

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA EN EL EMBALSE GÜIRABO

CALCULATION OF THE WATER QUALITY INDEX IN THE GÜIRABO

RESERVOIR

Marilin Martínez-Almira¹; correo: marilin.martinez@hlg.giat.cu <https://orcid.org/0009-0004-8182-3419>

Sara Fernández-Cruz² correo: capumafc@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-9246-5240>

Jorge Luis Bosch-Ortiz³ correo: jboschortiz73@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1857-9551>

Institución de los autores

¹ Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Holguín. Cuba

² Universidad de Holguín. Cuba

³ Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos de Holguín. Cuba

RESUMEN

Elevar la calidad de los diagnósticos de la calidad del agua de los embalses, a través del perfeccionamiento de las metodologías actualmente empleadas constituye una de las prioridades de los especialistas dedicados al estudio de los recursos hídricos. El objetivo de esta investigación es proponer una metodología para la valoración del Índice de la Calidad del Agua (ICA) en el embalse Güirabo, en la que se incluyen los parámetros NO₃ y Turbiedad. Se aplicaron diferentes métodos científicos de investigación y para la definición de estos parámetros se utilizó el software AHP. Como resultado se tiene una metodología más robusta y validada, considerada un medio eficaz y práctico para una mejor evaluación del ICA.

Palabras clave: calidad del agua, Índice de la Calidad del Agua ICA, diagnóstico de la calidad del agua.

ABSTRACT

Improving the quality of water quality diagnoses in reservoirs by improving the methodologies currently used is one of the priorities of specialists dedicated to the study of water resources. The objective of this research is to propose a methodology

for the assessment of the Water Quality Index (WQI) in the Güirabo reservoir, which includes the parameters NO₃ and Turbidity. Different scientific research methods were applied and the AHP software was used to define these parameters. The result is a more robust and validated methodology, considered an effective and practical means for a better assessment of the WQI.

Keywords: water quality, Water Quality Index ICA, water quality diagnosis.

INTRODUCCIÓN

El índice de Calidad del Agua (ICA), es un método muy usado que expresa en una cifra la calidad del recurso hídrico mediante la integración de las mediciones de determinados parámetros de calidad del agua. Según aseveran Fernández y Guardado (2021), constituye una de las mejores herramientas para calcular el potencial de contaminación de forma comprensiva; y puede utilizarse para clasificar la calidad del agua de una forma fácil de entender para todo criterio científico de calidad del agua. Es por ello que se ha convertido en un instrumento esencial para los decisores y especialistas a la hora de hacer un manejo responsable de los recursos hídricos.

Según referencias de Castro et al, (2014), el método es un indicador compuesto que integra información de varios parámetros de la calidad del agua. Plantean además, que es una herramienta matemática que puede ser utilizada para transformar grandes cantidades de datos sobre la calidad del agua en una escala de medición única.

Sin embargo, no se tiene una metodología que considere de forma consensuada y única los elementos para el cálculo del ICA, es decir, cada territorio ha desarrollado sus propios métodos de cálculo en correspondencia a sus condiciones e intereses. De forma general la aplicación del cálculo del ICA ha sido mayormente utilizada para describir y diagnosticar la calidad del agua en las cuencas hidrográficas, no así en el agua embalsada como fuente receptora.

A pesar de que los elementos que se han adoptado para el cálculo del ICA incluyen parámetros pertinentes como son el pH, la Conductividad eléctrica (CE), el Oxígeno disuelto con respecto a la saturación (ODSAT), la Demanda química de oxígeno (DQO) y los Coliformes fecales (CF), no son lo suficientemente abarcadores a la hora de evaluar el ICA, y no describen en su totalidad todos los fenómenos que

repercuten en la calidad de las aguas de los embalses. Este aspecto es una limitante para hacer una valoración integral y cualitativa de las causas que provocan la contaminación de las aguas en un embalse; máxime cuando se trata de embalses cuyas áreas tributarias sufren una fuerte presión antrópica como es el caso del embalse Güirabo

Es de señalar que el embalse Güirabo es una de las tres fuentes de abasto superficial con que cuenta la ciudad de Holguín, específicamente se encuentra vinculado al abasto de la zona sur de la ciudad de Holguín incluyendo la zona industrial, con una entrega garantizada de 10.2 Hm³. La cuenca tributaria del embalse se ubica al oeste de la ciudad de Holguín, es una cuenca muy antropizada con una alta presencia de núcleos urbanos que le ejercen una fuerte presión. Son varios los factores que inciden de forma desfavorable en la calidad de sus recursos, ejemplo de ello es:

- Considerable volumen de agua trasvasada que recibe este embalse desde el río Cauto la cual contiene altos niveles de Sales Solubles Totales.
- En áreas de la cuenca tributaria se identificaron 15 focos contaminantes activos que en mayor o menor medida inciden y afectan la calidad de este cuerpo de agua (Dirección Técnica EAAH, 2023).
- Se localizan numerosos asentamientos poblacionales que le aportan residuales líquidos y sólidos que son potenciales contaminantes y han degradado la calidad del agua hasta el punto que en ocasiones se ha notado fetidez y turbidez en el embalse.

Hay que tener en cuenta que el agua contaminada representa un peligro para el medio, y no se puede permitir que las reservas hídricas degraden su calidad, por lo que se debe llevar un control adecuado sobre presas, ríos, lagos, aguas subterráneas y principalmente sobre las fuentes contaminantes que vierten a estos sitios (Morales y Villagómez, 2014).

Por su parte Fernández y Guardado (2021), refieren que los cuerpos de agua superficiales en su gran mayoría presentan una alteración en su calidad causada por las descargas que reciben de las actividades domésticas e industriales, que influyen de alguna manera en la salud humana y en aspectos socioeconómicos de las poblaciones adyacentes.

Actualmente los especialistas de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Holguín diagnostican y controlan la calidad del agua del embalse a través de la Red de Calidad de las Aguas Terrestres. Sin embargo, estos monitoreos de diagnóstico y control que se realizan no son suficientemente representativos, en primer lugar son muy puntuales, y en segundo lugar a la hora de aplicar el Índice de Calidad de las aguas se limitan a medir algunos parámetros físico-químicos de las aguas sin hacer un profundo análisis de las incidencias de otros factores que intervienen en la calidad de las aguas. De esta forma dada las insuficiencias identificadas en el cálculo del ICA en el embalse Güirabo, el objetivo propuesto en este artículo se relaciona con el diseño de una herramienta para el cálculo del ICA más potente y representativa que abarque elementos que no se tienen en cuenta actualmente y que son de gran importancia para el diagnóstico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño de la propuesta metodológica tuvo tres momentos esenciales:

- I. Establecer los criterios de selección de los parámetros para el ICA
- II. Identificar y definir los parámetros para el cálculo del ICA
- III. Elaborar el procedimiento metodológico para su aplicación.

En el desarrollo de la investigación, se utilizaron métodos teóricos, empíricos y estadísticos, para definir la posición jerárquica de cada uno de los indicadores se aplicó el método de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés Analytic Hierarchy Process), el cual está diseñado para resolver situaciones complejas donde intervienen criterios múltiples y cuyo patrón de selección está dado por el resultado del radio de consistencia RC, el cual debe ser menor que el 10%.

Se utilizó una base de datos de 10 años de monitoreos (2013-2023), que abarcó observación de la lluvia, las entregas del embalse, los aportes de agua recibidos del río Cauto, así como el control de los focos contaminantes identificados en el área de la cuenca tributaria.

RESULTADOS

Criterios de selección de los parámetros para el cálculo del ICA.

Los criterios para la selección de los parámetros a utilizar en el cálculo del ICA, se relacionan con los parámetros que definen la calidad del agua y los agentes contaminantes, según la NC: 1021/2014 higiene comunal-fuentes de abastecimiento

de agua- calidad y protección sanitaria y la NC 827/2017 Agua Potable-Requisitos Sanitarios.

Tabla 1. Límite máximo de los parámetros que definen la calidad del agua.

Características	Simbología	UM	Límite Máximo
Calcio	Ca	mg/l	200
Cloruro	Cl	mg/l	250
Potencial de Hidrógeno	pH	U.PH	6.5-9
Sodio	Na	mg/l	200
Sólidos Disueltos Totales	SDT	mg/l	1000
Sulfato	SO ₄	mg/l	400
Turbiedad		UNT	10
Coliformes Fecales	CF o CTT	NPM/100 ml	50
Nitrito	NO ₂	mg/l	0.3
Dureza Total	DT	mg/l	400
Magnesio	Mg	mg/l	150
COLOR U	Color	UC	15
Demanda Bioquímica Oxígeno	DBO ₅	mg/l	4
Nitrato	NO ₃	mg/l	45

Identificación de parámetros para el cálculo del ICA.

Para la propuesta de los parámetros a utilizar en el cálculo del ICA, se analizaron los 5 parámetros estándares establecidos en el cálculo del ICA, además 15 parámetros físicos y químicos representativos de la calidad del agua que pueden incidir en el resultado del ICA, así como la inclusión como un parámetro más a evaluar, al volumen del embalse y el total de la lluvia caída dado su implicación en los resultados. De todos los parámetros analizados se seleccionaron los que mayores alteraciones mostraron en los últimos 10 años de observación y además los que están establecidos por norma. En ese caso resultaron:

- Volumen del embalse
- Conductividad eléctrica CE
- pH
- Coliformes fecales CF
- Demanda Química de Oxígeno DQO
- Oxígeno disuelto OD
- Nitrato NO₃,
- Turbiedad.

En los gráficos siguientes se muestran los resultados.

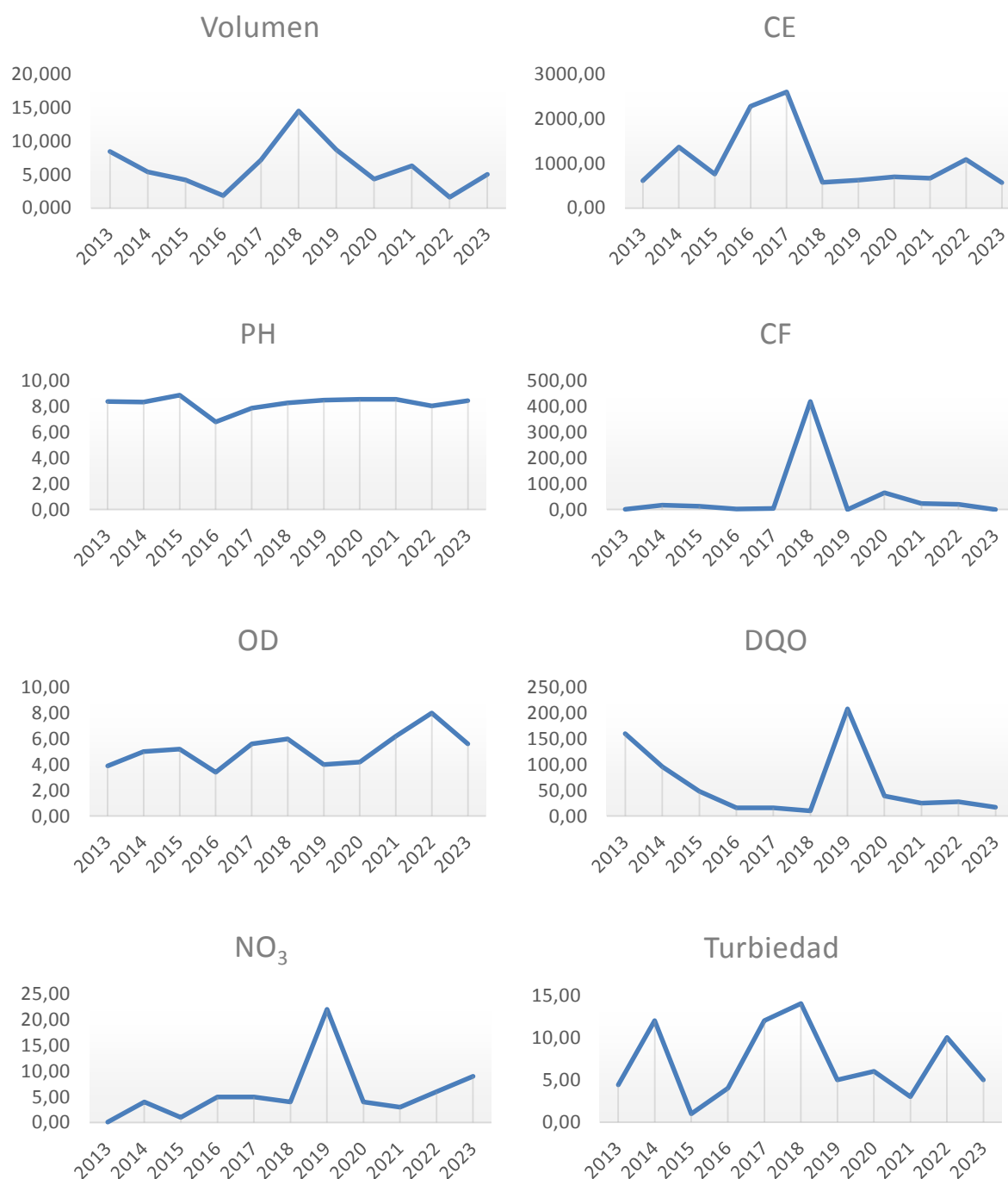


Figura 1. Gráficos de comportamiento de los parámetros: Volumen del embalse, Conductividad eléctrica CE, pH, Coliformes fecales CF, Demanda Química de Oxígeno DQO, Oxígeno disuelto OD, Nitrato NO₃ y Turbiedad.

El análisis de los parámetros graficados muestra que:

- Se alcanzan picos de alteración de los parámetros NO₃, DQO, CF y CE asociado a los incrementos de volumen del embalse luego de una prolongada sequía la cual tiene como recurrencia entre 4 y 5 años, lo que demuestra que

los arrastres de los ríos y afluentes del embalse Güirabo son afectados por esto.

- El comportamiento del pH es estable con pocas variaciones en el tiempo sin interferencia notable de las variaciones de volumen.
- El OD presenta variaciones con pequeños incrementos del embalse asociado a los incrementos de volumen del embalse, ya sea provocado por las lluvias o por el aporte realizado con agua desde el Rio Cauto por efectos del bombeo del trasvase Cauto-Güirabo.
- Las variaciones de la turbidez reflejan correspondencia con las variaciones de la concentración de NO_3 , DQO, CF, CE y el Volumen del embalse.

Los resultados se evalúan sobre la base de las NC: 1021/2014 higiene comunal-fuentes de abastecimiento de agua- calidad y protección sanitaria y la NC 827/2017 Agua Potable-Requisitos Sanitarios. El Nitrato se evalúa por la NC 827/2017.

Definición de los parámetros para el cálculo del ICA.

A partir de la identificación de ocho parámetros para evaluar el ICA, se definió la posición jerárquica de cada una de ellos, lo cual facilitó la asignación de los pesos relativos de cada uno. Para llevar a cabo la jerarquización se aplicó de método de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), (Saaty, 1980). El CR resultante fue de 6.1%.

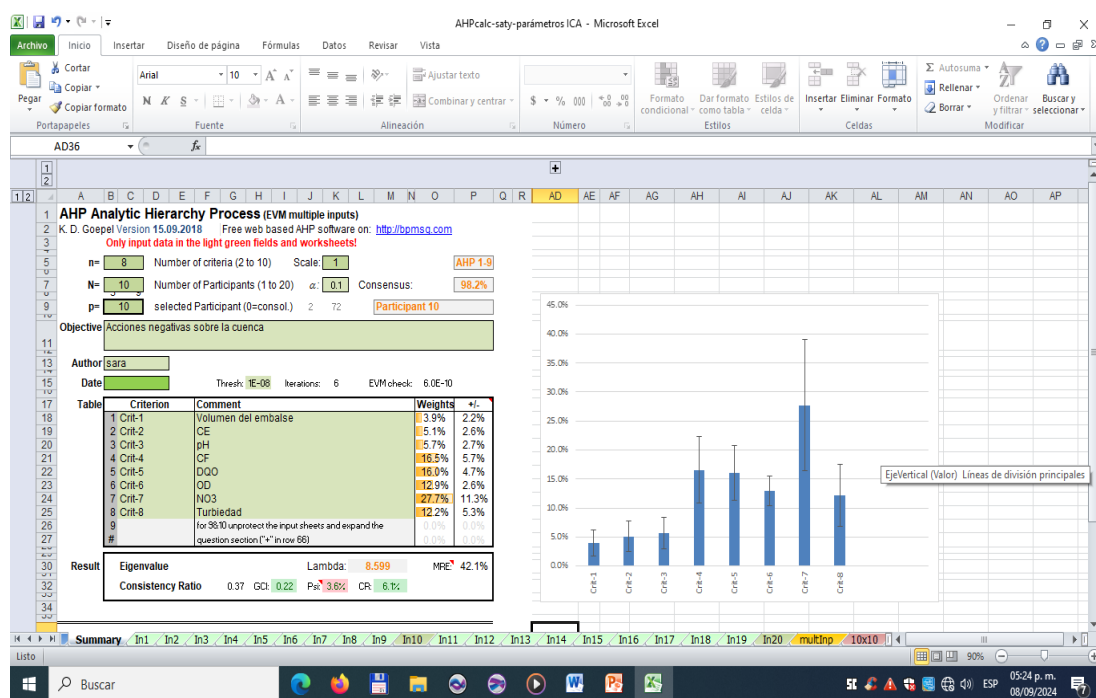


Figura 2. Aplicación de software del método AHP

Tabla 2. Parámetros resultantes según la aplicación del AHP

Criterio		Parámetro a evaluar	Pesos
1	Crit-1	Volumen del embalse	3.9%
2	Crit-2	CE	5.1%
3	Crit-3	pH	5.7%
4	Crit-4	CF	16.5%
5	Crit-5	DQO	16.0%
6	Crit-6	OD	12.9%
7	Crit-7	NO ₃	27.7%
8	Crit-8	Turbiedad	12.2%

Como puede observarse los parámetros según su importancia son 7: CE, pH, CF, DQO, OD, NO₃ y la turbiedad. El parámetro “volumen del embalse” es el que resultó de menos importancia debido a que es un parámetro que repercute en el comportamiento de los demás, por lo que no se consideró como un parámetro a evaluar ni a incluir en los cálculos.

En tanto los parámetros NO₃ y Turbiedad son los parámetros que se proponen para su inclusión en los cálculos.

El **NO₃** es el más representativo de los dos, esta condición tiene su explicación en grandes contenidos de materia orgánica. En este sentido, en el embalse Güirabo uno de los factores que influyen en las variaciones de las concentraciones de NO₃, es la presencia de materia orgánica producto de los arrastres de las avenidas de los ríos, además de los vertimientos de tipo doméstico, así como la existencia de 15 focos contaminantes que se ubican en el área de la cuenca tributaria del embalse.

La **Turbiedad**, es el otro parámetro propuesto para su inclusión en el cálculo del ICA, su presencia es producto de la erosión y arrastre, ya sea de partículas en suspensión, sólidos disueltos en el agua o material transportado como carga de fondo. Estas partículas son de diferentes orígenes, algunas son de naturaleza inorgánica (arcillas, fangos y óxidos minerales), que provienen de la erosión del suelo, otras son de naturaleza orgánica (bacterias, parásitos, algas, zooplancton, ácidos fúlvicos y coloides húmicos). Además de las fuentes naturales, las actividades humanas generan efluentes cargados de estas partículas y el aporte de otras sustancias que pueden combinarse con ellas (virus entéricos, contaminantes químicos, cloro, etc) tanto en el cuerpo de agua como en las plantas y redes de distribución. (Marcó et al, 2004).

La turbidez del agua es uno de los parámetros más importantes en la calidad del agua de consumo humano. Un agua turbia no solamente tiene un impacto estético negativo para el consumidor, la turbidez es también un indicativo de una mayor probabilidad de contaminación microbiológica y por compuestos tóxicos, que se adhieren a la materia dispersa en el agua y consecuentemente, indica también una mayor dificultad para la desinfección efectiva del agua. Una alta turbidez significa un aumento del contenido bacteriano. (Mamani Maron, 2024).

Tabla 3. Indicadores de calidad de las aguas propuestos para el cálculo del ICA.

No.	Indicador	Comentarios
1	pH (pH).	Acidez o basicidad.
2	Conductividad eléctrica (CE)	Contenido de sales solubles o salinidad.
3	Oxígeno disuelto % saturación (ODSAT).	Estado del cuerpo de agua con respecto a su contenido de oxígeno disuelto.
4	Demanda química de oxígeno, método del dicromato (DQO).	Materia orgánica presente. .
5	Coliformes Termotolerantes o fecales (CF).	Densidad de bacterias fecales.
6	Nitratos (NO ₃)	Contaminación por compuestos nitrogenados
7	Turbiedad	Contaminación microbiológica y por compuestos tóxicos

Los pesos relativos de cada indicador (Tabla 4), fueron asignados según el nivel de importancia resultado del AHP.

Tabla 4. Pesos relativos de los indicadores del ICA.

No.	Indicador	Pesos relativos
1	pH (pH)	0.05
2	Conductividad eléctrica (CE)	0.10
3	Oxígeno disuelto % con respecto a la saturación (ODSAT)	0.10
4	Demanda química de oxígeno (DQO)	0.20
5	Coliformes fecales (CF)	0.15
6	Nitrato (NO ₃)	0.25
7	Turbiedad	0.15
	Sumatoria	1.00

Procedimiento metodológico para la aplicación del ICA.

La metodología propuesta, debe estar sustentada en una red de monitoreo, con los datos de las observaciones del comportamiento de la lluvia, el nivel y la entrega del embalse en un período común de 10 años, considerando tanto el período seco como el húmedo. Además de tener en cuenta que este embalse recibe agua de la conductora Cauto – Güirabo cuando el mismo se encuentra en límite de llenado.

Cálculo del ICA: se llevará a cabo según recomendaciones de García y Gutiérrez (2015), considerando los 7 parámetros propuestos. El ICA es la sumatoria de los pesos relativos de cada indicador multiplicado por el valor de calidad obtenido mediante cada función matemática de relación.

$$ICA = \sum_{i=1}^7 W_i * q_i$$

Donde:

i: indicador de calidad, del 1 al 7.

W_i: peso relativo de cada indicador

q_i : valor en % obtenido de las funciones matemáticas de correlación

Análisis de los resultados del cálculo del ICA.

Los resultados del ICA presentan un valor único en el rango de valores de 0 a 100, el cual representa la calificación del estado de la calidad del agua. El resultado dependerá de la zona de ubicación de los puntos de monitoreo, ya que, a lo largo de la cuenca en tiempo y en espacio, son diversos los factores que alteran la calidad del agua. La evaluación de la calidad del agua se realiza a través de la comparación de los resultados del ICA donde intervienen un conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos con los valores establecidos. Se recomienda emplear la clasificación propuesta por García et al. (1983), en la que existen 5 categorías de calidad del agua.

Tabla 5. Clasificación de la calidad de las aguas de acuerdo al ICA

Clase	Rango de valores del ICA sp	Clasificación	Colores para representar
1	90.00-100.00	Excelente calidad (EX)	Azul intenso
2	89.99-80.00	Aceptable calidad (A)	Verde
3	79.99-70.00	Medianamente contaminada (MC)	Amarillo
4	69.99-60.00	Contaminada (C)	Anaranjado
5	Menor de 59.99	Altamente contaminada (AC)	Rojo

La propuesta metodológica para la evaluación del ICA en el embalse Güirabo, fue validada a partir de la aplicación del método de criterio de especialistas, cuyos resultados aportados muestran una significativa validez. El 100% lo valoraron de aplicable considerando que existen todas las condiciones de estructura administrativa y organizativa en el territorio que permitan su aplicación; en tanto el 90% lo valoraron de eficiente considerando que con su implementación se logra un resultado significativo en cuanto a la valoración de la calidad del agua en el embalse Güirabo; y el 100% lo consideraron pertinente reconociéndolo como un buen instrumento práctico para lograr las metas deseadas.

También la aplicación del procedimiento de cálculo constituyó una forma de validación. En este sentido se incorporaron a los cálculos del ICA los parámetros NO_3 y Turbiedad, se evidenció su incidencia en el comportamiento de la calidad del agua en dicho embalse, y se ha podido establecer un nuevo sistema de vigilancia para el control de los focos localizados en el área de la cuenca.

Al analizar los resultados de la validación por ambos métodos, se evidencia que la propuesta constituye una buena herramienta para evaluar la calidad del agua. Por una parte, los criterios emitidos por los especialistas fueron muy favorables; y por otra parte se observan resultados positivos en la valoración parcial considerando la representatividad de los parámetros incluidos NO_3 y la Turbiedad.

Hay que tener presente que el ICA no es un valor constante, sino que representa la calidad del agua en el momento de la toma de muestra, lo que resulta evidente que variará en dependencia del comportamiento del ciclo hidrológico en la cuenca, no es igual en época de seca que en época de lluvia, al igual refleja el impacto de la contaminación de acuerdo a las cargas contaminantes impuestas en los momentos del muestreo considerando su transporte a lo largo del río principal y sus afluentes. Por lo que se debe mantener un control estricto y sistemático del comportamiento de los parámetros que intervienen en el ICA, para ello se recomienda:

- Cuantificar, mapear y controlar los focos contaminantes localizados en el área de la cuenca tributaria del embalse
- Mantener un seguimiento sistemático del comportamiento de los valores del ICA en el embalse

CONCLUSIONES

La propuesta para el cálculo del ICA está en busca de mejores resultados con más elementos para diagnosticar de manera efectiva el comportamiento de la calidad de agua del embalse Güirabo. De esta forma se puede hacer una valoración cualitativa, y determinar las causas que pudieran estar afectando esta fuente, y de esta manera ayudará a definir las prioridades en la gestión del agua, e identificar tendencias y áreas problemáticas para la toma de decisiones a tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J., & Díaz, D. (2014). Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global. *Ingeniería solidaria*, 10(17), 111-124.
- Dirección Técnica EAAH. (2023). Control de focos contaminantes. *Informe Técnico*. Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Holguín. Delegación provincial del INRH.
- Fernández Rodríguez, M. y Guardado Lacaba, R. M. (2021). Evaluación del Índice de Calidad del Agua (ICAsup) en el río Cabaña, Moa-Cuba. *Revista Minería y Geología*, vol. 37, núm. 1, pp. 105-119, 2021.
<https://www.redalyc.org/journal/2235/223566343008/html/>
- García J.M. y J. Gutiérrez. (2015). "Un Índice para evaluar la calidad de los recursos hídricos superficiales en cuencas hidrográficas (ICA sp 2014)". *Revista Voluntad Hidráulica*, Cuba.vol.113.
- García J.M., O. Beato y J. Gutiérrez (1983): "Un Índice para evaluar la calidad de las aguas superficiales". *Revista Voluntad Hidráulica*, Cuba vol.62.
- Mamani Maron, R. R. (2024). Determinación de la calidad del agua para consumo humano en el centro poblado de Corpa-distrito de Sicuani.
<https://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/870&ved>
- Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., Garcia, M. D., Marcó, L., & Azario, R. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 4(11), 4-72.
- Morales Yépez, M. M., & Villagómez Yépez, N. D. (2014). Enfermedades prevalentes relacionadas con la calidad de agua que utilizan para el consumo humano los

pobladores de la comunidad la Calera, cantón Cotacachi en el periodo
noviembre 2013.

<https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/3487?locale=en>

NC: 1021/2014 Higiene comunal-fuentes de abastecimiento de agua- calidad y
protección sanitaria

NC: 827 2017 Agua potable. Requisitos sanitarios (esta normas sustituye a la NC
827 2010).

Saaty, T. (1980). Marketing Applications of the Analytic Hierarchy Process".
Management. Science. vol. 26, no7, ISSN 1526-5501, New York, USA..

Como citar este artículo

Martínez Almira, M., Fernández Cruz, S., & Bosch Ortiz, J.L. (2024). Cálculo del índice de calidad del agua en el embalse Güirabo. *Ciencias Holguín* ,30(3), 17-30.

Fecha de envío a
revisión: 09/01/2024
Fecha de aceptación:
09/02/2024