH	Alcalinidad total	Dureza total	Dureza cálcica	Cloruros	Sulfatos	Ortofosfatos
	U Pt-Co	UNT		mg CaCO ₃ /L	mg CaCO ₃ /L	mg CaCO ₃ /L	mg/L	mg/L	mg/L
1	10	2,45	7,27	241	179	61	101	0,211	0,426
2	10	3,07	7,97	207	188	74	153	0,205	0,357
3	15	2,8	7,55	213	122	48	29	0,192	0,577
4	10	3,25	7,1	195	131	52	93	0,141	0,411
5	10	2,83	7,09	300	318	82	620	0,364	0,323
6	25	2,79	6,99	205	156	73,5	79	0,163	0,400
7	10	2,64	6,86	215	129	51	69	0,137	0,456
8	10	2,36	7,16	203	108	46	25	0,234	0,528
9	7,5	2,5	7,02	205	168	71,5	168	0,387	0,408
10	5	2,23	7,07	227	220	74	120	0,155	0,396
11	12,5	3,45	6,65	186	218	86,5	157	0,122	0,430
12	25	3,52	6,66	199	163	68,5	105	0,507	0,449
13	12,5	4,01	6,99	191	231	77,5	191	0,374	0,432
14	7,5	3,36	6,66	183	428	91	654	0,153	0,250
15	15	4,34	6,87	181	373	71	585	0,178	0,353
16	5	3,21	6,74	198	470	89	692	0,156	0,357
17	20	3,15	7,18	197	235	48	135	0,134	0,471
18	15	2,68	6,57	154	223	190	37	0,360	0,230

La turbidez mostró valores relativamente bajos (2,23 a 4,34 UNT), lo cual indica una baja presencia de sólidos suspendidos y una buena calidad física del agua en términos de claridad. Sin embargo, algunos pozos presentan valores cercanos al límite recomendado para consumo humano, lo que sugiere la necesidad de tratamiento previo. El color real varió entre 5 y 25 unidades Pt-Co, evidenciando en algunos casos la presencia de materia orgánica disuelta o compuestos metálicos como hierro o manganeso, lo cual podría afectar la aceptabilidad del agua para consumo.

Los resultados indican que existe una dominancia de procesos geoquímicos naturales (disolución de carbonatos) que controlan parámetros como pH, alcalinidad y dureza, se identifican posibles focos de contaminación o salinización en función de los elevados niveles de cloruros en ciertos pozos.

En términos de coliformes totales, se observa que varios pozos presentan concentraciones detectables, con valores que oscilan entre 1,5 y 280 NMP/100 mL. Destacan particularmente los pozos 14 (280 NMP/100 mL) y 17 (240 NMP/100 mL), seguidos por el pozo 1 (112 NMP/100 mL), lo cual evidencia una contaminación microbiológica significativa (Tabla 4). Estos niveles son indicativos de la presencia de materia orgánica y posibles infiltraciones de origen antrópico, como aguas residuales domésticas, lixiviados o deficiencias en sistemas de saneamiento cercanos. Por otro lado, varios pozos (2, 7, 9 y 10) reportan ausencia de coliformes totales, lo que sugiere condiciones de mayor protección natural del acuífero o menor influencia de fuentes contaminantes (Echeverría et al., 2025)

Tabla 4. Indicadores microbiológicos (coliformes totales y fecales) en muestras de agua subterránea

Pozo	Coliformes totales	Coliformes fecales
1	112	7,5
2	Ausencia	Ausencia
3	2	17
4	8	4
5	20	Ausencia



6	12,5	Ausencia
7	Ausencia	Ausencia
8	6	<2
9	Ausencia	Ausencia
10	Ausencia	Ausencia
11	23	Ausencia
12	4	Ausencia
13	4	Ausencia
14	280	Ausencia
15	29	Ausencia
16	4	Ausencia
17	240	Ausencia
18	1,5	Ausencia

Respecto a los coliformes fecales, su presencia es más limitada, detectándose en menor número de pozos y en concentraciones relativamente bajas, con valores entre 0 y 17 NMP/100 mL. El pozo 3 presenta el valor más alto (17 NMP/100 mL), seguido por el pozo 1 (7,5 NMP/100 mL) y el pozo 4 (4 NMP/100 mL) (Tabla 4). La detección de coliformes fecales es especialmente relevante, ya que constituye un indicador específico de contaminación de origen fecal reciente, lo cual implica un mayor riesgo sanitario asociado a la posible presencia de patógenos entéricos.

Los resultados muestran que existe una afectación microbiológica heterogénea del acuífero, con pozos que cumplen condiciones sanitarias y otros que presentan contaminación significativa. La presencia de coliformes fecales en varios puntos indica riesgo sanitario directo, limitando el uso del agua para consumo humano sin tratamiento.

La evaluación de la calidad del agua subterránea mediante los tres índices aplicados (ICA-AP, ICA-CCME e ICA-Bhargava) evidenció diferencias sustanciales en la clasificación de los 18 pozos analizados, lo que refleja la sensibilidad y enfoque metodológico de cada índice. En términos generales, el ICA-AP mostró una tendencia a clasificar la mayoría de los pozos en condiciones favorables, predominando la categoría “buena” (72,2%) y “excelente” (5,6%), mientras que un grupo reducido fue clasificado como “pobre” (16,7%) y “muy pobre” (5,6%). Este comportamiento sugiere una posible sobreestimación de la calidad del agua, atribuible a la naturaleza del índice, el cual se basa principalmente en parámetros fisicoquímicos y no incorpora de manera explícita variables microbiológicas (N et al., 2022; G. et al., 2022)

Tabla 5. Clasificación de la calidad del agua subterránea en los 18 pozos evaluados mediante los índices ICA-AP, ICA-CCME e ICA-Bhargava

Pozo	ICA-AP	Clasificación AP	ICA-CCME	Clasificación CCME	ICA-Bhargava	Clasificación Bhargava
1	78,4	Buena	70	Justa	49	Media
2	64,2	Buena	85	Buena	65	Buena
3	52,1	Buena	88	Buena	68	Buena
4	71,3	Buena	72	Justa	50	Media
5	182,6	Pobre	65	Justa	47	Media
6	66,8	Buena	80	Buena	60	Media
7	59,7	Buena	83	Buena	66	Buena
8	48,9	Excelente	87	Buena	67	Buena
9	85,2	Buena	78	Justa	64	Media
10	74,6	Buena	82	Buena	65	Buena
11	92,3	Buena	70	Justa	52	Media
12	81,7	Buena	75	Justa	55	Media



13	96,5	Buena	73	Justa	53	Media
14	198,4	Pobre	52	Marginal	40	Media
15	176,2	Pobre	55	Marginal	45	Media
16	205,7	Muy pobre	50	Marginal	44	Media
17	88,1	Buena	68	Justa	50	Media
18	73,5	Buena	80	Buena	66	Buena

Para el ICA-AP, los valores se interpretan como excelente (< 50), buena (50–100), pobre (100–200), muy pobre (200–300) y no apta para consumo humano (> 300). En el caso del índice ICA-CCME, la calidad del agua se clasifica como excelente (95–100), buena (80–94), justa (60–79), marginal (45–59) y mala (0–44). Por su parte, el índice de Bhargava presenta una escala más estricta, categorizando el agua como excelente (90–100), buena (65–89), media (35–64), inadecuada (11–34) y muy mala (1–10)

Por su parte, el ICA-CCME presentó una distribución más conservadora, con una mayor proporción de pozos clasificados como “justa” (44,4%) y “marginal” (16,7%), además de un menor número en categoría “buena” (38,9%). Este resultado evidencia la capacidad del índice para identificar incumplimientos normativos de manera más integral, al considerar no solo la magnitud, sino también la frecuencia y extensión de las desviaciones respecto a los límites permisibles. En particular, los pozos 14, 15 y 16 fueron consistentemente clasificados en condiciones marginales, indicando un deterioro significativo de la calidad del agua (Cancho et al., 2025)

En contraste, el ICA-Bhargava mostró una evaluación aún más restrictiva, con la mayoría de los pozos clasificados en la categoría “media” (66,7%), mientras que solo un grupo reducido alcanzó la categoría “buena” (33,3%). Este comportamiento responde a la inclusión de parámetros microbiológicos en su formulación, los cuales tienen un peso significativo dentro de las funciones de sensibilidad. En este sentido, la presencia de coliformes totales y fecales influye directamente en la reducción del índice, reflejando de manera más realista el riesgo sanitario asociado al consumo del agua (Lora-Ariza et al., 2024; Boglione et al., 2023)

La Figura 2 muestra la comparación de los índices de calidad del agua para los pozos analizados. Los pozos 14, 15 y 16 emergen como puntos críticos en los tres enfoques evaluados, evidenciando condiciones de calidad deficientes de manera consistente. Este patrón coincide con los resultados fisicoquímicos y microbiológicos previamente discutidos, lo que refuerza la confiabilidad del análisis y sugiere la presencia de fuentes de contaminación localizadas, posiblemente asociadas a actividades antropogénicas o condiciones hidrogeológicas específicas.

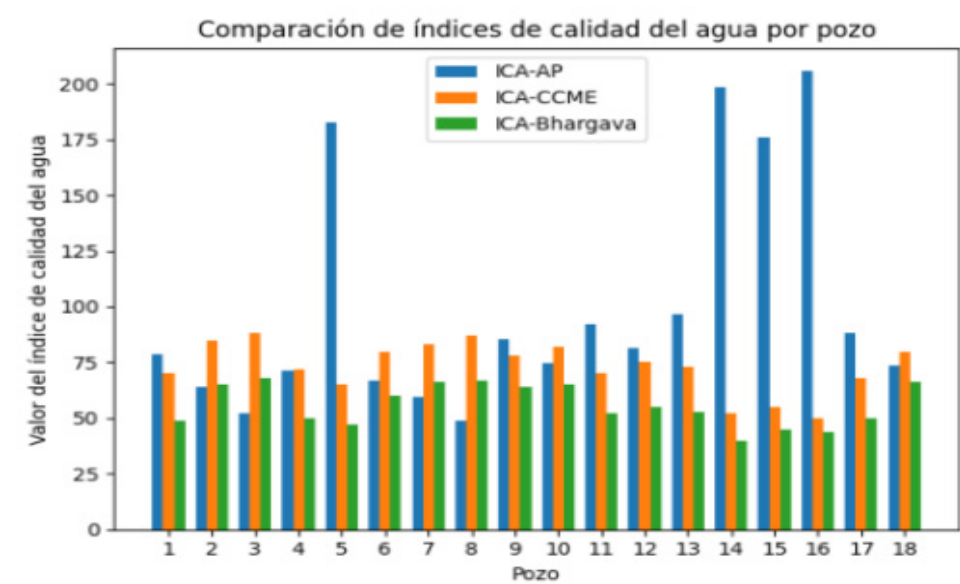


Figura 2. Comparación de índices de calidad del agua por pozo

El diagrama de caja presentado en la Figura 3 evidenció la presencia de valores atípicos en el índice ICA-AP, asociados a valores elevados en algunos pozos, lo que indica condiciones críticas de calidad del agua. Estos *outliers* reflejan la heterogeneidad del sistema acuífero y la existencia de focos de contaminación localizados. En contraste, los índices ICA-CCME y ICA-Bhargava presentaron una distribución más homogénea, evidenciando una menor sensibilidad a valores extremos.

La implementación de la estrategia didáctica basada en el uso de índices de calidad del agua permitió evidenciar una alta participación de los estudiantes y un adecuado desarrollo del trabajo colaborativo. La organización en equipos facilitó la discusión de resultados y la construcción colectiva del conocimiento, promoviendo la interacción entre los participantes durante el análisis de los datos.

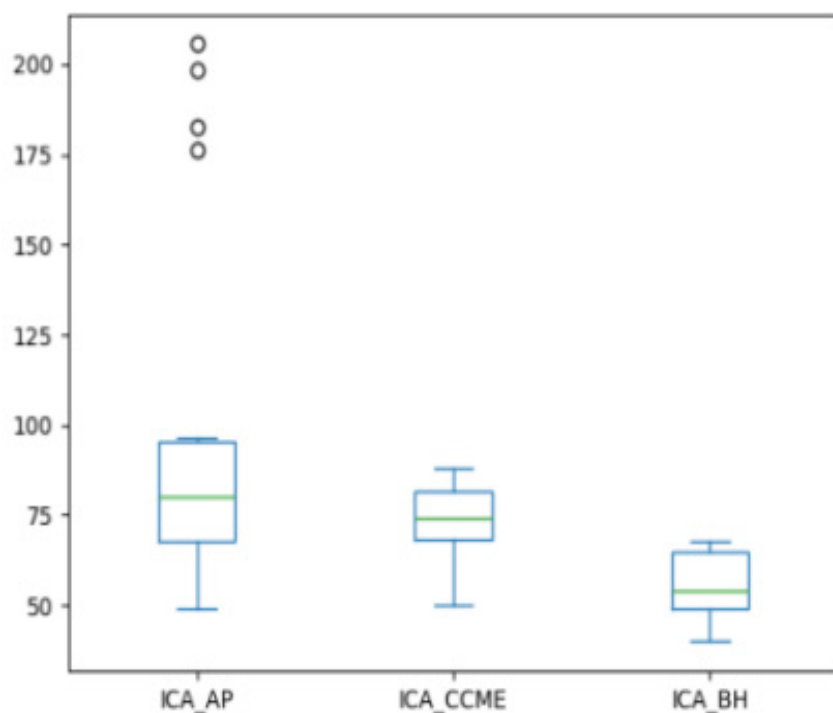


Figura 3. Comparación de índices de calidad del agua por pozo

La Figura 4 muestra la relación entre el índice ICA-CCME y el ICA-Bhargava, evidenciando una correlación positiva entre ambos enfoques. Los datos se agrupan en función de las categorías del ICA-CCME, observándose que los valores clasificados como “buena”, “justa” y “marginal” presentan comportamientos diferenciados en el índice Bhargava. No obstante, este último muestra una menor dispersión, lo que sugiere una mayor estabilidad en la evaluación de la calidad del agua. Estas diferencias reflejan la naturaleza metodológica de cada índice, donde el ICA-CCME responde al cumplimiento normativo, mientras que el ICA-Bhargava enfatiza el impacto sanitario de los parámetros evaluados.

El análisis de agrupamiento jerárquico permitió identificar patrones de similitud entre los pozos evaluados (Figura 5), evidenciando la existencia de grupos claramente diferenciados en función de la calidad del agua. Se observó la formación de conglomerados con características homogéneas, destacándose un subconjunto de pozos con condiciones críticas, caracterizados por concentraciones elevadas de cloruros y valores reducidos en los índices de calidad del agua, particularmente en el ICA-Bhargava y el ICA-CCME.

Estos resultados sugieren la presencia de procesos de contaminación localizados, posiblemente asociados a intrusión salina, lixiviación de suelos o actividades antrópicas como disposición inadecuada de aguas residuales. La agrupación de estos pozos dentro de un mismo clúster refuerza la hipótesis de una fuente común o de

condiciones hidrogeológicas similares que favorecen la acumulación de sales y la degradación de la calidad del agua.

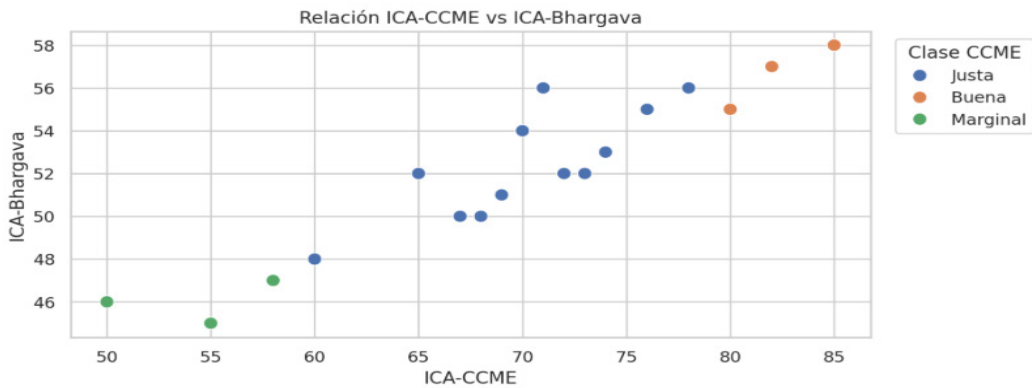


Figura 4. Relación entre los índices de calidad del agua ICA-CCME e ICA-Bhargava en pozos de agua subterránea

Adicionalmente, el análisis de agrupamiento pone en evidencia la heterogeneidad espacial del sistema acuífero, indicando que la calidad del agua no es uniforme y que existen zonas con distintos niveles de vulnerabilidad. Esta variabilidad puede estar influenciada por factores como la geología local, la profundidad del acuífero, la dinámica de recarga y la interacción con actividades humanas. En este sentido, los clústeres identificados pueden interpretarse como unidades hidrogeoquímicas con comportamientos diferenciados.

Por otra parte, la correspondencia observada entre los grupos definidos por el clustering y las clasificaciones obtenidas mediante los índices de calidad del agua confirma la consistencia interna del análisis. En particular, los pozos agrupados como críticos coinciden con aquellos clasificados como “marginal” en el ICA-CCME y “media” en el ICA-Bhargava, lo que refuerza la validez de estos índices como herramientas de evaluación integradas.

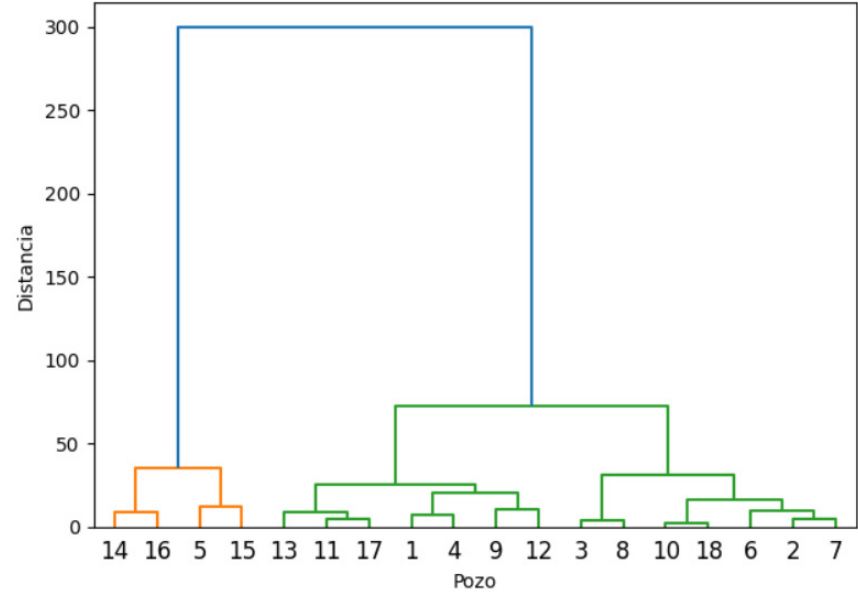


Figura 5. Relación entre los índices de calidad del agua ICA-CCME e ICA-Bhargava para los pozos evaluados

Durante la actividad, los estudiantes lograron aplicar correctamente los procedimientos para el cálculo de los diferentes índices de calidad del agua (ICA-AP, ICA-CCME e ICA-Bhargava), evidenciando comprensión de las variables involucradas y de las ecuaciones utilizadas. Asimismo, se observó una adecuada interpretación de los resultados

obtenidos, destacándose la capacidad de los estudiantes para identificar diferencias entre los índices y reconocer la influencia de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en la calidad del agua (Tabla 6).

Tabla 6. Distribución de frecuencias de las respuestas Likert (1–2, 3 y 4–5) según dimensiones de aprendizaje

Dimensión	1–2 (%)	3 (%)	4–5 (%)
Comprensión	2%	10%	88%
Análisis	3%	12%	85%
Pensamiento crítico	5%	15%	80%
Interpretación ambiental	2%	8%	90%
Aprendizaje activo	1%	5%	94%

En relación con el análisis ambiental, los estudiantes fueron capaces de identificar posibles fuentes de contaminación en los pozos evaluados, asociando valores elevados de cloruros con procesos de intrusión salina o contaminación antropogénica, y la presencia de coliformes con riesgos sanitarios vinculados a deficiencias en infraestructura o manejo de aguas residuales. Este proceso evidenció un avance en la comprensión sistémica de la problemática ambiental.

El rol del docente como facilitador contribuyó significativamente al desarrollo de la actividad, orientando el proceso sin intervenir de manera directa en la resolución, lo que permitió a los estudiantes desarrollar autonomía en la toma de decisiones y en la formulación de hipótesis basadas en evidencia. (Sattler et al., 2025)

La evaluación de la estrategia didáctica evidenció un fortalecimiento significativo de competencias clave en los estudiantes, particularmente en el análisis de datos, la interpretación de indicadores ambientales y la toma de decisiones fundamentadas.

Desde el enfoque cuantitativo, los resultados del desempeño académico mostraron una mejora en la capacidad de los estudiantes para calcular e interpretar los índices de calidad del agua, evidenciada en la precisión de los resultados obtenidos y en la correcta clasificación de la calidad del recurso hídrico. Asimismo, se observó una reducción en errores conceptuales relacionados con la interpretación de parámetros individuales, lo que indica una mayor comprensión integral del sistema (Montero et al., 2024; Martins et al., 2024)

Desde el enfoque cualitativo, la observación del proceso de resolución de problemas permitió identificar un desarrollo progresivo del pensamiento crítico, reflejado en la capacidad de los estudiantes para comparar los resultados entre distintos índices, cuestionar las

diferencias obtenidas y argumentar sus conclusiones en función del contexto ambiental (Musah y Wangila, 2024).

Adicionalmente, los estudiantes demostraron habilidades para interpretar la información desde una perspectiva ambiental, estableciendo relaciones entre los resultados obtenidos y sus implicaciones en términos de salud pública y sostenibilidad. Este aspecto es particularmente relevante en la formación de ingenieros ambientales, donde la toma de decisiones debe considerar múltiples dimensiones del problema.

Los resultados obtenidos evidencian que la estrategia pedagógica basada en el uso de datos reales y herramientas analíticas como los índices de calidad del agua favorece el aprendizaje activo y el desarrollo de competencias fundamentales para el ejercicio profesional en el ámbito ambiental (James et al., 2025).

CONCLUSIONES

La aplicación de los índices de calidad del agua (ICA-AP, ICA-CCME e ICA-Bhargava) permitió evidenciar diferencias significativas en la evaluación del recurso hídrico, destacándose el índice de Bhargava como el más restrictivo debido a la incorporación de parámetros microbiológicos, lo que proporciona una valoración más cercana al riesgo sanitario real.

Los resultados fisicoquímicos y microbiológicos confirmaron la heterogeneidad del sistema acuífero, identificándose pozos críticos asociados a procesos de salinización y contaminación antropogénica, lo que limita el uso del agua para consumo humano sin tratamiento previo.

Desde el enfoque educativo, la implementación de la estrategia basada en el uso de datos reales y el cálculo de índices de calidad del agua demostró ser altamente efectiva, favoreciendo el desarrollo de competencias clave como el análisis de datos, el pensamiento crítico y la interpretación ambiental en estudiantes de ingeniería.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexakis, D. E. (2024). Groundwater Quality and Human Health Risk. *Water*, 16(19), 2762. <https://doi.org/10.3390/w16192762>
- Alves, J., Lima, M., Dória, J., Silva, I., Monteiro, A. (2021). Hydrogeochemical characterization of reservoir waters undergoing salinization processes in Northeastern Brazil. *Brazilian Journal of Water Resources*, 26(24), 1-16 <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210043>
- American Public Health Association (APHA); American Water Works Association (AWWA); Water Environment Federation (WEF). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 24th ed.; American Public Health Association Press: Washington, DC, USA, 2022; pp. 1–1516.
- Boglionne, R., Griffa, C., Panigatti, M. C., Schierano, M. C., Meichtry, J. M., & Asforno, M. (2023). Groundwater quality index in central west region of Santa Fe province, Argentina. *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías*, 15(2), 14. <https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931>
- Cancho, E., Mendoza, T., Yallico-Calmett, R., Cahua, A., & Maytahuari, P. (2025). Calidad del agua subterránea y riesgo sanitario en el Centro Poblado Santiago, Ica, Perú. *Alfa*, 9(26), 752–765. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i26.379>
- Cardoso, S. B., Teramoto, E. H., Crioni, P. L. B., & Kiang, C. H. (2025). Qualidade das águas subterrâneas de aquíferos rasos no município de Rio Claro (SP): influência de processos naturais e antrópicos. *Derbyana*, 46. <https://doi.org/10.69469/derb.v46.872>
- Casillas, J. (2018). *Propuesta de un sistema de potabilización de aguas subterráneas para el sector La Macanilla del municipio La Cañada de Urdaneta, estado Zulia* [Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, División de Estudios para Graduados, Maracaibo, Venezuela].
- CCME. (2017). *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life. CCME water quality index user's manual. Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME). <https://ccme.ca/en/res/wqjimanualen.pdf>
- Chaves Fortes, A C., Guimarães Barrocas, P. R., & Cynamon Kligerman, D. (2023). Water quality indices: Construction, potential, and limitations. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111187>
- Chen, X., Li, G., Xie, F. (2024). Tracing sulfate sources and transformations of surface water using multiple isotopes in a mining-rural-urban agglomeration area. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269, 115805. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115805>
- Colmenero-Chacón, C., Morales de Avila, H., Gutiérrez, M., Esteller-Alberich, M., Alarcón-Herrera, M. (2023). Enrichment and Temporal Trends of Groundwater Salinity in Central Mexico. *Hydrology*, 10(10), 194. <https://doi.org/10.3390/hydrology10100194>
- Dwivedi, R., & Dubey, A. (2023). A review of water quality index (WQI) assessment methods. *International Journal Of Chemical Research and Development*, 5(2), 24–27. <https://doi.org/10.33545/26646552.2023.v5.i2a.51>
- Echeverría, I., Mamani, O., & Saavedra, O. (2025). Caracterización hidro geoquímica e índice de calidad del agua subterránea en el Valle Bajo de Cochabamba, Bolivia. *Revista Investigación y Desarrollo*, 25(1), 119–132. <https://doi.org/10.23881/idupbo.025.1-10i>
- James, F., Ibrahim, F. B., Otun, J., Ajayi, O. A., Ameh, G., & Oyedeji, A. N. (2025). Modifying water quality monitoring laboratory experience: a comparative analysis of in-person vs. online delivery for environmental engineering students. *Disciplinary And Interdisciplinary Science Education Research*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s43031-025-00139-7>
- Kumar, D., Kumar, R., Sharma, M., Awasthi, A., & Kumar, M. (2023). Global water quality indices: Development, implications, and limitations. *Total Environment Advances*, 9, 200095. <https://doi.org/10.1016/j.teadv.2023.200095>
- Lora-Ariza, B., Piña, A., Donado, L., Vaca, M. (2024). *Groundwater quality assessment for human consumption. A case study of the Middle Magdalena Valley –Colombia.*, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-13760, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-13760>
- Marín, J., Olivar, A., Sarcos, V., & Gutiérrez, J. (2023). Comparación de índices de calidad de agua para consumo humano en pozos profundos del municipio Miranda (Zulia, Venezuela). *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 63(1), 166–178
- Martins, M., Maia, M., Morais, S., Barbosa, M., Quintela, T., Miranda, P., Filho, J., Filho, J., Rocha, M., & Sousa, F. (2024). O ensino de química ambiental usando a experimentação investigativa sobre a temática poluição das águas em poços. *Lumen et Virtus*, 15(41), 5620–5646. <https://doi.org/10.56238/levv15n41-054>
- Montero, D. M., Gómez, G. Z., & Escobar, H. M. R. (2024). La Investigación como Estrategia Pedagógica (IEP) en la conservación del recurso hídrico. *Huellas Revista*, 10(2). <https://doi.org/10.22267/huellas.24102.18>
- Ministerio de Salud de Costa Rica. (2015). *Reglamento para la calidad del agua potable* (Decreto Ejecutivo N.º 38924-S). Gobierno de Costa Rica. https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=117
- Musah, E., & Wangila, C. (2024). Inquiry-based Ethnoecological Conservation Approach to Improve Students' Critical Thinking Skills. *International Journal of Ethnoscience And Technology In Education*, 1(2), 97. <https://doi.org/10.33394/ijete.v1i2.11240>

- Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable (1998). *República de Venezuela, Ministerio de Sanidad y Asistencia Social*. Gaceta Oficial N.º 36.395, 13 de febrero de 1998. <https://observatorioguayana.ucab.edu.ve/wp-content/uploads/2024/06/NORMAS-SANITARIAS-DE-CALIDAD-DEL-AGUA-POTABLE.pdf>
- Organización mundial de la salud, OMS. (2018). *Guías para la calidad de consumo humano. 4a edición. Organización Mundial de la Salud (OMS)*. Ginebra, Suiza. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?ua=1> (Acceso febrero 2026)
- Rocha, V., Silva, O., Vendramel, S., & De Souza, A. (2024). Educação ambiental na prática: utilizando a avaliação da qualidade da água de um rio próximo à escola como ferramenta de aprendizagem para estudantes do ensino médio. *Revista de Gestão E Secretariado (Management And Administrative Professional Review)*, 15(5), e3706. <https://doi.org/10.7769/gesec.v15i5.3706>
- Samira, Z., Azzeddine, R. (2024). Assessing groundwater quality in northern Algeria using geochemical and index approaches. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, 5(2), e11733–e11733. <https://doi.org/10.54021/seesv5n2-669>
- Sattler, E., Gonçalves, P., Mancini, K. (2025). Ressignificando ideias e construindo o conhecimento científico no ensino médio pelo estudo da água. *Revista Guarará*, 18, 21-35. <https://doi.org/10.30712/guara.v1i18.44467>
- Vallejo, U., & Bustamante, V. (2024). Competencias de sostenibilidad en la educación de ingenierías. *Espacios*, 45(6), 1-11. <https://doi.org/10.48082/espacios-a24v45n06p01>
- Zhou, P., Zhang, Q., Zhang, F., Li, Z. (2025). Sustainable Water Resource Management: Challenges and Opportunities. *Environments*, 12(8), 268–268. <https://doi.org/10.3390/environments12080268>