

Variación espacial y temporal del Índice de calidad del agua en la estratificación térmica del lago de Zirahuén, Michoacán, México

Spatial and temporal variation of water quality index in thermal stratification of lake Zirahuén, Michoacán, México

Rosalva Mendoza-Ramírez ^{ORCID}^{a1*}, Ramón Domínguez-Mora ^{b1}, Rodolfo Silva-Casarín ^{b2}, Karina Suárez-Alcántara ^{ORCID}^{a2}, Anibal Sol-Benítez ^c, Eliseo Carrizosa-Elizondo ^{b3}

^a Unidad Morelia del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Unidad Morelia del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Antigua carretera a Pátzcuaro, Ex Hacienda de San José de la Huerta, CP 58190, Morelia, Mich. México.

^b Instituto de Ingeniería de la UNAM. Ciudad Universitaria. Coyoacán. CP 04510. Ciudad de México, México.

^c Asesor externo.

E-mail: ^{a1}rmmr@pumas.iingen.unam.mx, ^{b1}RDomínguezM@iingen.unam.mx, ^{b2}RSilvaC@iingen.unam.mx, ^{a2}karina_suarez@materiales.unam.mx, ^cAsolbe22@hotmail.com, ^{b3}ECarrizosaE@iingen.unam.mx

*Autor para correspondencia

Recibido: 31/07/2024

Aceptado: 01/12/2024

Publicado: 31/01/2025

Citar como: Mendoza-Ramírez, R., Domínguez-Mora, R., Silva-Casarín, R., Suárez-Alcántara, K., Carrizosa-Elizondo, E., Sol-Benítez, A. 2025. Spatial and temporal variation of water quality index in thermal stratification of lake Zirahuén, Michoacán, México. *Ingeniería del agua*, 29(1), 15-29. <https://doi.org/10.4995/ia.2025.22204>

RESUMEN

Se analizaron las variaciones espaciales y temporales del índice de calidad del agua en las tres capas de estratificación térmica en un cuerpo de agua endorreico de Michoacán, México. Se utilizaron dos métodos, el primero es el desarrollado por la Fundación Nacional de Saneamiento de los Estados Unidos de América, que usa nueve variables, físicas, químicas y bacteriológicas, para la estimación del índice. El segundo usa tres parámetros que son recomendados por la Comisión Nacional del Agua en México. El conjunto de datos analizado es una base de datos pública con información de los años 2012 a 2019 en cuatro sitios de muestreo. Los resultados mostraron que la calidad del agua del lago es buena y que en los meses en los que se rompe la estratificación térmica la calidad del agua en el lago es ligeramente mejor que la registrada en los meses de estratificación térmica.

Palabras clave | índice de calidad del agua; lago endorreico; estratificación térmica.

ABSTRACT

Spatial and temporal variations of the water quality index in three thermal stratification layers in an endorheic water body in Michoacán, México, were analyzed. Two methods were used, the first was developed by the US National Foundation of Sanitation and involves nine variables, physical, chemical, and bacteriological. The second method uses three parameters recommended by the National Commission of Water in México. The data set analyzed is a public database with information from the years 2012 to 2019, at four sampling sites of the National Commission of Water. The results show that the water quality of the lake is good, and water quality is slightly better in months without thermal stratification than in months when the phenomenon is present.

Key words | water quality index; endorheic lake, thermal stratification.

INTRODUCCIÓN

El recurso agua es vital para el desarrollo y continuidad de toda la vida en el planeta, mantenerlo y preservar fuentes de abastecimiento, tanto superficiales como subterráneas, libres de los contaminantes que las actividades humanas producen es tarea fundamental. La literatura reporta diversas metodologías desarrolladas y aplicadas para conocer de manera rápida el grado de contaminación del recurso agua, mediante el denominado índice de calidad del agua (ICA), (Abbasi y Abbasi, 2012; Tyagi *et al.*, 2013; Rodríguez *et al.*, 2016; Dascalescu *et al.*, 2017; Gaytán *et al.*, 2021; Nguyen *et al.*, 2022; Chidiac *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2024). Casi todas involucran la selección de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos, la transformación de valores en una escala común, la asignación de pesos y su cálculo como subíndices para sumarlos y obtener un valor final cuyo rango se define entre cero y cien. También existen índices basados en bioindicadores que utilizan organismos sensibles a la presencia de contaminantes o de cambios en el ecosistema (Forero *et al.*, 2014; García *et al.*, 2017; Rincón-Bello *et al.*, 2021; Mendoza-Cruz, 2023; Vega-Garzón *et al.*, 2024). En el caso de las metodologías basadas en la evaluación de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos, el valor del índice está asociado con una escala de clasificación de la calidad que define como “Muy mala” a valores entre cero y 25; “Mala” si el resultado es mayor a 25 y menor o igual a cincuenta; para que la calidad del ICA sea “Media” requiere obtener puntajes mayores a cincuenta y menores o iguales a setenta; si el ICA es mayor a setenta y menor o igual a noventa se asocia con calidad “Buena”; solo estimaciones mayores a 90 obtendrán clasificación de “Excelente” (Brown *et al.* 1970). Sin embargo, cuando se trata de aplicar estas metodologías la elección es un tanto cuanto subjetiva, y dependerá del uso que el recurso agua tenga y de lo que se pretenda evaluar.

En México, a principios de los años setenta se utilizaban 18 parámetros para determinar el ICA, pero factores como el crecimiento poblacional e industrial han hecho que se emita la recomendación de elaborar una nueva metodología que considere la mayoría de las condiciones de las estaciones de medición de la red nacional de monitoreo. Actualmente, la evaluación se hace usando solo tres parámetros, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST), que muestran la influencia de esos factores en el deterioro de la calidad del agua. El valor de estos parámetros se establece dentro de un rango y dependiendo de su estimación alcanza clasificaciones de “Excelente”, “Buena calidad”, “Aceptable”, “Contaminada” y “Fuertemente contaminada” (SEMARNAT, 2013).

Un aspecto a considerar en el presente trabajo es el efecto en la calidad del agua de la estratificación térmica que afecta principalmente a la distribución del oxígeno disuelto, nutrientes, contaminantes y flora y fauna acuática (Amorim *et al.*, 2019; Briddon *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024; Duka *et al.*, 2024). El propósito del trabajo es tomar una de las metodologías del tipo aditivo y la que se recomienda en México para evaluar y analizar el ICA en cuatro sitios de muestreo en un cuerpo de agua, que desde 1985 tiene reportes del fenómeno de estratificación térmica (Vergara, 2006), usando datos medidos para el periodo de tiempo del 2012 al 2019, y contando además con el saneamiento, por una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) puesta en operación desde 2014, de las aguas vertidas a la principal corriente superficial que desemboca al lago. Este almacenamiento natural de agua constituye una importante fuente de ingresos económicos a las comunidades asentadas en la ribera, y es por ello que el conocer el estado pasado y actual de la calidad del agua en él, conducirá a un mejor entendimiento y aprovechamiento integral de los recursos de la cuenca que tiendan hacia su conservación y sustentabilidad.

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción general del sitio de estudio

El cuerpo de agua estudiado se localiza en el estado de Michoacán, se conoce con el nombre de lago de Zirahuén, su cuenca se localiza entre las coordenadas 19° 21' 14" – 19° 29' 32" de latitud N y 101° 30' 33" – 101° 46' 15" de longitud O (Figura 1). Cubre aproximadamente 260 km², es de tipo endorreico, con una red hidrológica cuyos flujos tanto superficial como subsuperficial son drenados por el río La Palma (también conocido como El Silencio), que nace a más de tres mil m sobre el nivel del mar (s.n.m) en el extremo este de la cuenca. El clima es templado subhúmedo con una precipitación media anual de 900 mm, que se concentra durante los meses de junio a noviembre. La temperatura promedio anual es de 16 °C (Chacón *et al.*, 2004; Bravo *et al.*, 2008). Santa

Clara del Cobre, Opopeo y Zirahuén son los poblados más importantes en la cuenca (Figura 1), con 16748, 11304 y 3263 habitantes, respectivamente (INEGI, 2020). Hasta mediados del 2014, las perturbaciones más importantes en el equilibrio del lago procedían de estos asentamientos con descargas domésticas e industriales no tratadas, que desembocaban directamente en el río La Palma. A fines del 2014 se logró la construcción y puesta en operación de la PTAR de Santa Clara del Cobre, que se localiza aproximadamente 9 km aguas arriba del lago (Figura 2).

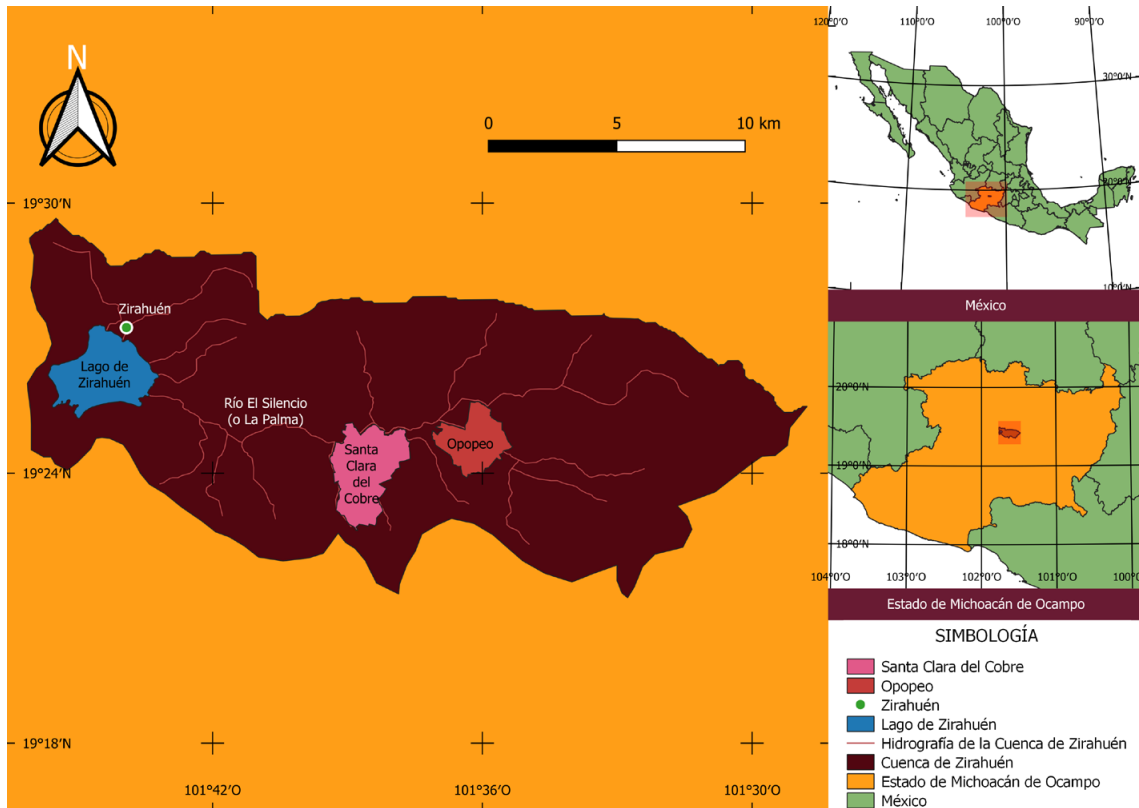


Figura 1 | Lago de Zirahuén en México, hidrología de la cuenca y poblados principales (Fuente: SINA, 2024).

El cuerpo de agua se encuentra en una región volcánica activa (Davies *et al.*, 2004; Vázquez *et al.*, 2010), se clasifica como monomítico según su régimen térmico, y como oligotrófico por la cantidad de nutrientes (fosfatos y nitratos) (Vergara, 2006; CEAC, 2023). El lago tiene una profundidad máxima reportada que va desde los 39 m hasta los 46 m (De Buen, 1942; Torres *et al.*, 2012). Presenta estratificación térmica que se inicia en marzo y se prolonga hasta inicios de noviembre. De diciembre a mediados de marzo no existe diferencia entre la temperatura de superficie y la de fondo, y se tiene un periodo de mezcla que se mantiene hasta el final del invierno (mediados de marzo). En el periodo de estratificación la diferencia máxima de temperaturas (superficie-fondo) se da entre el final de la primavera y los meses de verano (Vergara, 2006). La primera capa, llamada epilimnion comprende una profundidad entre el nivel del agua y los 17 m. La de enmedio conocida como metalimnion abarca profundidades mayores a los 17 m pero inferiores a los 22 m. El hipolimnion es la más baja con profundidades mayores a los 22 m.

Para preservar la salud del cuerpo de agua, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) realiza muestreos en forma sistemática y a diferentes profundidades desde 2012 en cinco puntos de la cuenca: cuatro en el lago y uno en el río, su ubicación e identificación se muestran en la Figura 2. Los límites permisibles de las variables medidas en el cuerpo de agua se establecen de acuerdo a los criterios ecológicos de calidad del agua para los usos de Pesca y conservación de la vida acuática (ver Tabla 5) (DOF, 1989).

La Figura 3 muestra la distancia entre cada punto de muestreo en el lago, se puede ver que los más cercanos son Muelle principal y Entrada 2. Los más distantes entre sí son Entrada 2 y Centro. Las campañas de muestreo se realizan en distintos meses



Figura 2 | Localización de sitios de muestreo y de la PTAR de Santa Clara del Cobre.

del año, tratando de cubrir la temporada de estiaje (meses de diciembre a mayo, en los que domina la mezcla de las capas) y la de lluvias (meses de junio a noviembre, periodo con estratificación térmica) (Tabla 1). Las muestras se procesan en el laboratorio de la dependencia y se determinan 389 parámetros físicos, químicos, bacteriológicos, y se incluye también la cuantificación de algunos metales pesados. Los datos se integran en el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA, 2024).

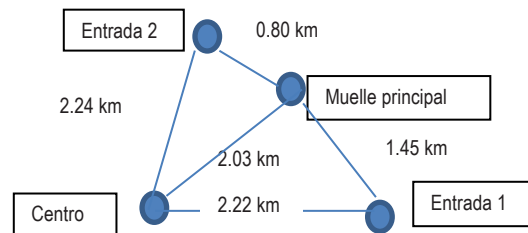


Figura 3 | Diagrama de sitios de muestreo y distancias.

Tabla 1 | Campañas de muestreo realizadas durante los años 2012 a 2019. Lago de Zirahuén.

Año	Fecha	Año	Fecha	Año	Fecha	Año	Fecha
2012	31 oct	2013	14 may; 25 sep	2014	2 abr; 9 oct	2015	14 abr; 21 oct
2016	16 jun; 12 oct	2017	23 mar; 18 oct	2018	19 abr; 21 jun; 8 nov	2019	7 mar

Metodologías para evaluar el ICA

a) Método de la Fundación Nacional de Saneamiento (FNS)

De las diversas metodologías del tipo aditivo reportadas en la literatura se eligió la que es más usada, y es la desarrollada por la FNS en los años setenta (Brown *et al.*, 1970). Evalúa nueve parámetros y a cada uno le asigna un peso (Tabla 2), el valor

del parámetro se asocia con gráficas que dan un resultado de calidad que junto con el peso proporcionan el valor del índice del parámetro. La suma de los nueve índices da el total del ICA y este finalmente se asocia a las calificaciones de la Tabla 3 para saber la calidad del recurso.

Tabla 2 | Parámetros y peso para evaluar el ICA (Boulder Area Sustainability Information Network, 2022).

Variable	Unidades	Peso (w)	Variable	Unidades	Peso (w)	Variable	Unidades	Peso (w)
Coliformes fecales	NMP/100 mL	0.16	pH	Unidades	0.11	Oxígeno disuelto	% sat	0.17
DBO ₅	mg/L	0.11	Fosfatos totales	mg/L	0.10	ΔT	°C	0.10
Turbiedad	NTU	0.08	Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/L	0.07	Nitrógeno en nitratos	mg/L	0.10

En el caso del lago de Zirahuén, las variables oxígeno disuelto (OD) y pH se miden a diferentes profundidades en las tres capas de estratificación que presenta el lago. Para las siete variables restantes: Coliformes fecales, DBO₅, Turbiedad, Fosfatos totales, Sólidos disueltos totales, ΔT (diferencia entre la temperatura ambiente y la de la muestra) y Nitratos, se decidió tomar los datos de ellas a la profundidad de 5 m para el epilimnion, entre los 18 m y 20 m para el metalimnion, y lo reportado a profundidad mayor a 22 m correspondería al hipolimnion.

Tabla 3 | Escala de clasificación del ICA (Boulder Area Sustainability Information Network, 2022).

Clasificación	Valor (%)	
	Mínimo	Máximo
Excelente	91	100
Buena	71	90
Media	51	70
Mala	26	50
Muy mala	0	25

b) Metodología de la CONAGUA en México

En México, una forma rápida de evaluar la calidad del agua es tomando los valores de las variables DBO₅, DQO y SST y clasificarlas según los rangos mostrados en la Tabla 4. La DBO₅ mide la cantidad de materia orgánica que es degradada por procesos biológicos. El origen de la materia orgánica susceptible a biodegradarse, son las aguas residuales urbanas. La DQO es un parámetro que mide la cantidad de materia orgánica que es degradada por medios químicos. La literatura reporta que un aumento de la DBO₅ o de la DQO provoca una disminución en el contenido del OD en el agua, limitando el crecimiento de plantas acuáticas, que es indispensable para que se mantenga la vida aerobia en los ecosistemas acuáticos. Los SST miden la cantidad de material (sólido) que se encuentra suspendido en el agua y no puede ser disuelto. Un aumento de los SST causa turbiedad en el agua y una disminución del paso de la luz solar en los cuerpos de agua impidiendo o reduciendo la actividad fotosintética, que reviste gran importancia para la producción de oxígeno disuelto. Su origen puede ser antropogénico por contaminación con aguas residuales o por procesos de erosión hídrica, principalmente en zonas agrícolas y zonas altamente deforestadas (SEMARNAT, 2013).

Tabla 4 | Escala de clasificación para el ICA en México (SEMARNAT, 2013).

Criterio (mg/L)			Clasificación
DBO ₅ ≤ 3	DQO ≤ 10	SST ≤ 25	Excelente
3 < DBO ₅ ≤ 6	10 < DQO ≤ 20	25 < SST ≤ 75	Buena calidad
6 < DBO ₅ ≤ 30	20 < DQO ≤ 40	75 < SST ≤ 150	Aceptable
30 < DBO ₅ ≤ 120	40 < DQO ≤ 200	150 < SST ≤ 400	Contaminada
DBO ₅ > 120	DQO > 200	SST > 400	Fuertemente contaminada

c) Similitudes y diferencias de los dos métodos

Ambos métodos evalúan solo una variable en común: la DBO_5 , que es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días, y cuya medición tiene como limitante que debe tomarse como un valor aproximado, ya que las condiciones de laboratorio no reproducen las condiciones de temperatura, luz solar y movimiento del agua que tienen influencia sobre el proceso de descomposición y que difieren de un tiempo y lugar a otro (SEMARNAT, 2024). La principal diferencia entre ambos métodos es que con el de la FNS se obtiene un número que puede clasificarse con la Tabla 3 en general y con la Tabla 5 en particular usando la columna correspondiente a “Pesca y conservación de la vida acuática”. Usando el método de la CONAGUA no se obtiene un valor numérico como tal del ICA, solo se tiene una clasificación de acuerdo a los límites en los cuales se encuentren las tres variables que se miden (Tabla 4). Esto es, solo se obtendrán tres clasificaciones de calidad, una por variable, que serán “Excelente”, “Buena”, “Aceptable”, “Contaminada” y “Fuertemente contaminada”.

Tabla 5 | Clasificación del Índice del ICA de acuerdo al uso del agua (SEMARNAT, 2002).

Valor del ICA (%)	Criterio general	Público- Urbano	Recreativo	Pesca y conservación de vida acuática	Industria y Riego	Navegación
100					No requiere purificación	
90	No contaminada	No requiere purificación	Aceptable para todos los deportes acuáticos	Aceptable para todos los organismos		
85						
80	Aceptable	Require purificación ligera			Ligera purificación para algunos procesos	
70						Aceptable
60	Ligeramente contaminada	Tratamiento recomendado	Aceptable pero no recomendada	Aceptable, excepto para organismos susceptibles	No requiere tratamiento para uso industrial	
50				Dudosa para organismos sensibles		
40	Contaminada	Dudosa	Dudosa	Solo organismos muy resistentes	Requiere tratamiento para la mayor parte del uso industrial	
30			Evitar contacto con el agua			
20	Fuertemente contaminada	No aceptable	Ligeramente contaminada		Uso restringido	Contaminada
10				No aceptable		
0			No aceptable		No aceptable	No aceptable

RESULTADOS

El cálculo del ICA con las dos metodologías seleccionadas mostró lo siguiente:

1. Con la metodología de la FNS:
 - a) Los cuatro sitios de muestreo que se presentan en la Figura 3 con sus distancias de separación, indicaron que en las tres capas de estratificación térmica del lago, Entrada 1 y Entrada 2, separados aproximadamente 2.25 km, son los que presentan un comportamiento similar del ICA. Los valores en Muelle principal, que se encuentra separado 0.80 km de Entrada 2, y 1.45 km de Entrada 1, muestran un comportamiento similar al sitio del que se encuentra menos distante (Entrada 2). El punto que muestra mayor heterogeneidad en el índice es el llamado Centro, con distancias de separación de poco más de 2 km de los otros tres lugares de muestreo.
 - b) Analizando las gráficas de la Figura 4, se tomó la suma del valor absoluto de las diferencias entre cada sitio, se encontró que la mayor variación espacial del ICA en el epilimnion, se da entre Entrada 1 y Muelle principal con Centro (35.4 unidades (u) y 35.2 u, respectivamente), seguido de Entrada 1 con Muelle principal (29.4 u), en orden descendente

continúa Muelle principal con Entrada 2 (28.2 u), después Entrada 2 con Centro (27.1 u), y la menor variación se da entre Entrada 1 con Entrada 2 (24.8 u). En el metalimnion la mayor acumulación de las diferencias se da entre Muelle principal, Entrada 1 y Entrada 2 con el lugar denominado Centro (115.5 u, 113.5 u y 111.8 u, respectivamente), sigue Muelle principal con Entrada 2 (31.4 u), enseguida Entrada 1 con Muelle principal (23.6 u), y finalmente las mínimas variaciones se dan nuevamente entre Entrada 1 y Entrada 2. En el hipolimnion se vuelve a encontrar, igual que en la capa del metalimnion, que las diferencias mayores se presentan entre Entrada 2, Entrada 1 y Muelle principal con Centro (172.6 u, 172.2 u y 162.7 u, respectivamente), la menor variabilidad se tiene entre Muelle principal con Entrada 2 (30 u). Las menores variaciones espaciales se encuentran en el epilimnion y las mayores en el hipolimnion. Los más parecidos en valores del ICA y por tanto en calidad del agua en las tres capas de estratificación térmica son Entrada 1, Muelle principal y Entrada 2.

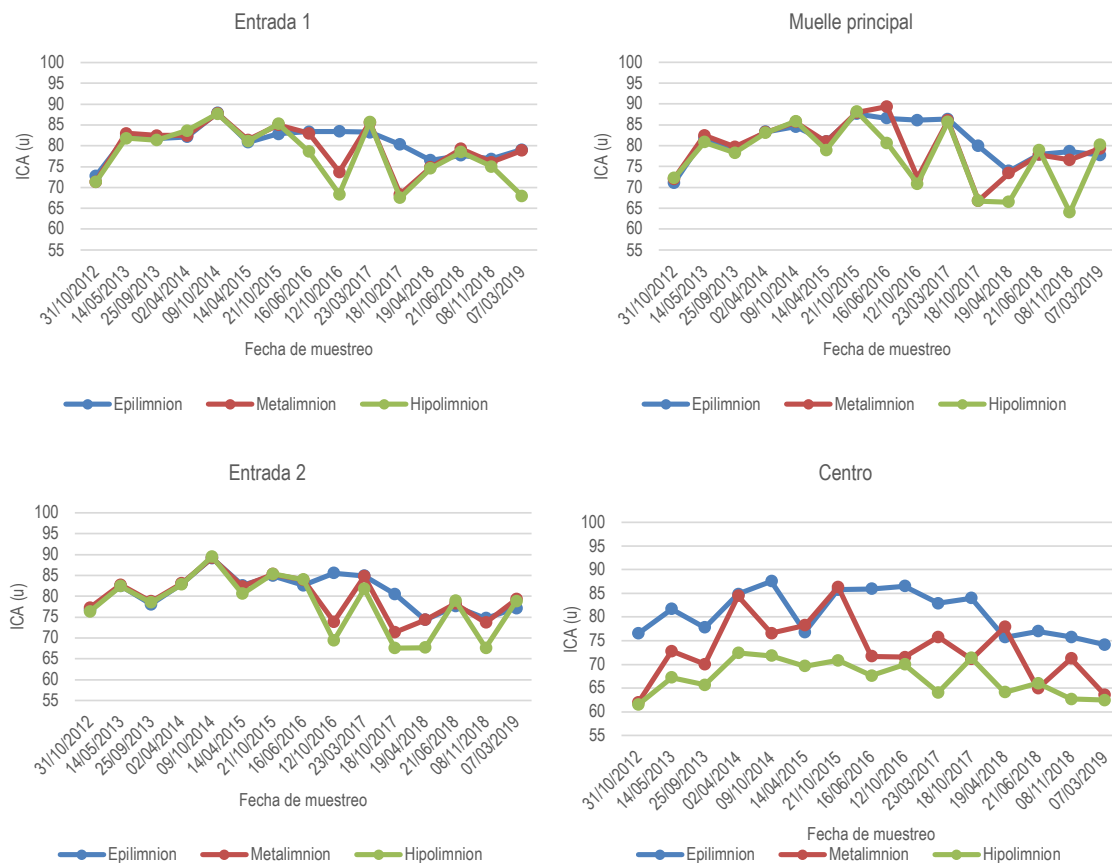


Figura 4 | Valores del ICA en los cuatro sitios de muestreo y por capa de estratificación térmica.

- c) Temporalmente hay similitud entre Entrada 1, Entrada 2 y Centro. Al buscar el resultado máximo del ICA se encontró un valor de 88 u (en el epilimnion en Entrada 1 y Centro), y de 90 u (en el metalimnion para Entrada 2). Las tres estimaciones son en la campaña del 9 de octubre del 2014. Muelle principal registra un máximo del ICA (89 u) en la campaña del 16 de junio del 2016. El registro mínimo del ICA coincide temporalmente (campaña del 18 de octubre del 2017) en los sitios Entrada 1 y Entrada 2, con 68 u en ambos. En Muelle principal se obtuvieron 64 u en la campaña del 8 de noviembre del 2018, y en Centro 61 u el 31 de octubre del 2012. En los cuatro puntos de muestreo el registro mínimo del ICA siempre se obtiene en el hipolimnion.

- d) Cada valor numérico del ICA está asociado con una escala de clasificación (Tabla 3) para conocer la calidad del recurso. Esta se presenta en la Tabla 6 para cada una de las capas de estratificación del lago. Se puede ver que en el epilimnion los cuatro sitios muestreados tienen calidad “Buena” en todos los años de análisis (del 2012 al 2019). En el metalimnion se tiene mayoritariamente una calidad “Buena”, con solo cinco resultados que alcanzan calidad “Media”. De estos cinco, tres se presentan en el punto de muestreo que se encuentra más alejado de la periferia del lago (Centro). En la capa más profunda 21 resultados tienen calidad “Media” y 39 calidad “Buena”. Once de esos 21 valores con calidad “Media” nuevamente se registran en el lugar identificado como Centro, el resto se distribuye entre los tres restantes sitios de muestreo (4 en Entrada 2 y Muelle principal, respectivamente; y tres en Entrada 1). En el mes de octubre del año 2016 y del 2017, y en los meses de abril y noviembre del 2018 los índices son temporalmente los más bajos, en la capa más profunda.
- e) Si se usa la Tabla 5 para calificar al ICA de acuerdo con el uso del agua en el lago, se encontró que para las tres capas de estratificación el índice se encuentra en dos rangos: $r_1 = 60 < ICA \leq 80$, y en $r_2 = ICA > 80$, con esto se tiene que la calidad del agua es “Aceptable excepto para organismos sensibles” para el caso del r_1 y “Aceptable para todos los organismos” para el r_2 .
- f) En la escala del tiempo la calidad del agua en el lago es “Buena” en el epilimnion y en el metalimnion. En el hipolimnion se presentan años con calidad “Media”, pero en general la calidad del recurso se puede decir que es “Buena”.

Tabla 6 | Epilimnion: clasificación del ICA en el lago de Zirahuén.

		Epilimnion, Metalimnion e Hipolimnion				
	Fecha de muestreo	31/10/2012	14/05/2013	25/09/2013	02/04/2014	09/10/2014
	Entrada 1	B B B	B B B	B B B	B B B	B B B
	Muelle principal	B B B	B B B	B B B	B B B	B B B
	Entrada 2	B B B	B B B	B B B	B B B	B B B
	Centro	B M M	B B M	B B M	B B B	B B B
	Fecha de muestreo	14/04/2015	21/10/2015	16/06/2016	12/10/2016	23/03/2017
Sitio	Entrada 1	B B B	B B B	B B B	B B M	B B B
	Muelle principal	B B B	B B B	B B B	B B B	B B B
	Entrada 2	B B B	B B B	B B B	B B M	B B B
	Centro	B B M	B B B	B B M	B B M	B B M
	Fecha de muestreo	18/10/2017	19/04/2018	21/06/2018	08/11/2018	07/03/2019
	Entrada 1	B M M	B B B	B B B	B B B	B B M
	Muelle principal	B M M	B B M	B B B	B B M	B B B
	Entrada 2	B B M	B B M	B B B	B B M	B B B
	Centro	B B B	B B M	B M M	B B M	B M M

B = Buena, M = Media.

- g) Las campañas de 2012 a 2019 se realizaron tanto en temporada de estiaje (diciembre a mayo) como en lluvias (junio a noviembre). Se separaron los periodos y se analizaron los resultados del ICA. Se puede ver en las Figuras 5 a 7 que el ICA es casi siempre mejor en la temporada de estiaje, que comprende mayormente meses en los cuales en el lago se rompe la estratificación térmica y domina la mezcla de las aguas, sin embargo esta mezcla no se dá de manera clara en la parte central del lago donde los valores del ICA, en el punto de muestreo llamado Centro, presentan un comportamiento diferente al de los otros tres lugares de muestreo, siendo en general los más bajos. Por otro lado, en la temporada de lluvias, que comprende meses en los cuales se define la estratificación térmica en el cuerpo de agua, la capa del epilimnion es la más estable en el comportamiento de los registros del ICA en los cuatro puntos de muestreo, no encontrándose diferencias notables entre ellos. En la capa del metalimnion, Entrada 1, Muelle principal y Entrada 2 tienen un comportamiento similar, los valores del ICA son muy parecidos. En la capa del hipolimnion el sitio Centro es el que muestra más heterogeneidad en los resultados del ICA siendo casi siempre los más bajos.

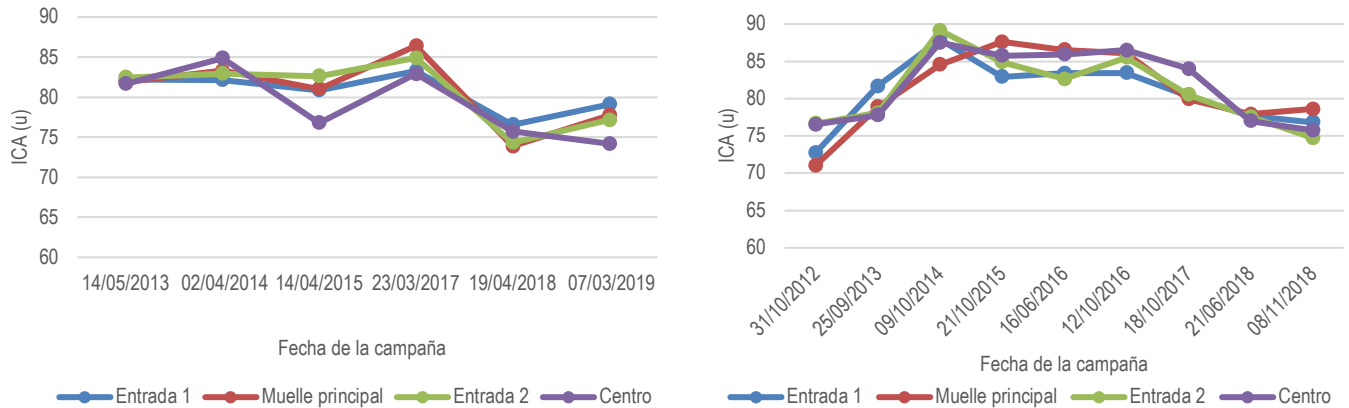


Figura 5 | Valores del ICA a la profundidad del epilimnion. Sin estratificación térmica (izquierda) y con estratificación térmica (derecha).

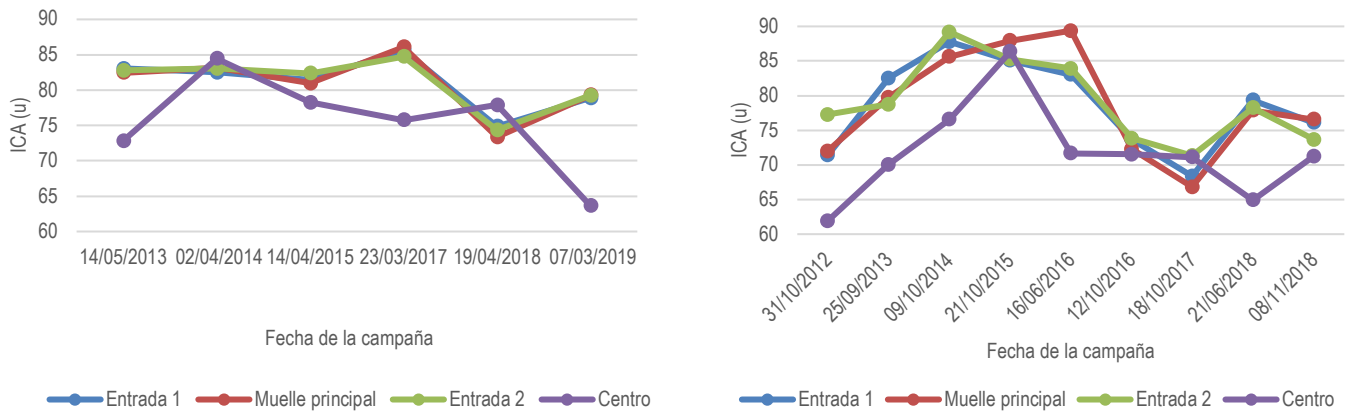


Figura 6 | Valores del ICA a la profundidad del metalimnion. Sin estratificación térmica (izquierda) y con estratificación térmica (derecha).

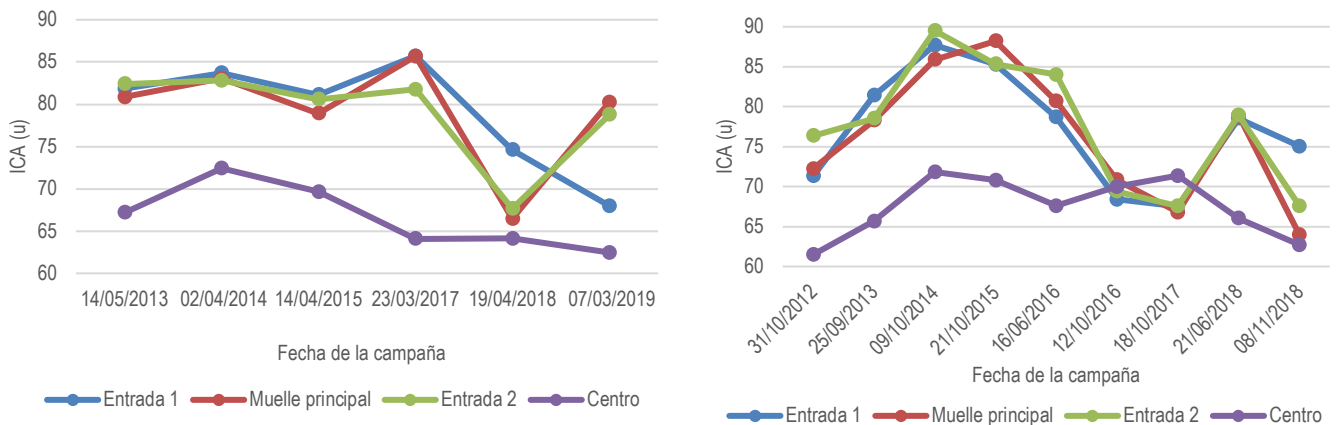


Figura 7 | Valores del ICA a la profundidad del hipolimnion. Sin estratificación térmica (izquierda) y con estratificación térmica (derecha).

h) La diferencia máxima de temperatura entre la superficie y el fondo se da al final de la primavera y los meses de verano (Vergara, 2006). Para analizar esto, se tomaron los muestreos hechos en el año 2018, que se realizaron en abril y en junio. En la Tabla 6 se puede ver que el epilimnion permanece sin cambios en los cuatro sitios de muestreo. En el metalimnion,

Entrada 1, Muelle principal y Entrada 2 no registran cambios en la calidad del agua, pero en el sitio Centro pasa de ser “Buena” en abril a “Media” en junio, esto es, la calidad baja un rango en la clasificación. En el hipolimnion Muelle principal y Entrada 2, registran una alza en la calidad del agua al pasar de “Media” a “Buena”. Esta mejora en la calidad en los dos sitios no se mantiene, se analizaron los resultados de la campaña de noviembre (mes de estiaje al igual que abril) y en los dos la calidad del agua vuelve a ser “Media”.

2. Con la metodología de la CONAGUA (estimar las variables DBO₅, DQO y SST):

Se evaluaron los cuatro lugares de muestreo de la CONAGUA, los resultados se muestran en la Tabla 7, de ella se puede ver que:

- a) Temporalmente en el epilimnion el mejor resultado se obtiene en la campaña del 14 de abril del 2015 pues los cuatro sitios alcanzan la clasificación de “Excelente”, y el siguiente mejor resultado lo tiene la campaña del 16 de junio del 2016 en el que Muelle principal, Entrada 2 y Centro obtienen “Excelente” y solo Entrada 1, queda en “Buena” con la variable DQO. Para el metalimnion el mejor resultado lo tiene la campaña del 16 de junio del 2016 en la que las tres variables alcanzan la clasificación de “Aceptable”, “Buena” y “Excelente”. Esta misma combinación se presenta en el hipolimnion en la campaña del 14 de abril del 2015. Para el caso del metalimnion y del hipolimnion en ninguna de las campañas se tiene que las tres variables medidas se clasifiquen como “Excelente”. En las tres capas de estratificación en todas las campañas la única variable que siempre alcanza la clasificación de “Excelente” es la de los SST. De 2013 al 2019 al menos una de las tres variables alcanza la clasificación de “Contaminada”.
- b) En el epilimnion la DQO es el parámetro cuyas mediciones se encuentran en los cuatro primeros rangos de clasificación (Tabla 3), el único que no registra es el que tiene clasificación de “Fuertemente contaminada”. En el metalimnion y en el hipolimnion solo se encuentra en los rangos de clasificación 2 a 4 (Tabla 3).
- c) Espacialmente en la capa del epilimnion el sitio que registra el mayor número de veces la clasificación de “Excelente” es Centro con 25, seguido de Muelle principal y Entrada 2 con 23, y con 21 Entrada 1. Con la clasificación “Buena” el mejor es Entrada 1 (nueve veces), después Muelle principal y Entrada 2 (cinco veces), y el que menos veces registra esta clasificación es Centro con 6. Entrada 2 alcanza diez veces la clasificación “Aceptable”, Entrada 1 nueve, y Muelle principal y Centro cuantifican ocho. El lugar que mas veces alcanza la clasificación de “Contaminada” es Muelle principal (nueve ocasiones), le sigue Entrada 2 con siete veces, y después Entrada 1 y Centro con seis. En el metalimnion la clasificación que más se registra en los cuatro sitios es la de “Aceptable”: 19 veces en Entrada 1 y Entrada 2, 18 veces en Centro y 17 veces en Muelle principal. La segunda clasificación más registrada es la de “Excelente” con 15 veces en cada uno de ellos. La tercera es la de “Contaminada” con 11 veces en Muelle principal, 9 en Entrada 2 y en Centro, y 7 Entrada 1. La clasificación “Buena” es la de menor frecuencia, solo se tienen 4 registros en Entrada 1, 3 en Centro y 2 en Muelle principal. En el hipolimnion se tiene el mismo patrón de clasificación que en el metalimnion: la más frecuente es la de “Aceptable”, seguida por “Excelente”, luego “Contaminada” y finalmente se tiene a “Buena”. El mejor es Entrada 1 alcanzando 19 veces la clasificación de “Aceptable”. Los sitios que más veces tienen la clasificación de “Contaminada” son Muelle principal (12 veces) y Centro (10 veces).
- d) En el epilimnion Entrada 1, en los últimos cuatro muestreos, tres en 2018 y uno en 2019, la variable DQO se mantiene en la clasificación de “Contaminada”. En Muelle principal y Entrada 2 este patrón se da desde octubre del 2017, solo cambia en junio del 2018 en Entrada 2 alcanzando allí clasificación de “Aceptable”. Tanto en la penúltima como en la última campaña reportadas en el sitio Centro la variable muestra una recuperación al mantenerse con clasificación de “Aceptable”. Las tres variables alcanzan la clasificación de “Excelente” 87 veces (60 de ellas corresponden a los SST), treinta ocasiones “Buena”, 35 “Aceptable” y 28 “Contaminada”. Con estos resultados la clasificación del ICA en la capa superior se puede considerar como “Excelente”.
- e) Tanto en el metalimnion como en el hipolimnion las variables DBO₅ y SST en todas las campañas y en los cuatro lugares de muestreo se mantienen en las clasificaciones de “Aceptable” y “Excelente”, respectivamente. En las dos capas la clasificación más frecuente para la variable DQO en los cuatro puntos de muestreo es la de “Contaminada”.

- f) Espacial y temporalmente en las tres capas la mejor clasificación la tiene la variable de los SST, siempre alcanza “Excelente”, seguida de la DBO₅, y la que más veces se clasifica como “Contaminada” es la DQO, conviene destacar que este último parámetro está asociado con la presencia o ausencia de un elemento vital para la preservación y conservación de la vida aerobia en el lago, y es el que registra las clasificaciones más bajas.
- g) En los meses de mayor diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo, que es entre el final de la primavera y los meses de verano, solo se tiene un año en el cual se puede analizar si existe alguna diferencia espacial y temporalmente en la calidad del agua: son las campañas realizadas en el año 2018 en abril y junio. De los resultados de la Tabla 7 se puede ver que temporalmente y espacialmente las capas del metalimnion y el hipolimnion no presentan diferencias entre ellas. En la capa del epilimnion la variable DBO₅ registra una mejor calidad en los cuatro sitios; en tres de ellos: Entrada 1, Muelle principal y Entrada 2, pasa de “Aceptable” a “Excelente”, y en Centro de “Buena” a “Excelente”. La variable DQO en Entrada 2 también registra una mejor clasificación y pasa de “Contaminada” a “Aceptable”. Aquí se puede ver que la clasificación del agua usando de manera individual el comportamiento de las tres variables solo permite establecer diferencias temporales en la capa del epilimnion, en la que dos de las tres variables tienen mejor clasificación en el mes de junio.

Tabla 7 | Clasificación del ICA en el lago de Zirahuén con las variables DBO₅, DQO y SST.

		Epilimnion, Metalimnion e Hipolimnion					
Fecha de muestreo		31/10/2012	14/05/2013	25/09/2013	02/04/2014	09/10/2014	
		Epi Meta Hipo	Epi Meta Hipo	Epi Meta Hipo	Epi Meta Hipo	Epi Meta Hipo	
Sitio	Entrada 1	AAE AAE AAE	AAE ACE ACE	EBE ABE AAE	BAE AAE AAE	EAE AAE ACE	
	Muelle principal	AAE AAE ACE	AAE ACE ACE	ECE ACE ACE	BAE ACE ACE	ECE ACE ACE	
	Entrada 2	AAE AAE ACE	AAE AAE AAE	ECE ACE ACE	BAE AAE AAE	ECE ACE ACE	
	Centro	AAE AAE ACE	ACE ACE ACE	ECE ACE ACE	EAE AAE AAE	EAE ACE ACE	
	Fecha de muestreo		14/04/2015	21/10/2015	16/06/2016	12/10/2016	23/03/2017
			Epi Meta Hipo	Epi Meta Hipo	Epi Meta Hipo	Epi Meta Hipo	Epi Meta Hipo
	Entrada 1	EEE ABE ABE	BCE ACE ACE	EBE ABE AAE	BCE ACE ACE	BBE ABE ABE	
	Muelle principal	EEE ABE ABE	ECE ACE ACE	EEE ABE ABE	BCE ACE ACE	BAE ABE AAE	
	Entrada 2	EEE AAE ABE	BCE ACE ACE	EEE ABE ABE	BAE ACE ACE	AEE ABE ABE	
	Centro	EEE ABE ABE	BCE ACE ACE	EEE ABE ABE	BAE AAE ACE	BEE ABE ABE	
	Fecha de muestreo		18/10/2017	19/04/2018	21/06/2018	08/11/2018	07/03/2019
			Epi Meta Hipo	Epi Meta Hipo	Epi Meta Hipo	Epi Meta Hipo	Epi Meta Hipo
	Entrada 1	AAE AAE ACE	ACE ACE ACE	ECE ACE ACE	BCE ACE ACE	BCE ACE ACE	
	Muelle principal	ACE ACE ACE	ACE ACE ACE	ECE ACE ACE	BCE ACE ACE	BCE ACE ACE	
	Entrada 2	ACE ACE ACE	ACE ACE ACE	EAE ACE ACE	BCE ACE ACE	BCE ACE ACE	
	Centro	BCE ACE ACE	BCE ACE ACE	ECE ACE ACE	BAE ACE ACE	EAE AAE AAE	

Epi = Epilimnion; Meta = Metalimnion; Hipo = Hipolimnion A= Aceptable; B = Buena; C = Contaminada; E = Excelente.

Las Figuras 8 a la 10 muestran las clasificaciones para las tres variables en cada una de las capas de estratificación térmica, para las temporadas de estiaje y lluvia, de ellas se puede ver que:

- a) En todas las campañas la capa mas heterogenea es la del epilimnion. En ella, al igual que con el método de la FNS, la calidad del agua en los meses de mezcla (estiaje) es mejor también con la evaluación de las tres variables que emplea la CONAGUA. En la temporada de estiaje en el 17% de las muestras analizadas las tres variables medidas obtuvieron la clasificación de “Excelente” mientras que en la de lluvias solo la tienen un 8%. Se puede ver que las clasificaciones comunes en las dos temporadas son: “AAE”, “ACE”, “BAE”, “EAE”, “EEE” y “BCE”, y excepto la “EAE” en la que el porcentaje es el mismo, en el resto siempre es mayor en la temporada de estiaje que en la de lluvias.

- b) El metalimnion y el hipolimnion son más parecidas entre si, en ambas solo se encuentran las combinaciones “AAE”, “ACE” y “ABE”, y se mantiene, al igual que en el epilimnion, una mejor clasificación de las tres variables en la temporada de estiaje que en la de lluvias. Esto es, en los meses en los que se rompe la estratificación térmica en el lago, las variables medidas tienen una distribución más homogénea lo que uniformiza la calidad del agua.
- c) En la temporada de estiaje, se puede ver que las tres variables tienen el mismo comportamiento en las capas del metalimnion y del hipolimnion (Figuras 9 y 10 izquierda). Esto es, la mezcla de las aguas a nivel de las capas media y profunda del lago es total, estableciendo los valores de las tres variables medidas dentro de los mismos rangos de clasificación.
- d) En la temporada de lluvias se puede apreciar (Figuras 9 y 10 derecha) que las clasificaciones de las variables en el metalimnion y en el hipolimnion son mejores en el metalimnion. Esto es algo esperado pues en la temporada de lluvias se presenta la estratificación térmica en el lago y la diferenciación por densidad entre las capas queda marcada definiendo con ello condiciones heterogéneas en la distribución de nutrientes y parámetros químicos, así como variaciones térmicas, que impactan de manera notable la capa más profunda del lago.

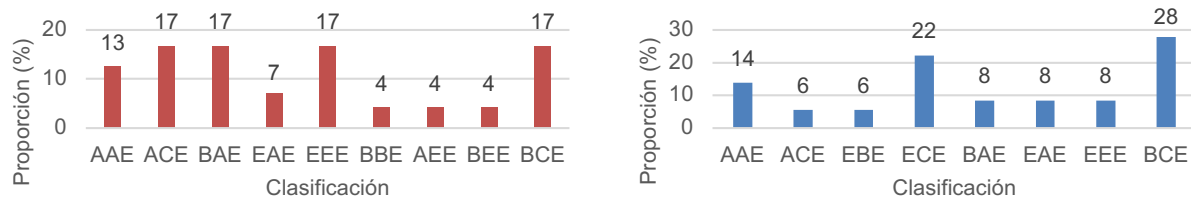


Figura 8 | Clasificación de la calidad del agua en el epilimnion. Temporada de estiaje (izquierda) y de lluvias (derecha).

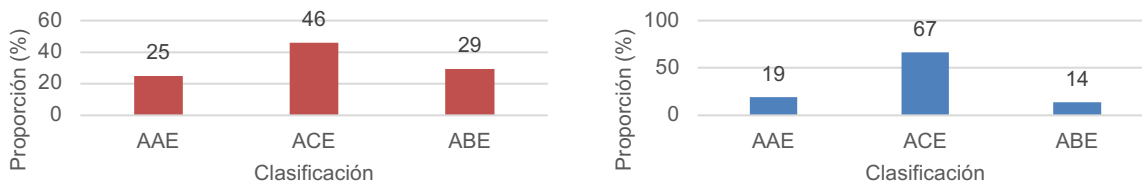


Figura 9 | Clasificación de la calidad del agua en el metalimnion. Temporada de estiaje (izquierda) y de lluvias (derecha).

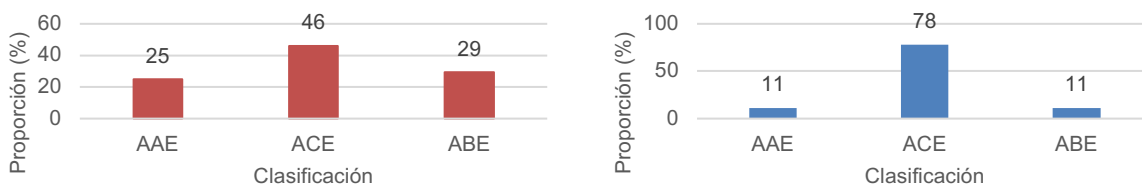


Figura 10 | Clasificación de la calidad del agua en el hipolimnion. Temporada de estiaje (izquierda) y de lluvias (derecha).

Un punto importante a resaltar es que con ninguno de los dos métodos, el ICA muestra un cambio importante (se esperarían mejores valores de calidad del agua) a partir de la puesta en marcha de la PTAR en el año 2014. Se hizo una visita a la planta y el personal operativo explicó que desde inicio tuvo problemas en la operación y funcionó de manera intermitente hasta septiembre del 2021, cuando se terminó la rehabilitación. Sin embargo se estima que el caudal tratado es solo en promedio de 10 a 12 L/s, y según los datos oficiales las tres localidades (Santa Clara, Opopeo y Casas Grandes) producen 55 L/s de aguas residuales (CEAC, 2023). En el lago, esta intermitencia en la operación de la PTAR y sobre todo el poco caudal tratado, pone de manifiesto que

la recuperación de la calidad del agua, depende básicamente del control de las actividades antropogénicas en la cuenca y de la eficiencia en el mecanismo de control del vertido de los contaminantes que llegan por diversos procesos al cuerpo de agua.

DISCUSIÓN

Los métodos empleados para el cálculo del ICA en el lago de Zirahuén, mostraron que la clasificación del recurso se encuentra en los rangos de “Buena” y “Media” con el método de la FNS, y de “Buena” y “Aceptable” con la evaluación de tres variables que se hace actualmente en México. Sin embargo con este último método llama la atención, por un lado, el deterioro que muestra la variable DQO y por el otro el buen desempeño de los SST, lo que puede estar asociado a no contar con un perfil detallado de ellas a diferentes profundidades. Aparentemente, la hidrodinámica del lago permite que la clasificación del ICA se mantenga prácticamente homogénea en las tres capas de estratificación térmica del cuerpo de agua, a pesar de que el rango de valores de las variables que intervienen en las dos metodologías es amplio, la escala de clasificación los engloba en promedio en “Buena” calidad, esto es, prácticamente a solo un paso de llegar a “Excelente”. Individualmente si hay diferencias notables en los resultados del ICA que cada capa obtiene, siendo la más pobre en desempeño la del hipolimnion. Con ambos métodos la calidad del agua en el lago es mejor en los meses en los que se rompe la estratificación térmica y la mezcla de las aguas homogeneiza la distribución de variables y nutrientes, logrando que las condiciones para la conservación de la vida en el cuerpo de agua no sean tan adversas. En los meses de estratificación térmica la capa más profunda (hipolimnion) es en la que los parámetros medidos tienen el desempeño más pobre.

Generalizando, tanto de los resultados aquí obtenidos como lo consultado en la literatura, se puede decir que es importante seguir los muestreos y tomar en cuenta el proceso de estratificación térmica para definirlos y si es necesario intensificar su número. También sería importante el poder contar con instrumentación moderna que mida perfiles a distintas profundidades de las componentes horizontal y vertical de velocidad, y variables químicas asociadas con las actividades de agricultura presentes en la cuenca, principalmente. Cuantificar el caudal de ingreso promedio de las principales corrientes que desembocan en el lago, aumentar el número de estaciones meteorológicas en la cuenca para conocer y evaluar de manera confiable la variable lluvia, que constituye, junto con los caudales de las corrientes superficiales que desembocan en el lago, las principales entradas en el balance hídrico, entre otras acciones que se deben tomar en cuenta para conservar y mantener el cuerpo de agua, prácticamente ya el único de su tipo que queda en condiciones saludables en el estado. También sería importante que al no contar con una metodología propia para evaluar el ICA se proponga por ejemplo conocer, con base en la hidrología de la región, que actividades impactan en los cuerpos de agua y que parámetros se asocian con riesgo en ellas, para así en los muestreos definir que variables se miden en cada cuerpo de agua que se monitorea.

Otro aspecto importante a considerar es que en el lago se realizan más actividades sobre todo ecoturísticas: recorrido en lancha (con motor a gasolina) y en kayak, natación, entre otras, que hacen poner especial atención en el monitoreo de parámetros bacteriológicos y químicos, para evitar riesgos tanto a la población local como al turismo, y proteger también el frágil equilibrio del lago.

CONCLUSIONES

Los resultados del ICA en el lago de Zirahuén con las dos metodologías empleadas en el estudio, permiten afirmar que el recurso agua se encuentra en “Buena” calidad y cumple con los criterios ecológicos que las dependencias federales mexicanas establecen para el uso de protección de la vida acuática en agua dulce (DOF, 1989), excepto para organismos sensibles. Con los dos métodos se pudo observar que la calidad del agua en la temporada en la que se rompe la estratificación térmica es mejor que cuando se presenta la diferenciación por densidades. Las políticas públicas que se implementen para la mejora primero y la conservación a futuro del lago deben considerar un manejo integral de aspectos tales como: el continuar con las campañas de toma de muestras en el lago y definir las considerando que sí hay diferencias en la calidad del agua debido al fenómeno de estratificación térmica, e incrementar el caudal tratado que es vertido al cuerpo de agua.

REFERENCIAS

- Abbasi, T., Abbasi, S.A. 2012. *Water Quality Indices*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-54304-2.00001-4>
- Amorim, L.F., Martins, J.R.S., Nogueira, F.F. and Silva, F.P. 2019. Measurement and modeling vertical mixing in tropical stratified lakes. *Proceedings of the IAHR World Congress*. <https://doi.org/10.3850/38wc092019-1675>
- Bravo-Espinoza, M., Mendoza-Cantú, M.E., Medina-Orozco, L.E. 2008. Soil erosion scenarios under different agronomic managements in the Zirahuén Lake Basin, Michoacán, Mexico. *Investigaciones geográficas*, (68), 73-84.
- Briddon, C.L. Metcalfe, S., Taylor, D., Bannister, W., Cunanan, M., Santos-Borja, A.C., Donne-Papa, R. and McGowan, S. 2023. Changing water quality and thermocline depth along an aquaculture gradient in six tropical crater lakes. *Hydrobiologia*, 850(2), pp. 283-299. <https://doi.org/10.1007/s10750-022-05065-7>
- Brown, R.M., McClelland, N.I., Deininger, R.A., Tozer, R.G. 1970. A Water Quality Index: Do We Dare?. *Water Sewage Works*, 117(10), 339-343.
- Boulder Area Sustainability Information Network. 2022. Disponible en: <https://bcn.boulder.co.us/basin/>. Consultado en marzo del 2024.
- CEAC. 2023. Cuenca Zirahuén. Disponible en: <https://ceac.michoacan.gob.mx/areas/subdireccion-de-cuencas/cuenca-zirahuen/>. Consultado en marzo del 2024.
- Chacón, T.A., Madrigal, G.X., Novelo, R.A. 2004. Flora y vegetación acuáticas del Lago de Zirahuén, Michoacán, México. *Acta Botánica Mexicana*. <https://doi.org/10.21829/abm68.2004.099>.
- Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., El Azzi, D. 2023. A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 22(2), 349-395. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>
- Dascalescu, I.G., Morosanu, I., Ungureanu, F., Musteret, C.P., Minea, M., Teodosiu, C. 2017. Development of a versatile water quality index for water supply applications. *Environmental Engineering and Management Journal*, 16(3), 525-534.
- Davies, S.J., Metcalfe, S., Mackenzie, A.B., Newton, A., Endfield, G.H., Farmer, J.G. 2004. Environmental changes in the Zirahuen Basin, Michoacan, Mexico, during the last 1000 years. *Journal of Paleolimnology*, 31(1). <https://doi.org/10.1023/B:JOPL.0000013284.21726.3d>
- De Buen, F. 1942. Los lagos Michoacanos I. Características generales. El lago de Zirahuén. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, (4), 211-232.
- DOF. 1989. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989. Consultado en junio del 2024.
- Duka, M.A., Bernardo, T.L.B., Casim, N.C.I., Tamayo, L.V.Q., Monterey, M.L.E., Yokoyama, K. 2024. Understanding stratification and turnover dynamics of a tropical lake using extensive field observations and 3D hydrodynamic simulations, *Science of The Total Environment*, 946, 174397, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174397>.
- Forero, L.C., Longo, M., Ramírez R., J.J., Chalar, G. 2014. Índice de calidad ecológica con base en macroinvertebrados acuáticos para la cuenca del río Negro (ICE RN-MAE), Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 62 (Suppl. 2), 233-247. Retrieved October 22, 2024, from https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442014000600016.
- García, J.M., Sarmiento, L.F., Salvador, M., Porras, L.S. 2017. Uso de bioindicadores para la evaluación de la calidad del agua en ríos: aplicación en ríos tropicales de alta montaña. Revisión corta. *Revista UGCiencia*, 23, 47-62.

- Gaytán Alarcón, A.P., González Elizondo, M.S., Vergara Gómez, I., Díaz Lagos, M., Alarcón Herrera, M.T. 2021. Water quality indices in México and Colombia. Evolution, criteria and challenges. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 21(2), 5-22. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v21.n2.2021.14264>
- INEGI. 2020. *Censo de población y vivienda 2020*. Resultados definitivos, México.
- Kumar, D., Kumar, R., Sharma, M., Awasthi, A., Kumar, M. 2024. Global water quality indices: Development, implications, and limitations. *Total Environment Advances*, 9, 200095, <https://doi.org/10.1016/j.teadva.2023.200095>
- Mendoza-Cruz, J.S. 2023. Macroinvertebrados del río Teuchitlán, Jalisco, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich. México.
- Nguyen Van, H., Nguyen Viet, H., Truong Trung, K., Nguyen Hai, P., Nguyen Dang Giang, C. 2022. A comprehensive procedure to develop water quality index: A case study to the Huong River in Thua Thien Hue province, Central Vietnam. *PLoS One*, 17(9), e0274673. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274673>
- Rincón-Bello, M.T., Soler-Romero, F.Y., Calderón-Rivera, D.S., Sierra-Parada, R.J., Jaramillo-Londoño, Á.M. 2021. Macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de calidad de agua en el río Chicú, Cundinamarca, Colombia. *Hidrobiológica*, 31(1), 17-29. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2021v31n1/rincon>
- Rodríguez Miranda, J.P., Serna Mosquera, J.A., Sánchez Céspedes, J.M. 2016. Índices De Calidad En Cuerpos De Agua Superficiales En La Planificación De Los Recursos Hídricos (Quality Indices In Surface Water Bodies In Water Resources Planning). *Logos, Ciencia y Tecnología*, 8(1), 159-167. <https://doi.org/10.22335/rlct.v8i1.306>
- SEMARNAT. 2002. Comisión Nacional del Agua. Disponible en: https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/compendio_2000/03dim_ambiental/03_02_Agua/data_agua/RecuadroIII.2.2.3.htm. Consultado en septiembre del 2024.
- SEMARNAT. 2013. Compendio de Estadísticas Ambientales. México. Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2013/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html. Consultado en abril del 2024.
- SEMARNAT. 2024. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Conjunto de Indicadores Clave. Disponible en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/clave16/clave12.html>. Consultado en octubre 2024.
- SINA. 2024. Calidad del agua en México. Disponible en : <https://app.conagua.gob.mx/sistemasdeagua/>. Consultado en enero 2024.
- Torres-Rodríguez, E., Lozano-García, S., Figueroa-Rangel, B.L., Ortega-Guerrero, B., Vázquez-Castro, G. 2012. Cambio ambiental y respuestas de la vegetación de los últimos 17 000 años en el centro de México: el registro del lago de Zirahuén. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 29(3), 764-778.
- Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., Dobhal, R. 2013. Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*, 1(3), 34-38. <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>
- Vázquez, G., Ortega, B., Davies, S.J., Aston, B. 2010. Registro sedimentario de los últimos ca. 17000 años del lago de Zirahuén, Michoacán, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3), 325-343. <https://doi.org/10.18268/BSGM2010v62n3a2>
- Vega-Garzón, L.P., Pulido, C.A., Sánchez-Rodríguez, S., García, G.P., Salcedo-Hurtado, K.N. 2024. Evaluación de la calidad del agua mediante indicadores biológicos en el río Cane – Colombia. *Revista Facultad De Ingeniería*. Universidad De Antioquia. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20240516>
- Vergara De Paz, Y. 2006. Evaluación de la dinámica de nutrientes en el lago de Zirahuén, Michoacán, México. Tesis de Maestría. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México.
- Wang, Y., Li, Y., Cheng, Y., Wang, Y., Zhu, Y., Li, R., Acharya, K., Ibrahim, M. 2024. Thermal stratification and mixing processes response to meteorological factors in a monomictic reservoir. *Journal of Environmental Management*, 354, 120205. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120205>