

**Monitoreo de cianobacterias como estrategia para el
aseguramiento de la calidad del agua potable
distribuida en el Área Metropolitana de San Salvador, El
Salvador**

**Monitoring of cyanobacteria as a strategy to ensure the
quality of drinking water distributed in the Metropolitan
Area of San Salvador, El Salvador**

Luis Ortiz¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1751-4529>

Yaneth Alvarado², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9729-9720>

Gabriela Montes³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2256-7422>

Alma Aguilar⁴, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2465-7572>

¹Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, San Salvador,
El Salvador, jose.sierra@anda.gob.sv

²Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, San Salvador,
El Salvador, yaneth.alvarado@anda.gob.sv

³Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, San Salvador,
El Salvador, gabriela.montes@anda.gob.sv

⁴Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, San Salvador,
El Salvador, alma.aguilar@anda.gob.sv

Autor para correspondencia: Luis Orteza, jose.sierra@anda.gob.sv

Resumen

El lago de Güija posee una superficie aproximada de 45 km² y una profundidad máxima de 21 m en época seca; forma parte del complejo lagunar homónimo y su importancia como ecosistema fue reconocida en 2010 tras la obtención de su declaratoria como sitio Ramsar. Dada su ubicación geográfica, ejerce una influencia significativa en la calidad del agua de la cuenca alta del río Lempa, por lo que la vigilancia de las comunidades fitoplanctónicas y la relación de estas con diversos factores ambientales relacionados con sus proliferaciones es de suma importancia para garantizar la seguridad del agua y la salud pública de gran parte de los habitantes del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). En vista de lo anterior, desde febrero de 2021 hasta mayo de 2023 se realizaron muestreos mensuales en cinco puntos de monitoreo dentro del lago, y se determinó que en él las proliferaciones de cianobacterias están dominadas por los géneros *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis* y *Dolichospermum*, los cuales se encuentran relacionados con el régimen de precipitación pluvial, altos valores de pH y la estratificación de la columna de agua, la cual ocurre entre abril y octubre de cada año.

Palabras clave: cianobacterias, calidad del agua, lago tropical, prevención de riesgo.

Abstract

Guija's Lake has a surface area of approximately 45 km² and a maximum depth of 21 m in the dry season. It is part of the homonymous lagoon and, in 2010 was recognized as a Ramsar site. Given its geographical

location has a significant influence on the water quality of the upper basin of the Lempa River, monitoring the phytoplankton communities and their relationship with various environmental factors related to “blooms” is of utmost importance to guarantee the safety of water and the public health of a large part of the inhabitants of the AMSS. Because of the above, from February 2021 to May 2023, monthly sampling was carried out at 5 monitoring points within the lake, determining that the genera that dominated the “blooms” belong to the cyanobacterial Phylum to the genera *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis*, and *Dolichospermum*, which they are related to the rainfall regime, high pH values and the stratification of the water column, which occurs between April and October of each year.

Keywords: Cyanobacteria, water quality, tropical lake, risks prevention.

Recibido: 15/07/2024

Aceptado: 15/10/2024

Publicado *ahead of print*: 31/10/2024

Versión final: 01/11/2025

Introducción

La Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) es el operador de agua potable y saneamiento más grande de El Salvador; en la actualidad, solamente en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) abastece a más de 1.5 millones de habitantes, a través de cuatro sistemas de explotación, entre los cuales se encuentra la Planta Potabilizadora Torogoz (PPT), cuya fuente de abastecimiento es el río

Lempa y que por sí sola representa cerca del 30 % del abastecimiento total de agua potable para el AMSS (ANDA, 2020).

Dada la naturaleza de su fuente de abastecimiento, la PPT es vulnerable ante la ocurrencia de fenómenos naturales, como las proliferaciones algales, sobre todo durante la época de estiaje, situación que quedó de manifiesto a finales de 2019 y principios de 2020, cuando una intensa proliferación dominada por cianobacterias ocurrida en el lago de Güija afectó seriamente la calidad del agua producida en la planta.

La ocurrencia de estos eventos representa un serio desafío tanto a nivel técnico-operacional como a nivel económico para cualquier operador de agua potable del mundo, por lo que su abordaje no depende solo de un tratamiento puntual, con la aplicación de químicos en la planta potabilizadora, sino más bien debe abordarse desde una estrategia con enfoque de cuenca y adaptabilidad al cambio climático basada en el principio de prevención.

Es por ello que desde febrero de 2021, la ANDA, en coordinación con la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), y el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) realiza el monitoreo de la comunidad fitoplanctónica del lago de Güija, así como de los factores ambientales asociados con la proliferación de estos organismos, con el objetivo de minimizar los impactos negativos de dichos fenómenos en el agua producida por la planta Torogoz, ubicada 46 km aguas abajo del lago de Güija.

Tradicionalmente la gestión del agua se ha enfocado en garantizar la disponibilidad y accesibilidad de las poblaciones al recurso; sin embargo, a partir de la promulgación de la Agenda 2030 y de los Objetivos De Desarrollo Sostenible de la ONU en septiembre de 2015, el tema de

calidad del agua ha sido considerado como una meta importante de alcanzar en el corto plazo, meta que El Salvador, como país signatario de la agenda, se ha comprometido a asumir como propia (ONU, 2018; ODS El Salvador, 2023).

Pese a lo anterior, el tema de aseguramiento de la calidad del agua es uno de los principales retos que enfrenta la mayoría de los operadores de agua potable y saneamiento en la región latinoamericana, principalmente cuando se utilizan fuentes superficiales para su abastecimiento, pues por su naturaleza son mucho más susceptibles a diversos tipos de contaminación (Jiménez-Cisneros & Galizia-Tundisi, 2012).

Hacia finales del siglo XIX, la perspectiva del aseguramiento y control de la calidad del agua giraba en torno a la contaminación fecal y orgánica; después, en la década de 1960, a partir del auge de la agricultura intensiva a gran escala, la vigilancia de la calidad se centró en los procesos de eutrofización y la proliferación de algas del fitoplancton, en especial de las cianobacterias, que por la potencialidad de producir eventos tóxicos se consideran fenómenos naturales que pueden llegar a generar problemas de salud pública (Giannuzzi, 2009; Vammen, 2015).

En la actualidad, en el mundo, muchos países, entre ellos Canadá, Australia, Brasil y Panamá, han incluido en sus reglamentos de calidad de agua destinada a consumo humano aspectos relacionados con el manejo de riesgo ante la ocurrencia de proliferaciones de cianobacterias tanto en sus sistemas de distribución como en las fuentes de abastecimiento, lo que le brinda a los operadores de agua potable un marco de referencia sobre qué aspectos considerar en cuanto a este tipo de amenazas a la calidad del agua (Chorus, 2012; MCI, 2019).

El Salvador, cuenta con un Reglamento Técnico Salvadoreño (RTS) para aguas de consumo humano, el cual no incluye ninguno de estos aspectos; sin embargo, la ANDA ha implementado diversos protocolos de actuación ante la ocurrencia de estos fenómenos naturales, con el propósito de minimizar al máximo los impactos negativos que pudieran generar al proceso de potabilización.

Por lo anterior y conscientes de la vulnerabilidad de la planta potabilizadora ante los fenómenos naturales de proliferaciones fitoplanctónicas, se ha trabajado en el desarrollo de procedimientos internos que establecen acciones específicas a realizar en el proceso de potabilización, e inclusive bajo el principio de prevención se ha mantenido desde 2021 un constante monitoreo en el lago de Güija, del cual se presentan los hallazgos más relevantes en el presente artículo.

Materiales y métodos

Área de estudio

El lago de Güija forma parte del complejo lagunar homónimo, el cual fue declarado sitio Ramsar el 16 de diciembre de 2010; posee una superficie aproximada de 45 km² y una profundidad máxima de 21 m en época seca; cuenta con tres afluentes originados en Guatemala, los ríos Angüe, Cusmapa y Ostúa, así como un efluente por el cual conecta sus aguas con el río Lempa dentro del territorio salvadoreño, denominado río Desagüe o Guajoyo (Figura 1). Al este limita con territorio guatemalteco, mientras que al oeste se encuentra rodeado en su mayoría por el Área Natural Protegida de San Diego y San Felipe Las Barras, zona que, de acuerdo

con la clasificación de vida de Holdridge, corresponde a bosque seco tropical (MAG, 1978).

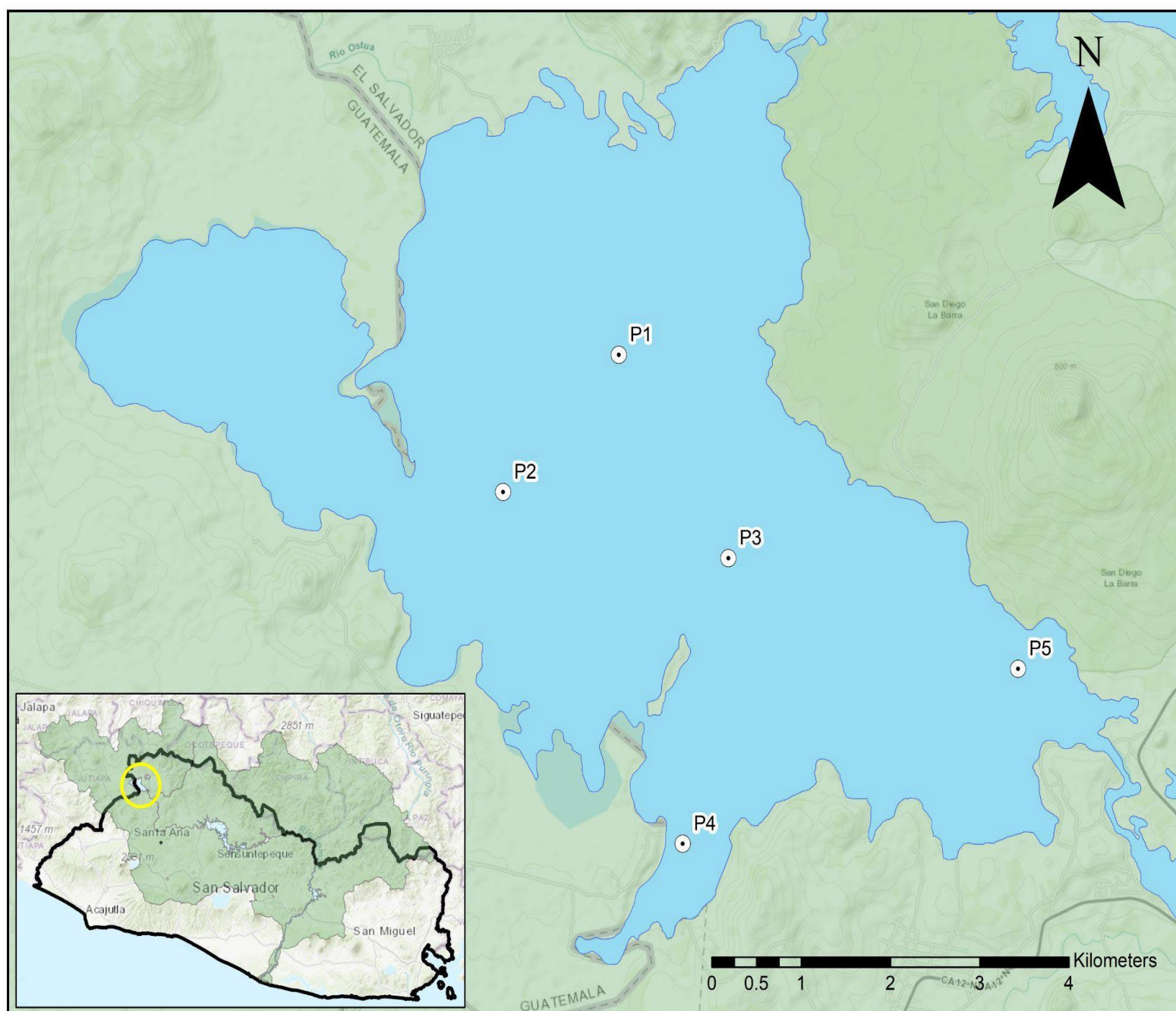


Figura 1. Ubicación del área del estudio y sitios de muestreo.

Muestreo y medición de parámetros ambientales

Considerando las zonas de influencia de los afluentes que llegan al lago de Güija, así como la zona de mayor profundidad y salida del mismo, se establecieron cinco puntos de monitoreo (Figura 1), en los cuales, de forma mensual, desde febrero de 2021 hasta mayo de 2023, se realizó la toma de muestras para la medición a distintas profundidades de clorofila "a", pH, oxígeno disuelto, potencial redox y temperatura; dichas mediciones se hicieron con una sonda multiparamétrica (XYLEM/YSI modelo EXO 2), mientras que los datos de lluvia y temperatura promedio mensual fueron provistos por el MARN y corresponden a los registros de la estación Güija (14° 13' 42" N - 89° 28' 12" O). Por otro lado, entre diciembre de 2021 y diciembre de 2022 se determinó la concentración de fósforo y nitrógeno total por fotometría a través del método del ácido ascórbico y del persulfato, para lo cual se utilizó el test Spectroquant.

Muestreo de cianobacterias

La recolección de muestras cuantitativas se llevó a cabo en los sitios de muestreo considerados para la medición de los parámetros ambientales; se establecieron dos profundidades de trabajo: una superficial, ubicada en los primeros 50 cm de la columna de agua; y otra de profundidad, la cual coincidía con la medida del Disco Secchi. Posteriormente, utilizando una botella oceanográfica horizontal de tipo Van Dorn (modelo Alfa 2.2 I, Wildco®), se tomaron muestras de 500 ml en cada nivel de profundidad y se depositaban en frascos de polietileno, a los que se les añadía 5 ml de solución de Lugol al 1 % como conservante, para finalmente

almacenarlas en hieleras a 4 °C para su traslado hasta el laboratorio. Las muestras cualitativas se recolectaron con una red de fitoplancton de 20 µm de luz de malla (Watermark simple plankton nets 77974), con la cual se hizo un arrastre vertical de la zona fótica (Zeu), la cual se determinó a partir de la Ecuación (1), utilizando de la medida de transparencia del Disco Secchi (DS) en cada punto de muestreo. Luego la muestra colectada se guardó en frascos de 100 ml a 4 °C para su traslado al laboratorio:

$$Z_{eu} = 1.92 * DS \quad (1)$$

Procesamiento de las muestras

La identificación taxonómica de las cianobacterias presentes en el lago de Güija se realizó con un microscopio invertido marca Motic modelo AE31E, a una magnificación máxima de 400X; así como claves y bases de datos taxonómicas especializadas como las de UNESCO (Bonilla, 2009), Prescott (1982a), Prescott (1982b), y Guiry y Guiry (2023). Después de la identificación taxonómica, se cuantificaron las muestras utilizando una cámara Sedgewick Rafter (modelo 1801-G20, Wildco®), a través de la metodología propuesta por Reguera Alonso, Moreira y Méndez (2011).

Análisis estadístico

Con el propósito de evaluar las variaciones espaciales (puntos de muestreo) y temporales (meses de muestreo) de los parámetros ambientales considerados en este estudio, se empleó la prueba de Kruskal Wallis a un 95 % de confianza. Posteriormente, los datos se transformaron empleando el Log₁₀ con el propósito de determinar la

relación de los parámetros ambientales con la abundancia de cianobacterias a través de la prueba de correlación de Spearman. Finalmente, se elaboró un modelo de regresión lineal múltiple para determinar cuáles parámetros ambientales pueden ayudar como predictores de la abundancia celular de cianobacterias en el lago de Güija.

Resultados

Lluvia y temperatura ambiente

De acuerdo con los registros obtenidos de la estación Güija, durante 2021, la distribución de lluvia se dio entre abril y octubre, con un promedio mensual de 201.5 mm y un acumulado de 1 410 mm, mientras que para 2022 fue de marzo a noviembre, con un promedio mensual de 183.9 mm y un acumulado de 1 654.8 mm. Por otro lado, los registros de temperatura ambiente muestran que la temperatura promedio mensual para 2021 fue de 26.5 °C, mientras que para 2022 fue de 27.8°C; se observó un aumento sostenido, el cual suele tener picos máximos previo al inicio de la estación lluviosa y desciende una vez que dicha estación está plenamente establecida (Figura 2).

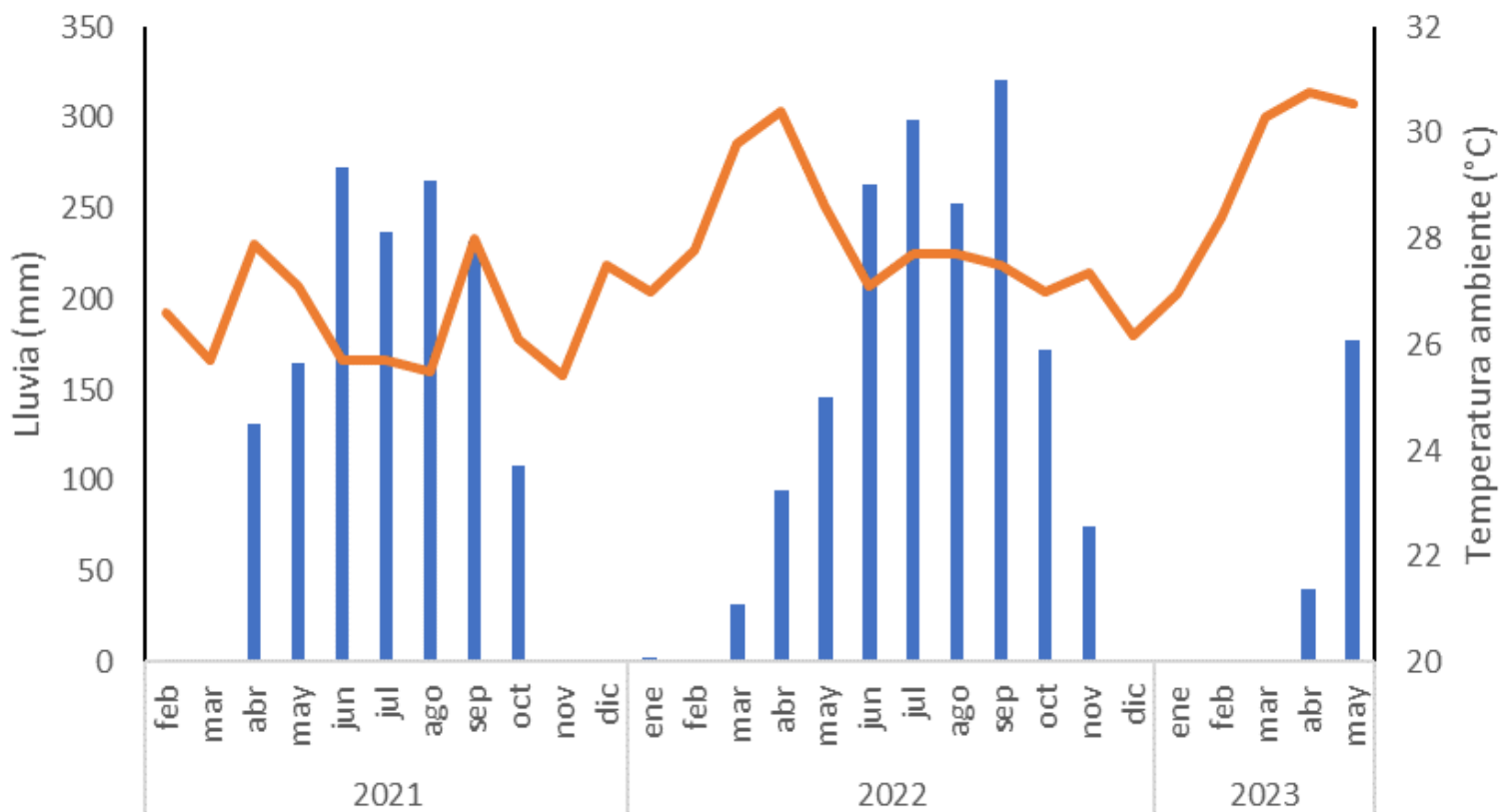


Figura 2. Distribución de los registros de lluvia acumulada mensual y temperatura promedio mensual de la estación meteorológica Guija.

Fuente: MARN-DOA (2023).

Factores ambientales

En la Tabla 1 se pueden observar valores mínimos, máximos y promedios de cada uno de los parámetros ambientales monitoreados para el periodo de estudio. Mediante la aplicación de la prueba de Kruskal-Wallis se determinó que, con excepción del oxígeno disuelto, el resto de los factores ambientales tiene un comportamiento homogéneo a escala espacial en el lago de Güija (Tabla 1).

Tabla 1. Valores mínimos, máximos y promedios de cada parámetro ambiental monitoreado.

Parámetro ambiental	Unidades	Mínimo	Máximo	Promedio
Clorofila "a"	µg/l	2.27	76.21	15.63
pH	--	6.22	9.35	8.56
Oxígeno disuelto	mg/l	1.97	9.49	5.41
Potencial REDOX	mV	-55.94	245.10	67.17
Temperatura del agua	°C	24.36	30.79	27.88

La Figura 3 muestra que los puntos situados al sur del lago (P4 y P5) tienen concentraciones significativamente mayores de oxígeno disuelto respecto al resto de puntos de muestreo, lo cual podría estar relacionado con la alta actividad fotosintética generada por el fitoplancton, ya que también, como se puede observar en la Figura 4, dicha zona es donde se han encontrado las mayores concentraciones de clorofila "a", la cual es un indicador de la presencia de estos organismos.

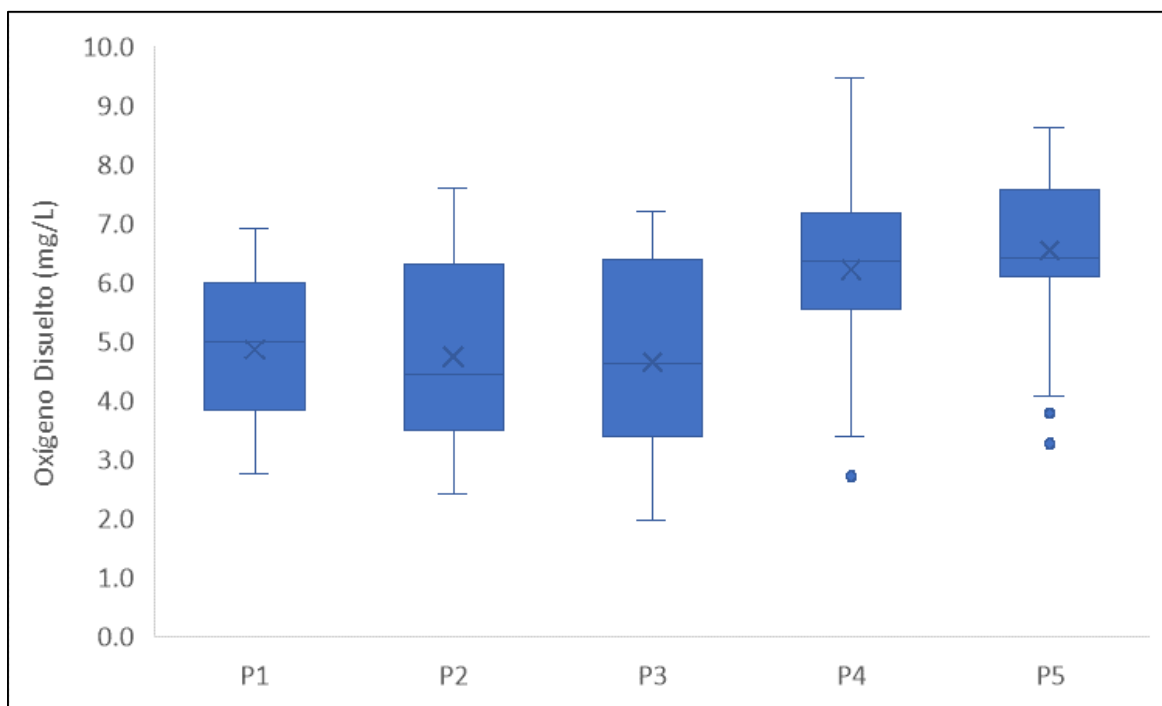


Figura 3. Variabilidad del oxígeno disuelto por punto de muestreo durante el periodo de estudio.

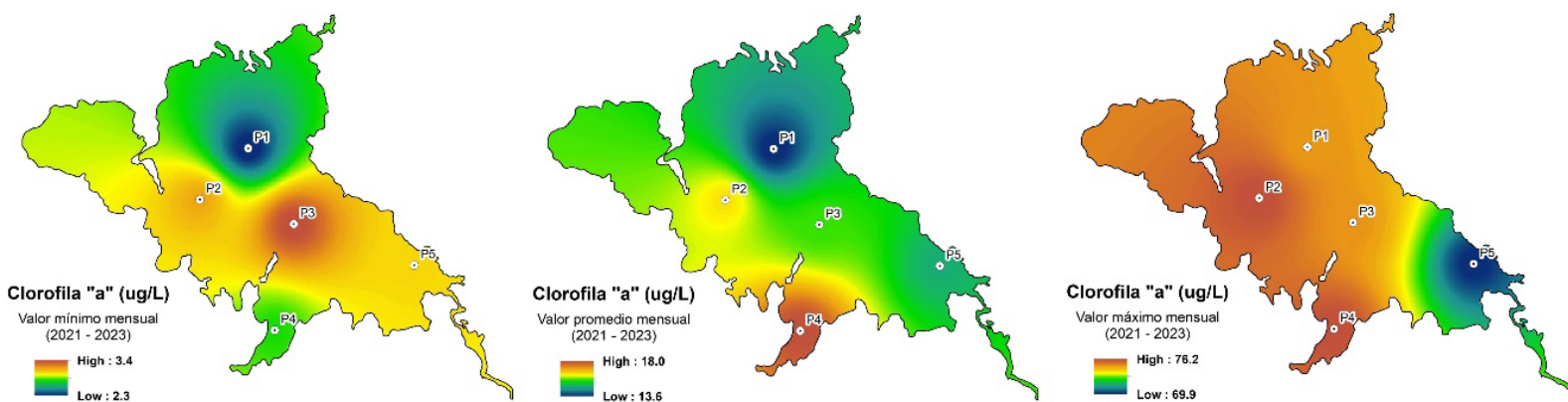


Figura 4. Distribución espacial de los valores mínimo, promedio y máximo de clorofila "a" en el lago de Güija durante el periodo de estudio.

En cuanto a la escala temporal, todos los factores ambientales, exceptuando la clorofila "a", mostraron cambios significativos a escala mensual durante el periodo de estudio. La Figura 4 muestra los valores promedio, mínimos y máximos de la distribución superficial de clorofila "a"; se evidencia que en el sector noroeste del lago, especialmente la zona de influencia del río Cusmapa, es donde se registran los valores más altos de concentración de este pigmento fotosintético.

Temperatura del agua

A través del monitoreo constante se ha registrado y caracterizado el régimen térmico anual de la columna de agua; se observa una estratificación estacional entre abril y octubre, mientras que de noviembre a marzo el lago presenta un patrón de mezcla (Figura 5).

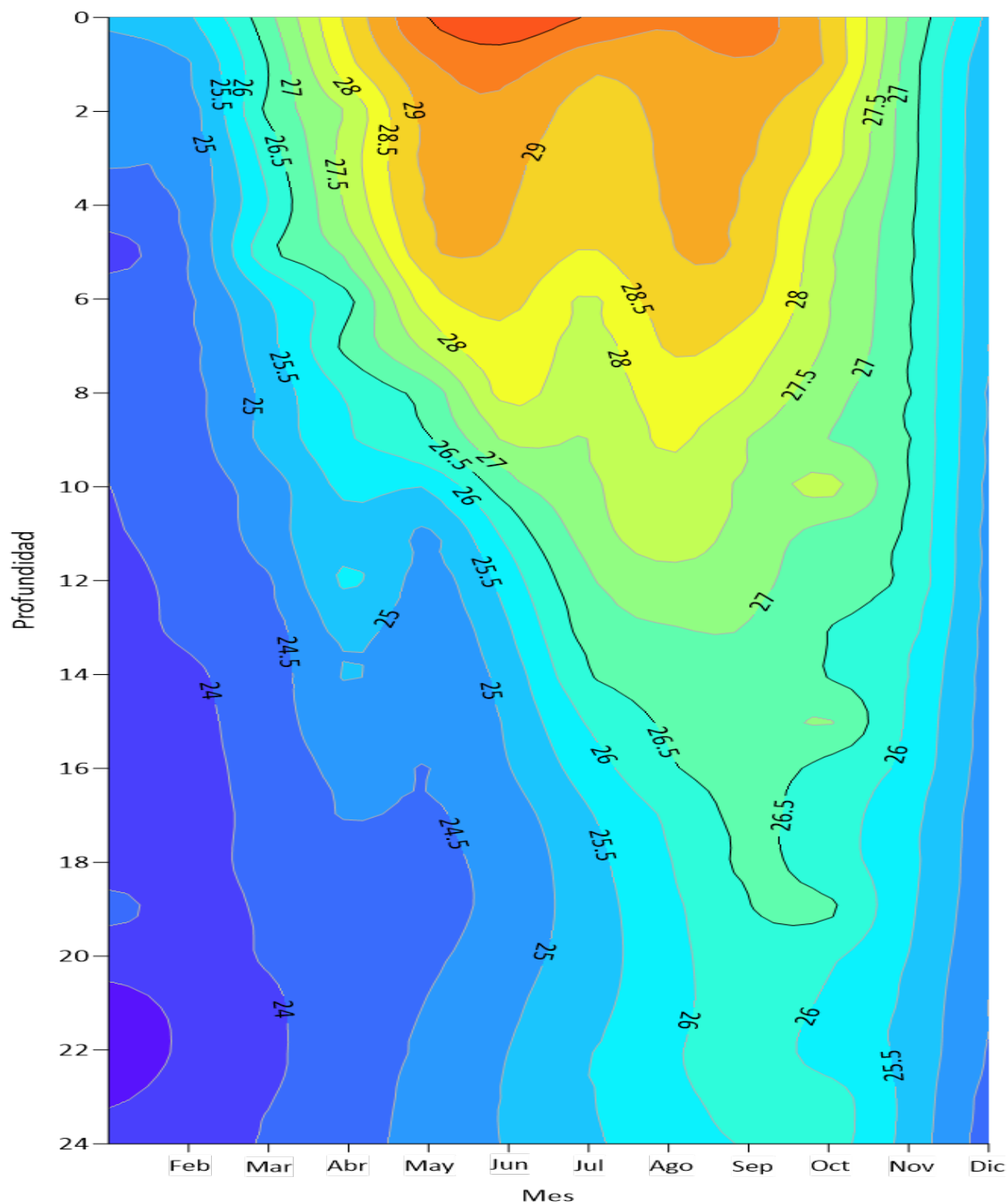


Figura 5. Distribución promedio anual de la temperatura en la columna de agua del lago de Güija.

Cianobacterias

Durante el periodo de estudio, las cianobacterias representaron en promedio el 72.2 % de la composición fitoplanctónica total del lago de Güija, y en algunas ocasiones llegaron a alcanzar hasta el 99.99 %. La concentración más alta de estos organismos tuvo lugar en el P2 durante octubre de 2021, con un registro de 4.1×10^5 cel/ml (Figura 6), lo cual sobrepasa por mucho el valor guía de concentración de estos organismos propuesto por la OMS tanto para aguas destinadas a consumo humano como para aguas destinadas a la recreación con contacto ($> 200\ 000$ cel/ml; Chorus & Bartram, 1999).

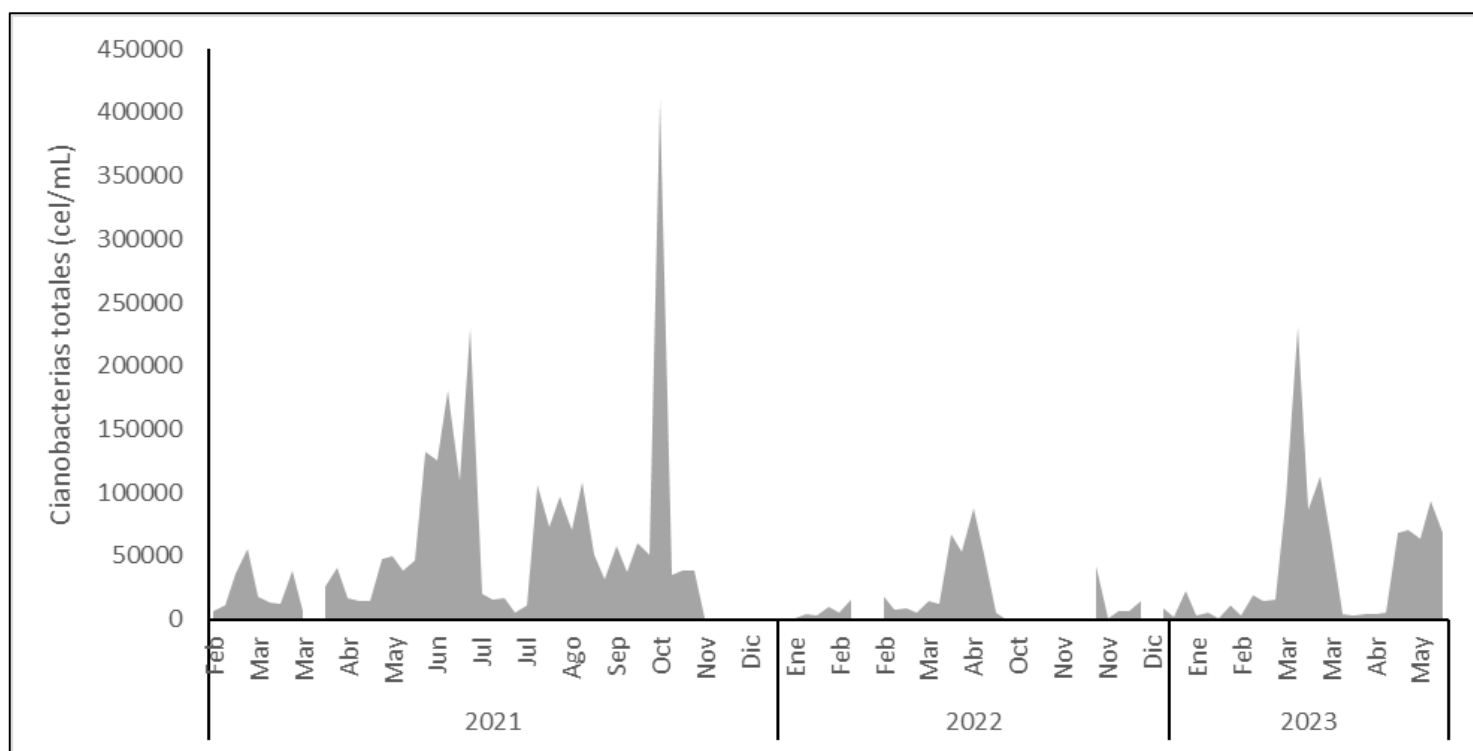


Figura 6. Variación de la concentración total de cianobacterias durante el periodo de estudio.

Los géneros más abundantes reportados fueron *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis*, *Pseudanabaena* y *Dolichospermum* (Figura 7), cada uno de los cuales ha generado proliferaciones intensas, especialmente durante febrero, marzo, junio y octubre; además, cabe destacar que todos ellos tienen la potencialidad de generar eventos tóxicos, por lo que su vigilancia se vuelve un asunto de importancia para la salud pública.

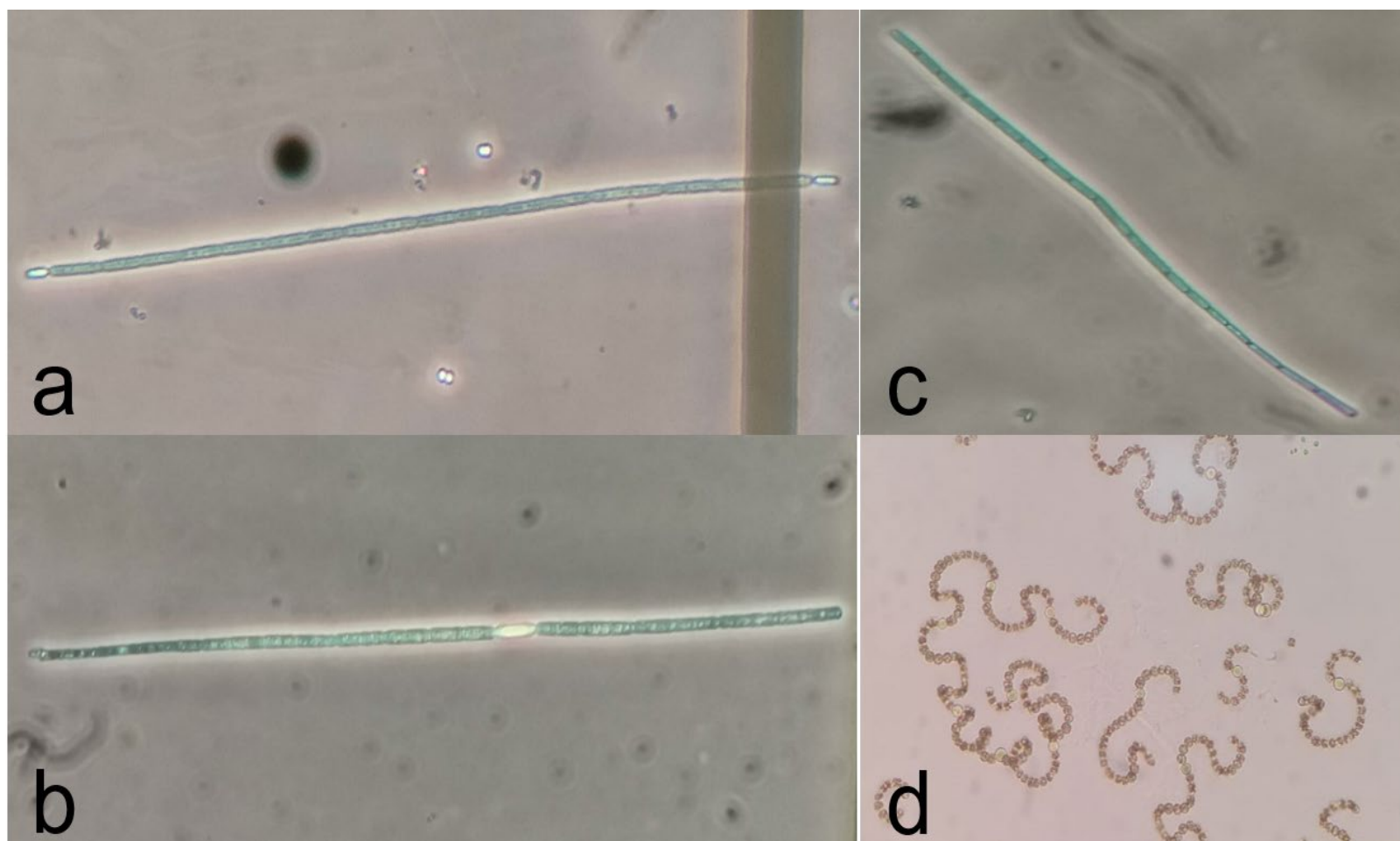


Figura 7. Géneros de cianobacterias más abundantes en el lago de Güija: a) *Cylindrospermopsis*, b) *Aphanizomenon*, c) *Pseudanabaena*, d) *Dolichospermum*. Imágenes a, b y c 400x; d 100x.

Nutrientes

Durante el periodo en el que se realizaron las mediciones de nitrógeno y fósforo total no se observaron diferencias significativas en su distribución dentro del lago de Güija; sin embargo, al comparar dichas concentraciones entre los diferentes meses de cada estación seca, se observó que existen diferencias significativas (nitrógeno, $F = 5.07$, $p < 0.05$; fósforo $F = 7.47$, $p < 0.05$); en noviembre se presentaron las mayores concentraciones en ambos analitos. Por otro lado, se evaluó la relación entre ambos nutrientes y se observó que en promedio la relación N:P fue de 7:1, con una máxima de 12:1 y una mínima de 2:1.

Relación entre cianobacterias y parámetros ambientales

La relación entre concentración de cianobacterias con el registro de los diversos parámetros ambientales monitoreados en el lago de Güija se evaluó a través de la correlación de Spearman; se encontró que tanto la lluvia ($r = 0.68$, $p < 0.05$) como la temperatura del agua ($r = 0.62$, $p < 0.05$) muestran relaciones significativas de mediana intensidad con la abundancia de estos organismos. Posteriormente se generó un modelo de regresión lineal múltiple (Ecuación (2)) empleando todos los parámetros ambientales como predictores de la abundancia celular de cianobacterias; se obtuvo que estos, en conjunto, explican el 72.18 % de dicha abundancia ($F = 17.0$, $p < 0.01$); sin embargo, solo los parámetros lluvia y pH fueron significativos ($p < 0.05$):

$$Ciano = -32.47 - (1.97 * T_{amb}) + (4.41 * T_{agua}) - (0.016 * OD) - (0.14 * RDX) + (34.1 * pH) + (0.6 * LL) \quad (2)$$

En donde:

T = temperatura

OD = oxígeno disuelto

RDX = potencial redox

LL = lluvia acumulada mensual

Discusión

La vigilancia de las proliferaciones fitoplanctónicas, especialmente de aquellas dominados por cianobacterias, son de sumo interés para los operadores de agua potable que se abastecen de fuentes susceptibles a este tipo de contaminación, pues dependiendo de diversos factores como la intensidad y extensión de la proliferación, la proximidad de ocurrencia del fenómeno con la infraestructura sanitaria y el tipo de tecnología implementada en el tratamiento del agua pueden ocasionar que se minimice o suspenda totalmente la producción, lo que afecta el abastecimiento del agua potable y en el caso de El Salvador es un tema particularmente sensible; esto, sin mencionar posibles afectaciones a la salud pública en el caso de que los organismos que proliferen tengan la potencialidad de producir metabolitos tóxicos (Walker, 2014).

Por lo anterior, el monitoreo efectivo de las fuentes de agua, así como de sus afluentes, en el caso de tenerlos, es la base de un sistema de alerta temprana ante este tipo de fenómenos. Caracterizar el comportamiento de diversos parámetros ambientales asociados con la

comunidad fitoplanctónica del lago de Güija es el primer paso en la implementación de una estrategia de aseguramiento de la calidad del agua destinada al consumo humano en la cuenca alta del río Lempa (Sklenar, Westrick, & Szlag, 2016), sobre todo si se considera la dinámica agroambiental que rodea al lago, en donde hay zonas de intensa actividad agrícola, lo cual, aunado a las intensas precipitaciones registradas en la zona, favorecen el movimiento de nutrientes y otro tipo de contaminantes hacia el espejo de agua, lo que de manera consecuente favorece la proliferación de cianobacterias (Basterrechea, 2008; Chávez & Martínez, 2012; Luna *et al.*, 2013; Madrid, 2015).

Al realizar el monitoreo de los parámetros ambientales evaluados en el presente estudio, se evidenció que presentan una marcada estacionalidad; por ejemplo, en el caso de la temperatura, en mayo de 2023 se observó un incremento en más de 1.5 °C en la temperatura del agua respecto a marzo del mismo año, cuando se registró una máxima de 30.2 °C. Estas condiciones favorecen la proliferación de cianobacterias, pues se estima que muchos de estos organismos tienen sus tasas máximas de crecimiento sobre los 25 °C (O'Neil, Davis, Burford, & Gobler, 2012); no obstante, este aumento de temperatura por sí solo no sería el desencadenante de una proliferación, sino que estaría asociado con otros fenómenos, como la estratificación de la columna de agua (Figura 5), y proporcionaría las condiciones ideales para que las cianobacterias, con vesículas de gas como las del género *Dolichospermum*, se muevan hacia la superficie, en donde tendrían mejor acceso a la luz solar, que les permitiera aumentar su metabolismo y por ende generar proliferaciones intensas (Bonilla, 2009; Dalu & Wasserman, 2018; Huisman *et al.*, 2018).

Asimismo, las condiciones de pH alcalino, presentes en el lago de Güija, suelen relacionarse con proliferaciones de cianobacterias; sin

embargo, esto, más que una causa, podría considerarse una consecuencia, ya que la alta actividad fotosintética originada por la abundante biomasa de cianobacterias puede provocar alteraciones en equilibrio bicarbonato-carbonato, que confieren al agua altos valores de pH (Dalu & Wasserman, 2018; Chorus & Welker, 2021; Orteza, Rovira, & Morán, 2022). Por otro lado, la presencia abundante de nutrientes, en especial de nitrógeno y fósforo en los ecosistemas acuáticos están relacionados con la degradación del estado trófico del mismo, pues favorecen el crecimiento de las cianobacterias (Bravo-Inclán, Tomasini-Ortiz, Sánchez-Chávez, & Moeller-Chávez, 2012).

En el lago de Güija, las relaciones N:P encontradas indican que el elemento limitante del medio es el nitrógeno (Bonilla, 2009); a pesar de ello, las proliferaciones de cianobacterias se mantienen activas, lo cual se puede apreciar en la distribución de la clorofila "a", que presenta su mayor concentración en el sector noroeste del lago, así como en las zonas limítrofes con Guatemala y en la desembocadura del río Cusmapa, sobre todo durante la época seca. Dichas proliferaciones son dominadas por organismos pertenecientes a géneros, como *Dolichospermum*, *Aphanizomenon* y *Cylindrospermopsis*, que se caracterizan por poseer heterocistos, células especializadas que les permiten fijar el nitrógeno atmosférico, por lo que la ausencia de este en el medio no limita su crecimiento, sino por el contrario, les confiere una ventaja competitiva frente a otros grupos del fitoplancton (Paerl & Otten, 2012; Huisman, 2018).

Durante estos tres años de monitoreo continuo se ha determinado que la dinámica de los parámetros ambientales, como pH, lluvia, temperatura del agua y la carga de nutrientes genera las condiciones ideales para la ocurrencia de proliferaciones de cianobacterias en el lago

de Güija, que por ser un enclave natural de gran influencia en la calidad del agua de la cuenca alta del Lempa debe contar con protocolos de vigilancia sanitaria efectivos que permitan establecer un sistema de alerta temprana ante la ocurrencia de estos fenómenos, a fin de alertar a la población en general y en especial a los operadores de agua potable, para garantizar el aseguramiento de la calidad del agua de consumo humano y por ende la salud pública, sobre todo de la población que habita en el Área Metropolitana de San Salvador.

Conclusiones

Las proliferaciones de cianobacterias en el lago de Güija presentan una marcada estacionalidad y registran sus más altos valores de concentración celular durante los meses de la época seca (noviembre-abril), que coincide con los periodos de estratificación térmica de la columna de agua; además, se encuentran estrechamente relacionadas con valores altos de pH y con el régimen de precipitaciones en la zona. Las pruebas estadísticas indican que los parámetros ambientales muestran un comportamiento homogéneo en los diferentes puntos de muestreo del lago, lo cual no ocurre con la concentración de cianobacterias, las cuales tienden a concentrarse en el sector noroeste del lago, en las zonas limítrofes con Guatemala y en la desembocadura del río Cusmapa. El lago de Güija —por ser un enclave natural de gran influencia en la calidad del agua de la cuenca alta del Lempa— debe contar con un régimen de vigilancia sanitaria especial, ya que si bien es cierto que en la actualidad en el país no se consideran valores de referencia para aguas naturales, es de vital importancia legislar al respecto, a fin de

promover el aseguramiento de la calidad del agua para el uso que fuere desde una perspectiva de cuenca.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades de la ANDA por el apoyo y reconocimiento al trabajo realizado por el personal técnico en pro del aseguramiento de la calidad del agua en todo su ciclo de gestión. Asimismo, agradecen a CEL y MARN por el apoyo en campo con equipo y personal en cada una de las campañas de muestreo.

Referencias

- ANDA, Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados. (2020). *Boletín estadístico*. San Salvador, El Salvador: Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
- Basterrechea, M. (2008). *Levantamiento de la línea base de la laguna Guija, previo al inicio de operaciones de un proyecto minero (informe)*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Asesoría Manuel Basterrechea Asociados, S.A.
- Bonilla, S. (ed.). (2009). *Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión* (documento técnico PHI-LAC, No 16). París, Francia: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).
- Bravo-Inclán, L., Tomasini-Ortiz, A. C., Sánchez-Chávez, J. J., & Moeller-Chávez, G. (2012). *Estudio de eutroficación del lago de Pátzcuaro, Mich., y su relación con los florecimientos de cianobacterias*. XXII Congreso Nacional de Hidráulica, 2 al 7 de noviembre, Acapulco, Guerrero, México.

- Chávez, F., & Martínez, E. (2012). Informe de estudios sobre humedales en Metapán. Recuperado de http://riolempa.org/wp-content/uploads/2020/11/Informe_de_estudios_sobre_humedales_en_Metapan__17_Ago_12_.pdf
- Chorus, I. (2012). *Current approaches to Cyanotoxin risk assessment, risk management and regulation in different countries*. Recuperado de <http://www.uba.de/uba-info-medien-e/4390.html>
- Chorus, I., & Bartram, J. (eds.). (1999). *Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management*. Ginebra, Suiza: E&FN Spon, London, Organización Mundial de la Salud. DOI: 10.4324/9780203478073
- Chorus, I., & Welker, M. (2021). *Toxic Cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring and management* (2nd ed.). Geneva, Switzerland: World Health Organization. DOI: 10.1201/9781003081449
- Dalu, T., & Wasserman, R. J. (2018). Cyanobacteria dynamics in a small tropical reservoir: Understanding spatio-temporal variability and influence of environmental variables. *Science of the Total Environment*, 643, 835-841. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.256
- Giannuzzi, L. (2009). *Cianobacterias y cianotoxinas. Identificación, toxicología, monitoreo y evaluación de riesgo*. Recuperado de <https://cyanosur.fiba.org.ar/wp-content/uploads/2021/11/2009-Cianobacterias-y-Cianotoxinas-.pdf>
- Guiry, M. D., & Guiry, G. M. (January 27, 2023). *AlgaeBase. World-Wide electronic publication*. Galway, Ireland: National University of Ireland. Recuperado de <https://www.algaebase.org>

- Huisman, J., Codd, G. A., Paerl, H. W., Ibelings, B. W., Verspagen, J. M. H., & Visser, P. M. (2018). Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology*, 16(8), 471-483. DOI: 10.1038/s41579-018-0040-1
- Jiménez-Cisneros, B., & Galizia-Tundisi, J. (coords.). (2012). *Diagnóstico del agua en las Américas*. Recuperado de https://www.agua.org.mx/wp-content/uploads/2012/03/Libro_Diagnostico_del_Agua_en_las_Americas.pdf
- Luna, J. R., Cosillo, A., Gordillo, C., Vendrell, P., Solís, L., Navichoque, G., & Contreras, L. (2013). *Análisis de la información de la cuenca Ostúa-Güija, con énfasis en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, y la incidencia del proyecto minero Cerro Blanco*. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2013/02/INFORME-FINAL-ANALISIS-CUENCA-OSTUA-GUIJA-10-DE-JUNIO.pdf>
- Madrid, E. (2015). Calidad del agua y estado trófico en el lago de Güija y sus ríos afluentes y efluente para un programa de monitoreo. Managua, Nicaragua: Universidad Autónoma de Nicaragua, Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua.
- MCI, Ministerio de Comercio e Industria de Panamá. (2019). Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 21-2019 Tecnología de los Alimentos. Agua potable. Definiciones y Requisitos Generales. *Gaceta Oficial Digital*, 28777, 1-15. Recuperado de https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/28777_B/GacetaNo_28777b_20190520.pdf

- MAG, Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador. (1978). *Mapa ecológico de El Salvador. Sistema de Zonas de Vida del DR. LR. Holdridge. 1:300 000. San Salvador. Santa Tecla, El Salvador: Instituto Geográfico Nacional "Ingeniero Pablo Arnoldo Guzmán".*
- MARN-DOA, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Dirección del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales. (2023). Respuesta a solicitud de información pública.
- O'Neil, J. M., Davis, T. W., Burford, M. A., & Gobler, C. J. (2012). The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae*, 14, 313-334. DOI: 10.1016/j.hal.2011.10.027
- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (2018). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Nueva York, EUA: Organización de las Naciones Unidas.
- ODS El Salvador. (14 de julio 2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible y sus metas*. Recuperado de <http://odselsalvador.egob.sv/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Ortez, L., Rovira, M. D., & Morán, L. (2022). Distribución espaciotemporal de cianobacterias planctónicas y factores ambientales asociados a sus proliferaciones en el embalse Cerrón Grande, El Salvador. *Revista de Biología Tropical*, 70(1), 250-262. DOI: 10.15517/rev.biol.trop.v70i1.47625
- Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2012). Harmful Cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls. *Environmental Microbiology*, 65, 995-1010. DOI: 10.1007/s00248-012-0159-y
- Prescott, G. (1982a). *Algae of the Western Great Lakes area*. Boston, USA: Brown Publishers.

- Prescott, G. (1982b). *How to know the freshwater algae*. Missoula, USA: University of Montana.
- Reguera, B., Alonso, R., Moreira, A., & Méndez, S. (2011). *Guía para el diseño y puesta en marcha de un plan de seguimiento de microalgas productoras de toxinas*. París, Francia: Comisión Oceanográfica Intergubernamental Manuales-Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Sklenar, K., Westrick, J., & Szlag, D. (September, 2016). *Managing Cyanotoxins in drinking water: A technical guidance manual for drinking water professionals managing Cyanotoxins in drinking water*. Denver, USA: American Water Works Association and Water Research Foundation.
- Vammen, K. (2015). *Desafíos del agua urbana en las Américas: Perspectivas de las academias de ciencias*. París, Francia: Red Interamericana de Academias de Ciencias-Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. DOI: 10.22231/asyd.v12i3.238
- Walker, H. W. (2014). Harmful algae blooms in drinking water. In: *Harmful Algae Blooms in Drinking Water*. DOI: 10.1201/b17922