

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA LAGUNA DE YURIRIA, GUANAJUATO, MÉXICO PARA 2022

[ANALYSIS OF WATER QUALITY IN YURIRIA LAGOON, GUANAJUATO, MÉXICO FOR 2022]

Ileana Jimena Granillo-Suárez^{1§}, Eugenia López-López², Enrique Martínez y-Ojeda³

¹Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Oaxaca. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Oaxaca de Juárez, México. ²Instituto Politécnico Nacional. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Laboratorio de Evaluación de la Salud de los Ecosistemas Acuáticos. Ciudad de México, México. ³Profesor Investigador del Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Oaxaca. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Oaxaca de Juárez, México.

§Autor para correspondencia: (ileanagranillo@gmail.com).

RESUMEN

La Laguna de Yuriria es un ecosistema de agua dulce que constituye un área natural protegida con importancia internacional, nacional y regional. Actualmente, está afectada por una contingencia ambiental ocasionada por la descarga de aguas residuales, la contaminación, la sobrepoblación del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y la sobreexplotación de sus recursos naturales. Su preservación es importante debido a que genera beneficios ambientales, desarrollo social, cultural y económico. Como consecuencia, la calidad del agua de este recurso hídrico desempeña un papel importante y requiere su mantenimiento en condiciones adecuadas. El objetivo del estudio fue evaluar la calidad del agua de la laguna de Yuriria mediante el análisis de 21 parámetros físicos y químicos de 11 sitios de monitoreo y la aplicación del índice de la calidad del agua (ICA) de Dinius (1987). Esto permitirá obtener un índice de la calidad del agua de la laguna que proporcione información de su estado actual y que sea útil para los manejadores del recurso hídrico y la comunidad científica. Los datos muestran que las estaciones 4 y 8 presentan altas concentraciones de sólidos suspendidos y disueltos y una presencia elevada de coliformes totales y coliformes fecales. El valor de ICA fue de 61.77, por lo que la calidad del agua posee un conteo de bacterias aceptable y con tendencia a convertirse en contaminada para su utilización en la recreación. Su condición resultó en el límite para peces sensibles, y adecuada para la agricultura.

Palabras clave: Ecosistemas de agua dulce, desarrollo local, descargas residuales, gestión de recursos hídricos, sitio Ramsar.

ABSTRACT

The Yuriria lagoon is a freshwater ecosystem that constitutes a natural protected area with international, national and regional importance. Currently, it is affected by an environmental contingency caused by the discharge of wastewater, pollution, the overpopulation of the water lily (*Eichhornia crassipes*) and the overexploitation of its natural resources. Its preservation is important because it generates environmental benefits, social, cultural and economic development. As a consequence, the quality of the water of this important hidric resource plays an important role and requires its maintenance in suitable conditions. The objective of the study was to evaluate the water quality of the Yuriria lagoon through the analysis of 21 physical and chemical parameters from 11 monitoring sites and the application of the Dinius (1987) Water Quality Index (ICA). This will allow obtaining a water quality index that will help obtain actual information that it's useful for managers of water resources and the scientific community. The data shows that stations 4 and 11 present high concentrations of suspended and dissolved solids and a high presence of total coliforms and fecal coliforms. The ICA value was 61.77, so the water quality has an acceptable bacteria

Recibido: 26-agosto-2022

Aceptado: 02-diciembre-2022

count and a tendency to become contaminated for use in recreation. His condition was borderline for sensitive fishes and suitable for agriculture.

Index words: Freshwater ecosystems, local development, management of hydric sources, Ramsar site, residual discharges.

INTRODUCCIÓN

El agua es fundamental para el desarrollo de las distintas formas de vida. Sumando a esto, las aguas dulces dominan el 2.5% de toda el agua de la Tierra y su distribución y disponibilidad no es la misma en las distintas partes del mundo (Dodds y Whiles, 2010; Guerrero *et al.*, 2009). A partir del siglo XXI, el agua se convirtió en un tema prioritario en las agendas mundiales de gobierno pues las actividades antropogénicas han debilitado el bienestar ambiental y el mantenimiento de las actividades sociales y económicas que genera este importante recurso (Agudelo, 2005).

Por otro lado, la calidad del agua dulce ha ido deteriorándose, de manera considerable, desde la época de la revolución industrial. Está influenciada por factores naturales como: la materia orgánica, los materiales arrastrados y las partículas suspendidas. Así como por actividades antrópicas que son las descargas residuales y domésticas y los efluentes provenientes de la industria y la agricultura (Torres *et al.*, 2010). Zhao *et al.* (2012) sugieren que la calidad del agua de las aguas superficiales está claramente relacionada con la salud humana y tiene un papel importante en torno a los organismos acuáticos y como proveedor de bienes y servicios para la sociedad. García-Rodríguez *et al.* (2021) mencionan que la calidad del agua se refiere a las propiedades físicas, químicas y biológicas que en conjunto pueden clasificarse de acuerdo a normativas establecidas para cada tipo de uso. Por su parte, Mendoza-Fuentes (2018) explica que la definición de la calidad del agua no es sencilla y que genera controversia, pero su comprensión puede abordarse desde la perspectiva utilitaria, de sus características para mantener un equilibrio en el ecosistema y la perspectiva de sus propiedades físicas y químicas, así como microbiológicas. Por último, Villena-Chávez (2018) expresa que la calidad del agua es un tema relevante en los niveles políticos, sociales, económicos, ambientales y de salud pública.

Así pues, la condición de la calidad del agua puede evaluarse a través del análisis de especialistas acerca de parámetros físicos, químicos y biológicos (Balmaseda-Espinoza y García-Hidalgo, 2014). Una herramienta para esta interpretación, son los Índices de la Calidad del Agua (ICA) que tienen como objetivo comunicar a la población, tomadores de decisiones y expertos sobre el estado actual de un determinado ecosistema acuático. Además, una característica importante, es que tienen la capacidad de sintetizar una gran cantidad de datos en una sola cifra (Rodríguez-Miranda *et al.*, 2016). Varios autores coinciden en que el primer índice de la calidad del agua fue desarrollado por Horton en 1965 (Alarcón-Corro, 2019; Rana y Ganguly, 2020; Shala-Abazi *et al.* 2020). En tanto, Kachroud *et al.* (2019) y Uddin *et al.* (2021) mencionan que a lo largo del tiempo se han propuesto otros, como el del Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente y los ICA del Programa de Mejoramiento de la Cuenca del Bajo Gran Miami en Dayton, Ohio, Estados Unidos. Además, indican, que en este mismo país y a principios de este siglo, fue desarrollado el índice de Scatterscore.

Para Gradilla-Hernández *et al.* (2020), hasta la fecha, no ha sido posible la construcción de un índice universal debido a la complejidad de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en un cuerpo de agua contaminado. En contraste, un aspecto que es igual para todos los modelos de ICA, es su formulación. Esta se lleva a cabo en cuatro etapas y son las siguientes: 1. Selección de los parámetros, pueden ser uno o varios. 2. Generación de los subíndices de los parámetros. 3. Asignación del valor del peso de los parámetros. 4. Cálculo del índice de la calidad del agua. En esta última etapa, los subíndices de los parámetros se combinan usando las ponderaciones. Esto resulta en un índice general y se clasifica de acuerdo a una escala para otorgarle un valor a la calidad del agua (Zotou y Tsihrintzis, 2019).

A nivel mundial, existen diversos estudios que muestran la aplicación de un ICA para la evaluación de la calidad del agua de determinados ecosistemas acuáticos. Bora y Goswami (2017) señalan la aplicación del ICA con el método de Brown *et al.* (1972) en el río Kolong en Assam, India. Su metodología incluyó el muestreo de siete sitios y el análisis de parámetros fisicoquímicos durante las épocas de pre-monzón, monzón y post-monzón durante enero de 2012 a noviembre de 2015. Conforme a sus resultados, la calidad del agua colectada durante la época de monzón mostró la calidad de agua más deteriorada con un valor promedio del ICA de 122.47. Los autores plantean que se deben de diseñar estrategias efectivas para aumentar la calidad del agua y propiciar la sustentabilidad y restauración del río. Otro estudio, es el de Shala-Abazi *et al.* (2020) quienes explican la evaluación de la calidad del agua en el río Sitnica, ubicado en la República de Kosovo, mediante el ICA de Canadá y el monitoreo de 16 parámetros de 10 sitios de estudio en primavera, verano y otoño. De acuerdo al tratamiento de los datos, el promedio del ICA para todo el período evaluado fue de 63.5. De acuerdo con la clasificación del índice empleado, quedó en la categoría de mala. Además, otros autores como Wu *et al.* (2018); Alarcón-Corro (2019) y Zotou y Tsihrintzis (2019) han evaluado la calidad de ríos y lagos a nivel internacional.

En México, la evaluación de la calidad del agua es muy importante. Ibararán *et al.* (2017) explican que se calcula que únicamente el 20% de las descargas residuales provenientes de las zonas urbanas y de la industria reciben tratamiento. Esta situación genera problemas de salud pública y desarrollo que se agrava debido a que la institución encargada de su monitoreo en las 12 regiones hidrológicas, solamente considera la materia orgánica como el principal agente de contaminación (demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST).

En México, la calidad del agua evaluada a través de un ICA ha sido estudiada por diversos autores. Gradilla-Hernández *et al.* (2020) evaluaron la calidad del agua del lago Cajititlán en Jalisco, México mediante la aplicación del ICA de la Fundación Nacional de Saneamiento de los Estados Unidos. Los datos fueron obtenidos mensualmente durante septiembre de 2009 a abril de 2018 en cinco sitios de muestreo localizados a lo largo del lago. El promedio del ICA fue de 50.4. De esta forma, el cuerpo de agua presentó una calidad del agua media que resulta en estrés para la vida acuática y que las actividades recreativas se tienen que llevar a cabo con precaución. Martínez-Zavala (2021) aplicó el ICA de Dinius (1987) utilizando 13 parámetros fisicoquímicos y monitoreos de seis localidades en la parte alta, media y baja del río Amacuzac en el estado de Morelos. Sus resultados arrojaron que la calidad del agua tuvo valores entre 51 y 80. Esto colocó a la calidad de agua de este cuerpo de agua en la categoría de regular.

Por su parte, en la laguna de Yuriria, también se han realizado este tipo de investigaciones. La primera, es la de Espinal-Carreón *et al.* (2013), donde emplearon el ICA de Dinius (1987) para evaluar la calidad del agua de la laguna en dos períodos de estudio (2005 y 2009-2010). Su objetivo fue comparar la calidad del agua entre ambos periodos, ya que entre éstos se aplicaron acciones para mejorar las condiciones del cuerpo de agua. Los datos mostraron que el promedio del ICA para 2005 fue de 60 ± 3.4 cuando se consideraron todos los sitios de estudio, de 61 ± 2.2 cuando se tomaron en cuenta solamente los 15 sitios del interior de la laguna y de 54 ± 3.3 para los tributarios. El análisis espacial de los autores muestra que los sitios 7, 9, 16, 17 y 18 tuvieron los valores más bajos de ICA. Para el segundo período de estudio el promedio global del ICA fue de 67 ± 3.9 y de 68 ± 1.9 cuando tomaron únicamente los sitios del interior de la laguna. Por último, el ICA fue de 58 ± 6.3 para los tributarios. La segunda investigación es la de Bonilla-Hernández *et al.* (2016); quienes en su estudio determinaron la calidad del agua a través del muestreo de 20 sitios en época de lluvias y de estiaje y mediante la aplicación de un ICA. El valor de este ICA fue de 57.43 y su clasificación fue etiquetada en levemente contaminada para la agricultura y la industria, contaminada para la pesca y agua potable y aceptable para uso recreativo sin considerar los deportes de inmersión.

La Laguna de Yuriria es un ecosistema acuático de importancia mundial, y regional debido a que posee tres decretos importantes. El primero es que este vaso de almacenamiento es un Sitio Ramsar. Esta distinción fue otorgada el 15 de enero de 2004 y tomó como referencia los criterios 2, 4 y 5 de la Convención Ramsar. Por otro lado, es un Área Natural Protegida Estatal en la categoría de preservación ecológica. Acorde a su

programa de manejo, es el sustento de las etapas de vida de especies de aves y desempeña la función de vaso regulador del microclima (SMAOT, 2005). Por último, es un Área de Importancia para la Conservación de las Aves. Esta distinción fue otorgada en el año de 1999 pues se registraron 143 especies de aves (CONABIO, 2015).

González-Banda *et al.* (2021) apuntan que la contaminación de la laguna de Yuriria se debe a sectores de la economía local como la pesca, el comercio y la agricultura. Cada uno de estos origina una presión sobre el estado de la calidad del agua. Por ejemplo, el correcto funcionamiento de las lanchas carece de normativa por lo que la laguna tiene acumulación de hidrocarburos. También, el comercio ejerce una influencia en la calidad del agua debido a la zona restaurantera de comunidades como La Angostura pues se desechan residuos sólidos y de alimentos. Esta situación se agrava, ya que no existe un plan de manejo de residuos y una conciencia ambiental. Por último, las zonas aledañas a la laguna son utilizadas para el cultivo de cebada, frijol, maíz, sorgo y trigo y predomina la agricultura de riego. Esta actividad origina un alto grado de toxicidad debido a los plaguicidas. En este sentido, el objetivo de este estudio fue evaluar la calidad del agua de la Laguna de Yuriria, Guanajuato mediante el análisis de 21 parámetros físicos y químicos de 11 sitios de monitoreo ubicados a lo largo de la laguna y la aplicación el índice de calidad del agua de Dinius (1987), para obtener datos actuales que contribuyan a los existentes y ayuden a plantear estrategias para su preservación ecológica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se ubica en la Laguna de Yuriria, Guanajuato. Este cuerpo de agua forma parte del Área Natural Protegida Laguna de Yuriria y su zona de influencia. Se ubica en la región hidrológica Lerma-Chapala-Santiago (SISR, 2004; Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial del Estado de Guanajuato, 2022). La cuenca de la Laguna de Yuriria se localiza en los estados de Guanajuato y Michoacán. En total, cubre once municipios y abarca una extensión aproximada de 1,119.45 km² y se localiza entre los paralelos 20°19'59'' y 20°01'35'' latitud norte y 100°56'54'' y 101°27'32' longitud oeste. A su vez, esta cuenca colinda con otras cuencas hidrológicas que forman parte de la región RH12 Lerma Santiago-Pacífico. Otra característica de la cuenca, es que se ubica dentro del Sistema Volcánico Transversal y su topografía incluye sierras, valles, llanuras y lomeríos que poseen una altitud promedio de 2500 m. El clima que domina la región es el semicálido tipo subhúmedo con lluvias en verano y con lluvia de invierno menor a 5%. Posee una temperatura media anual mayor a los 18 °C (INEGI, 2020).

La Laguna de Yuriria recibe aportes del Río Lerma y del dren La Cinta, y su principal afluente es el Río Moroleón y se distingue por fungir como vaso regulador. Asimismo, su caudal se nutre del agua proveniente de la precipitación, del escurrimiento de las vertientes y de las aguas residuales de las zonas aledañas (SISR, 2004). Este ecosistema acuático es hábitat de especies de peces como el tiro (*Goodea atripinnis*) y el charal (*Chirostoma jordani*) y de anfibios como la rana leopardo de Moctezuma (*Lithobates montezumae*), que de acuerdo a la NOM 059-SEMARNAT-2010 es endémica y se encuentra sujeta a protección especial.

Trabajo de campo

Los datos analizados corresponden al mes de junio de 2022. Los sitios de muestreo se distribuyeron dentro de la laguna considerando zonas limnéticas y zonas litorales, sus tributarios y efluentes. Así como zonas próximas a la influencia de asentamientos humanos y sin ellos (Figura 1). En total, se establecieron 11 estaciones. En todos los sitios se colectaron muestras de agua de superficie y en los 3 y 6 se añadieron muestras de fondo. Todas en recipientes de polietileno. Para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los parámetros fisicoquímicos fueron de 500 mL y para los coliformes fecales de 250 mL. En cada sitio se registró *in situ* la temperatura del agua y del aire (°C) con un termómetro de alcohol Termómetro de -10 a

+50 °C LO tox Laboratory marca Brannan; la Transparencia (cm) mediante un Disco de Secchi; el pH mediante un medidor multiparamétrico Marca HACH Modelo HQ40D y el Oxígeno Disuelto (OD, mg L⁻¹) con una sonda modelo VTSYIQI. Posteriormente, las muestras se trasladaron en obscuridad y refrigeración (4 °C) al laboratorio.

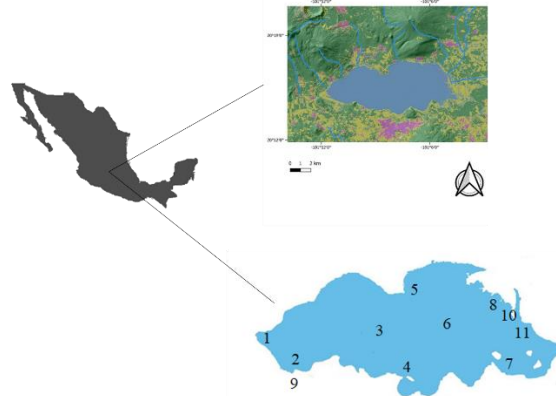


Figura 1 Área de estudio y ubicación de los puntos de muestreo.

Determinación de los parámetros de calidad del agua

La determinación de los parámetros físicos y químicos se realizó en el laboratorio y empleando las técnicas de Hach. Se determinaron las concentraciones de nitratos NO₃ (mg L⁻¹, reducción de cadmio), nitritos NO₂ (mg L⁻¹, sulfato ferroso), amoníaco NH₃ mg l⁻¹ (mg L⁻¹, método de salicilato), ortofosfatos (PO₄³⁻, mg L⁻¹, ácido ascórbico), sólidos suspendidos totales (SST, mg L⁻¹, método fotométrico), color (unidades Pt-Co), nitrógeno total (NT, mg L⁻¹, digestión con persulfato), fósforo total (FT, mg L⁻¹, digestión con persulfato), sulfatos (SO₄; mg L⁻¹, sulfaver 4) por medio de un espectrofotómetro HACH/DRL3900. Los coliformes totales (CT) y fecales (CF) número más probable (NMP, lauril, verde brillante y EC).

Análisis de datos

Índice de la calidad del agua de Dinius (1987)

El índice de calidad del agua de Dinius (1987) fue desarrollado mediante el método Delphi y su aplicación considera el uso del recurso hídrico destinado para la agricultura, la industria, el consumo humano, la pesca y la vida acuática y la recreación. Este ICA está conformado por 11 parámetros físicos y químicos. La función ponderada IiWi se calcula con la sustitución del valor de la función del subíndice y su ponderación (Cuadro 1). Este índice, clasifica la calidad del agua en una escala de 0 a 100 (Dinius, 1987). Se expresa de la siguiente manera:

$$ICA = \prod_{i=1}^n I_i^{w_i}$$

Donde:

ICA= índice de la calidad del agua, un número entre 0 y 100.

li= subíndice de la variable contaminante (un número entre 0 y 100).

Wi= peso unitario de la variable contaminante, un número entre 0 y 1.

n= indica el número de variables contaminantes.

Cuadro 1. Funciones del subíndice en el índice de calidad del agua de Dinius (1987).

Parámetro	Dimensión	Función
OD	% de Saturación	0.82OD+10.56
DBO 5	Mg L ⁻¹ , en 20 °C	108(DBO)-0.3494
Coliformes	NMP-Coli/100 ml	136(COLI)-0.1311
<i>E.Coli</i>	Fecal-Coli/100 ml	106(E-COLI)-0.1286
Alcalinidad	ppmCaCO ₃	110(ALC)-0.1342
Dureza	ppmCaCO ₃	552(DU)-0.4488
Cloruros	Mg L ⁻¹ , agua dulce	391(CL)-0.3480
Conductividad específica	µmhos/cm 25 °C	506(CES)-0.3315
p ^H	pH<6.9	100.6803+0.1856 (pH)
	pH – unidades (6.9-7.1)	1
Nitratos	pH<7.1	103.65-0.2216 (pH)
	NO ₃ mg l ⁻¹ /l	125(N)-0.2718
Temperatura	°C	102.004-0.0382(T-T)
Color	Unidades de color	127(C)-0.2394

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Muestreo de agua

Análisis de los parámetros *in situ*

Las estaciones de monitoreo superficiales mostraron un valor promedio de 21.44 °C y las profundas 21.43 °C. El pH se mantuvo entre los valores 7 y 8. La transparencia mostró ser de 25 cm en todos los sitios de muestreo. El OD registró mayor concentración en las estaciones 8, 10 y 11. Para estos sitios, incumplió la normativa ya que sus valores quedaron dentro de la clasificación de fuertemente contaminada. Los valores de Cond se mantuvieron constantes en todas las estaciones de monitoreo. Esto ocurrió también con los SDT y la sal (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores de los parámetros *in situ* registrados en cada estación de monitoreo en la laguna de Yuriria, Guanajuato.

	Estación de monitoreo								3 Profunda	6 Profunda
	3	4	5	6	7	8	10	11		
Temperatura del agua (T)	21.17	21.32	21.41	21.40	21.53	21.56	21.57	21.52	21.33	21.57
Transparencia	25	25	25	25	25	25	25	25		
pH	7.54	7.79	7.83	7.91	7.90	7.91	7.94	7.98	7.92	8
Oxígeno disuelto (mg l ⁻¹)	4.97	4.3	4.64	4.69	4.9	5.02	5.07	5.20	4.84	4.73
Conductividad (mS/cm)	0.70	0.69	0.70	0.69	0.69	0.70	0.69	0.69	0.68	0.69
Sólidos Disueltos Totales (g l ⁻¹)	0.449	0.450	0.453	0.447	0.448	0.455	0.448	0.450	0.440	0.448
Salinidad (Sal)	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.34

Análisis de los parámetros en el laboratorio

En promedio, los sitios 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 y 11 superficial mostraron una concentración de Nitratos (NO_3) de 1.68 mg L^{-1} . Esto puede deberse a la influencia de las actividades humanas como la agricultura y los desechos industriales y domésticos. En este caso, esto se confirma debido a que en los sitios 4, 5 y 11 se determinaron las concentraciones más altas (1.85 mg L^{-1} , 1.80 mg L^{-1} y 2.35 mg L^{-1}) y además, son zonas que se ubican en la cabecera municipal de Yuriria y las comunidades rurales de Cahuageo y Loma de Zempoala donde se practica la agricultura de temporal anual, de riego anual y de humedad anual. En cuanto a los nitritos (NO_2), la concentración más alta (0.067 mg L^{-1}) se presentó en la estación 4, y la más baja en la estación 8 (0.046 mg L^{-1}).

El amoníaco (NH_3) mostró un valor promedio de concentración de 1.37 mg L^{-1} para las estaciones de muestreo superficial y 1.45 mg L^{-1} para las estaciones de muestreo de fondo. La estación 4 presentó la concentración más alta con un valor promedio de 1.62 mg L^{-1} y la más baja se mostró en la estación 10 con un valor promedio de 1.23 mg L^{-1} . La mayor concentración de amoníaco (NH_3) reflejó que existe influencia de actividades domésticas y la descomposición de materia orgánica sobre la calidad del agua de estos sitios. Respecto a la dureza, los valores más altos se registraron en las estaciones 4 y 8. Esta dureza muestra que en la calidad del agua de la laguna de Yuriria están presentes iones de calcio y magnesio.

Para los SST y de acuerdo a la normativa nacional, las estaciones 10 y 11 (Cimal y Loma de Zempoala) se clasificaron de buena calidad ($25 < \text{SST} \leq 75$). Mientras que las estaciones restantes se mantuvieron en aceptable ($75 < \text{SST} \leq 150$). El color tuvo los valores más altos en las estaciones 6 y 10. Esto indicó que la calidad del agua de estos sitios está influenciada por la presencia de sólidos disueltos (materia orgánica y minerales) y la descarga de aguas residuales. Estas estaciones, se ubican en el lado oriental de la laguna de Yuriria, que es donde se localiza una población elevada de lirio acuático (*E. crassipes*).

Las estaciones 4 y 11 mostraron la mayor concentración de Nitrógeno total (NT). La mayor concentración de Fósforo total (FT) ocurrió en las estaciones 3 (2.54 mg L^{-1}) y 8 (2.46 mg L^{-1}). En cuanto a los ortofosfatos (PO_4^{3-}), las estaciones 4 y 6 indicaron las concentraciones más altas (1.54 mg L^{-1} y 1.60 mg L^{-1}). La alcalinidad mostró valores elevados en las estaciones 4 (2.72 mL), 6 (2.70 mL) y 8 (2.67 mL). Las concentraciones más altas de sulfatos se localizaron en las estaciones 4, 5, 11 y en las 3 y 6 profunda. Las estaciones 4 y 3 superficial y profunda mostraron valores elevados de cloruros.

De acuerdo a la normativa y respecto a los Coliformes Totales (CT), la estación 6 (Isla El Patol), se clasificó en buena calidad ($100 < \text{CF} \leq 200$). Las estaciones 3 y 5 se clasificaron en aceptables ($200 < \text{CF} \leq 1000$). En tanto, las estaciones 4 y 8 presentaron una clasificación de contaminada ($1000 < \text{CF} \leq 10000$). En cuanto a los coliformes fecales (CF), las estaciones 4 y 8 se clasificaron en contaminadas ($1000 < \text{CF} \leq 10000$). A continuación, se ubicaron las estaciones 5 y 11 (comunidad de Cahuageo y Loma de Zempoala, respectivamente) que quedaron clasificadas en aceptables ($200 < \text{CF} \leq 1000$). Por último y en relación a *Escherichia coli*, las estaciones 4 y 8 quedaron clasificadas en contaminadas ($1000 < \text{CF} \leq 10000$); mientras que las 5 y 11 en aceptables ($200 < \text{CF} \leq 1000$).

Índice de la calidad del agua (ICA) de Dinius (1987)

Los sitios 4 y 8 obtuvieron los valores de ICA más bajos (56.66 y 57.89), mientras que los restantes mostraron un valor por encima de 60 (Cuadro 3). El ICA de los sitios 4 y 8 mostró que el agua para el uso recreativo está propensa a convertirse en contaminada y su conteo de bacterias se mantiene en los límites aceptables. Además, se mantuvo en el margen para los peces sensibles. Sin embargo, mostró una condición adecuada para la mayoría de los cultivos. De manera global, la laguna de Yuriria obtuvo un ICA de 61.77.

Cuadro 3. Valor de ICA de Dinius (1987) para cada estación de monitoreo en la laguna de Yuriria.

Sitio de monitoreo	Valor de ICA	Escala de clasificación del valor de ICA de Dinius (1987)		
		Recreación	Pesca	Agricultura
E3	62.61	Agua que se está convirtiendo en contaminada. Conteo de bacterias aceptable.	Se encuentra en el margen para peces sensibles.	Es adecuada para la mayoría de los cultivos.
E4	56.66	Agua que se está convirtiendo en contaminada. Conteo de bacterias aceptable.	Su condición es incierta para peces sensibles.	Es adecuada para la mayoría de los cultivos.
E5	60.59	Agua que se está convirtiendo en contaminada. Conteo de bacterias aceptable.	Su condición se encuentra en el límite para peces sensibles	Es adecuada para la mayoría de los cultivos.
E6	63.28			
E7	65.91			
E8	57.89	Agua que se está convirtiendo en contaminada. Conteo de bacterias aceptable.	Su condición es incierta para peces sensibles.	Es adecuada para la mayoría de los cultivos.
E10	62.46	Agua que se está convirtiendo en contaminada. Conteo de bacterias aceptable.	Su condición se encuentra en el límite para peces sensibles	Es adecuada para la mayoría de los cultivos.
E11	60.17			
E3 profunda	62.85			
E6 profunda	65.30			

El crecimiento de la población es un factor que afecta de forma negativa la calidad del agua (Kachroud *et al.*, 2019). En esta investigación, esto se reflejó en las estaciones 4 y 11, pues evidenciaron tener concentraciones altas en los parámetros que son indicadores de contaminación como los Nitratos (N-NO₃), sólidos suspendidos totales (SST) y los coliformes totales (CT) y un incremento de su población. La primera, ha incrementado su población del 2005 al 2020 de 21,708 a 25,845 habitantes (INEGI, 2020). La segunda, ha aumentado de 1583 a 1919 habitantes en el mismo periodo (INEGI, 2020). Respecto a Espinal-Carreón *et al.* (2013) y la CONAGUA (2021), en promedio, los SST aumentaron. Además, se puede apreciar que, en promedio, de 2005 a 2022, la concentración de los SST aumentó de 76 a 125 mg L⁻¹ y de 59.5 a 125 mg L⁻¹ respecto a 2009-2010. En comparación con estos mismos autores, el color aumentó de 70.59 unidades PtCo registrados en 2005 y 2009-2010 a 91.1 y de 46.2 de 2021 a 91.1.

En contraste con Espinal-Carreón *et al.* (2013), el nitrógeno total (NT) disminuyó su concentración de 29.66 a 1.53 mg l⁻¹ respecto a 2005 y 2009 -2010. El fósforo total, considerando el promedio de todos los sitios de estudio disminuyó de 1.88 a 1.72 mg L⁻¹. La temperatura aumentó de 19.37 a 21.49 °C, en comparación con el promedio de los sitios y los periodos de estudio de Espinal-Carreón *et al.* (2013). Mientras que se mostró una ligera disminución con el de Vargas-Sáenz *et al.* (2021) (22.53 °C) y la CONAGUA (2021) (22.94 °C).

Respecto al valor del ICA de Dinius (1987), se determinó que la calidad del agua aumentó respecto al 2005 y 2016 y disminuyó en comparación con el periodo 2009-2010. Esto muestra que de acuerdo con Espinal-Carreón *et al.* (2013) las variaciones temporales en la laguna de Yuriria son importantes para el estudio de la calidad de agua ya que determinan sus condiciones físicas y químicas.

CONCLUSIONES

El agua de la laguna de Yuriria resultó con un valor que refleja una calidad del agua aceptable únicamente para el riego. Aunque el uso del agua de la laguna de Yuriria está destinado en su mayoría a la agricultura, su calidad requiere una mejora para la preservación de las especies de fauna y sus diversas funciones ecológicas. Las estaciones de mayor crecimiento poblacional registraron una clara afectación en la calidad del agua, pues la normativa la clasificó como contaminada respecto a los parámetros de oxígeno disuelto y coliformes fecales. Por lo tanto, es necesario que la calidad del agua de la laguna sea monitoreada periódicamente y reforzar o crear nuevas estrategias para su preservación en condiciones adecuadas.

LITERATURA CITADA

- Agudelo, R.M. 2005. El agua, recurso estratégico del siglo XXI. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública* 23(1): 91-102.
- Alarcón-Corro, J.F. 2019. Aplicación de métodos de índices de Calidad de Agua (ICA) en el río Rimac. CYBERTESIS Repositorio de Tesis digitales UNMSM. Perú. (Consultado: 13/10/2022). Disponible en: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/12169>.
- Balmaseda-Espinoza, C. e Y. García-Hidalgo. 2014. Índice canadiense de calidad de las aguas para la cuenca del río Naranjo, provincia Las Tunas, Cuba. *Revistas Ciencias Técnicas Agropecuarias* 23(3): 11-16.
- Bonilla-Hernández, M., F. Alejo-Iturvide y M.A. Márquez-Lucio. 2016. Determinación de calidad de agua y estudio batimétrico en la presa de La Purísima y la Laguna de Yuriria del estado de Guanajuato. *Jóvenes en la Ciencia* 5(3): 16-20.
- Bora, M. and D.C. Goswami. 2017. Water quality assessment in terms of water quality index (WQI): case study of the Kolong River, Assam, India. *Appl. Water. Sci.* 7: 3125-3135. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0451-y>.
- Brown, R.M., N.I. McClelland, R.A. Deininger y M.F. O'Connor. 1972. A water quality index—crashing the psychological barrier. In: Thomas, W.A. (Eds) *Indicators of environmental quality*. Environmental Science Research, Boston, MA. PP. 173-182. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2856-8_15.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2021). *Calidad del Agua Superficial 2012-2020*. (Consultado: 02/11/2021). Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2015. *Laguna de Yuriria*. México. (Consultado: 11/04/2022). Disponible en: http://avesmx.conabio.gob.mx/EspeciesRegion.html#AICA_56.
- Dinius, S.H. 1987. Design of an index of water quality. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 23(5): 833-843. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1987.tb02959.x>.
- Dodds, W.K. and M.R. Whiles. 2010. *Freshwater Ecology. Concepts and Environmental Applications of Limnology*. 2a. ed. Ed. Elsevier. Amsterdam. pp. 5-18.
- Espinal-Carreón, T., J.E. Sedeño-Díaz y E. López-López. 2013. Evaluación de la calidad del agua en la laguna de Yuriria, Guanajuato, México, mediante técnicas multivariadas: un análisis de valoración para dos épocas 2005, 2009-2010. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29(3): 147-163.
- García-Rodríguez, G., M.A. Sandoval-Rojas, E.R. Corona-Romano, R.E. De Jesús-De la Rosa, B. Martínez-Romay, E. García-Gil y E. García-Gil. 2021. Aplicación de dos metodologías para la evaluación de la calidad del agua de cuerpos superficiales destinados a la pesca en el Sur del Estado de Veracruz, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 37: 89-107. <https://doi.org/10.20937/RICA.53681>.
- González-Banda, M.A., P.D. Quintanar-Rodríguez, G. Alcántara-Antonio, J.T. Zúñiga-Zúñiga, D.O. Rocha-Amador y R. Costilla-Salazar. 2021. Diagnóstico de las principales fuentes de contaminación que impactan la laguna de Yuriria. *Jóvenes en la Ciencia* 10: 1-9.
- Gradilla-Hernández, M.S., J. de Anda, A. García-González, C. Yebra-Montes, H. Barrios-Piña, P. Ruiz-Palomino and D. Díaz-Vázquez. 2020. Assessment of the water quality of a subtropical lake using the NSF-WQI and newly proposed ecosystem specific water quality index. *Environm. Monit. Assess.* 192(5): 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08265-7>.

- Guerrero, T., C. Rives, A. Rodríguez, Y. Saldívar y V. Cervantes. 2009. El agua en la ciudad de México. *Ciencias* 94(094): 16-23.
- Ibarrarán, M.E., A. Mendoza, C. Pastrana y E.J. Manzanilla 2017. Determinantes socioeconómicos de la calidad del agua superficial en México. *Región y Sociedad* 29(69): 89-125. <https://doi.org/10.22198/rys.2017.69.a325>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2020. Cuenca hidrológica Laguna de Yuriria: humedales: informe Técnico. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. (Consultado: 13/10/2022). Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825197100>
- Kachroud, M., F. Trolard, M. Kefi, S. Jebari and G. Bourrié. 2019. Water quality indices: challenges and application limits in the literature. *Water* 11(2): 1-26. <https://doi.org/10.3390/w11020361>.
- Martínez-Zavala, A. 2021. Aplicación de bioindicadores e índices biológicos y ecológicos para evaluar el estado de salud del río Amacuzac. Repositorio Institucional de Acceso Abierto de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México. (Consultado: 13/10/2022). <http://riiaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/1925>.
- Mendoza-Fuentes, M.A. 2018. Evaluación fisicoquímica de la calidad del agua superficial en el centro poblado de Sacsamarca, región Ayacucho, Perú. Repositorio Digital de Tesis y Trabajos de Investigación PUCP. Perú. (Consultado: 13/10/2022). Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/12256>.
- Rana, R. and R. Ganguly. 2020. Water quality indices: challenges and applications-an overview. *Arabian Journal of Geosciences* 13(20): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06135-7>
- Rodríguez-Miranda, J.P., J.A. Serna-Mosquera y J.M. Sánchez-Céspedes. 2016. Índices de calidad en cuerpos de agua superficiales en la planificación de los recursos hídricos. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología* 8(1): 159-167.
- Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial del Estado de Guanajuato (SMAOT). 2005. Resumen del programa de manejo del área natural protegida en la categoría de Área de restauración ecológica "Laguna de Yuriria y su zona de Influencia". Gobierno del Estado de Guanajuato. Guanajuato, México. (Consultado: 10/04/2022). Disponible en: <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/areas-naturales-protegidas/10/Laguna-de-Yuriria-y-su-Zona-de-Influencia>.
- Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial del Estado de Guanajuato (SMAOT). 2022. Laguna de Yuriria y su zona de influencia. Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial del Estado de Guanajuato. Guanajuato, México. (Consultado: 13/10/2022). Disponible en: <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/areas-naturales-protegidas/10/Laguna-de-Yuriria-y-su-Zona-de-Influencia>.
- Servicio de Información sobre Sitios Ramsar (SISR). 2004. Laguna de Yuriria. (Consultado: 11/04/2022). Disponible en: <https://rsis.ramsar.org/es/ris/1361?language=es>.
- Shala-Abazi, A.M., B.H. Durmishi, F.S. Sallaku, H.S. Çadraku, O.B. Fetoshi, P.H. Ymeri and P.S. Bytyçi. 2020. Assessment of water quality of Sitnica river by using water quality index (WQI). *RASĀYAN J. Chem.* 13(1): 146-159. <http://dx.doi.org/10.31788/RJC.2020.1315344>.
- Torres, P., C.H. Cruz, P. Patiño, J.C. Escobar y A. Pérez. 2010. Aplicación de índices de calidad de agua-ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano. *Ingeniería e Investigación* 30(3): 86-95.
- Uddin, G., S. Nash and A.I. Olbert. 2021. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological indicators*. 122: 107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>.
- Vargas-Sáenz, S.M., Z.G. Barrios-Martínez, N. Olvera-Rosales y A. Zanol. 2021. Evaluación de la calidad del agua de la laguna de Yuriria (Guanajuato) y su impacto antrópico. *Jóvenes en la Ciencia*, 10: 1-12.
- Villena-Chávez, J. 2018. Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Rev Peru Med Exp Salud Pública* (35)2: 304-308. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>.

- Wu, Z., X. Wang, Y. Chen, Y. Cai and J. Deng. 2018. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment* 612: 914-922. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.293>.
- Zhao, Y., X.H. Xia, Z.F. Yang and F. Wang. 2012. Assessment of water quality in Baiyangdian Lake using multivariate statistical techniques. *Procedia Environmental Sciences* 13: 1213-1226. doi:10.1016/j.proenv.2012.01.115.
- Zotou, I. and V.A. Tsihrintzis. 2019. Performance of seven quality indices (WQIs) in a Mediterranean River. *Environ. Monit. Assess.* 191(8): 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7652-4>.