

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA LAGUNA DE YURIRIA (GUANAJUATO) Y SU IMPACTO ANTRÓPICO

Silvia María Vargas Saézn¹, Zureyka Guadalupe Barrios Martínez¹, Berenice Olvera Rosales¹, Gabriela Ana Zanor¹

¹Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Departamento de Ciencias Ambientales, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato
Ex Hacienda El Copal, km 9 Carretera Irapuato-Silao AP. 311 CP. 36500 Irapuato, Guanajuato.

Resumen

La Laguna de Yuriria es un reservorio artificial construido en el año 1548, el cual desarrolla diversas funciones ecológicas y socioeconómicas para la región. Este cuerpo de agua pertenece a la región hidrológica Lerma-Santiago, la cual se encuentra densamente poblada y con un alto impacto antrópico. Actualmente, las problemáticas ambientales que presenta la laguna se asocian con las actividades agrícolas, la descarga de aguas residuales domésticas y urbanas, el enriquecimiento de nutrientes, la disminución del volumen de agua y el azolve. El objetivo principal de este proyecto es evaluar la calidad del agua de la Laguna de Yuriria mediante el análisis de parámetros físicos y químicos y el uso del Índice de Estado Trófico (IET). Los valores de OD no cumplieron en todos los casos con el límite mínimo establecido en la normatividad nacional para la protección de la vida acuática. El pH del agua resultó apto para riego agrícola aunque algunos valores sobrepasaron el límite máximo para la protección de la vida acuática. Con base en los valores de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, el agua de dos canales no es apta para su uso en riego agrícola. Según el IET, la laguna se encuentra hipereutrofizada debido a la alta carga de nutrientes que ingresan a la laguna. Este proyecto aporta información de utilidad para crear conciencia en la sociedad sobre la importancia del cuidado y protección de los cuerpos de agua y su biodiversidad, y servirá para ser utilizada en programas de monitoreo y cogestión sustentable.

Palabras clave: reservorio artificial; calidad del agua; contaminación, presión antrópica, cogestión, México.

Introducción

Los lagos son cuerpos de agua lénticos que ocupan una depresión topográfica sobre la superficie de la Tierra. (Wetzel 2001). Los lagos son ambientes muy sensibles a las variaciones de los factores externos e internos que se producen en el territorio de la cuenca hídrica. Estos cambios en los forzantes se reflejan en variaciones físicas, químicas y biológicas en el agua y en los sedimentos de los sistemas lacustres (Cohen 2003). Las fuentes principales que producen cambios en la dinámica de los lagos son: 1) Fuentes naturales: meteorización de las rocas, actividad volcánica y mineralizaciones y, 2) Fuentes antrópicas: descargas domésticas, industriales, agrícolas y actividades mineras (Skinner y Murck 2011). Según Zahra et al. (2014), los contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales pesados) se introducen principalmente en los sistemas acuáticos a través de fuentes puntuales, por ejemplo: efluentes de aguas residuales industriales, municipales y domésticas, y por fuentes difusas, tales como: escurrimientos de pesticidas o fertilizantes, erosión y deposición atmosférica.

Recientemente, los cuerpos de agua a nivel mundial han estado sometidos a fuertes impactos antropogénicos (por ej., Wu et al. 2018, Zhao et al. 2019; Halac et al. 2020). El aumento poblacional y las demandas crecientes de agua han generados enormes presiones sobre los recursos hídricos. El estado de Guanajuato (México central) no es ajeno a esta problemática. En años recientes ha aumentado la preocupación por la contaminación, la sobreexplotación y la escasez de agua. En particular, la Laguna de Yuriria (Figura 1) se encuentra dentro de la región hidrológica RH-12 Lerma-Santiago y la cuenca hidrológica Pátzcuaro-Cuitzeo, en cuyas áreas se desarrollan diversas actividades económicas, como la agricultura, la ganadería y la industria.

Dentro de las funciones que realiza el reservorio Yuriria se encuentran la pesca, la recreación, el control de inundaciones y el riego agrícola al Distrito de Riego 011, contribuyendo con el desarrollo socioeconómico a nivel local y regional. Asimismo, este reservorio posee una enorme importancia desde el punto de vista ecológico: la laguna fue declarada Área de Importancia para la Conservación de las Aves en el año 1999 (AICAS, CONABIO), Área Natural Protegida en el año 2001 (ANP, IEE) y sitio RAMSAR en el año 2004. Sin embargo, actualmente, la Laguna de Yuriria enfrenta diversas problemáticas ambientales relacionadas con el cambio de uso del suelo, la extensión de espacios para la agricultura, la ganadería extensiva, la pérdida de áreas forestales y matorrales, el aumento de erosión y el azolve, la reducción del volumen de agua y las descargas directas de aguas residuales sin tratamiento o con tratamiento incompleto de localidades litorales y otras dentro de la cuenca.

Existen escasos estudios realizados en la Laguna de Yuriria. Ramos-Ventura y Novelo-Retana (1993) realizaron una caracterización de la vegetación y flora acuática de la laguna, observando la proliferación del lirio acuático *Eichhornia crassipes* y reportaron un proceso de envejecimiento de la laguna y la pérdida de hábitats acuáticos. Espinal Carreón et al. (2013) evaluaron la calidad de agua del embalse (años 2005 y 2009-2010), donde concluyeron que la laguna presentaba un alto grado de eutrofización, con aportes de materia orgánica y fecal. Por lo expuesto anteriormente, resulta de vital importancia evaluar la calidad del agua de la Laguna de Yuriria mediante el análisis de la variación de parámetros físicos y químicos, e índices de calidad (Índice de Estado Trófico: IET). La información resultante permitirá valorar si las acciones de gestión y protección en la laguna han sido suficientes y pertinentes, y cuáles parámetros requieren mayor atención y una corrección de manera inmediata.

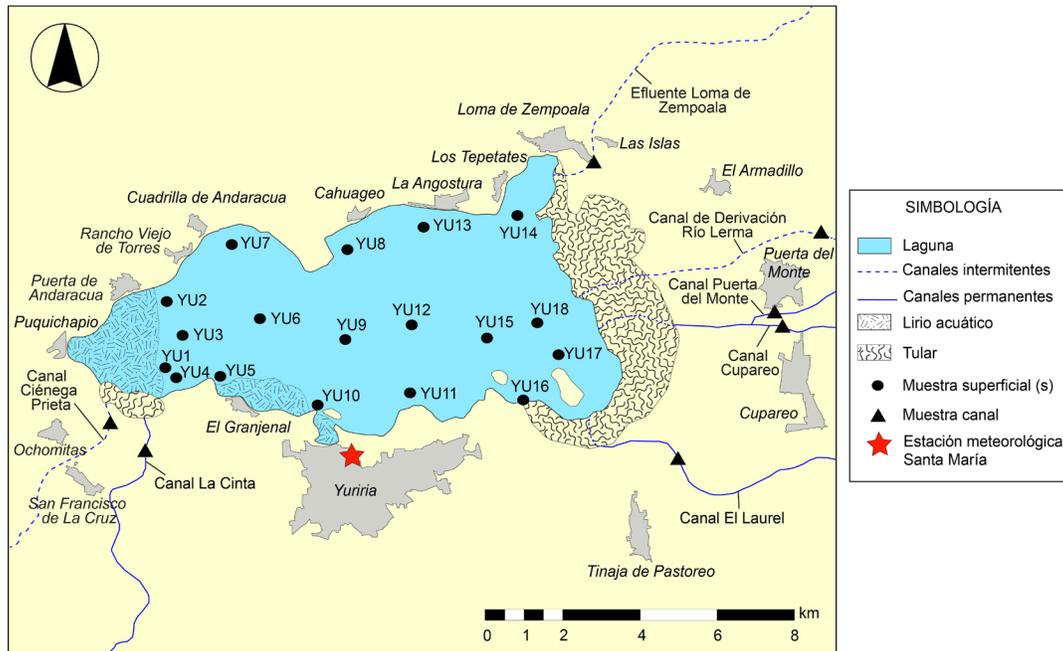


Figura 1. Ubicación de la Laguna de Yuriria y sitios de muestreo. Se muestra la localización de las principales localidades y la estación meteorológica analizada.

Metodología

Área de estudio

La Laguna de Yuriria (20° 15' 08" LN y 101° 07' 30" LW) se encuentra localizada entre los Municipios de Yuriria, Salvatierra y Valle de Santiago, al sur del estado de Guanajuato, en el centro de México (Figura 1). La ciudad más importante y cercana al embalse es Yuriria con unos 25,845 habitantes (Censo poblacional 2020, INEGI). Yuriria es un reservorio artificial construido en el año 1548 por Fray Diego Chávez y Alvarado, constituyendo la primera obra hidráulica de América Latina en la época colonial. La laguna posee una longitud de 14 Km por 6 Km de ancho y tiene una superficie de 60 km² (aproximadamente 6,000 ha). Yuriria alcanza una profundidad máxima de 5 m y un volumen medio de almacenamiento de 130 millones de m³. La zona ribereña de la laguna presenta una altitud promedio de 1,740 m s.n.m. Actualmente, sus funciones principales son: la pesca, la recreación, el control de inundaciones, y el riego agrícola al Distrito de Riego 011, contribuyendo con el desarrollo socioeconómico a nivel local y regional. También, el embalse funge como un regulador del microclima de la región. Además, este reservorio posee una enorme importancia desde el punto de vista ecológico. Se destaca la importancia numérica y diversidad de especies de aves migratorias y otros animales con la función de soporte de esas poblaciones en periodos críticos de sus ciclos biológicos (especialmente las

migraciones hemisféricas; Ficha Informativa de los Humedales de RAMSAR; <https://rsis.ramsar.org/es/rs/1361?language=es>.

Las actividades principales que se desarrollan a su alrededor son la agricultura de temporal y especialmente de riego (parcelas de Ciénega Prieta, Módulo de Riego Salvatierra y Valle) y la ganadería. Cabe mencionar, el desarrollo de la industria textil en los municipios de Moroleón y Uriangato. En el territorio de la subcuenca hidrológica se ha producido un crecimiento poblacional en los últimos años, especialmente en las cabeceras municipales (Figura 2). Esto aunado a las actividades económicas ha provocado un deterioro de los recursos naturales en el área de la cuenca.

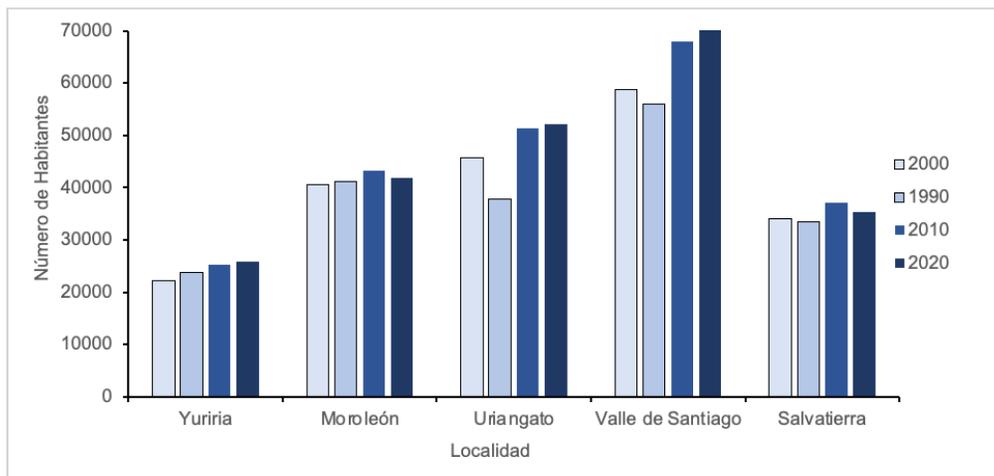


Figura 2. Crecimiento poblacional en las cabeceras municipales de la subcuenca hidrológica de la laguna de Yuriria. Datos de los censos poblacionales: 1990, 2000, 2010 y 2020 (Fuente de datos: INEGI). Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis climatológico, se utilizaron las series de tiempo de las variables temperatura (T) precipitación (P) y evaporación (EV) registradas en las estaciones Santa María (periodo: 1940-2019), operada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN; Figura 3). La temperatura media mensual histórica presentó un valor de 19.17 °C, la precipitación media anual histórica alcanzó un valor de 669.37 mm mientras que el valor de la evaporación fue de 1899.33 mm. El balance hídrico resultó negativo, con un valor de -1229.96 mm.

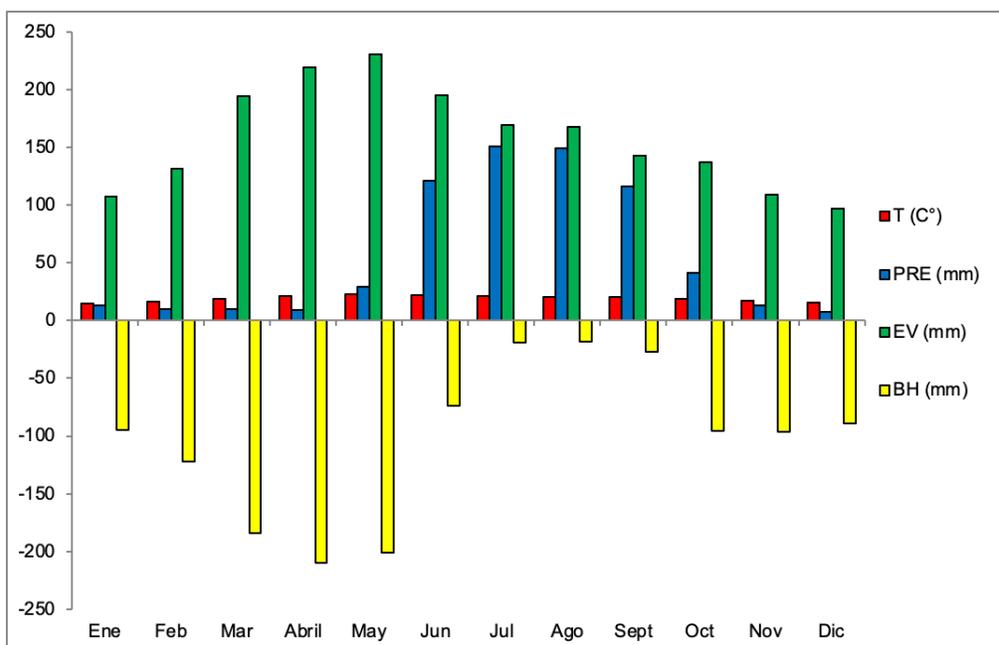


Figura 3. Medias mensuales históricas de temperatura, precipitación y evaporación de la estación Santa María (periodo 1940-2019). T: temperatura, PRE: precipitación, EV: evaporación y BH: balance hídrico. Fuente:Elaboración propia.

Parámetros *in-situ*

La determinación de los parámetros *in-situ* se llevó a cabo el 30 de septiembre de 2020 en el interior de laguna y el 1 de octubre de 2020 en los canales tributarios y el efluente, mediante un equipo multiparamétrico HANNA HI98194. Las mediciones se realizaron a tres profundidades: 0.2, 1.0 y 1.5 m. Una vez ubicados en la estación de monitoreo se tomaron las coordenadas del punto con un GPS y la profundidad con una ecosonda GARMIN STRIKER PLUS 7sv. Los parámetros *in-situ* medidos fueron: temperatura (T, °C), pH, Oxígeno Disuelto (OD, mg/L), Sólidos Suspendidos Totales (SST, mg/L) y Conductividad Eléctrica (CE; µs/cm).

Análisis de eutrofización

En el interior de la laguna se colectaron alícuotas en dieciocho puntos superficiales (YU1 a YU18; Figura 1). Las muestras se tomaron a 20 cm de profundidad desde la superficie. Para la colecta de las muestras, se utilizaron botellas de polipropileno previamente lavadas siguiendo la normatividad nacional. Una vez finalizado el muestreo, las botellas fueron colocadas en refrigeración a 4 °C. Todos los análisis de agua de los parámetros físicos y químicos se realizaron en el Laboratorio Químico Industrial y Agrícola, S.A. DE C.V.; LAQUIMIA (Irapuato, Guanajuato).

El Fósforo total (Pt) fue medido de acuerdo con la NMX-AA-029-SCFI-2001, mediante el método del ácido vanadomolibdofosfórico. Para la digestión se adicionó ácido fuerte y persulfato de amonio y se leyó la absorbancia con un espectrofotómetro GENESYS UV-VIS marca Thermo a 470 nm.

Los datos obtenidos fueron comparados con los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en los Lineamientos de Calidad de Agua (LCA) de CONAGUA (2019) para riego agrícola y protección de la vida acuática (PVA) en aguas dulces y humedales.

Para las muestras del interior de la laguna se calculó el IET con base en las concentraciones obtenidas de Pt (Ecuación 1; Carlson 1977):

$$\text{IETPt} = 14.42 \ln(\text{TP}) + 4.13 \quad (1)$$

Según los valores que alcanza el IET, se diferencian cuatro categorías: oligotrófico (< 40), mesotrófico (> 40 y < 50), eutrófico (> 50 y < 70) e hipereutrófico (> 70).

Resultados y discusión

En la Tabla 1 se muestran los datos de los parámetros *in-situ* medidos en la laguna y la Tabla 2 presenta los datos de los parámetros *in-situ* medidos en los canales.

Muestra	Prof (m)	pH	OD (mg/L)	CE (μ S/cm)	SDT (mg/L)	T ($^{\circ}$ C)
YU1	0.2	8.28	3.32	791	396	23.78
	1.0	8.21	1.86	793	397	23.02
	1.5	8.12	1.51	793	397	22.86
YU2	0.2	8.44	4.48	787	393	23.30
	1.0	8.41	4.08	786	393	22.99
	1.5	8.40	3.66	787	393	22.61
YU3	0.2	8.47	5.32	780	390	23.69
	1.0	8.47	4.37	781	390	22.56
	1.5	8.45	4.17	779	390	22.25
YU4	0.2	8.24	3.57	791	395	23.73
	1.0	8.23	2.22	792	396	22.68
	1.5	8.15	1.74	791	396	22.61
YU5	0.2	8.57	3.96	791	395	23.34
	1.0	8.13	3.48	790	395	22.70
	1.5	8.12	3.37	789	395	22.59
YU6	0.2	8.59	6.85	787	394	24.85
	1.0	8.39	4.58	793	397	22.45
	1.5	8.23	4.01	792	396	22.34
YU7	0.2	8.29	6.29	800	400	23.79
	1.0	8.38	5.48	794	397	22.19
	1.5	8.33	5.05	793	397	22.16
YU8	0.2	8.56	7.55	790	396	26.70
	1.0	8.33	5.95	792	396	22.90
	1.5	8.17	4.34	790	395	22.12

YU9	0.2	8.65	7.26	794	394	25.41
	1.0	8.57	4.91	785	393	22.18
	1.5	8.43	4.68	781	391	22.08
YU10	0.2	8.62	5.23	5.23	392	22.51
	1.0	8.29	4.71	4.71	392	22.00
	1.5	8.28	4.50	4.50	393	21.00
YU11	0.2	8.76	8.18	786	393	25.91
	1.0	8.60	4.21	783	392	22.03
	1.5	8.40	3.75	785	393	21.86
YU12	0.2	8.74	7.71	782	390	24.65
	1.0	8.71	4.50	788	393	22.32
	1.5	8.46	4.46	782	391	21.95
YU13	0.2	8.37	6.73	793	397	25.19
	1.0	8.34	5.48	793	396	24.15
	1.5	8.33	3.87	786	393	22.50
YU14	0.2	8.78	7.48	789	394	26.22
	1.0	8.65	4.04	791	397	25.02
YU15	0.2	8.80	7.69	783	392	25.43
	1.0	8.58	4.55	783	391	22.11
	1.5	8.45	4.27	780	390	22.01
YU16	0.2	8.87	8.23	789	394	27.84
	1.0	8.69	5.87	792	396	25.87
YU17	0.2	8.81	7.30	783	392	26.90
	1.0	8.71	4.80	786	394	22.58
	1.5	8.54	4.11	781	391	22.24
YU18	0.2	8.81	7.50	788	392	24.39
	1.0	8.76	4.48	781	390	22.24
	1.5	8.58	4.34	778	389	21.98

Tabla 1. Parámetros in-situ medidos en la laguna. Prof.: profundidad, OD: Oxígeno Disuelto, CE: Conductividad Eléctrica, SDT: Sólidos Disueltos Totales, T: Temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra	pH	OD (mg/L)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TDS (mg/L)	T ($^{\circ}\text{C}$)
Lerma	7.27	3.29	678	334	21.33
Monte	7.73	4.90	834	417	21.29
Cupareo	7.90	4.68	1153	576	22.15
Laurel	7.66	4.24	692	345	22.00
La Cinta	7.99	3.46	1263	631	22.88
Prieta	7.17	4.31	528	264	22.62
Zemपो la	7.32	3.30	845	423	21.85

Tabla 2. Parámetros in-situ medidos en los canales tributarios y efluente. OD: Oxígeno Disuelto, CE: Conductividad. Eléctrica, SDT: Sólidos Disueltos Totales, T: Temperatura. Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros pH, OD y Temperatura medidos en el interior de la laguna mostraron diferencias entre los puntos de muestreo y en el perfil vertical (Tabla 1). Particularmente, los valores de CE y los SDT no mostraron grandes variaciones entre los sitios de muestreo dentro del cuerpo lacustre. La temperatura también evidenció variaciones verticales en algunos puntos > a 1.5 $^{\circ}\text{C}$ entre la capa superficial (epilimnion) y la capa más profunda del agua (hipolimnion). Por su parte, los canales tributarios y el efluente registraron variaciones significativas en los parámetros de CE y SDT.

En el sistema lacustre, los valores de pH obtenidos indican que el reservorio posee aguas medianamente alcalinas, con una tendencia decreciente en el perfil vertical (Figura 4). A los 0.2 m de profundidad, el pH presentó un valor medio de 8.59, a 1.0 m de profundidad un valor de 8.47 y a 1.5 m de profundidad un valor de 8.34. Los pH alcalinos registrados en la laguna se explicarían por los procesos de meteorización de las rocas de la cuenca. También, las tasas de fotosíntesis realizadas por el fitoplancton y macrófitas acuáticas contribuirían con el aumento del pH del agua de la laguna.

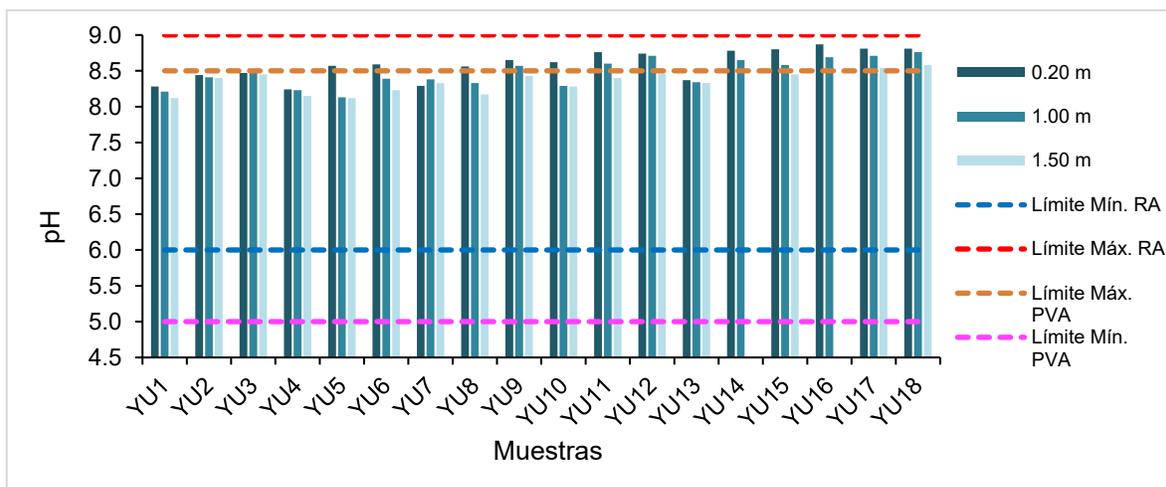


Figura 4. Variación del pH en los sitios de muestreo del interior de la laguna. RA: riego agrícola, PVA: protección de la vida acuática.

Comparando los datos de pH en los sitios del interior de la laguna y los canales con respecto a los límites para el uso del agua en RA de CONAGUA (2019), el cual indica un rango entre 6.0 y 9.0, todas las muestras cumplen con dicha normatividad. También, este lineamiento indica un rango de pH entre 6.0 y 8.5 para la PVA en agua dulce y humedales. Los valores de pH de la laguna en algunos sitios del sector oriental superan los límites.

La CE en la laguna no mostró variaciones laterales ni verticales, resultando todos los valores muy similares entre sí. A 0.20 m de profundidad, la CE alcanzó una media de 788.22 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a 1.00 m de profundidad de 788.17 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y a 1.50 m de profundidad de 785.75 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 1). Según el lineamiento nacional, el agua para riego agrícola no debe superar el valor límite de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En la laguna, ninguna muestra superó el límite. De manera similar, los SDT tuvieron mínimas variaciones entre sitios y en el perfil vertical de la columna de agua (Tabla 1). En cambio, en los canales tributarios y efluentes se encontró variación de la CE y los SDT entre los canales analizados (Figuras 5 y 6). En este sentido, el canal La Cinta presentó los valores máximos de CE con 1263 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de SDT con un valor de 631 mg/L, seguido por Cupareo (CUP) con 1153 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la CE y 576 mg/L para los SDT (Tabla 1). A diferencia de la laguna, la CE y los SDT en las muestras de los canales CIN y CUP sobrepasaron los límites permitidos para riego agrícola (Figuras 5 y 6).

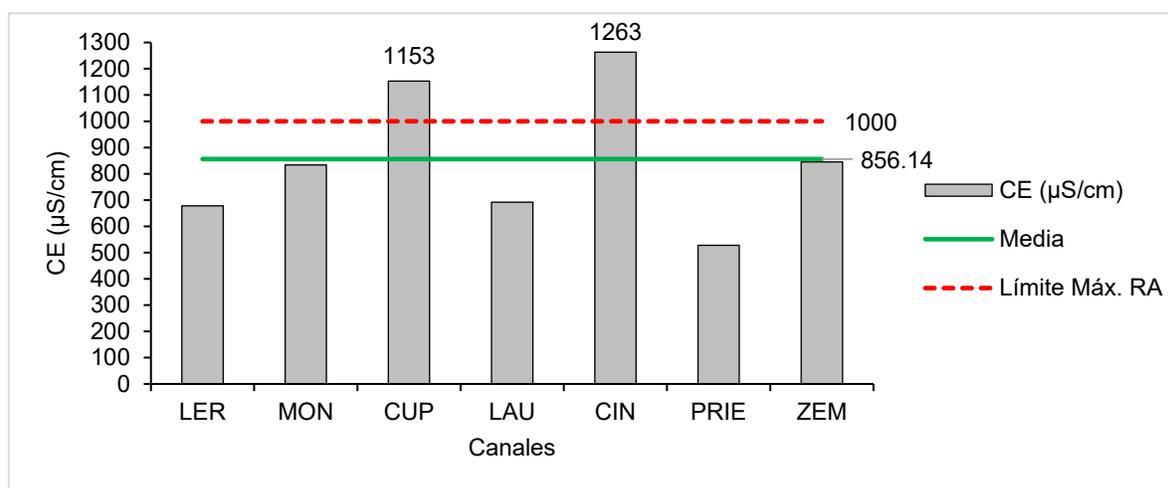


Figura 5. Variación de la conductividad eléctrica (CE) en los canales. RA: riego agrícola.

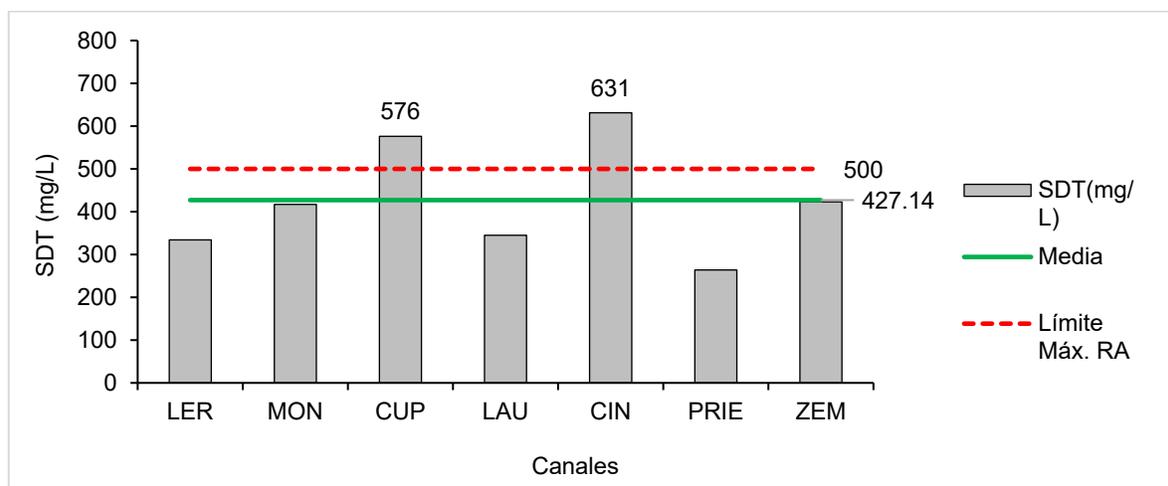


Figura 6. Variación de los sólidos disueltos totales (SDT) en los canales. RA: riego agrícola.

Los factores que influirían en los altos contenidos de sales en los canales y el cuerpo de agua son las fuentes geológicas de la región (meteorización de depósitos geológicos) y el aporte de las escorrentías agrícolas con una alta carga de

sales debido al uso de agroquímicos (sales de potasio, sulfatos, etc.). A esto hay que sumarle el aspecto climático (déficit hídrico histórico de -1230 mm) y la reducción del nivel del agua, que aumentan los valores tanto de CE como de SDT. Particularmente, para el Canal La Cinta la elevada salinidad se asociaría también a los procesos de la industria textil en las localidades de Moroleón-Uriangato.

En general, los cuerpos de agua (lagos y reservorios artificiales) presentan valores de OD en un rango de 6-13 mg/L (Wetzel 2001). La media de OD a 0.20 m de profundidad en la laguna fue de 6.37 mg/L y el valor medio a 1.50 m de profundidad fue de 3.86 mg/L (Tabla 1). Como se observa en la Figura 7, los valores de OD en la laguna disminuyeron notablemente con la profundidad en todos los sitios de muestreo. Asimismo, se observa que las muestras del sector oeste presentan valores de OD menores a las muestras de los sectores del centro y este del cuerpo de agua.

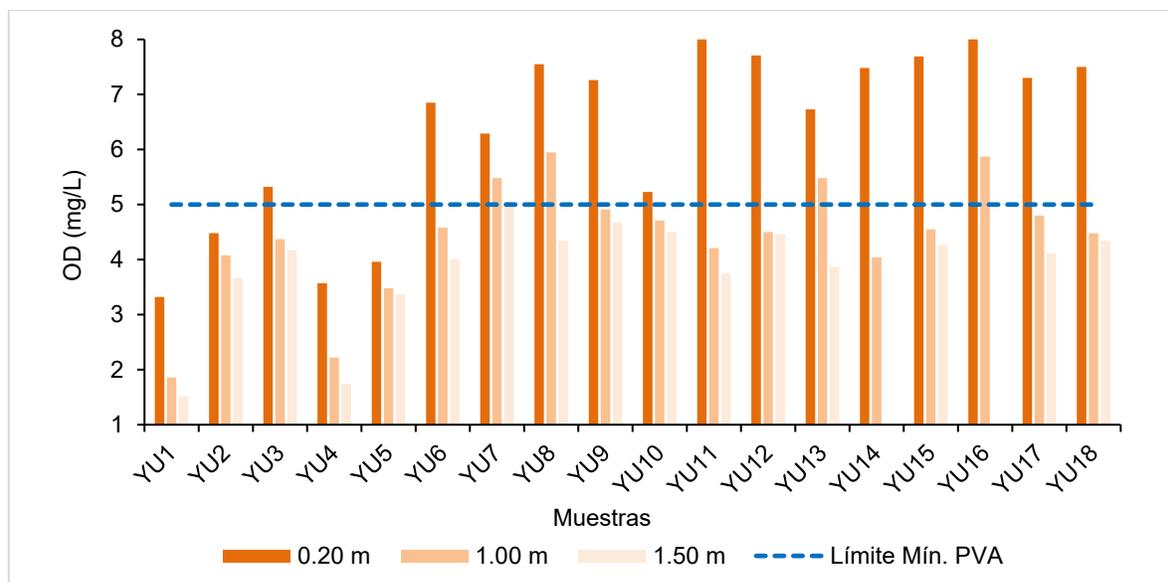


Figura 7. Variación del oxígeno disuelto (OD) en las muestras de la laguna. PVA: protección de la vida acuática.

El valor mínimo en superficie lo presentó el sitio YU1 con 3.32 mg/L y el valor mínimo en profundidad lo registró el mismo sitio con 1.51 mg/L (Tabla 1 y Figura 7). Por su parte, el sitio YU16 presentó el valor de OD máximo en superficie con 8.23 mg/L. Para el caso de los canales, el valor medio de OD fue de 4.03 mg/L. El LCA de Conagua (2019) señala que para la PVA en cuerpos de aguas dulces y humedales se debe contar con un mínimo de 5.0 mg/L de OD. Las muestras del sector oeste (YU1, YU2, YU4 y YU5) no alcanzaron con el límite mínimo a profundidades someras de 0.20 m, a excepción de la YU3 (5.32 mg/L). Por otro lado, las concentraciones de OD de las muestras de los sectores centro y este sobrepasaron el valor mínimo a 0.20 m de profundidad. Sin embargo, el 100% de los sitios muestreados a 1.50 m de profundidad y la totalidad de los canales no alcanzaron el mínimo para la PVA (Figura 7 y Tabla 1). Los datos de OD obtenidos indican que en la zona oeste de la laguna, tanto en superficie como en profundidad, y en la zona más profunda de todo el cuerpo de agua, existen condiciones hipóxicas, las cuales generarían especialmente en el sector occidental zonas muertas acuáticas ($OD < 2$ mg/L). El agotamiento del OD en el cuerpo de agua es una consecuencia del proceso de eutrofización, producido por un enriquecimiento de nutrientes, especialmente de fósforo (P) y nitrógeno (N).

Finalmente, los valores de temperatura medidos en la laguna se encontraron en rangos óptimos para el desarrollo de las especies de peces que habitan el cuerpo de agua (tilapias, bagres, carpas).

A continuación, la Tabla 3 muestra los datos obtenidos de Pt y el IETPt en las muestras de la laguna.

Muestra	Pt (mg/L)	IET _{Pt}	Clase IET
YU1	0.423	91.33	Hipereutrófico
YU2	0.883	101.95	Hipereutrófico
YU3	0.301	86.42	Hipereutrófico
YU4	0.138	75.20	Hipereutrófico
YU5	0.465	92.70	Hipereutrófico
YU6	0.451	92.26	Hipereutrófico
YU7	0.099	70.40	Hipereutrófico
YU8	0.115	72.51	Hipereutrófico
YU9	0.784	100.24	Hipereutrófico
YU10	0.777	100.09	Hipereutrófico
YU11	0.130	74.36	Hipereutrófico
YU12	0.085	68.18	Eutrófico
YU13	0.468	92.80	Hipereutrófico
YU14	0.475	92.99	Hipereutrófico
YU15	0.611	96.63	Hipereutrófico
YU16	0.606	96.52	Hipereutrófico

YU17	0.906	102.32	Hipereutrófico
YU18	0.407	90.79	Hipereutrófico

Tabla 3. Clases del Índice de Estado Trófico (IET) obtenidas para la laguna con base en la concentración de Fósforo Total (Pt). Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el cálculo de los IET con base en el Pt, todos los sitios muestreados en el interior de la laguna obtuvieron una categoría hipereutrófica (Tabla 3 y Figura 8), a excepción de la muestra YU12, la cual obtuvo una categoría eutrófica.

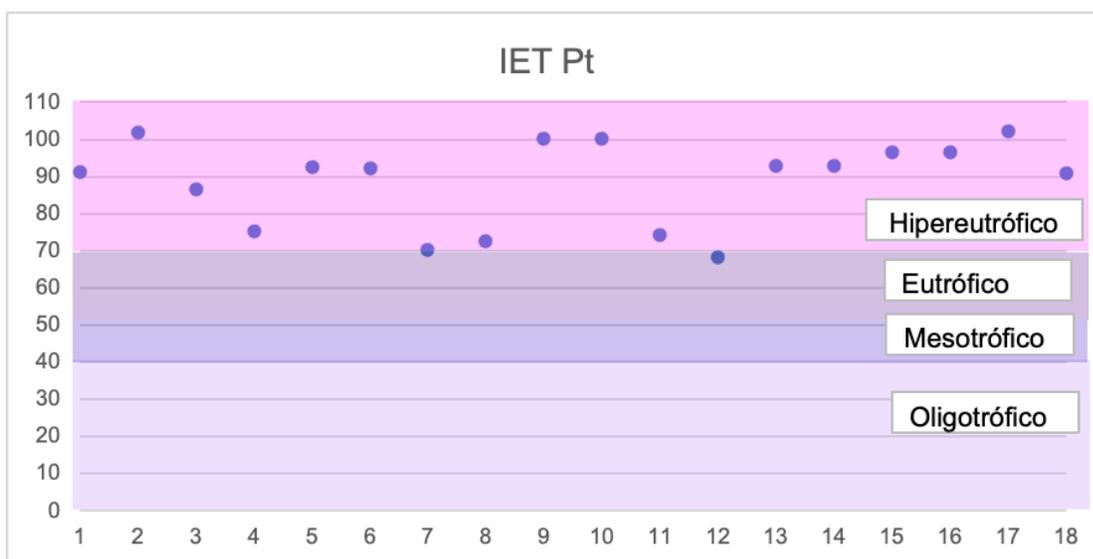


Figura 8. Clases de IETPt obtenidos en los sitios de muestreo de la laguna.

La eutrofización es uno de los problemas más comunes que enfrentan los reservorios artificiales en la actualidad. La eutrofización se refiere al enriquecimiento de nutrientes de los cuerpos de agua, especialmente por aportes de N y P. Ambos elementos juegan un rol principal limitando la productividad en los sistemas acuáticos (Davidson y Jeppesen 2013). La eutrofia en los cuerpos lacustres es causada por un exceso de nutrientes y se refleja en una sobreproducción de fitoplancton, algas y macrófitas flotantes. Según Prats et al. (2014), durante los períodos de estratificación térmica, el exceso de biomasa producida en la zona fótica y aerobia sedimenta hacia el fondo donde es mineralizada por organismos utilizando el oxígeno del agua del hipolimnion. En casos de gran producción primaria en la superficie, se puede llegar a consumir todo el oxígeno disponible en las zonas profundas del lago produciendo episodios de anoxia. Para el caso de la Laguna de Yuriria, las principales fuentes del enriquecimiento en nutrientes serían las aguas residuales que se vierten desde las zonas ribereñas, los detergentes, la escorrentía de la agricultura y los efluentes provenientes de áreas urbanas.

Conclusiones

- Los valores de OD y pH para los sitios muestreados del interior de la laguna no cumplieron en todos los casos con los límites permisibles para la protección de la vida acuática.
- El agua de algunos canales tributarios presentó restricciones para su uso en riego agrícola debido a que los valores registrados de CE y SDT sobrepasaron los LMP de la normatividad nacional. Esto alerta sobre una salinización de la laguna que recibe agua proveniente de los canales. El aumento de sales en los cuerpos de agua es debido al uso de agroquímicos, la meteorización geológica y el déficit hídrico.
- Con base en el IET, la laguna evidenció un proceso avanzado de eutrofización, el cual genera condiciones de hipoxia en profundidad, una mayor turbiedad y una superpoblación de fitoplancton y macrófitas, afectando la supervivencia de la vida acuática.

- Es necesaria la instauración y fortalecimiento de distintas acciones mediante un esfuerzo multisectorial, tendientes al monitoreo, protección y restauración del sistema lacustre.
- Las estrategias de gestión deben enfocarse al cuidado y mantenimiento de los servicios ecosistémicos, la protección a la vida acuática y el aseguramiento de la aptitud del agua para los distintos usos.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a la Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial del estado de Guanajuato (SMAOT), por el apoyo financiero para la realización del proyecto. Muchas gracias a la Universidad de Guanajuato por las becas otorgadas a S.V.S., Z.B.M. y B.O.R.

Referencias

- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22, 361369.
- Cohen, A.S. 2003. *Paleolimnology: The history and evolution of lake systems*. Oxford University Press, New York.
- CONAGUA 2019. Ley Federal de Derechos – Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación. México, D.F. 01 de octubre de 2019.
- Davidson, T., Jeppesen, E. 2013. The role of palaeolimnology in assessing eutrophication and its impact on lakes. *Journal of Paleolimnology*, 49: 391-410.
- Espinal Carreón, T., Sedeño Díaz, J.E., López López, E. 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. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 29(3): 147-163.
- Halac, S. Mengo, L., Guerra, L., Lami, A., Musazzi, S., Loizeau, J.L., Ariztegui, D., Piovano, E.L. 2020. Paleolimnological reconstruction of the centennial eutrophication processes in a sub-tropical South American reservoir. *Journal of South American Earth Sciences*, 103: 102707.
- Prats, J., Morales B. R., Dolz, J., Armengol, J. 2014. Aportaciones de la limnología a la gestión de embalses. *Ingeniería del Agua*, 18 (1): 83-97.
- Secretaría de Economía 2001. Norma Mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001, Análisis de agua - Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. Secretaría de Economía, Diario Oficial de la Federación. México, D.F. 17 de abril de 2001.
- Skinner, B. J., Murck, B. W. 2011. *The Blue Planet, An Introduction to Earth System Science*. John Wiley & Sons, INC. United States of America.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology. Lake and River Ecosystems*. New York. Academic Press.
- Wu, Z., Wang, X. Chen, Y., Cai, Y., Deng, J. 2018. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment*, 612, 914-922.
- Zahra, A., Hashmi, M.Z., Malik, R.N., Ahmed, Z. 2014. Enrichment and geoaccumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah-Feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan. *Science of the Total Environment*, 470-471: 925-933.
- Zhao, C.S., Shao, N.F., Yang, S.T., Rend, H., Ge, Y.R., Zhang, Z.S., Feng, P., Liu, W.L. 2019. Quantitative assessment of the effects of human activities on phytoplankton communities in lakes and reservoirs. *Science of the Total Environment*, 665, 213-225.