

Caracterización fisicoquímica y bacteriológica de una laguna confinada para uso recreativo: malecón de la bahía interior de Puno, lago Titicaca

Physicochemical and bacteriological characterization of a confined lagoon for recreational use: the boardwalk of the inner bay of Puno, Titicaca Lake

Alfredo Loza Del Carpio^{1,2*}, Deysi Quispe Ramos⁴ y Margot Reyes Orihuela³

Resumen

En adyacencias al muelle central de la ciudad de Puno, se viene utilizando un segmento de la bahía interior, separado artificialmente formando una laguna confinada, con fines recreativos, desconociéndose la calidad de sus aguas que la conforman; por ello, se planteó como objetivo evaluar sus características fisicoquímicas y bacteriológicas. Las determinaciones fisicoquímicas se realizaron mediante multiparámetro digital y en laboratorio, las bacteriológicas que incluyeron coliformes totales y fecales se analizaron mediante el método de tubos múltiples; para los muestreos y evaluaciones se consideraron dos zonas de muestreo (orilla e interior) evaluando tres puntos en cada una, mensualmente por seis meses. Destacaron los bajos valores en oxígeno disuelto con una media de 3.06 ± 1.17 mg/L, sólidos suspendidos totales con 107.58 ± 67.41 mg/L y conductividad eléctrica 1473.50 ± 342.74 μ S/cm que sugieren alta cantidad de partículas e iones diversos, la BOD_5 también muy elevada con 38.68 ± 9.69 y 107.01 ± 27.74 mg/L alude ingreso de alta carga orgánica y los coliformes fecales con un rango de 200 a 1000000 NMP/100 mL, indican presencia de abundante material fecal. Todos los parámetros no cumplieron los ECAs para su uso con fines recreativos, además los resultados refieren que la laguna confinada estaría conformada principalmente por aguas residuales y no son aptas para uso recreativo, más bien constituyen un riesgo para la salud pública y para la integridad ecológica y paisajística del lago Titicaca.

Palabras clave: Calidad del agua, contaminación, laguna artificial, riesgo, salud pública.

Abstract

Adjacent to the central pier of the city of Puno, a segment of the inner bay, artificially separated to form a confined lagoon, has been used for recreational purposes. The quality of its waters is unknown. Therefore, the objective was to evaluate its physicochemical and bacteriological characteristics. Physicochemical determinations were performed using a digital multiparameter assay and in the laboratory. Bacteriological determinations, including total and fecal coliforms, were analyzed using the multiple-tube method. For sampling and evaluation, two sampling zones (shore and inland) were considered, with three points in each zone evaluated monthly for six months. The low values of dissolved oxygen stood out with an average of 3.06 ± 1.17 mg/L, total suspended solids with 107.58 ± 67.41 mg/L and electrical conductivity 1473.50 ± 342.74 μ S/cm which suggest a high amount of various particles and ions, the BOD_5 also very high with 38.68 ± 9.69 and 107.01 ± 27.74 mg/L alludes to the entry of high organic load and fecal coliforms with a range of 200 to 1,000,000 NMP/100 mL, indicate the presence of abundant fecal material. Not all parameters met the ECAs for recreational use. Furthermore, the results indicate that the confined lagoon is composed primarily of wastewater and is not suitable for recreational use. Rather, it poses a risk to public health and the ecological and landscape integrity of the Titicaca Lake.

Keywords: Artificial lagoon, pollution, public health, risk, water quality.

Recibido: 06/04/2025

Aceptado: 22/12/2025

Publicado: 28/12/2025

Sección: Artículo Original

*Autor correspondiente: aloza@unap.edu.pe

Introducción

A nivel mundial, más del 80% de aguas residuales son liberadas a cuerpos de agua sin un tratamiento adecuado, siendo la principal causa de contaminación hídrica con efectos directos en la salud humana y en el ecosistema (WWAP, 2017; UNESCO, 2023). En el Perú se estima que un 70% de aguas residuales no son tratadas (Larios-Meoño *et al.*, 2015) y en la región Puno la mayoría de ciudades vierten sus desagües directamente al lago Titicaca o con deficiente tratamiento (Medrano *et al.*, 2020; Ocola y Laqui, 2017) y la ciudad de Puno evacúa todas sus aguas residuales a la bahía interior afectando sus características fisicoquímicas y microbiológicas (Beltrán *et al.*, 2015; Siguayro *et al.*, 2022), ingresando además sustancias farmacéuticas (Nieto-Juárez *et al.*,

2025) incrementando el riesgo a la salud pública, la integridad del ecosistema y el desarrollo de actividades económicas, como el turismo y la recreación.

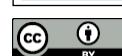
¹Programa de Ecología, Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú.

²Instituto de Investigación en Ciencias Ambientales Salud y Biodiversidad, Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú.

³Laboratorio de Ecología Acuática, Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú.

⁴Programa de Microbiología y Laboratorio Clínico, Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú.

Como citar: Loza del Carpio, A., Quispe Ramos, D., & Reyes Orihuela, M. (2025). Caracterización fisicoquímica y bacteriológica de una laguna confinada para uso recreativo: malecón de la bahía interior de Puno, lago Titicaca. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 27, e27764. <https://doi.org/10.18271/ria.2025.764>



Attribution 4.0 Internacional (CC BY 4.0) Share-Adapt

Aguas residuales no tratadas arrastran microrganismos patógenos, parásitos, disruptores endocrinos, contaminantes emergentes y metales pesados, afectando la salud humana, la economía local y toda forma de vida del ecosistema receptor (WWAP, 2017); entre las principales enfermedades transmitidas por el agua incluyen la gastroenteritis, tifoidea, hepatitis A y E, cólera y parasitosis intestinales (OMS, 2024) y el 4% de muertes en el mundo están relacionadas con la higiene, calidad del agua y saneamiento, siendo mayor en países en vías de desarrollo debido al mal manejo de sus aguas residuales y a la deficiente cobertura en el sistema de alcantarillado (Rodríguez et al., 2017).

Pero ello está relacionado también con el uso indirecto del agua cuando se aprovechan con fines recreativos (WHO, 2003), aumentando el riesgo por infecciones agudas entre 40 y 50 % si estas se desarrollan en fuentes contaminadas que implican contacto parcial como la navegación, en comparación con actividades recreativas no acuáticas (Sanborn y Takaro, 2013). Actualmente, los balnearios y similares tienen gran importancia socioeconómica y los humedales o ecosistemas acuáticos con ese potencial son alternativa de usufructo que podría beneficiar a diferentes grupos humanos (Acuña et al., 1998), ya que cada vez son más frecuentados por personas que buscan distracción y disfrute visual (Cervantes, 2016). Aunque bajo condiciones inapropiadas, pueden conllevar a infecciones gastrointestinales, dermatitis y problemas respiratorios, debido a la relación directa que existe entre contaminantes del agua e incidencia de síntomas para estas enfermedades (Romero et al., 2010). Por lo cual es fundamental garantizar la idoneidad de los cuerpos de agua ante un uso turístico y recreativo.

En el lago Titicaca, la bahía interior de Puno (BIP) constituye un espacio de importante aprovechamiento turístico (Araníbar y Patiño, 2022), aunque sus condiciones ambientales no son del todo apropiadas para ello (Beltrán et al., 2015; Siguayro et al., 2022). Pero en este ámbito destaca una sección que ha sido separada de la BIP por la construcción del denominado “Malecón Ecoturístico Bahía de los Incas” por los años 2005 para conformar artificialmente una “laguna confinada” y años posteriores, hasta la actualidad se aprovecha con fines recreativos, especialmente para ofrecer servicios de navegación en botes a los visitantes. Sin embargo, en esta laguna se aprecia afluentes permanentes conformados, según percepción sensorial, por aguas residuales provenientes desde vecindarios de la zona noreste de la ciudad de Puno, aledaños al lago Titicaca, probablemente por infiltraciones del sistema de alcantarillado o por desagües clandestinos que fluyen por cauces pluviales que al parecer antiguamente

constituían microcuenca, percibiendo además olores desagradables, acumulación de residuos sólidos y una deplorable calidad paisajística; y bajo estas condiciones se ofrecen los servicios mencionados, además de expendio de alimentos y artesanías.

Estudios al respecto son muy pocos, pero se sabe que por los años 80, desde la ciudad de Puno descargaban directamente 13 afluentes de aguas negras hasta la BIP y tres de ellos justamente desembocaban en el ámbito del presente estudio, entre el muelle central de Puno y el barrio Vallecito (Pacoricona et al., 1991) y al parecer continúan sus descargas en la actualidad. En esta misma zona en 1982 los coliformes fecales promediaban 100 celulas/100 mL (Rivera et al. 1991) y por este mismo año el fósforo total como máximo alcanzaba 0,015 mg/L, el oxígeno disuelto podía llegar a 9 mg/L aunque ocasionalmente llegaban a valores menores a 3 mg/L y el pH estaba alrededor de 8 (Miranda et al., 1991). No se reportan estudios más recientes en esta misma, por lo que en la actualidad son poco conocidas las reales características de sus aguas, de su calidad ambiental y por tanto de sus impactos y riesgos para la salud humana y del ecosistema, fundamentalmente porque este ámbito es utilizado con fines recreativos y es imperativo esclarecer y alertar con fundamento técnico sobre las consecuencias que podría concatenar este tipo de aprovechamiento.

Por ello, considerando que el monitoreo ambiental constituye la herramienta fundamental para evaluar la calidad del agua y determinar las posibilidades de uso de un recurso hídrico (Romero et al., 2010), se plantea el presente estudio, enfocado especialmente en la condición de uso turístico y recreativo que actualmente se le viene dando a la laguna. Bajo este contexto el objetivo fue evaluar las características fisicoquímicas y bacteriológicas de las aguas de la laguna confinada del malecón turístico en la bahía interior de Puno.

Material y Métodos

Ámbito de Estudio y Muestreos

Las evaluaciones se realizaron en la laguna confinada del malecón turístico de la bahía interior de Puno (BIP), ubicada al noreste de la ciudad de Puno y al oeste del lago Titicaca, a una altitud de 3810 msnm. Se extiende por una superficie de 17 ha en un perímetro de 2181 m, con una profundidad media en la parte central de 1,05 m en julio y 1,32 m en febrero y por sus orillas se aprecia hasta tres afluentes que descargan directamente aguas residuales, cuya procedencia son los barrios Vallecito, Bellavista y Porteña de la ciudad de Puno. Actualmente la laguna tiene un uso recreativo,

ofreciéndose paseos en botes a los visitantes y en sus alrededores se desarrolla comercio de artesanías y restaurantes, además de existir viviendas familiares en sus alrededores, excepto en su colindancia este, que delimita con la bahía interior (Figura 1).

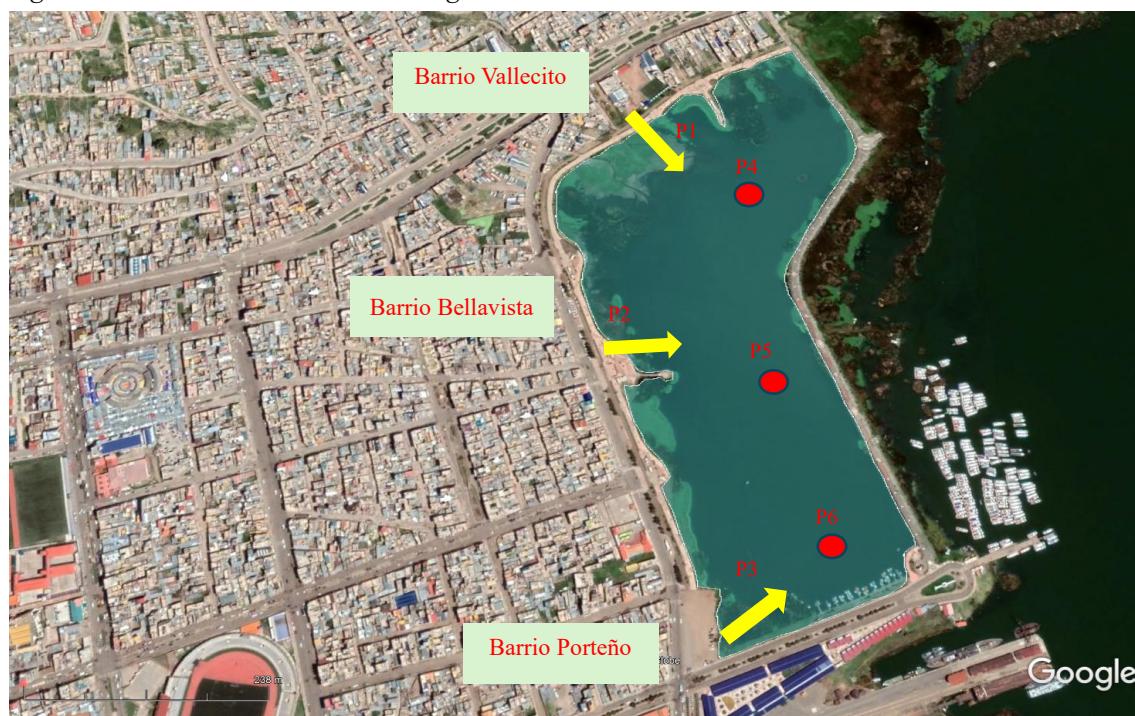
La mayor temperatura media en sus inmediaciones se da en noviembre con 10,5 °C y la menor en julio con 6,4 °C, las precipitaciones más altas registradas en enero y febrero con 174 y 149 mm respectivamente y la más baja en julio con 3 mm (SENAMHI, 2025).

Para la evaluación se establecieron dos zonas de muestreo: una en las riberas, donde descargan afluentes de aguas residuales y la otra en la parte central de la laguna. En cada una se consideraron tres puntos de muestreo, como repeticiones, según se representa en la Figura 1, siendo las coordenadas (UTM) de cada punto de muestreo (P) las siguientes:

Afluentes: P1) 390915 – 8249532; P2) 390971 – 8249247; P3) 391095–8248977

Figura 1

Área de estudio y distribución de los puntos y zonas de muestreo en la laguna confinada. Las flechas amarillas refieren puntos de muestreo desde los afluentes de aguas residuales y los puntos rojos, lugares de muestreo al interior de la laguna.



Fuente: Google Earth

Parámetros Evaluados

Los parámetros para el estudio en laboratorio fueron demanda química de oxígeno (DQO) (método de oxidación por dicromato de potasio en medio ácido), demanda biológica de oxígeno (DBO_5) (incubación

Interior laguna: P4) 391070 – 8249431; P5) 391094 – 8249241; P6) 391128 – 8249084

Las muestras se tomaron de forma mensual y superficialmente del cuerpo de aguas, en horas de la mañana (8 a 10 am), por un período de seis meses durante los años 2019 y 2020, considerando época seca (julio), transitoria (setiembre, octubre y noviembre) y lluviosa (diciembre y febrero), por cada punto de muestreo, haciendo un total de 36 repeticiones por cada parámetro fisicoquímico y bacteriológico, excepto fósforo total y nitrógeno total que fueron 12, porque se consideraron dos muestreos mensuales cada uno.

De cada punto de muestreo se recabó 1 L de muestra de agua, siguiendo los criterios establecidos por ANA (2016) para aguas superficiales, los que luego fueron utilizados para los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos en los laboratorios de Aguas y Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias y de Ecología Acuática de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional del Altiplano.

por cinco días a 20°C), sólidos disueltos totales (SDT) y sólidos suspendidos totales (SST) (ambos por gravimetría), fósforo total (PT) y nitrógeno total (NT) (mediante digestión con persulfato salino y digestión Kjeldahl), coliformes totales (CT) y coliformes termotolerantes (CF) (mediante fermentación en tubos

múltiples en número más probable con diluciones de 10^{-3} , 10^{-4} , y 10^{-5}). En todos los casos se consideró procedimientos establecidos en APHA-AWWA (1998). Al momento de los muestreos se realizaron también determinaciones *in situ* con multiparámetros digitales para la temperatura del agua (Tem) y oxígeno disuelto (OD) mediante equipo YSI 550 A, y conductividad eléctrica (CE) y pH con equipo Pasco PS-2172.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Se aplicó estadísticos descriptivos y análisis de varianza para contrastar diferencias entre zonas de muestreo (afluentes e interior de laguna) y entre fechas de evaluación, por cada parámetro analizado, considerando un diseño factorial $6*2$, siendo los factores los seis meses y las dos zonas de muestreo. Cuando no cumplieron los supuestos para el ANVA (normalidad y homogeneidad de varianzas) se realizaron transformaciones de los datos a $\log x$. Los análisis se realizaron utilizando el programa SPSS v27.

Resultados

Características Fisicoquímicas

Los resultados del análisis global se muestran en la Tabla 1 y se aprecia que la mayoría no cumplen los Estándares de Calidad Ambiental del Perú (ECAs) para fines recreativos en contacto secundario (SC-B2) y para conservación del medio ambiente acuático (C-4) (MINAM, 2017). Destacan los bajos valores de OD que promedian los 3,06 mg/L con valores mínimos cercanos a cero; la DBO₅ en todos los muestreos superó los estándares en ambas categorías promediando 38,68 mg/L respectivamente, evidenciando alta carga de materia orgánica; la CE con 1473,50 μ S/cm en promedio representa alta carga iónica y mineral en la laguna y también superó los límites para SC-B2, al igual que el PT (6,35 mg/L) y los SST (107,58 mg/L). Las interpretaciones de acuerdo a meses y zonas de muestreo, por cada parámetro evaluado, están basados en los ANVA que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1

Características fisicoquímicas generales de las aguas en la laguna confinada en el Malecón Ecoturístico Bahía de los Incas, Puno

Parámetro	n	Media \pm DE	Mínimo	Máximo	ECAs	
					SC-B2	C-4
Tem (°C)	36	15,01 \pm 2,24	10,50	21,70		Δ3
OD (mg/l)	36	3,06 \pm 1,17	0,23	5,73	>4	>5
pH	36	8,04 \pm 0,49	7,11	9,20	6-9	6,5-9
SDT (mg/l)	36	856,94 \pm 289,55	410,00	1540,00	*	*
SST (mg/l)	36	107,58 \pm 67,41	33,00	330,00	*	<25
CE (μ S/cm)	36	1473,50 \pm 342,74	963,00	2320,00	*	1000
DBO ₅ (mg/l)	12	38,68 \pm 9,69	21,50	60,00	10	5
PT (mg/l)	12	6,35 \pm 2,37	1,80	10,20	*	0,035
CT (NMP/100 mL)	36	366164 \pm 427256	2000	1100000	*	*
CF (NMP/100 mL)	36	108575 \pm 195485	200	1000000	1000	1000

* No aplica

Para la temperatura se ha encontrado diferencias significativas entre meses (Tabla 2), siendo significativamente mayor en diciembre con 18,48 °C y menor en julio con 12,38 °C, lo cual se relaciona con las características climáticas de estas épocas, considerando que julio es uno de los meses más fríos en el altiplano de Puno y diciembre el más cálido (SENAMHI, 2025). Según zonas de muestreo también hubo significancia, siendo mayor al interior de la laguna misma con 15,32 °C, comparado con la zona cercana a los afluentes que promedió 14,71 °C (Figuras 2 y 3). La interacción significativa evidenció que el mes más frío (julio) y cálido (diciembre) propiciaron a que se presente similitud

en las temperaturas entre zonas de muestreo, por lo que estos meses influenciaron en los niveles de temperatura.

El OD fue estadísticamente similar entre meses y zonas de muestreo y sin interacciones en el ANVA (Tabla 2), variando desde 2,25 mg/L en diciembre a 4,05 mg/L en setiembre y según zonas en la orilla promediaron 2,82 mg/L y al interior de la laguna 3,31 mg/L (Figuras 2 y 3). El 81 % de datos de OD no cumplieron exigencias de los ECAs para uso recreativo y el 94 % no cumplieron para conservación del recurso acuático. Esto evidencia que la laguna confinada alcanzó condiciones hipóxicas y anóxicas.

Tabla 2

*Significancia de ANVAs factorial 6*2 según parámetros fisicoquímicos de las aguas en la laguna confinada, Puno*

Parámetro	Fuente variabilidad	F	Sig. p<0.05
Temp	Mes	18,15	0,000
	Zona	4,92	0,036
	Mes*zona	3,98	0,009
OD	Mes	2,17	0,091
	Zona	0,51	0,481
	Mes*zona	2,53	0,056
pH	Mes	6,09	0,001
	Zona	20,09	0,000
	Mes*zona	4,21	0,007
SDT	Mes	11,76	0,000
	Zona	0,06	0,805
	Mes*zona	3,54	0,015
SST	Mes	1,86	0,038
	Zona	23,78	0,000
	Mes*zona	3,25	0,022
CE	Mes	15,21	0,000
	Zona	38,72	0,000
	Mes*zona	7,25	0,000
DBO5	Mes	1,29	0,301
	Zona	12,39	0,002
	Mes*zona	2,58	0,052
PT	Mes	40,96	0,000
	Zona	26,92	0,000
	Mes*zona	1,84	0,143
C-totales	Mes	8,95	0,000
	Zona	0,43	0,52
	Mes*zona	2,21	0,086
C-fecales	Mes	16,85	0,000
	Zona	2,49	0,128
	Mes*zona	4,25	0,07

Números en rojo son significativos.

El pH tuvo diferencias significativas entre meses y zonas de muestreo, además con interacción significativa (Tabla 2). En octubre se registró el mayor valor con 8,56 respecto a los meses de setiembre, diciembre y febrero que promediaron 7,69; 7,93 y 7,87 respectivamente; la zona con mayor pH fue al interior de la laguna con 8,25 y en la orilla promedió 7,80 (Figuras 2 y 3). Estos valores indican aguas con tendencia alcalina, aunque no son valores extremos y la mayor parte de datos se encuentran dentro de los límites establecidos en los ECAs para uso recreativo o de conservación. La interacción significativa sugiere que meses más secos propiciaron mayor similitud en ambas zonas.

Los SDT presentaron también valores elevados, con diferencias significativas entre meses mas no entre zonas, pero con interacción significativa (Tabla 2), evidenciando que meses con más lluvias propician mayor similitud entre zonas. Meses con valores significativamente más altos incluyeron noviembre,

diciembre y febrero con 1035, 1013 y 1107 mg/L respectivamente. Según zonas los SDT promediaron 862,22 mg/L en la laguna misma y 851,67 mg/L en la orilla, estadísticamente ambas concentraciones fueron similares (Figuras 2 y 3).

Los SST en orilla fueron superiores con 139,05 mg/L en promedio, disminuyendo significativamente en su parte central a 76,11 mg/L. Según meses, también hubo diferencias significativas, siendo más bajos en julio con 70 mg/L y más altos en meses con más lluvias (noviembre y febrero) con 154,83 mg/L y 125 mg/L respectivamente (Figuras 2 y 3). La interacción significativa expresa que meses más lluviosos propician mayor similitud en los SST entre zonas. Los ECAs nacionales consideran este parámetro solo para su conservación, siendo su límite 25 mg/L, superándose este valor en el 100 % de muestras, lo que indica poca aptitud para el mantenimiento de organismos acuáticos.

Figura 2

Parámetros fisicoquímicos mensuales en la laguna confinada de la BIP (media \pm error estándar). Límites para uso recreativo en línea roja y para conservación del ambiente acuático de ECAs, en naranja. Letras diferentes entre barras indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$)

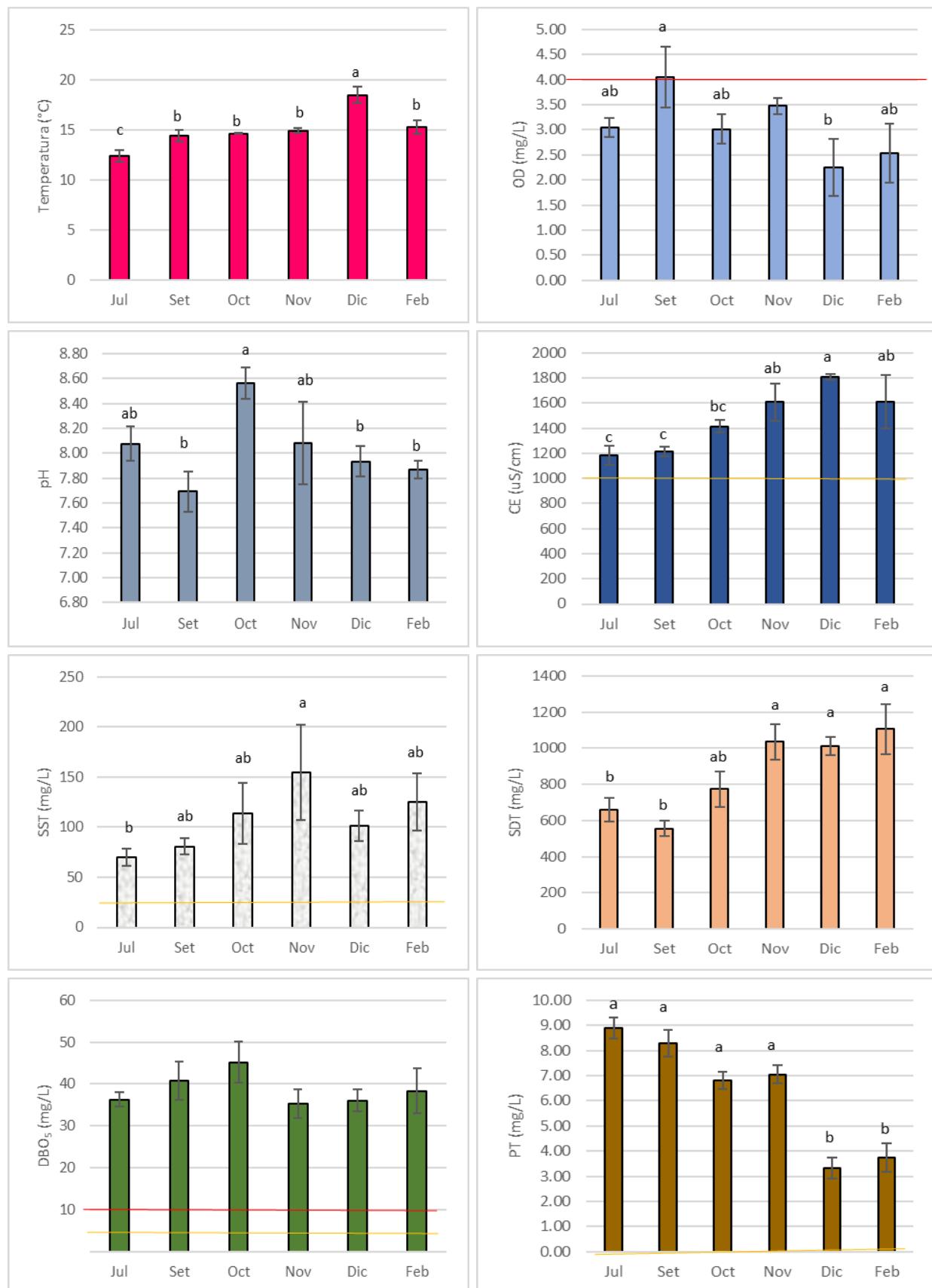
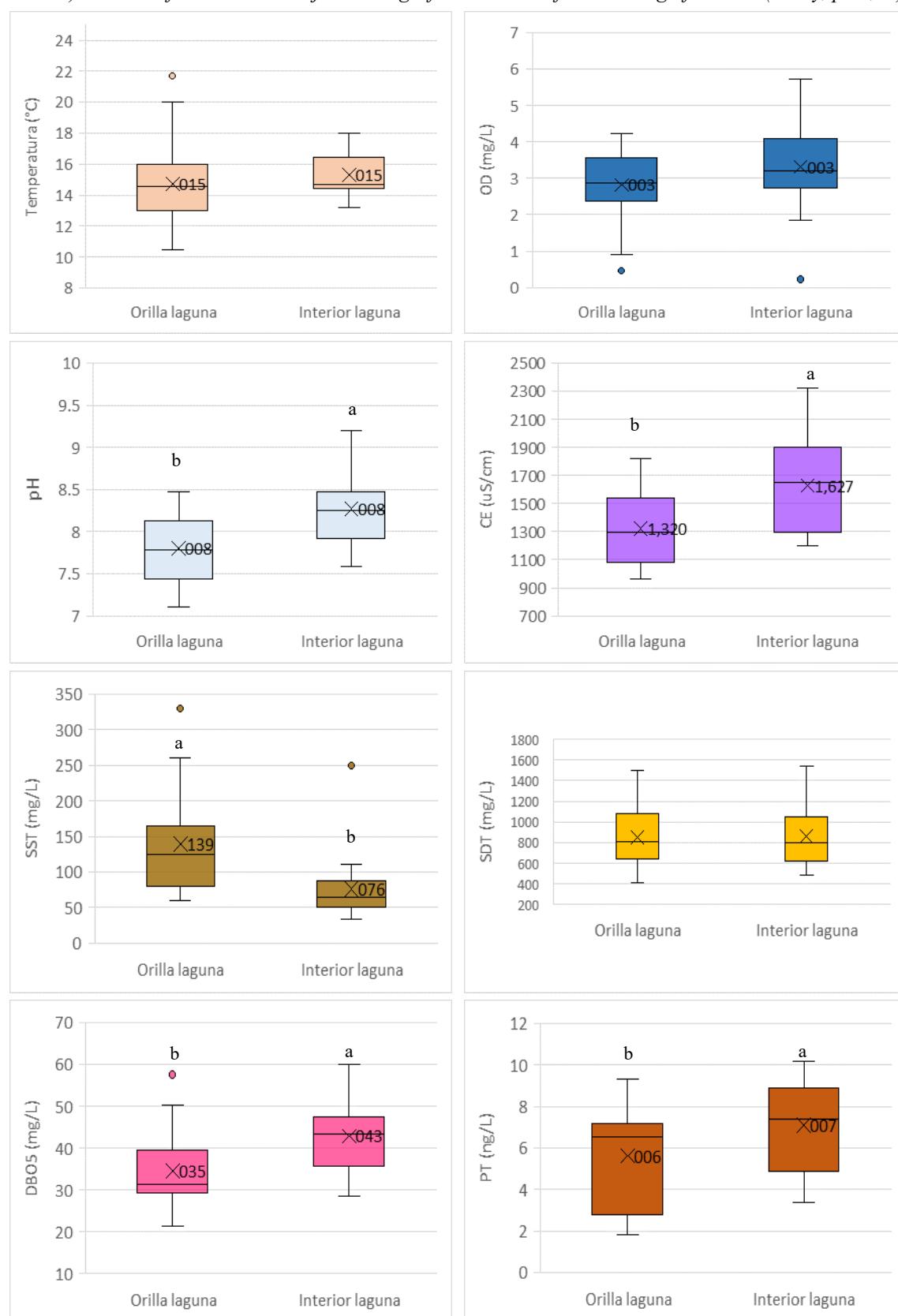


Figura 3

Parámetros fisicoquímicos según zona de muestreo en la laguna confinada de la BIP (se resaltan las medias). Letras diferentes entre cajas de un gráfico indican diferencias significativas (Tukey, $p<0,05$)



La CE difirió significativamente entre meses, siendo mayor en noviembre, diciembre y febrero con 1610; 1806,7 y 1610,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente y el valor más bajo promedió en julio con 1182,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figuras

2 y 3). Según zonas la CE fue menor en la orilla con 1319,89 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respecto a la zona central donde promedió 1623,11 $\mu\text{S}/\text{cm}$, observándose también interacción entre factores, asumiéndose que la CE en las dos zonas de la

laguna depende de los meses, incrementando conforme aumentan las lluvias.

La DBO_5 difirió entre zonas, pero fueron similares entre meses y sin interacciones significativas, lo que implica que ambos factores son independientes entre sí (Tabla 2). Según zonas, La DBO_5 promedió valores superiores en la parte central de la laguna con 42,84 mg/L, mientras que en la orilla promedió 34,52 mg/L (Figuras 2 y 3). Mensualmente, alcanzó promedios desde 35,32 (noviembre) hasta 45,23 mg/L (octubre) y todos superaron ampliamente la normativa peruana establecida en 10 mg/L para aguas utilizadas con fines recreativos y los 5 mg/L para conservación del ambiente acuático (MINAM, 2017).

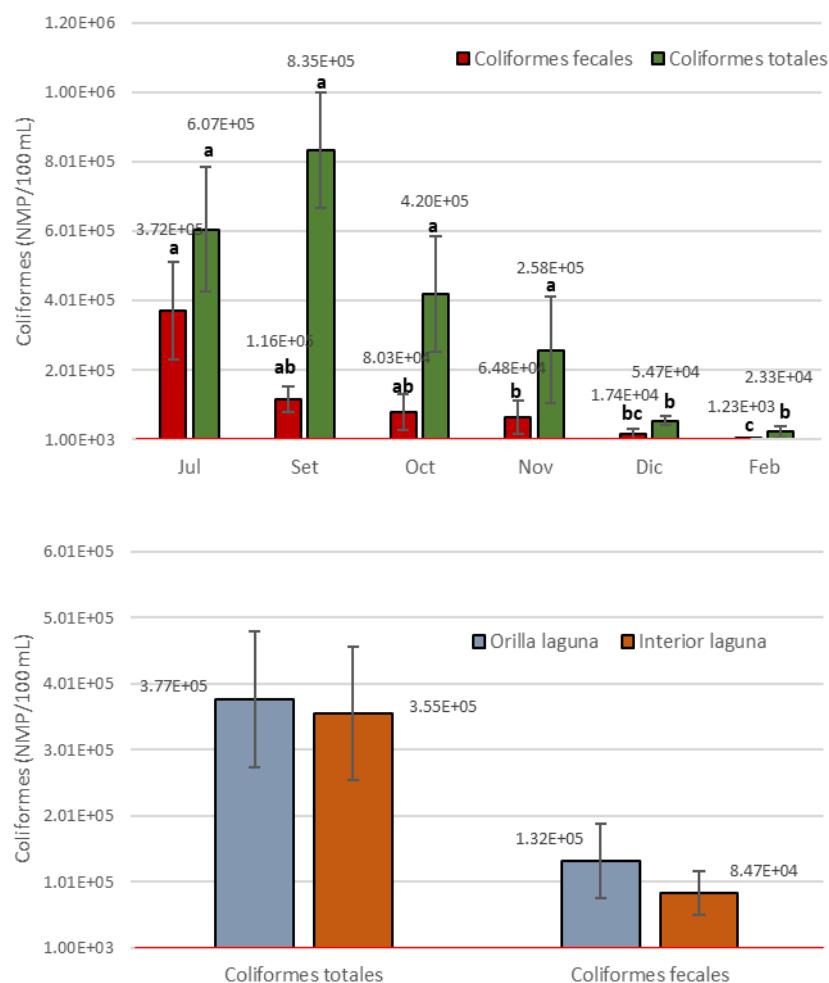
Los valores de PT también fueron elevados, con diferencias significativas entre meses y zonas, pero sin interacciones (Tabla 2). Los meses secos presentaron las más altas concentraciones, siendo mayor en julio con

8,90 mg/L y meses lluviosos como diciembre y febrero promediaron 3,33 mg/L y 3,75 mg/L respectivamente. La zona central de la laguna tuvo mayor promedio con 7,09 mg/L y la orilla 5,62 mg/L (Figuras 2 y 3).

Características Bacteriológicas

Los resultados generales sobre coliformes en la laguna confinada se muestran también en la Tabla 1. Los CT alcanzaron un promedio de 366164 NMP/100 mL, con un mínimo de 2000 y máximo de 1100000 NMP/100 mL y los CF promediaron 108575 NMP/100 mL, con un mínimo de 200 y un máximo de 1000000 NMP/100 mL, valores que representan altas concentraciones de coliformes en la laguna. Los ECAs refieren un límite de 1000 NMP/100 mL para uso recreativo y de conservación en lagos y lagunas, valor que fue ampliamente superado en el 92 % de muestreos, demostrando que las aguas de esta laguna representan un alto riesgo para la salud humana.

Figura 4
Concentraciones de coliformes en la laguna confinada, según meses (arriba) y zonas de muestreo (abajo). Letras diferentes entre barras indican diferencias significativas



Según el ANVA los CF tuvieron diferencias significativas entre meses, siendo más bajos en febrero (1230 NMP/100 mL) y más altos en julio (372000 NMP/100 mL); con concentraciones similares entre zonas promediando 132000 NMP/100 mL en la orilla y 84700 NMP/100 mL en la parte interior, sin interacción entre factores. Similar tendencia se observa para CT, aunque en concentraciones más elevadas (Tabla 1 y Figura 4).

Discusión

Las temperaturas del agua de la laguna confinada fueron relativamente altas, con 15 °C en promedio, respecto a los 13 °C del lago Titicaca (Iltis et al., 1991); aunque similar a la BIP cuyo promedio es 15,68 °C (Beltrán et al., 2015). Los ingresos de aguas residuales pueden incrementar las temperaturas de los receptores por el aporte de agua caliente que contienen debido al previo uso domiciliario (Espigares y Pérez, 1985), por lo que llegaron incluso hasta 21 °C en la laguna confinada, además de que su baja profundidad le predispone a calentarse más rápidamente durante el día.

Los ECAs exigen un mínimo de 5 mg/L para conservación y 4 mg/L de para fines recreativos de OD, pero el 94 % y 81 % de datos respectivamente no superaron esta exigencia, por lo que la laguna no tendría aptitudes para estos usos. El OD registrado fluctuó entre 0,23 y 5,73 mg/L, evidenciando condición hipóxica y hasta anóxica, inducida principalmente por el elevado ingreso de materia orgánica desde los efluentes, provocando el agotamiento de oxígeno por su descomposición (Molles, 2006). Estéticamente, un ecosistema lento debe mantener condiciones aeróbicas en la columna de agua, de lo contrario la condición anaeróbica favorece la generación de emisiones desagradables (EPA, 1976; Thurston et al., 1979). Normalmente cuerpos de agua pequeños y poco profundos, como la laguna confinada, tienen similitud en la distribución de OD desde las orillas hasta el interior superficial, debido a que su fuente principal son las brisas y la difusión atmosférica (Fondriest et al., 2025; Smith y Smith, 2001), tal como evidenció la similitud estadística entre zonas y meses.

La mayoría de datos en la laguna estuvo en el rango de los ECAs (6 a 9), pero con tendencia alcalina, probablemente debido a la presencia de hidróxidos, carbonatos, bicarbonatos y lejías que son comunes en aguas residuales (USEPA, 2025), siendo este último, aunado a variados detergentes, la causa principal de su alcalinidad. La zona central presentó valores significativamente más altos que la orilla y en algunos muestreos superaron los ECAs, indicativo de que estaría ocurriendo descomposición anaerobia en los sedimentos de esta zona elevando aún más el pH por la metanogénesis (Aruna et al., 2020), pudiendo redundar

en la conversión de amoníaco no tóxico en formas más tóxicas (Waterboards, 2017), con perjuicio de los organismos acuáticos. Estudios en la BIP, también reportaron valores de pH superiores a 8 (Beltrán et al., 2015; Siguayro et al., 2022), mostrando similitud con la laguna confinada debido a sus similares condiciones de contaminación.

Metcalf – Eddy (1995) indican que las aguas residuales contienen altas cargas de SDT y al superar los 850 mg/L se tratan de concentraciones fuertes y la laguna confinada tuvo un promedio mayor a este. Von Sperling (2007), refiere que el valor promedio de los SDT para aguas residuales es de 700 mg/L y en la laguna el 86 % de muestreos superaron este valor, indicio de que estaría conformada por aguas servidas, aumentando incluso significativamente más en meses lluviosos (febrero), por la carga adicional que arrastran las escorrentías superficiales, incrementando las concentraciones en el receptor (Mohamad et al., 2017; Muchanga y Sichingabula, 2021). En otro lago urbano, la principal causa del incremento de SDT fue también el aumento de la escorrentía superficial en épocas lluviosas que desplazaron sedimentos y productos químicos de zonas circundantes (Dawn et al., 2025), acrecentándose debido a la impermeabilidad superficial del pavimento urbano y vertidos de aguas residuales (Adjovu et al., 2023).

Para los SST el 42 % de muestras estuvieron entre 100 y 350 mg/L, que es el rango típico en aguas residuales domésticas (Metcalf – Eddy, 1995) y los ECAs para conservación establecen el límite de 25 mg/L, superado en el 100 % de muestras, incrementando incluso en meses lluviosos debido al efecto del arrastre de sedimentos por las escorrentías (Mohamad et al., 2017). Mas bien hubo disminución en la zona central de la laguna, especialmente en época seca, debido a su mayor sedimentación respecto a la zona de orilla donde los afluentes revuelven permanentemente el material particulado, dicha situación también fue reportada en otros estudios (Muchanga y Sichingabula, 2021). Los SST además propician acumulación de lodos en el lecho, favoreciendo condiciones anaeróbicas y disminuyen la profundidad de la columna de agua con la sedimentación (Loza-Del Carpio et al., 2016; Metcalf – Eddy, 1995), suceso que también estaría ocurriendo en esta laguna.

Para la CE el límite de los ECAs para conservación es 1000 μ S/cm, el cual fue superado en el 94 % de muestreos en la laguna confinada. Este parámetro es indicador de la concentración de sales, iones y minerales en el agua y está relacionado positivamente con la dureza, por lo que, a mayor concentración de estos elementos en el agua (Solís et al., 2018), deduciéndose que en la laguna hay elevada presencia de estos elementos. Además, incrementó en meses lluviosos, debido a las

escorrentías, aunado a la escasa capacidad de filtración del pavimento, similar a lo ocurrido con los SDT ya que ambos están fuertemente correlacionados (Rusydi, 2018); las lluvias tienen efecto agresivo para disolver sales del suelo y arrastrar sustancias químicas por lo que en estas temporadas puede aumentar drásticamente la CE en los receptores (Mohamad et al., 2017). Así mismo, hubo mayor CE al interior de la laguna que en la orilla, debido a las acumulaciones de sales, nutrientes y otros elementos que se liberan desde los sedimentos (Fondriest, 2025 b).

EL DBO₅ superó los 10 y 5 mg/L de los ECAs en el 100 % de muestreos, para uso recreativo y conservación, por lo que la laguna confinada no tiene aptitud para ninguno. Las aguas naturales se consideran contaminadas cuando el DBO₅ supera 4 mg/L (Kader et al., 2023) y aguas residuales contienen cargas entre 110 y 400 mg/L (Metcalf – Eddy, 1995), aunque la laguna confinada no estuvo en ese rango (máximo valor de 60 mg/L), sus aguas propenden a esa condición. Por otro lado, mensualmente la DBO₅ tuvo promedios similares, debido a que la cantidad de materia orgánica ingresante sería constante mes tras mes; aunque otros estudios indican que la DBO₅ puede incrementar en época de lluvias, por al arrastre de materia orgánica con las escorrentías (Momou et al., 2012) o disminuir por efecto de la dilución al incrementar el volumen de agua (Bai et al., 2010); en este caso, al parecer la principal fuente materia orgánica son las aguas residuales de las viviendas aledañas. Según zonas de muestreo, si difirieron, siendo mayor al interior de la laguna debido a su constante acumulación de carga orgánica, que se resuspende permanentemente incrementando el DBO₅ (Mocuba, 2010; Radwan et al., 2003).

El límite del PT según los ECAs, para fines de conservación es de 0,035 mg/L, valor superado en el 100 % de muestreos de la laguna confinada y la OCDE refiere que cuerpos de agua con valores superiores a 0,1 mg/L de PT se consideran hipertróficos (Ledesma et al., 2013), condición en la que se encontraría esta laguna. En aguas residuales el PT supera 7 mg/L (Von Sperling, 2007) y en la laguna el 42 % de muestras superaron ese nivel, ratificando que estaría conformada por ese tipo de aguas. Se observó menores concentraciones en meses lluviosos debido al incremento del volumen de agua en la laguna, que diluyeron la materia orgánica y por tanto la concentración de nutrientes. Otros estudios concuerdan que en períodos secos incrementa la concentración de nutrientes y tiende a mejorar en época lluviosa (Aguirre et al., 2016; Espinal et al., 2013). El PT también incrementó aguas adentro de la laguna por su mayor carga de materia orgánica acumulada en el lecho que va liberando el fósforo con el proceso de descomposición, en cambio en las aguas de los afluentes

que ingresan a las orillas, el fósforo aún es parte de la materia orgánica misma.

Características Microbiológicas

Los ECAs sólo consideran a los CF como indicador de calidad del agua con fines recreativos y de conservación, siendo el límite para ambos de 1000 NMP/100 mL. En la laguna, el 92 % de muestreos superaron este valor y no tendría aptitud para ninguno de estos usos. Normas internacionales como la canadiense para aguas de uso recreativo, establecen que la media geométrica de al menos cinco muestras tomadas en un período no mayor a cinco días no debe exceder los 2000 NMP/100 mL de CF (CEQG, 1999); en la laguna, seis muestras de un mismo día superaron esa pauta en cinco meses, excepto en febrero cuyo promedio geométrico fue 829 NMP/100 mL y el máximo en julio con 237618 NMP/100 mL. En este mismo sector, por el año 1982 se reportan valores que no superan 100 CF/100 mL (Rivera et al., 1991), mucho menor que el promedio de 108575 NMP/100 mL reportado en este estudio, hecho que demuestra que el ingreso de aguas residuales a esta zona también ha incrementado notablemente.

Un estudio en aguas residuales reporta valores de 4700000 hasta 18000000 NMP/100 mL en CT y desde 390000 hasta 3500000 NMP/100 mL en CF (Córdova et al., 2021), para el presente estudio los máximos han superado el millón de bacterias, tanto en CT como en CF, coincidiendo en varias de las muestras con el anterior estudio. Estos resultados también corroboran que las aguas de la laguna confinada están conformadas por aguas residuales y no deben utilizarse para fines recreativos.

Los meses de mayor precipitación, presentaron mayor carga bacterial, tanto en CT y CF, por el incremento del volumen en los caudales y en la laguna, que diluyeron sus concentraciones. La laguna Junín también evidenció similares efectos (Cusiche y Miranda, 2020), así como lagunas de otras latitudes (Hennani et al., 2012). Según zonas, las concentraciones de CT y CF fueron similares, significando que, al ingresar microorganismos desde los afluentes hacia la laguna, su abundancia no disminuye significativamente aguas adentro, por lo que el riesgo para las personas que ingresan a la laguna para fines de navegación o canotaje, es similar en ambos lugares. Otros estudios refieren que la carga bacteriana de un agua residual que ingresa a un cuerpo acuático, se reduce conforme se aleja del afluente y es más baja que en el punto de ingreso (Dehghani et al., 2018; Makwua et al., 2020); en este caso no ocurre tal situación, probablemente porque la laguna tiene una superficie pequeña y poco profunda, donde los ingresos bacterianos se dispersan y distribuyen permanentemente en ella.

Conclusiones

La laguna confinada, según los parámetros fisicoquímicos evaluados y confrontados con los ECAs no tiene aptitud para uso recreativo en contacto secundario ni conservación del ambiente acuático. El OD presentó valores tan bajos como 0,23 mg/L y en la mayoría de muestreos no superaron los 5 mg/L para la categoría C-4, denotando condiciones claramente hipóxicas en sus aguas. Con el pH se advierte que sus aguas tienen tendencia alcalina donde el 55 % de muestreos superaron el valor 8, probablemente por su alta presencia de lejías y detergentes. Las elevadas concentraciones de SDT y SST la asemejan al de aguas residuales urbanas, con valores de hasta 1540 mg/L en el primer caso y hasta 330 mg/L en el segundo, similarmente la CE supera en el 94 % de muestreos los 1000 μ S/cm que se exige para la categoría C-4; estos tres parámetros refieren que a la laguna ingresa alta carga de material particulado, sales, minerales y diferente tipo de iones que conllevan a la formación de lodos y son indicadores de sustancias contaminantes. Los niveles de DBO_5 evidenciaron ingreso de alta carga de materia orgánica y las elevadas concentraciones de PT la categorizan como una laguna hipertrófica, corroborando además que sus aguas que la conforman son de origen residual.

Para el caso de la temperatura, pH, SDT, SST y CE se presentó interacción entre factores zona*mes de muestreo, sugiriendo que la concentración en las zonas de muestreo depende también de la época, sobre todo son determinantes meses lluviosos que diluyen sus niveles. En el caso de OD, DBO_5 y PT, al no observarse interacción, los factores principales (zona y mes) tuvieron efecto independiente.

Los coliformes alcanzaron valores superiores a 1000000 NMP/100 mL, tanto en CT como en CF, asemejándola a un agua residual, superando la normativa en 94 % de muestreos, lo que también confirma que sus aguas contienen también alta carga de microorganismos patógenos.

El uso recreativo de la laguna, representa un alto riesgo para la salud pública, con potencial para la transmisión de diversas enfermedades infecciosas en los usuarios. Los niveles elevados de indicadores fisicoquímicos y microbiológicos, sugieren que estas aguas estarían conformadas por aguas servidas procedentes de algunas viviendas de los barrios aledaños, que ingresan de forma clandestina o por infiltraciones de la red de alcantarillado, por lo que es necesario que las instancias pertinentes consideren esta situación a fin de evitar riesgos sanitarios futuros y se continúe degradando la integridad ecológica y paisajística del lago Titicaca y de la ciudad de Puno.

Contribución de autores

Loza Del Carpio, A: Conceptualización, Investigación, Escritura – Borrador original, Análisis formal, Supervisión, Escritura – Revisión y edición; Quispe Ramos, D: Investigación, Recursos, Análisis formal; Reyes Orihuela, M: Análisis formal, Metodología, Validación.

Referencias

- Acuña, N. B., Meyer, R., Haye, M. y Lerman, B. (1998). *Contaminación bacteriana en aguas recreacionales factores interviniéntes*. Argentina: Universidad Nacional de Santa Fé.
- Aguirre, M., Vanegas, E. y García, N. (2016). Evaluación del estado trófico del Lago de Izabal, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(1), 28-31.
- Adjovu, G.E., Stephen, H., James, D. y Ahmad, S. (2023). Measurement of total dissolved solids and total suspended solids in water systems: A review of the issues, conventional, and remote sensing techniques. *Remote Sens.* 15, 3534. <https://doi.org/10.3390/rs15143534>
- ANA – Autoridad Nacional del Agua. (2016). *Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales*. Resolución Jefatural N° 010-2011-ANA. Autoridad Nacional del Agua.
- APHA – AWWA. (1998). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. 17 edición, Ed. Díaz de Santos, SA.
- Aranibar, E. y Patiño, A. (2022). Turismo, camino hacia la sostenibilidad: una aproximación al Lago Titicaca Peruano. *ReHuSo*, 7(3), 46-62. <https://doi.org/10.3393/rehuso.v7i3.5150>
- Aruna, C., Sivaraman, N. y Asha, B. (2020). The role of pH in the degradation of organic substances of institutional wastewater in a compartmentalized anaerobic migrating blanket reactor. *Desalination and Water Treatment*, 196 (2020) 439–446. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26235>
- Beltrán, D., Palomino, R. Moreno, E., Peralta, C. y Montesinos-Tubée, D. (2015). Calidad de agua de la bahía interior de Puno, lago Titicaca durante el verano del 2011. *Revista peruana de biología* 22(3): 335-340. <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v22i3.11440>

- Canadian Environmental Quality Guidelines—CEQG. (1999). *Recreational Water Quality Guidelines and Aesthetics*. Canadian Council of Ministers of the Environment.
- Cervantes, M. (2016). Conceptos fundamentales sobre ecosistemas acuáticos y su estado en México. En M. Cervantes (Ed.). *Los escenarios acuáticos de México* (pp.37-67). Instituto Nacional de Ecología y Conservación.
- Córdova, P., Barrios, T., Córdova, I. y Navarrete, R. (2021). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante reactor anaerobio para la reutilización del efluente en cultivos agrícolas. *Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias*, 5(14), 137-249. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i14.114>
- Cusiche, L. y Miranda, G. (2019). Contaminación por aguas residuales e indicadores de calidad en la Reserva Nacional ‘Lago Junín’, Perú. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(6), 1433-1447.
- Dawn, A., Hinge, G., Kumar, A., Nikoo, M. y Hamouda, M.A. (2025). Assessment of water quality in urban lakes using multi-Source data and modeling techniques. *Sustainability*, 17, 7258. <https://doi.org/10.3390/su17167258>
- Dehghani, R., Bagher, M., Mazaheri, A., Akbari, H., Iranshahi, L. y Zeraatkar, Z. (2018). Evaluation of raw wastewater characteristic and effluent quality in Kashan Wastewater Treatment Plant. *Membrane Water Treatment*, 9(4), 273-278. <https://doi.org/10.12989/mwt.2018.9.4.273>
- Espigares, M. y Pérez, J.A. (1985). *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas*. Granada: Servicio de Publicaciones, Universidad de Granada.
- Espinal, T., Sedeño, J., López, E. (2013). Evaluación de la calidad del agua en la laguna de Yuriria, Guanajuato, México, mediante técnicas multivariadas: un análisis de valoración para dos épocas 2005, 2009-2010. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3), 147-163.
- FONDRIEST a. (2025, 25 de junio). Dissolved Oxygen. Environmental Learning Center. https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/dissolved-oxygen/?utm_source=chatgpt.com
- FONDRIEST b. (2025, 25 de junio). Conductivity, Salinity & Total Dissolved Solids, Environmental Learning Center. https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/?utm_source=chatgpt.com
- Hennani, M., Maanan, M., Robin, M., Chedad, K. y Assobhei, O. (2012). Temporal and Spatial Distribution of Faecal Bacteria in a Moroccan Lagoon. *Pol Journal Environmental Studies*, 21(3), 627-634.
- Iltis, A., Carmouze, J. y Lemoalle, J. (1991). Características físico-químicas del agua. En C. Dejoux y A. Iltis (Eds.), *Lago Titicaca, síntesis del conocimiento limnológico actual*. La Paz, Bolivia: Hisbol.
- Kader, S., Morufu, O., Velibor, S., Austin, I., Raheem, B. y Bukola, R. (2023). A concise study on essential parameters for the sustainability of Lagoon waters in terms of scientific literature. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 47(3), 299-307. <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3087>
- Larios – Meoño, J.F., Taranco, C. y Morales, Y. (2015). Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Saber y Hacer*, 2(2), 19-25.
- Loza-Del Carpio, A., Gamarra, C. y Condori, N. (2016). Caracterización morfobatimétrica y estimación de sedimentos de la bahía interior de Puno, lago Titicaca, mediante tecnología SIG. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 18(2), 237 – 248.
- Makuwa, S., Tlou, M., Fosso-Kankeu, F. y Green, E. (2020). Evaluation of fecal coliform prevalence and physicochemical indicators in the effluent from a wastewater treatment plant in the north-west province, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 6381. <https://doi.org/10.3390/ijerph1717638>
- Medrano, M., Mamani, A., Muñoz, E., Díaz, R. y Medrano, E. (2020). Operatividad de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas circunlacustres al lago Titicaca-Sector Perú y el marco legal en defensa de los ecosistemas. *Ciencia y Desarrollo*, 23(3), 55-68.
- Metcalf–Eddy, INC. (1995). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. New York: 3^a ed. McGraw-Hill.
- Ministerio del Ambiente–MINAM. (2017). *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua*

- y establecen Disposiciones Complementarias.*
Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM.
- Miranda, N., Hall, K., Northcote, T., Hinojosa, A., Sarmiento, A. y Mollocondo, H. (1991). Efectos de la eutrofización sobre las condiciones químicas. En T. Northcote, P. Morales, D. Levy y M. Greaven (Eds.). *Contaminación en el lago Titicaca, Perú: capacitación, investigación y manejo* (pp. 35-60). Westwater Research Centre, University of British Columbia.
- Mocuba, J. (2010). *Dissolved Oxygen and Biochemical Oxygen Demand in the waters close to the Quelimané sewage discharge* (Master thesis in Chemical Oceanography). University of Bergen – Norway.
- Mohammad, A.H., Abdullat, G. y Alzughoul, K. (2017) Changes in total dissolved solids concentration during infiltration through soils (rain, fresh groundwater and treated wastewater). *Journal of Environmental Protection*, 8, 34-41. <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2017.81004>
- Molles, M. (2006). *Ecología, conceptos y aplicaciones*. Madrid, España: McGraw Hill/Interamericana S.A.
- Momou, J., Sory, K. y Dosso, M. (2012). Lagoon pollution and nutritive compounds change in urban tropical area. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(6): 8012-8023. <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v6i6.45>
- Muchanga, M. y Sichingabula, H. (2021). Spatial and Seasonal Dynamics of Total Suspended Sediment, Total Dissolved Solids and Turbidity of a Lacustrine Reservoir in the Magoye Catchment, Southern Zambia. *European Journal of Environment and Earth Sciences*, 2(6), 43-48. <http://dx.doi.org/10.24018/ejgeo.2021.2.6.227>
- Nieto-Juarez, J., Sarzosa, N., Serna, E., Torres, R., Fabregat, D., Botero, A. y Hernández, F. (2025). Evaluation of contaminants of emerging concern in surface waters (rivers and lake) from Peru: Occurrence and environmental risk assessment. *Environment International*, 200, 109522. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109522>
- Ocola, J. y Laqui, W. (2017). *Fuentes Contaminantes en la Cuenca del Lago Titicaca: Un aporte al conocimiento de las causas que amenazan la calidad del agua del maravilloso lago Titicaca*. Autoridad Nacional del Agua–ANA.
- Pacoricona, F., Kistritz, R. y Berolatti, R. (1991). Suministro y uso del agua potable y manejo de las aguas residuales. En T. Northcote, P. Morales, D. Levy y M. Greaven (Eds.). *Contaminación en el lago Titicaca, Perú: capacitación, investigación y manejo* (pp. 257-276). Westwater Research Centre, University of British Columbia.
- Organización Mundial de la Salud–OMS. (2024, 13 de octubre). *Enfermedades diarreicas*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/diarrhoeal-disease>
- Radwan M., Willems P., El-Sadek A., and Berlamont J. (2003). Modelling of dissolved oxygen and biochemical oxygen demand in river water using a detailed and a simplified model. *International Journal of River Basin Management*. 1(2): 97-104.
- Rivera, C., Hall, K., Escobedo, C. y Romero, M. (1991). Bacterias patógenas en la bahía y en los pozos de Puno. En T. Northcote, P. Morales, D. Levy y M. Greaven (Eds.). *Contaminación en el lago Titicaca, Perú: capacitación, investigación y manejo* (pp. 189-202). Westwater Research Centre, University of British Columbia.
- Rodríguez, J., García, C. y García, J. (2017). Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia. *Revista de Salud Pública*, 18 (5), 738-745. <http://dx.doi.org/10.15446/rsap.v18n5.54869>
- Romero, S., García, J., Valdez, B. y Vega, M. (2010). Calidad del Agua para Actividades Recreativas del Río Hardy en la Región Fronteriza México-Estados Unidos. *Información Tecnológica* 21(5), 69-78. <http://dx.doi.org/10.1612/inf.tecnol.4357it.09>
- Rusydi, A. Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. (2018). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 118, 012019. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019>
- Sanborn, M. y Takaro, T. (2013). Recreational water-related illness Office management and prevention. *Canadian Family Physician*, 59, 491-495.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI (2025, 21 de marzo). Pronóstico del tiempo para PUNO (Puno). <https://www.senamhi.gob.pe/?dp=21&localidad=0030&p=pronostico-detalle&utm>
- Siguayro, H., Pasapera, J., Coila, Y., Villanueva, C. y Gamarra, C. (2022). Evaluación de fuentes

- contaminantes en el anillo circunlacustre del lago Titicaca (sector peruano), 2017. *Boletín del Instituto del Mar del Perú*, 37(2), 361-386.
- Smith, R. y Smith, T. (2001). *Ecología*. Madrid, España: Pearson Educación S.A.
- Solís, Y., Zúñiga, A. y Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 31(1), 35-46. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>
- Thurston, R. V., Russo, R. C., Felterof, Jr. C. M., Edsall, T. A. y Barber, Y.M. (1979). *A review of the EPA red Book: Quality criteria for Water*. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society, Water Quality Section.
- UNESCO. (2023). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023, alianzas y cooperación por el agua*. WWAP.
- United States Environmental Protection Agency—USEPA. (1976). *Quality criteria for water*. Washington D.C. US. Environmental protection Agency.
- United States Environmental Protection Agency—USEPA. (2025, 26 de julio). *pH*. <https://www.epa.gov/caddis/ph?utm>
- Von Sperling, M. (2007). *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. London: Published by IWA Publishing.
- Waterboards. (2017). *pH*. Folleto informativo 3.1.4.0, California State Water Resources Control Board. https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf
- Waterboards. (2018). *Temperatura*. Folleto Informativo 3.1.2.0, California State Water Resources Control Board. https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3120sp.pdf
- World Health Organization—WHO. (2003). *Guidelines for safe recreational water environments*, Volume 1. Geneva: Coastal and fresh waters.
- WWAP—Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017*. París, UNESCO: Aguas residuales, el recurso desaprovechado.