









Evaluación de la concentración de cianobacterias en las playas de San Bernardino, Ypacaraí y Areguá del Lago Ypacaraí durante el periodo 2022-2024

Evaluation of Cyanobacteria concentration in the beaches of San Bernardino, Ypacaraí, and Areguá of Lake Ypacaraí during the period 2022-2024

Claudia Raquel Ávalos de Enciso^{1,4,*}, Franco Nahuel León Ávalos²,
Rocío Rosmary Acosta Britez², Andrea Alejandra Arrua^{3,4}, Zunilda Jara Villasboa⁴, Gustavo
René Brozón Benítez¹, Felicia Mabel Díaz Cubilla⁴ & Gilberto Antonio Benítez Rodas^{3,4,*}

¹Universidad Nacional de Asunción, Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas, Laboratorio de Calidad de Aguas, San Lorenzo, Paraguay.

²Universidad Nacional de Asunción, Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas, Laboratorio de Hidrobiología, San Lorenzo, Paraguay.

³Universidad Nacional de Asunción, Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas, Mycology Investigation and Safety Team, San Lorenzo, Paraguay.

⁴Universidad Nacional de Asunción, Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas, Área de Gestión de Proyectos Ambientales, San Lorenzo, Paraguay.

*Autor de correspondencia: gilberto.benitez@cemit.una.py.

Resumen: El Lago Ypacaraí, un ecosistema acuático de gran relevancia en Paraguay, ha sido objeto de investigación debido a las proliferaciones de cianobacterias en ciertos periodos del año y que representa riesgos significativos para la salud pública y la biodiversidad. En este trabajo se planteó como objetivo evaluar la concentración de cianobacterias en las Playas Municipales de San Bernardino, Ypacaraí y Areguá, abarcando las estaciones de verano de mayor afluencia durante un periodo de tres años (2022-2024). Se realizaron 15 campañas de monitoreo, se midieron parámetros *in situ* (pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura) y se analizaron muestras de agua superficial en el CEMIT para determinar las concentraciones de cianobacterias, fósforo total y nitrógeno total. Se observaron variaciones importantes de las cianobacterias en las 3 playas y los géneros más frecuentes fueron *Microcystis*, *Pseudanabena* y *Dolichospermum*. Los resultados del análisis de Kruskal-Wallis indicaron diferencias significativas a lo largo del tiempo ($p < 0,05$) respecto a las concentraciones de cianobacterias (0 - 38.883 cél.mL⁻¹). El coeficiente de correlación de Spearman reveló una correlación positiva significativa entre cianobacterias y conductividad ($r = 0,55$), sugiriendo que una mayor presencia de iones disueltos y nutrientes pudo favorecer su proliferación, mientras que la correlación negativa con el nitrógeno total Kjeldahl ($r = -0,52$) resaltó el aumento de la biomasa debido a la capacidad de algunas cianobacterias para fijar nitrógeno atmosférico en condiciones de deficiencia de este. Los hallazgos reflejan la compleja interacción entre las cianobacterias y las condiciones fisicoquímicas del agua, subrayando la importancia de factores ambientales y antropogénicos en la dinámica de estos microorganismos en el Lago Ypacaraí.

Palabras clave: eutrofización, calidad de agua, nutrientes, variables ambientales.

Abstract: Lake Ypacaraí, a significant aquatic ecosystem in Paraguay, has been the subject of research due to the proliferation of cyanobacteria during certain times of the year, which poses significant risks to public health and biodiversity. The aim of this study was to evaluate the concentration of cyanobacteria at the Municipal Beaches of San Bernardino, Ypacaraí, and Areguá during the summer seasons, which see higher visitor numbers, over a three-year period (2022-2024). Fifteen monitoring campaigns were conducted, where *in situ* parameters such as pH, conductivity, dissolved oxygen, and temperature were measured. Surface water samples were analyzed at CEMIT to determine cyanobacteria concentrations, total phosphorus, and total nitrogen. Significant variations in cyanobacteria were observed across the three beaches, with the most common genera being *Microcystis*, *Pseudanabaena*, and *Dolichospermum*. The results of the Kruskal-Wallis analysis indicated significant differences over time ($p < 0.05$) in cyanobacteria concentrations (0 - 38,883 cells/mL). Spearman's correlation coefficient revealed a significant positive correlation between cyanobacteria and conductivity ($r = 0.55$), suggesting that a higher presence of dissolved ions and nutrients may have favored their proliferation. Meanwhile, the negative correlation with total Kjeldahl nitrogen ($r = -0.52$) highlighted the increase in biomass due to the ability of some cyanobacteria to fix atmospheric nitrogen under conditions of nitrogen deficiency. These findings reflect the

complex interaction between cyanobacteria and the physicochemical conditions of the water, emphasizing the importance of environmental and human factors in the dynamics of these microorganisms in Lake Ypacaraí.

Keywords: eutrophication, water quality, nutrients, environmental variables.

Introducción

Las cianobacterias, también conocidas como algas verdeazules, son un grupo diverso de microorganismos fotosintéticos que se encuentran comúnmente en cuerpos de agua dulce. Estas bacterias son reconocidas por su capacidad para realizar la fotosíntesis, similar a las plantas superiores (Wehr & van Vuuren, 2024). Biológicamente, las cianobacterias presentan una amplia variedad de formas y tamaños, abarcando desde organismos unicelulares hasta filamentos complejos. Ecológicamente, juegan roles cruciales en los ciclos biogeoquímicos, particularmente en el ciclo del nitrógeno, gracias a su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico (Bhardwaj *et al.*, 2024).

El crecimiento de las cianobacterias está influenciado por varios factores abióticos, siendo la temperatura y la luz determinantes clave, ya que estas bacterias prefieren temperaturas cálidas y alta irradiancia para maximizar su tasa fotosintética. Los nutrientes, específicamente nitrógeno y fósforo, son esenciales para su crecimiento (Bhardwaj *et al.*, 2024), sin embargo, la eutrofización de cuerpos de agua, debido al aporte excesivo de estos nutrientes puede desencadenar proliferaciones masivas de cianobacterias. Además, las condiciones hidrodinámicas, como la estabilidad de la columna de agua, pueden favorecer su acumulación en la superficie, formando floraciones visibles (Hamilton *et al.*, 2016).

Las floraciones de cianobacterias tienen un impacto significativo en los ecosistemas acuáticos (Song *et al.*, 2024). Ecológicamente, estas floraciones pueden alterar las comunidades biológicas al competir por recursos como la luz y los nutrientes, y al producir toxinas que afectan a otras formas de vida acuática (Mohamed *et al.*, 2023). Estas toxinas pueden llegar hasta el ser humano a través de la cadena trófica o por consumo de agua no tratada de forma adecuada, representando un riesgo significativo para la salud pública (Haida *et al.*, 2024).

En lo que respecta al Lago Ypacaraí, ha experimentado recurrentes floraciones de cianobacterias desde octubre de 2012 (López Moreira M. *et al.*, 2018). Estas floraciones han variado en frecuencia y severidad, influenciadas por factores, tanto naturales como antropogénicos. Históricamente, eventos significativos de floraciones se han documentado en múltiples ocasiones, reflejando la susceptibilidad del lago a la eutrofización y otros cambios ambientales (Benitez Rodas *et al.*, 2017).

Debido a los riesgos asociados a las floraciones, es necesario un monitoreo continuo en lo que respecta a la concentración de cianobacterias, sobre todo, en las playas de San Bernardino, Ypacaraí y Areguá, ubicadas en el Lago Ypacaraí, que son áreas de recreación muy importantes, especialmente durante las épocas de verano. Estas playas son altamente concurridas por turistas y residentes locales, que buscan disfrutar de actividades recreativas y acuáticas (Ibarrola & Achucarro, 2021; Weiler *et al.*, 2016).

Por esta razón, se estableció como objetivo evaluar la concentración de cianobacterias en las playas de San Bernardino, Ypacaraí y Areguá del Lago Ypacaraí, mediante el análisis de muestras de agua superficial recogidas durante las estaciones de verano entre 2022 y 2024. Este estudio permitirá entender mejor la dinámica de las concentraciones de cianobacterias en la época de mayor actividad humana en estas áreas críticas, proporcionando datos esenciales que sirvan para la gestión ambiental y la formulación de políticas de salud pública que busquen la seguridad de los usuarios y la sostenibilidad del uso recreativo del lago.

Materiales y métodos

Área de estudio

El Lago Ypacaraí se encuentra ubicado a 48 kilómetros de Asunción (capital del Paraguay) y recibe aguas provenientes de tres departamentos: Central, Paraguari y Cordillera (González Torres &

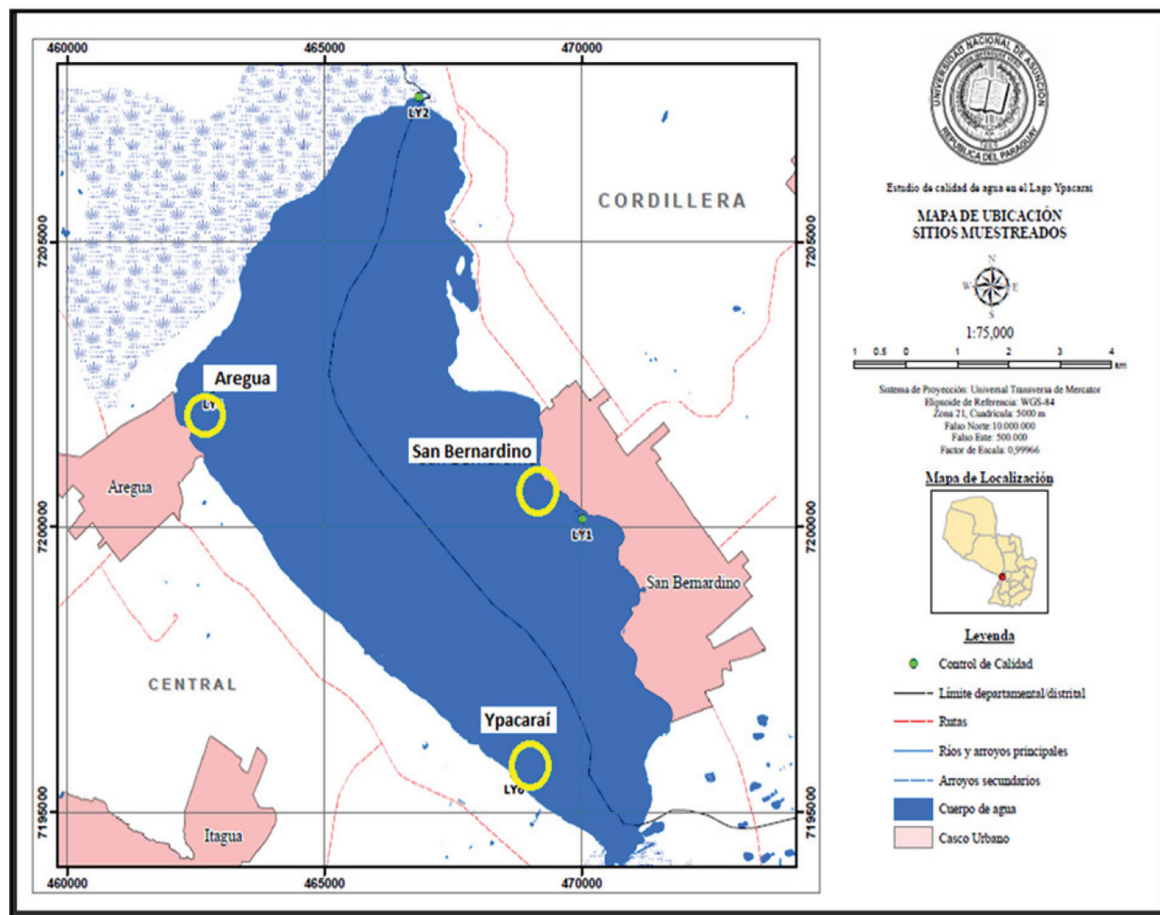


Figura 1. Mapa con los puntos de monitoreo de las playas del Lago Ypacaraí.

González Romero, 1986). El sistema Lago Ypacaraí y sus cuencas abarcan 1.109 km² del cual 5 km² corresponde al cuerpo de agua (Weiler *et al.*, 2016).

Puntos y frecuencia de muestreo

Se seleccionaron como puntos de monitoreo las playas municipales de San Bernardino, correspondiente al Departamento de Cordillera, y las de Areguá e Ypacaraí correspondientes al Departamento de Central (Fig. 1), debido a su gran afluencia para actividades de recreación de contacto primario y secundario con el agua en épocas de verano (Tabla 1). Se realizaron un total de 15 muestreos, comenzando el 10 de enero de 2022 y finalizando el 19 de febrero de 2024. La cantidad de muestreos por año variaron según el financiamiento.

Determinaciones fisicoquímicas y cianobacterias

Se tomaron muestras de agua superficial y se transportaron en condiciones refrigeradas hasta el Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas (CEMIT) para su procesamiento y análisis. La identificación y clasificación taxonómica de las cianobacterias se basó en características morfológicas y se utilizaron diversas claves taxonómicas (Hindák,

Tabla 1. Puntos y coordenadas de monitoreo de las playas del Lago Ypacaraí.

Puntos de monitoreo	Coordenadas (UTM)
Playa San Bernardino	21J 470161 7200178
Playa Areguá	21J 462425 7201548
Playa Ypacaraí	21J 470047 7194709

1988; Komarek, 2006; Komárek, 2016; Komárek & Anagnostidis, 2000; Komarek & Komárková-Legnerová, 2002). Una vez realizada la identificación, se procedió con la cuantificación mediante el método de Utermöhl (Edler & Elbrächter, 2010). Además, se midieron los siguientes parámetros fisicoquímicos asociados a las concentraciones de cianobacterias: Fósforo total (PT), nitrógeno total kjeldahl (NTK), oxígeno disuelto (OD), pH y temperatura del agua (Temp) (Cao *et al.*, 2024). La toma de muestras, transporte, así como las determinaciones fisicoquímicas se realizaron según el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd. Edition & Bridgewater, 2012).

Análisis estadístico

Para realizar el análisis del conjunto de datos se utilizó el software estadístico R Studio 2024.04.1 Build 748. Primero se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk y los datos se consideraron con distribución normal cuando el valor $p > 0,05$. A continuación, se realizó una estadística descriptiva de los datos (valores máximos, mínimos, mediana), luego se aplicó la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis para determinar si hubo diferencia significativa entre los valores de las concentraciones de cianobacterias y los parámetros fisicoquímicos a través de los años. Para determinar la correlación entre dos variables (Cianobacterias vs. Fisicoquímicos), se procedió a determinar el coeficiente de correlación de Spearman (Rosínska *et al.*, 2017). Los gráficos se realizaron con el programa OriginPro 8.5.

Resultados y Discusión

Concentraciones de Cianobacterias en las 3 playas monitoreadas del Lago Ypacaraí

Durante el monitoreo de la playa San Bernardino, se observó una variación importante en la densidad de cianobacterias a lo largo del tiempo. El 24 enero de 2022, la densidad alcanzó un valor máximo de $29.393 \text{ cél.mL}^{-1}$, sin embargo, se registraron valores inferiores de 12.623 y $11.544 \text{ cél.mL}^{-1}$ el 10 y 17 de enero respectivamente, y alcanzando mínimos de $4.480 \text{ cél.mL}^{-1}$ el 7 de febrero. Durante el periodo de verano de diciembre de 2022 hasta

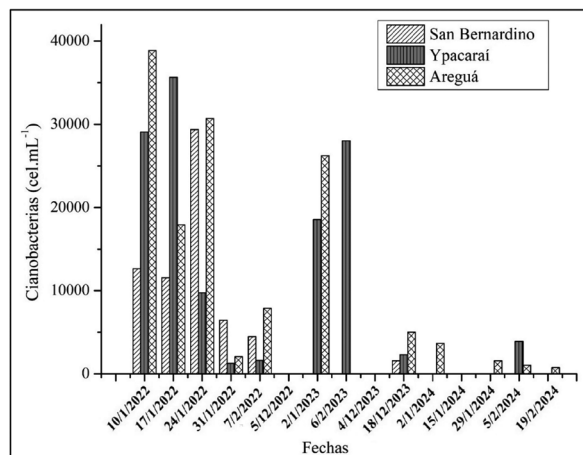


Figura 2. Tendencia de la concentración de cianobacterias en las playas del Lago Ypacaraí durante el tiempo de monitoreo.

febrero de 2023 no se observaron cianobacterias en las muestras analizadas. También lo mismo ocurrió en el siguiente periodo de verano de diciembre de 2023 hasta febrero de 2024, con una excepción el 18 de diciembre de 2023, cuando se registró $1.573 \text{ cél.mL}^{-1}$. En el año 2024, tampoco se observaron cianobacterias en las muestras analizadas (Fig. 2).

En la playa Ypacaraí a diferencia de la playa de San Bernardino, la densidad de cianobacterias mostró un comportamiento fluctuante. En el primer periodo de verano (diciembre -2022 a febrero -2023) los valores más altos se registraron el 17 de enero de 2022 con $35.685 \text{ cél.mL}^{-1}$, seguido por un descenso gradual hasta $1.600 \text{ cél.mL}^{-1}$ el 7 de febrero de 2022. Durante el segundo periodo de verano de diciembre de 2022 a febrero de 2023, el 02 y 06 de febrero de 2023 se registraron 18.560 y $28.052 \text{ cél.mL}^{-1}$ respectivamente. Para el tercer periodo de verano de diciembre de 2023 a febrero de 2024, se reportó en 2 ocasiones la presencia de cianobacterias, el 18 de diciembre de 2023 con $2.314 \text{ cél.mL}^{-1}$ y el 05 de febrero del mismo año con $3.900 \text{ cél.mL}^{-1}$; en las demás fechas de muestreo no se observaron cianobacterias en las muestras analizadas (Fig. 2).

En relación a la playa Areguá presentó las densidades más elevadas al inicio del periodo de estudio, con un pico de $38.883 \text{ cél.mL}^{-1}$ el 10 de enero de 2022. Posteriormente, se evidenciaron

valores de 17.940 y 30.732 cél.mL⁻¹ el 17 y 24 de enero respectivamente, y 7.872 cél.mL⁻¹ el 7 de febrero. Al igual que en las otras playas, no se observaron cianobacterias en las muestras analizadas de diciembre de 2022, sin embargo, el 02 de enero de 2023 se registró 26.240 cél.mL⁻¹ y un descenso el 18 de diciembre de 2023 con 5.005 cél.mL⁻¹. Los valores decrecientes se siguieron reportando durante enero hasta 780 cél.mL⁻¹ el 19 de febrero de 2024 (Fig. 2).

Los datos obtenidos en este estudio indicaron patrones de variabilidad en la densidad de cianobacterias en los puntos de monitoreos del Lago Ypacaraí (Fig. 2). Las fluctuaciones en las concentraciones de cianobacterias totales podrían estar influenciadas por factores ambientales tales como la temperatura del agua, la disponibilidad de nutrientes y las condiciones meteorológicas e hidrológicas, así como por factores antropogénicos, incluidos los aportes de nutrientes derivados de actividades industriales, agrícolas y urbanas (Mugani *et al.*, 2024; Richardson *et al.*, 2018).

Abundancia relativa de géneros de cianobacterias frecuentes registrados a lo largo del periodo 2022-2024

En la Fig. 3 se visualiza que el género más frecuente

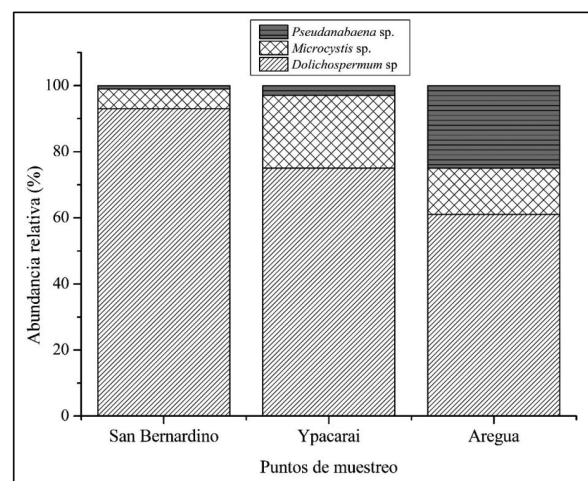


Figura 3. Abundancia relativa de *Pseudanabaena* sp. (■), *Microcystis* sp. (▨) y *Dolichospermum* sp. (▩) en las playas: San Bernardino, Ypacaraí y Areguá.

en todas las localidades fue *Dolichospermum*, comparable a los datos reportados por González *et al.* (2024) para otro sistema acuático similar (González *et al.*, 2024). Esta preponderancia fue más pronunciada en la Playa San Bernardino que en los demás puntos de muestreo, al contrario de lo ocurrido con respecto al género *Microcystis*, que estuvo presente en las tres playas, pero con menor abundancia en San Bernardino y mayor concentración en Ypacaraí. El género *Pseudanabaena* mostró variabilidad importante, con presencia marginal en las playas de San Bernardino y Areguá, pero considerablemente mayor en Ypacaraí, lo que podría estar relacionado con condiciones ambientales específicas como mayor disponibilidad de nutrientes que favoreció su crecimiento en esta playa.

Estos patrones podrían ser influenciados por factores locales de cada playa en la distribución y frecuencia de los géneros de cianobacterias en el Lago Ypacaraí. La predominancia de estos tres géneros por lo común se ha asociado como bio-indicadores a ecosistemas acuáticos eutrofizados (Tapia-Larios & Olivero-Verbel, 2023; Ferrari *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2018).

Análisis de la distribución de los datos físicoquímicos y cianobacterias

Los resultados evidenciaron que las variables pH ($W=0,95$; $p>0,05$), temperatura ($W=0,96$; $p>0,05$), OD ($W=0,95$; $p>0,05$) y PT ($W=0,91$; $p>0,05$) presentaron distribución normal. Sin embargo, las variables conductividad ($W=0,88$; $p<0,05$), nitrógeno NTK ($W=0,70$; $p<0,05$) y cianobacterias ($W=0,63$; $p<0,05$), no presentaron distribución normal (Tabla 2). En relación con el análisis de los datos de la playa Ypacaraí indicaron que las variables pH ($W=0,95$; $p>0,05$), conductividad ($W=0,89$; $p>0,05$), temperatura ($W=0,96$; $p>0,05$), OD ($W=0,91$; $p>0,05$) y NTK ($W=0,88$; $p>0,05$) tuvo distribución normal. Mientras que las PT ($W=0,39$; $p<0,05$) y densidad de cianobacterias ($W=0,72$; $p<0,05$) no lo hicieron (Tabla 2). Respecto a la playa Areguá, las variables pH ($W=0,97$; $p>0,05$), temperatura ($W=0,92$; $p>0,05$) y NTK ($W=0,89$; $p>0,05$) presentaron distribución

Tabla 2. Resultados de la prueba de Shapiro-Wilk para la normalidad de las variables monitoreadas en las playas: San Bernardino, Ypacaraí y Areguá. **Rf. S-W** (Shapiro-Wilk); **Norma** (Normalidad).

Puntos	Playa San Bernardino			Playa Ypacaraí			Playa Areguá		
Variables	S-W	Valor p	Norma	S-W	Valor p	Norma	S-W	Valor p	Norma
pH	0,95	p>0,05	V	0,95	p>0,05	V	0,97	p>0,05	V
Conductividad (uS.cm ⁻¹)	0,88	p<0,05	F	0,89	p>0,05	V	0,78	p<0,05	F
Temperatura (°C)	0,96	p>0,05	V	0,96	p>0,05	V	0,92	p>0,05	V
OD (mg.L ⁻¹)	0,95	p>0,05	V	0,91	p>0,05	V	0,85	p<0,05	F
NTK (mg.L ⁻¹)	0,7	p<0,05	F	0,88	p>0,05	V	0,89	p>0,05	V
PT (mg.L ⁻¹)	0,91	p>0,05	V	0,39	p<0,05	F	0,87	p<0,05	F
Cianobacterias (Cel.mL ⁻¹)	0,63	p<0,05	F	0,72	p<0,05	F	0,73	p<0,05	F

normal, pero la conductividad (W=0,78; p<0,05), OD (W=0,85; p<0,05), PT (W=0,87; p<0,05) y densidad de cianobacterias (W=0,73; p<0,05) no mostraron distribución normal (Tabla 2).

Es habitual que ciertas variables ambientales presentan distribución normal mientras que otras no cuando se aplica la prueba de Shapiro-Wilk, esto podría ser debido a varios factores que se detallan a continuación. La heterogeneidad en las fuentes de contaminación y la variabilidad natural de las condiciones ambientales son cruciales, ya que fuentes esporádicas o puntuales de contaminantes, pueden afectar de manera diferente las concentraciones en distintas fechas y ubicaciones. Las condiciones climáticas y estacionales, junto con las actividades humanas como descargas de aguas residuales, introducen variabilidad adicional. El tamaño de la muestra y la frecuencia de muestreo también impactan los resultados, ya que muestras pequeñas pueden no representar adecuadamente la distribución subyacente (Gad *et al.*, 2024; Modi & Chintalacheruvu, 2024; Yin *et al.*, 2024). Teniendo

en cuenta los resultados de las tres playas y que no todas presentaron una distribución paramétrica de los datos, se decidió aplicar las pruebas de Kruskal-Wallis y Spearman a las variables fisicoquímicas y cianobacterias (Rosińska *et al.*, 2017).

Análisis de la variación de Cianobacterias en las tres playas del Lago Ypacaraí

En Playa San Bernardino, la densidad de cianobacterias presentó un valor máximo de 29.393 cél.mL⁻¹, indicando un evento significativo de proliferación de cianobacterias. También se reportó la ausencia de cianobacterias en las muestras analizadas. La mediana de la densidad de cianobacterias fue de cero (ausencia), sugiriendo que en la mayoría de los muestreos no se observaron cianobacterias en las muestras. La prueba de Kruskal-Wallis arrojó un valor de 8,8, con un valor p<0,05, lo cual indicó una variación significativa en la densidad de cianobacterias en este punto de monitoreo (Tabla 3).

En Playa Ypacaraí, se registró una densidad máxima de cianobacterias de 35.685 cél.mL⁻¹,

Tabla 3. Estadística descriptiva y resultados de la prueba de Kruskal-Wallis aplicados a la concentración de cianobacterias de las diferentes playas del Lago Ypacaraí.

Cianobacterias (cél.mL ⁻¹)	Máximo	Mínimo	Mediana	Kruskal-Wallis	valor p
Playa San Bernardino	29.393	0	0	8,8	p<0,05
Playa Ypacaraí	35.685	0	1.600	4,1	p>0,05
Playa Areguá	38.883	0	2.093	3,1	p>0,05

nuevamente indicando un evento de alta proliferación. También como la Playa San Bernardino, se registraron ausencia de cianobacterias en algunos muestreos. La mediana en este caso fue de 1.600 cél.mL⁻¹, lo que sugiere que hubo periodos con densidades moderadas de cianobacterias. El valor de Kruskal-Wallis fue de 4,11, con un valor $p > 0,05$, lo que indicó que la variación en la densidad de cianobacterias en este punto no fue significativamente diferente en el período estudiado (Tabla 3).

Por último, en Playa Areguá, la densidad máxima alcanzó 38.883 cél.mL⁻¹, siendo el valor más alto registrado entre los tres puntos de monitoreo, lo que sugiere un evento significativo de proliferación. Los valores mínimos fueron de cero cél.mL⁻¹, indicando la ausencia de cianobacterias en las muestras analizadas en ciertos periodos. La mediana fue de 2.093 cél.mL⁻¹, lo que indicó densidades moderadas en varias campañas de muestreo. La prueba de Kruskal-Wallis resultó en un valor de 3,11, con un valor $p > 0,05$, indicando que las variaciones en la densidad de cianobacterias no fueron significativamente diferentes durante el período de monitoreo en este sitio (Tabla 3).

Los resultados obtenidos en este estudio indicaron que, aunque hubo eventos de alta proliferación de cianobacterias en los tres puntos de monitoreo (Fig. 2), solo en la Playa San Bernardino se observó una variación significativa en la densidad de cianobacterias a lo largo del tiempo según la prueba de Kruskal-Wallis (Tabla 3). Esto sugiere que la presencia de cianobacterias en las Playas Ypacaraí y Areguá se mantuvo dentro de un rango más constante durante el periodo estudiado, que en la Playa de San Bernardino. Una de las posibles causas podría ser el efecto del viento proveniente principalmente del noreste en verano (Grassi, 2020). Este pudo causar el arrastre de cianobacterias de la Playa San Bernardino, principalmente de los géneros más

frecuentes como *Microcystis* y *Dolichospermum* (Fig. 2), hacia las playas de Ypacaraí y Areguá (Ibelings *et al.*, 2021). Este fenómeno de desplazamiento por el viento podría explicar la dinámica de distribución espacial de las cianobacterias en el lago, debido a que la concentración de nutrientes no mostró variación significativa ($p > 0,05$) en las tres playas (Tabla 4).

Análisis de la variación significativa de Cianobacterias entre las playas monitoreadas

Se observó un rango considerable en la densidad de cianobacterias, con valores que oscilaron entre un mínimo de 0 cél.mL⁻¹ y un máximo de 38.883 cél.mL⁻¹. La mediana de la densidad de cianobacterias fue de 1.560 cél.mL⁻¹, indicando que la mitad de las muestras presentaron densidades por debajo de este valor (Tabla 4).

La prueba de Kruskal-Wallis, utilizada para determinar la significancia de las diferencias en la densidad de cianobacterias entre las distintas playas, arrojó un valor de 2,11 con un valor $p > 0,05$. Este resultado indicó que no reportó diferencias estadísticamente significativas en la densidad de cianobacterias entre las playas estudiadas (Tabla 4).

Esto sugiere que las condiciones ambientales y los factores que influyen en el crecimiento de cianobacterias, como la temperatura, la disponibilidad de nutrientes y la luz solar, son relativamente homogéneos en las tres playas, indicando un patrón uniforme de estas bacterias en todo el lago (Loza *et al.*, 2014). Esto se ve reflejado en la similitud en las concentraciones de cianobacterias y que podría estar relacionada con fuentes de nutrientes comunes que afectan por igual a las tres playas. Si los aportes de nutrientes provienen de fuentes difusas como la escorrentía agrícola o descargas urbanas distribuidas alrededor del lago, es probable que estas influencias no se limiten a un solo punto

Tabla 4. Estadística descriptiva y resultado de la prueba de Kruskal-Wallis para la variación de Cianobacterias del conjunto de playas del Lago Ypacaraí.

Cianobacterias (cél.mL ⁻¹)	Máximo	Mínimo	Mediana	Kruskal-Wallis	valor p
Todas las Playas	38.883	0	1560	2,11	$p > 0,05$

Tabla 5. Resultados descriptivos y análisis de Kruskal-Wallis de los parámetros fisicoquímicos entre las playas del Lago Ypacaraí.

Parámetros Fisicoquímicos	Máximo	Mínimo	Mediana	Kruskal-Wallis	valor p
pH	8,57	6,18	7,47	6,73	p<0,05
Conductividad (uS.cm ⁻¹)	773	209	307	0,54	p>0,05
Temperatura (°C)	35,5	19,1	29	3,55	p>0,05
OD (mg.L ⁻¹)	7,85	0,31	5,66	7,25	p<0,05
NTK (mg.L ⁻¹)	5,67	0,18	1,38	0,56	p>0,05
PT (mg.L ⁻¹)	2,50	0,07	0,26	2,12	p>0,05

de monitoreo.

La circulación y mezcla de aguas dentro del lago también podrían contribuir a la dispersión uniforme de las cianobacterias, mediante procesos como la mezcla y la circulación de corrientes que redistribuyen los microorganismos por todo el lago, minimizando las diferencias entre los puntos de muestreo (Ibelings *et al.*, 2021).

La temporalidad del muestreo también puede influir en la uniformidad de los resultados, especialmente porque el muestreo se realizó en el periodo de verano (Li *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2024). Estos resultados sugieren que las estrategias de gestión del Lago Ypacaraí deberían ser con un enfoque holístico y no diferenciado para controlar las concentraciones de cianobacterias. Las medidas de manejo de nutrientes y la mitigación de fuentes de contaminación deben aplicarse de manera uniforme en todo el lago para asegurar la mejora de la calidad del agua de manera general.

Análisis de la variación significativa de los parámetros fisicoquímicos entre las playas

Los resultados indican que el pH del agua varió entre un valor máximo de 8,57 y un mínimo de 6,18, con una mediana de 7,47. El análisis de Kruskal-Wallis arrojó un estadístico de 6,7 con un valor p<0,05, indicando diferencias significativas a lo largo del tiempo. En cuanto a la conductividad, los valores oscilaron entre un máximo de 773 uS.cm⁻¹ y un mínimo de 209 uS.cm⁻¹, con una mediana de 307 uS.cm⁻¹. Sin embargo, el estadístico Kruskal-Wallis fue p>0,05, sugiriendo que no hubo diferencias significativas en la conductividad durante el periodo de

estudio. La temperatura del agua presentó un rango entre 35,5°C y 19,1°C, con una mediana de 29°C. El estadístico de Kruskal-Wallis para la temperatura fue de 3,5, y el valor p>0,05, lo que indica la ausencia de diferencias significativas.

El oxígeno disuelto registró un máximo de 7,85 mg.L⁻¹ y un mínimo de 0,31 mg.L⁻¹, con una mediana de 5,66 mg.L⁻¹. El análisis de Kruskal-Wallis reveló un estadístico de 7.2 y un valor p<0,05, señalando diferencias significativas en los niveles de oxígeno disuelto. Para el nitrógeno total Kjeldahl (NTK), los valores oscilaron entre 5,67 mg.L⁻¹ y 0,18 mg.L⁻¹, con una mediana de 1,38 mg.L⁻¹ y el estadístico Kruskal-Wallis fue de 0,5 y el valor p>0,05, indicando que no hubo diferencias significativas en NTK. Finalmente, el fósforo total (PT) presentó rango entre 2,50 mg.L⁻¹ y 0,067 mg.L⁻¹, con una mediana de 0,26 mg.L⁻¹. El estadístico Kruskal-Wallis fue de 2,12 y el valor p mayor a 0,05, lo que sugiere la ausencia de diferencias significativas en los niveles de fósforo total a lo largo del periodo de estudio (Tabla 5).

Los resultados obtenidos indicaron que, de los parámetros fisicoquímicos evaluados en el Lago Ypacaraí, solo el pH y el oxígeno disuelto (OD) presentaron variaciones significativas a lo largo del tiempo, mientras que la conductividad, temperatura, NTK y PT no mostraron diferencias significativas, lo cual refuerza con las posibles causas de la ausencia de diferencias significativas entre las playas monitoreadas (Tabla 4). La variación significativa del pH y del OD puede atribuirse a la actividad fotosintética de las cianobacterias, cuya concentración también mostró fluctuaciones durante el periodo de

monitoreo (Fig. 2).

La fotosíntesis, especialmente intensa durante el día, puede aumentar el pH debido a la absorción de CO_2 y elevar los niveles de OD (Poza-Carrión *et al.*, 2001). Se observaron concentraciones relativamente altas de NTK y PT, sugiriendo la entrada constante de nutrientes al lago, posiblemente por escorrentía de aguas residuales industriales y domésticas, por lo que no mostraron variaciones significativas debido a un equilibrio en las entradas y salidas de estos nutrientes en el ecosistema acuático (Pranta *et al.*, 2023). Esto sugiere que mientras algunos procesos biológicos y ambientales son dinámicos, otros parámetros se mantienen relativamente estables.

Análisis de la correlación entre las concentraciones de Cianobacterias y las variables fisicoquímicas

El análisis de la correlación entre las concentraciones de cianobacterias y las variables fisicoquímicas en el Lago Ypacaraí reveló dos relaciones significativas (Tabla 6). La primera fue una correlación positiva con la conductividad (0,55), lo que sugiere que a medida que aumenta la conductividad del agua, también lo hace la concentración de cianobacterias. Este resultado podría indicar que la mayor presencia de iones disueltos y nutrientes, reflejada en la alta conductividad, favorece el crecimiento de cianobacterias. Este fenómeno puede estar relacionado con el aporte de nutrientes disueltos provenientes de fuentes externas, como escorrentías aguas residuales industriales y domésticas, que incrementan la disponibilidad de nutrientes esenciales para el crecimiento de estos microorganismos (Kumar & Sahoo, 2024).

Por otro lado, se observó una correlación negativa significativa con NTK (-0,52). Esto podría deberse a la capacidad de ciertas cianobacterias

para fijar nitrógeno atmosférico (Rogers, 2023). Especies diazotróficas como *Microcystis*, *Dolichospermum*, *Pseudanabaena* como la registradas en el Lago (Fig. 3), además los dos últimos géneros pueden desarrollar heterocistos, estructuras especializadas que les permiten convertir nitrógeno molecular (N_2) del aire en formas de nitrógeno utilizable. En condiciones de baja disponibilidad de nitrógeno disuelto en el agua, estas cianobacterias pueden proliferar utilizando el N_2 atmosférico, reduciendo así su dependencia del nitrógeno disuelto del ecosistema acuático (Hancock, 2024). Esta dinámica explicaría la correlación negativa observada, reflejando la capacidad de estas bacterias para mantener su crecimiento incluso en entornos con baja disponibilidad de nitrógeno disuelto y elevada concentración de fósforo (Tabla 3).

Conclusión

Considerando los hallazgos de este estudio, se puede concluir que la concentración de cianobacterias en las playas de San Bernardino, Ypacaraí y Areguá del Lago Ypacaraí durante el periodo 2022-2024 reveló fluctuaciones importantes en las densidades de cianobacterias, con San Bernardino mostrando la mayor variabilidad, posiblemente debido al arrastre de las bacterias hacia las otras playas a consecuencia de los vientos del norte y noreste predominantes. Se observaron variaciones significativas en el pH y OD, atribuibles a la actividad fotosintética de las cianobacterias, mientras que la conductividad, NTK y PT permanecieron relativamente constantes, sugiriendo un equilibrio en la entrada y salida de nutrientes en el lago.

La correlación positiva entre la concentración de cianobacterias y la conductividad indica que la disponibilidad de nutrientes disueltos favorece su crecimiento, mientras que la correlación negativa con el NTK destaca la capacidad de fijación de nitrógeno atmosférico por parte de algunas cianobacterias predominantes (*Microcystis*, *Dolichospermum* y *Pseudanabaena*). Estos hallazgos reflejan la compleja interacción entre las cianobacterias y las condiciones fisicoquímicas del agua, subrayando la importancia de factores ambientales y antropop-

Tabla 6. Coeficientes de correlación de Spearman entre las concentraciones de cianobacterias y las variables fisicoquímicas.

Coeficiente de Correlación de Spearman $p < 0,05$						
Variables	pH	Cond	Temp	OD	NTK	PT
Cianobacterias	N/A	0,55	N/A	N/A	-0,52	N/A

génicos en la dinámica de estos microorganismos en el Lago Ypacaraí.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron de manera equitativa en la elaboración de este artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se llevó a cabo en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un posible conflicto de interés.

Financiamiento

El trabajo se realizó con financiamiento propio.

Literatura citada

- Benitez Rodas, G.A., Villalba Duré, G., Ávalos de Enciso, C., Florentín, C.A., Brítez, R.A., Escobar, A., Escobar, O.A., Peralta López, I. & Román, C.C. (2017). Influencia de factores físicoquímicos sobre la biodiversidad de cianobacterias en el Lago Ypacaraí durante el periodo 2012-2014. *Steviana*, 9(2): 15–25.
- Bhardwaj, A., Singh, P., Gupta, N., Bhattacharjee, S., Srivastava, A., Parida, A. & Mishra, A.K. (2024). Cyanobacteria: A key player in nutrient cycling. Pp. 579–596, in Mishra, A.K. & Singh, S.S. (Eds.), *Cyanobacteria: metabolism to molecules*. London: Academic Press. xxviii + 615 pp.
- Tapia-Larios, C. & Olivero-Verbel, J. (2023). Potentially Toxic Cyanobacteria in a Eutrophic Reservoir in Northern Colombia. *Water*, 15(20)3696: 1–23.
- Edler, L. & Elbrächter, M. (2010). The Utermöhl method for quantitative phytoplankton analysis. *Microscopic and Molecular Methods for Quantitative Phytoplankton Analysis*, 110: 13–20.
- Ferrari, G., Pérez, M.delC., Dabiezies, M., Míguez, D. & Saizar, C. (2011). Planktic cyanobacteria in the lower Uruguay river, South America. *Fottea*, 11(1): 225–234.
- Gad, M., Cao, M., Qin, D., Sun, Q., Yu, C.-P. & Hu, A. (2024). Development, validation, and application of a microbial community-based index of biotic integrity for assessing the ecological status of a peri-urban watershed in China. *Science of The Total Environment*, 910: 168659.
- González, M.A.L., Jarero, E.G.R., Peña, M.P., Carrillo, E.J., Padilla, I.E. & Uriarte, E.L. (2024). Variación espacio-temporal del fitoplancton del lago de Chapala, México, durante 2012: Spatio-temporal variation of phytoplankton in Lake Chapala, Mexico, during 2012. *E-CUCBA*, 21: 68–85.
- González Torres, D. & González Romero, N. (1986). *Estudio Limnológico del Lago Ypacaraí*. San Lorenzo: Instituto Ciencias Básicas - Universidad Nacional de Asunción. 188 pp.
- Grassi, B. (2020). *Estado del clima Paraguay 2019. Cambio climático, evidencias científicas e impactos*. Asunción: Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible / Secretaría Técnica de Planificación del Desarrollo Económico y Social. 94 pp.
- Haida, M., El Khalloufi, F., Mugani, R., Essadki, Y., Campos, A., Vasconcelos, V., & Oudra, B. (2024). Microcystin Contamination in Irrigation Water and Health Risk. *Toxins*, 16(4)196: 1–18.
- Hamilton, D.P., Salmaso, N. & Paerl, H.W. (2016). Mitigating harmful cyanobacterial blooms: Strategies for control of nitrogen and phosphorus loads. *Aquatic Ecology*, 50(3): 351–366.
- Hindák, F. (1988). Contribution to the taxonomy of some cyanophyte genera. *Preslia*, 60(4): 289–308.
- Ibarrola, C.V. & Achucarro, W.C. (2021). Lago Ypacaraí: Aplicación de tecnosoles antieutrofizantes y reducción de cianobacterias. *Revista sobre estudios e investigaciones del saber académico*, 8: Article 8.
- Ibelings, B.W., Kurmayer, R., Azevedo, S.M., Wood, S.A., Chorus, I. & Welker, M. (2021). Understanding the occurrence of cyanobacte-

- ria and cyanotoxins. Pp. 213–294, in Chorus, I. & Welker, M. (Eds.). *Toxic cyanobacteria in water*. London: CRC Press. 858 pp.
- Komarek, J. (2006). Cyanobacterial taxonomy: Current problems and prospects for the integration of traditional and molecular approaches. *Algae*, 21(4): 349–375.
- Komárek, J. (2016). A polyphasic approach for the taxonomy of cyanobacteria: Principles and applications. *European Journal of Phycology*, 51(3): 346–353.
- Komarek, J. & Komárková-Legnerová, J. (2002). Contribution to the knowledge of planktic cyanoprokaryotes from central Mexico. *Preslia-Praha*, 74(3): 207–234.
- Li, D., Wu, N., Tang, S., Su, G., Li, X., Zhang, Y., Wang, G., Zhang, J., Liu, H., Hecker, M., Giesy, J.P. & Yu, H. (2018). Factors associated with blooms of cyanobacteria in a large shallow lake, China. *Environmental Sciences Europe*, 30(1)27: 1–15.
- López Moreira M., G.A., Hinegk, L., Salvadore, A., Zolezzi, G., Hölker, F., Monte Domecq S., R.A., Bocci, M., Carrer, S., De Nat, L., Escribá, J., Escribá, C., Benítez, G.A., Ávalos, C.R., Peralta, I., Insaurrealde, M., Mereles, F., Sekatcheff, J.M., Wehrle, A., Facetti-Masulli, J.F., Facetti, J.F. & Toffolon, M. (2018). Eutrophication, Research and Management History of the Shallow Ypacaraí Lake (Paraguay). *Sustainability*, 10(7)2426: 1–32.
- Loza, V., Perona, E. & Mateo, P. (2014). Specific responses to nitrogen and phosphorus enrichment in cyanobacteria: Factors influencing changes in species dominance along eutrophic gradients. *Water Research*, 48: 622–631.
- Modi, P. & Chintalacheruvu, M.R. (2024). Investigating river water quality assessment through non-parametric analysis: A case study of the Godavari River in India. *Environmental Quality Management*, 33(3): 239–264.
- Mohamed, H.M., Khalil, M.T., El-Zeiny, A.M., Khalifa, N., Kafrawy, S.B.E. & Emam, W.W.M. (2023). Trophic state and potential productivity assessment for Qaroun Lake using spatial techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(8): 987.
- Mugani, R., El Khalloufi, F., Kasada, M., Redouane, E.M., Haida, M., Aba, R.P., Essadki, Y., Zerrifi, S.E.A., Herter, S.-O., Hejjaj, A., Aziz, F., Ouazzani, N., Azevedo, J., Campos, A., Putschew, A., Grossart, H.-P., Mandi, L., Vasconcelos, V. & Oudra, B. (2024). Monitoring of toxic cyanobacterial blooms in Lalla Takerkoust reservoir by satellite imagery and microcystin transfer to surrounding farms. *Harmful Algae*, 135(102631): 1–14.
- Poza-Carrión, C., Fernández-Valiente, E., Piñas, F.F. & Leganés, F. (2001). Acclimation of photosynthetic pigments and photosynthesis of the cyanobacterium *Nostoc* sp. Strain UAM206 to combined fluctuations of irradiance, pH, and inorganic carbon availability. *Journal of Plant Physiology*, 158(11): 1455–1461.
- Komárek, J. & Anagnostidis, K. (2000). *Cyanoprokaryota 1. Teil: Chroococcales*. (Süßwasserflora Von Mitteleuropa 19/1). Heidelberg / Berlin: Springer Spektrum Akademischer Verlag, 548p.
- Pranta, A.D., Rahaman, M.T., Ahmed, M.S. & Rafi, M.S.A. (2023). Navigating Eutrophication in Aquatic Environments: Understanding Impacts and Unveiling Solutions for Effective Wastewater Management. *Research in Ecology*, 5(3): 11–18.
- Rice, E.W. & Bridgewater, L. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington DC: American Public Health Association. 724 pp.
- Richardson, J., Miller, C., Maberly, S.C., Taylor, P., Globevnik, L., Hunter, P., Jeppesen, E., Mischke, U., Moe, S.J., Pasztaleniec, A., Søndergaard, M. & Carvalho, L. (2018). Effects of multiple stressors on cyanobacteria abundance vary with lake type. *Global Change Biology*, 24(11): 5044–5055.
- Rosińska, J., Kozak, A., Dondajewska, R. & Gołdyn, R. (2017). Cyanobacteria blooms before and during the restoration process of a

- shallow urban lake. *Journal of Environmental Management*, 198: 340–347.
- Song, T., Zhang, H., Xu, Y., Dai, X., Fan, F., Wang, Y. & Liu, G. (2024). Cyanobacterial blooms in Lake Taihu: Temporal trends and potential drivers. *Science of The Total Environment*, 942(173684).
- Wehr, J. & van Vuuren, S.J. (2024). Algae and Cyanobacteria Communities. Pp. 463–510, in Jones, I.D. & Smol, J.P. (Eds.). *Wetzel's limnology: lake and river ecosystems*. (4th Ed.). London: Academic Press. xvi + 1088 pp.
- Weiler, A., Núñez, K., Airaldi, K., Caballero, A., Bauer, F., Dos Santos, M., Bueno, D., Carosini, A., Cardozo, R. & Pérez, P. (2016). Las aguas del lago Ypacaraí análisis a través de bioindicadores. *Investigaciones y Estudios-UNA*, 9(1): 59–81.
- Yin, Y., Xia, R., Liu, X., Chen, Y., Song, J. & Dou, J. (2024). Spatial response of water level and quality shows more significant heterogeneity during dry seasons in large river-connected lakes. *Scientific Reports*, 14(1)8373: 1–14.