



**Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca  
OBSERVATORIO PERMANENTE DEL LAGO TITICACA (OLT)**

---

# **EVALUACIÓN LIMNOLÓGICA DE LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO – LAGO TITICACA – Aportaciones de la sonda multiparamétrica y del espectroradiómetro**

**(Campaña: 10-11 de julio de 2024)**



**Elaborado por  
Xavier Lazzaro, PhD  
Especialista ambiental de la ALT  
Lic. Juan José Ocola Salazar  
Presidente Ejecutivo de la ALT**

La Paz, julio 2024



# Evaluación Limnológica en la Bahía Interior de Puno – Lago Titicaca – Aportaciones de la sonda multiparamétrica y del espectroradiómetro

## Índice

Índice	2
1.- INTRODUCCIÓN	3
2.- JUSTIFICACIÓN	4
3.- OBJETIVOS	4
4.- ZONA DE ESTUDIO Y CONDICIONES METEOROLÓGICAS	4
5.- DATOS DE LA CAMPAÑA	5
6.- CARACTERIZACIÓN DE LA EUTROFIZACIÓN	6
7.- EQUIPOS UTILIZADOS, PARÁMETROS Y METODOLOGÍAS	10
Notas	11
8.- Características bio-físicas por la sonda multiparamétrica YSI EXO2	12
Punto BInte03 (en el centro de la bahía interior) archivo <Kor EXO BInte03 100724 1210 trabajado.xlsx>	12
Punto BInte05 archivo <Kor EXO BInte05 100724 1240 trabajado.xlsx>	14
Punto BInte06 (frente al total del Hotel Titicaca) archivo <KorEXO BInte06 110724 1030 trabajado.xlsx>	15
Punto BInte07. Archivo <KorEXO BInte07 110724 0945 trabajado.xlsx>	17
Punto BInte09. Archivo <Kor EXO BInte09 100724 1240 trabajado.xlsx>	18
Punto BExte12 ‘Chimu’ (frente a la estación de bombeo de Puno, en la entrada de la Bahía Exterior) archivo <Kor EXO CHIMU 110724 0920 trabajado.xlsx>	19
9.- Atenuación vertical de la penetración de las radiaciones solares incidentes ultravioletas (UV-B, UV-A) y fotosintéticamente activa (PAR) por el espectro radiómetro C-OPS	25
Punto BInte01 archivo <001_240710_110207_URC_BInte01.xlsx>	25
Punto BInte02 archivo <004_240710_114957_URC_BInte02.xlsx>	26
Punto BInte03 archivo <002_240710_120906_URC_BInte03.xlsx>	26
Punto BInte04 archivo <001_240710_130919_URC_BInte04.xlsx>	26
Punto BInte05 archivo <001_240710_135601_URC_BInte05.xlsx>	27
Punto BInte07 archivo <001_240711_105904_URC_BInte07.xlsx>	27
Punto BInte09 archivo <003_240710_144304_URC_BInte09.xlsx>	28



**Punto Bexte12 - Chimu** (Bahía Exterior de Puno, frente a la estación de bombeo de agua) archivo  
<002\_240711\_092008\_URC\_BEte12.xlsx> \_\_\_\_\_ 28

**10.- CONCLUSIONES** \_\_\_\_\_ 30

**11.- RECOMENDACIONES** \_\_\_\_\_ 31

**12.- LITERATURA CITADA** \_\_\_\_\_ 32

## 1.- INTRODUCCIÓN

La **Bahía Interior de Puno (BIP)** es una sección del **Lago Titicaca**, situada en el **noroeste del lago, en territorio peruano**, dentro del departamento de **Puno**. Se encuentra junto a la ciudad de **Puno**, una de las principales urbes de la región, con una población superior a los **140,000 habitantes**, ubicada a **3,812 metros sobre el nivel del mar**. Desde hace décadas, la BIP es una de las zonas más afectadas del Lago Titicaca, ya que recibe directamente las descargas de **aguas residuales municipales sin tratar o tratadas inadecuadamente**, además de aguas pluviales provenientes de la microcuenca que rodea la ciudad de Puno.

La BIP presenta características propias dentro del ecosistema del Lago Titicaca: es una **zona de aguas someras**, con una profundidad promedio que no supera los **7 metros**. Está casi separada de la **Bahía Mayor de Puno (BMP)** por una franja de **totorales** en la zona este, lo que favorece la acumulación de sedimentos y contaminantes. En el pasado, la bahía proveía **agua de buena calidad** y ofrecía diversos **servicios ecosistémicos**, como áreas para **recreación, pesca y turismo**. Cabe resaltar que es el **principal acceso al Lago Titicaca** desde la ciudad de Puno.

Actualmente, la BIP enfrenta una **grave crisis ambiental** debido a múltiples fuentes de contaminación. Entre los principales problemas se encuentran la **descarga de aguas residuales municipales**, ya que la falta de una planta de tratamiento de aguas residuales (**PTAR**) eficiente ha provocado que estas sean vertidas directamente en la bahía. A esto se suma la contaminación por **aguas pluviales**, que arrastran residuos urbanos y sustancias tóxicas hacia el ecosistema acuático. Otro problema crítico es la **acumulación de sedimentos contaminados**, estimándose la presencia de más de **700,000 toneladas de material con alta carga de contaminación**.

La excesiva acumulación de **materia orgánica y nutrientes**, en particular **nitrógeno (N) y fósforo (P)**, ha favorecido la proliferación de **microalgas**, con concentraciones superiores a **4 millones de células por litro**, y el crecimiento descontrolado de **lenteja de agua (Lemna gibba)**. Esta situación ha generado impactos severos en la biodiversidad, como la reducción de la pesca debido a la alteración del hábitat de reproducción y cría de peces nativos. Además, el turismo se ha visto afectado, ya que la presencia de residuos y aguas de mala calidad ha deteriorado la imagen del lago.

La crisis ambiental de la Bahía Interior de Puno requiere **acciones urgentes** para su recuperación, incluyendo el tratamiento adecuado de las aguas residuales, la gestión de los sedimentos contaminados y la restauración del ecosistema, con el fin de mitigar los daños y preservar el equilibrio ecológico del Lago Titicaca.



## 2.- JUSTIFICACIÓN

Desde hace varias décadas, la Bahía Interior de Puno (BIP) se encuentra en un estado de hipereutrofización debido a la descarga de aguas residuales urbanas sin tratamiento adecuado. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Espinar, colapsada y con una capacidad insuficiente, no logra cumplir eficazmente su función. Sin embargo, no se dispone de datos actualizados sobre los parámetros limnológicos de la bahía.

Por ello, en colaboración con especialistas de la Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT), el Proyecto Especial Lago Titicaca (PELT), la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Instituto del Mar del Perú (IMARPE), los días 10 y 11 de julio de 2024 se llevó a cabo una campaña de muestreo y mediciones *in situ* en 12 estaciones limnológicas de referencia, denominadas "puntos" en este estudio. Las mediciones se realizaron a bordo del BIC IMARPE VIII, abarcando nueve puntos (BInte01-BInte09) en la Bahía Interior y un punto (BExte12) en la Bahía Exterior, ubicado frente a la estación de bombeo de agua potable CHIMU, que abastece a la ciudad de Puno.

La información obtenida en esta campaña es fundamental para la toma de decisiones orientadas a la restauración de la calidad del agua en este ecosistema poco profundo y para la implementación de medidas que prevengan la contaminación en la estación CHIMU.

## 3.- OBJETIVOS

### General

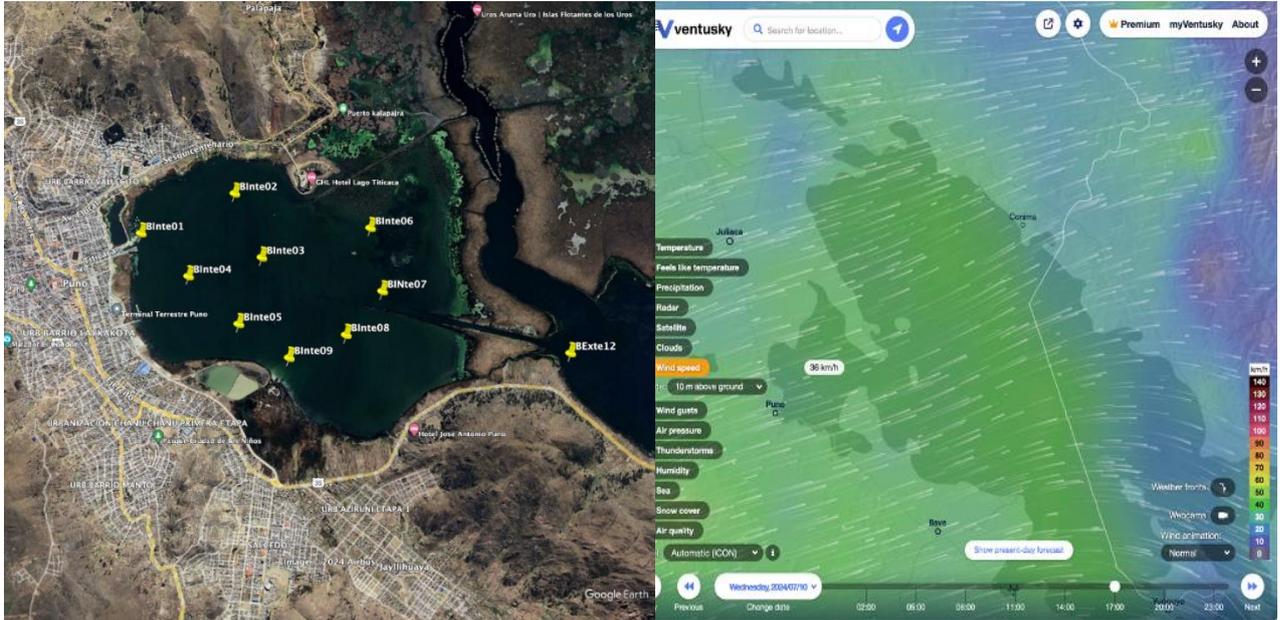
Evaluar las condiciones limnológicas de la **Bahía Interior de Puno (BIP)** del Lago Titicaca, a través del análisis de sus parámetros físicos, químicos y biológicos, con el fin de caracterizar su estado ecológico, identificar fuentes de contaminación y proponer medidas para su recuperación y conservación.

### Específicos

- **Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del agua**, incluyendo temperatura, pH, oxígeno disuelto, turbidez, conductividad eléctrica y nutrientes (nitrógeno y fósforo).
- **Evaluación de la Radiación fotosintéticamente activa (PAR, 400-700 nm)** utilizada por el fitoplancton para la fotosíntesis.

## 4.- ZONA DE ESTUDIO Y CONDICIONES METEOROLÓGICAS

Se muestrearon nueve puntos en la BIP (BInte01-09) y un punto en la BEP (BExte12). Los fuertes vientos (>40 km/h en ráfagas) y el intenso oleaje del miércoles 10/07/2024 obligaron a abortar la campaña a las 13:00. Como resultado, los dos últimos puntos, BExte12 y BInte09, fueron muestreados el jueves 11/07/2024 entre las 08:00 y las 11:00, en condiciones de vientos más leves.



**Figura 1:** (A) Distribución (parte superior izquierda) y ubicación georreferenciada (parte inferior) de los puntos de muestreo en la **Bahía Interior de Puno (BIP)** y la **Bahía Exterior de Puno (BEP)**. (B) Mapa de la dirección del viento el **10/07/2024**, mostrando un flujo predominante del **suroeste (desde tierra)** con ráfagas superiores a **38-40 km/h**, según datos del programa **Ventusky** (<https://www.ventusky.com/>).

Punto	Long.	Lat.
BInte01	-70,01414	-15,83537
BInte02	-70,00241	-15,83062
BInte03	-69,99907	-15,83855
BInte04	-70,00821	-15,84071
BInte05	-70,00198	-15,84657
BInte06	-69,98543	-15,83514
BInte07	-69,98410	-15,84288
BInte08	-69,98871	-15,84807
BInte09	-69,99578	-15,85069
BExte12	-69,96108	-15,85066



## 5.- DATOS DE LA CAMPAÑA

La campaña de monitoreo limnológico de la BIP, se realizó los días 10 y 11 de julio de 2024. Participaron:

Lic. Juan J. Ocola Salazar  
Ph.D. Xavier Lazzaro  
Ing. Cenaida Ramos Poma

Ing. Humberto Siguayro  
Ing. Carolina Amaro Cabrera  
Lic. Diego Ocola Villasante

Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca (ALT)  
Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca (ALT)  
Administración Local de Agua – Ilave de la Autoridad Nacional del Agua (ANA)  
Instituto del Mar del Perú – Lab. Continental de Puno  
Proyecto Living Lakes  
Profesional voluntario



## 6.- CARACTERIZACIÓN DE LA EUTROFIZACIÓN

Según el Índice de Estado Trófico (TSI) de Carlson (1977), las concentraciones de clorofila-*a* entre 20 y 56  $\mu\text{g Chl-}a/\text{L}$  corresponden a un estado eutrófico (Ver Tabla 1), mientras que valores superiores, entre 56 y 155  $\mu\text{g Chl-}a/\text{L}$ , indican un estado hipertrófico (Carlson & Simpson, 1996).

Asimismo, de acuerdo con las clasificaciones fijas y abiertas de la OCDE (1982), modificadas (Ver Tablas 2 y 3) por Ryding & Rast (1989), concentraciones de clorofila-*a* en el rango de 9,5 a 275  $\mu\text{g Chl-}a/\text{L}$  son características del estado eutrófico.

**Tabla 1: Índice de Estado Trófico (TSI) de Carlson (1977).** Criterio para la identificación de los niveles de la clasificación de los estados tróficos basado en la **triplicación de la biomasa algal**, medida a través de la **concentración de clorofila-*a***. Cada **triplicación de la clorofila-*a*** representa una transición a un nuevo nivel de estado trófico, lo que implica una **reducción del 50 % en la transparencia** medida con el **disco de Secchi**.

TSI	Disco de Secchi (m)	Fosforo total en superficie ( $\mu\text{g/L}$ )	Clorofila- <i>a</i> de superficie ( $\mu\text{g/L}$ )
0	64	0,75	0,04
10	32	1,5	0,12
20	16	3	0,34
30	8	6	0,93
40	4	12	2,6
50	2	24	6,4
60	1	48	20
70	0,5	96	56
80	0,25	192	154
90	0,12	384	427
100	0,062	768	1183

**Nota:** Según Carlson (1977), “**un índice de estado trófico no es lo mismo que un índice de calidad del agua.** El término ‘calidad’ implica un juicio subjetivo que debe mantenerse separado del concepto de estado trófico. Una confusión común en la terminología es la asociación de ‘eutrófico’ con ‘mala calidad del agua’. Sin embargo, la calidad del agua, ya sea **excelente o deficiente, depende de su uso y de las percepciones locales.** Por ello, **la definición de estado trófico y su índice deben mantenerse neutrales** ante estos juicios subjetivos, funcionando únicamente como un marco para evaluar la calidad del agua desde distintas perspectivas”.

Para ilustrar que un estado eutrófico no es necesariamente sinónimo de mala calidad del agua, consideremos la piscicultura de peces filtradores omnívoros, como las carpas y las tilapias. En este caso, es deseable que las concentraciones de clorofila-*a* sean elevadas y que, en consecuencia, la transparencia medida con el disco de Secchi sea reducida. Esto se debe a que estos peces para alimentarse de fitoplancton y detritos, remueven el sedimento orgánico. En cambio, estas mismas condiciones resultarían desfavorables para la piscicultura de truchas. Siendo depredadores visuales, las truchas requieren aguas transparentes, bien oxigenadas y con bajo contenido de fitoplancton para detectar y capturar sus presas, como zooplancton, invertebrados y peces pequeños.



Estos ejemplos demuestran que el concepto de “calidad del agua” es relativo y depende del uso específico de cada cuerpo de agua.

**Tabla 2: Sistema de ‘clasificación fija’ de estado trófico de Ryding & Rast (1989), modificado de OCDE (1982).**

Categoría trófica	Fosforo total (µg/L)	Promedio Clorofila-a (µg/L)	Máximo Clorofila-a (µg/L)	Promedio disco de Secchi (m)	Mínimo disco de Secchi (m)
Ultra-oligotrófico	< 4,0	< 1,0	< 2,5	> 12,0	> 6,0
Oligotrófico	< 10,0	< 2,5	< 8,0	> 6,0	> 3,0
Mesotrófico	10-35	2,5-8,0	8-25	6-3	3-1,5
Eutrófico	35-100	8-25	25-75	3-1,5	1,5-0,7
Hiper-eutrófico	> 100	> 25	> 75	< 1,5	< 0,7

**Tabla 3: Sistema de ‘clasificación abierta’ de estado trófico de Ryding & Rast (1989), modificado de OCDE (1982).**

Parámetro		Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipertrófico
Fosforo total (µg P/l)	Promedio	8,0	26,7	84,4	
	Rango	3,0-17,7	10,9-95,6	16,2-386	750-1200
Nitrógeno total (µg N/L)	Promedio	661	753	1875	
	Rango	307-1630	361-1387	393-6100	
Clorofila-a (µg/L)	Promedio	1,7	4,7	14,3	
	Rango	0,3-4,5	3,0-11	2,7-78	100-150
Clorofila-a máximo (µg/L)	Promedio	4,2	16,1	42,6	
	Rango	1,3-10,6	4,9-49,5	9,5-275	
Disco de Secchi (m)	Promedio	9,9	4,2	2,45	
	Rango	5,4-28,3	1,5-8,1	0,8-7,0	0,4-0,5

Los lagos tropicales, en particular los poco profundos, son generalmente limitados por nitrógeno. El índice de Carlson solo considera fosforo, en cuanto que el índice abierto (versión preferible) de la OCDE considera tanto fosforo como nitrógeno. La base matemática (progresión numérica) del índice de Carlson y su división en 10 niveles, no lo hace propicio para relacionarlo con las nociones de oligotrofia-mesotrofia-eutrofia-hipertrofia, ni las clasificaciones satelitales. Por lo que las clasificaciones de la OCDE, en particular la abierta, son mucho más adecuadas y usadas abundantemente. Por supuesto, sería útil determinar si las diferentes regiones (someras vs profundas) del Titicaca son limitadas por N o P, o colimitadas por N y P.

Las cianobacterias son un tipo de fitoplancton perjudicial debido a su capacidad para formar floraciones o "blooms" y, en algunos casos, liberar toxinas, conocidas como *Harmful Algal Blooms* (HAB) en inglés. Estas floraciones han sido identificadas en la Bahía Interior de Puno, las que probablemente fueron las que causaron la mortandad de peces ocurrida en marzo de 2013.

Northcote et al. (1991) destacó que los lagos ubicados en **baja latitud y gran altitud**, como el Lago Titicaca, son más susceptibles a la eutrofización y la contaminación. Esto se debe a factores como la **intensa radiación solar**, las **pocas variaciones estacionales** y las **temperaturas medias anuales elevadas**. Estas condiciones prolongan el período de actividad biológica, lo que favorece una mayor producción primaria y el incremento de la biomasa del fitoplancton.



Las áreas poco profundas, como la Bahía de Puno y el Lago Menor, son aún más vulnerables a la eutrofización. Un factor clave es la acción diaria de los **vientos térmicos**, que pueden mezclar toda la columna de agua, provocando la **resuspensión de nutrientes, materia orgánica y fitobentos acumulados en el sedimento**.

En su informe a la **FAO, Northcote (1979)** ya alertaba sobre el problema de **eutrofización** en la **Bahía de Puno**, señalando la presencia de **floraciones permanentes de microalgas** desde la década de **1970**. Estas floraciones estaban estrechamente vinculadas al **crecimiento demográfico de la ciudad** y a la **falta de tratamiento de las aguas residuales domésticas**. Incluso en aquella época, el autor destacaba la **ausencia de estudios sistemáticos sobre la calidad del agua** en distintas zonas de la cuenca lacustre, a pesar de los impactos generados por las actividades **domésticas, industriales, agrícolas y mineras** en el ecosistema.

Casi medio siglo después, es lamentable constatar que la situación sigue siendo la misma. La eutrofización y la contaminación continúan afectando el lago, lo que evidencia que los esfuerzos realizados han sido insuficientes para revertir este problema.

Desde el inicio del siglo, se han realizado pocas investigaciones sobre el deterioro de la calidad del agua en la Bahía de Puno. Entre diciembre de 2010 y abril de 2011, Beltrán Farfán et al. (2015) llevaron a cabo muestreos limnológicos mensuales en 12 estaciones, analizando parámetros como transparencia, temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad, alcalinidad, fosfatos ( $PO_4$ ), nitratos ( $NO_3$ ), nitritos ( $NO_2$ ) y la presencia de coliformes fecales (*Escherichia coli*). Sin embargo, **no midieron clorofila-a, ficocianina ni materia orgánica**.

Los resultados confirmaron que:

- a. La **zona del puerto** presentaba altas concentraciones de nutrientes, con **síntomas químicos de eutrofización extrema**.
- b. El **área cercana a la salida de la laguna de estabilización de la PTAR de Espinar** era un **punto crítico de contaminación**, con concentraciones extremadamente altas de *E. coli*, debido a la descarga directa de aguas residuales domésticas de la ciudad de Puno, cuyo tratamiento es deficiente.

En 2014, se detectaron **filamentos de la cianobacteria *Limnospira robusta*** en el fitoplancton y el perifiton de la Bahía de Puno. Paradójicamente, esta especie puede formar floraciones masivas (*blooms*) incluso en lagos tropicales oligotróficos, ya que es capaz de fijar nitrógeno molecular atmosférico durante la noche. Por ello, Komárková et al. (2016) analizaron los factores que podrían favorecer una floración masiva de *L. robusta* en la Bahía de Puno y en otras zonas de aguas transparentes del lago.

En marzo de 2014, se identificaron otras cianobacterias, entre ellas:

- i. **Colonias de *Microcystis aeruginosa***, capaces de formar *blooms* en condiciones hipertróficas y de producir **microcistinas hepatotóxicas**, especialmente en presencia de amonio.
- ii. **Filamentos solitarios de *Nodularia inca***, una nueva especie registrada en el Titicaca, que posee aerotopos (vesículas gaseosas que le permiten flotar). **Richerson et al. (1977, 1986)** ya habían identificado *Nodularia* en el norte del Lago Mayor entre 1973 y 1983. Algunas especies de *Nodularia* pueden volverse tóxicas, por lo que *N. inca* podría eventualmente causar *blooms* perjudiciales.



- iii. **Filamentos de *Lyngbya robusta***, una cianobacteria de gran tamaño (varios centímetros de longitud) con grandes vesículas de gas, capaz de fijar nitrógeno atmosférico. Aunque no se conoce por formar *blooms*, es más típica de reservorios oligotróficos.

Dado que el Lago Titicaca presenta una baja **razón estequiométrica N:P**, las condiciones de **limitación de nitrógeno (N) pueden favorecer la proliferación de cianobacterias fijadoras de N<sub>2</sub> atmosférico**. Esto representa **un riesgo significativo para el ecosistema** y la economía regional, afectando actividades como la piscicultura, la pesca y el turismo. Además, la presencia de *blooms* tóxicos podría comprometer la salud humana.

La **biomasa y la producción primaria del fitoplancton** dependen en gran medida de la **disponibilidad de nutrientes (N, P)** y de la **extensión de la zona eufótica**, es decir, la capa de agua donde la luz solar incidente es suficiente para estimular la fotosíntesis. Esta zona se define como el intervalo en el que la radiación solar disminuye desde el 100% en la superficie hasta el 1% en su límite inferior.

La energía solar incidente se compone de:

- a. **Radiación fotosintéticamente activa (PAR, 400-700 nm):** utilizada por el fitoplancton para la fotosíntesis.
- **Radiación ultravioleta: UV-B (280-315 nm) y UV-A (320-400 nm)**, que pueden ser dañinas para los organismos planctónicos, afectando sus células y material genético. Para protegerse, el fitoplancton y el zooplancton desarrollan pigmentos foto-protectores o migran a mayores profundidades, donde la exposición a la radiación UV es menor.

Debido a la gran altitud del Lago Titicaca, su atmósfera protectora es aproximadamente 4 km más delgada en comparación con la de los lagos a nivel del mar. Esto provoca una mayor intensidad de radiación UV en sus aguas, lo que impide que el fitoplancton permanezca cerca de la superficie. En cambio, suele concentrarse cerca del límite de la zona eufótica ( $z_{1\%}$ ), realizando migraciones verticales: descendiendo al amanecer y ascendiendo al atardecer.

Se considera que la **radiación solar incidente justo debajo de la superficie ( $I_0$ )** corresponde al 100%. Así, el límite inferior de la zona eufótica se define como la profundidad ( $z_{1\%}$ ) donde la intensidad luminosa se reduce al 1% de  $I_0$ . La penetración de la luz en la columna de agua sigue una atenuación exponencial con la profundidad, de acuerdo con la **ley de Beer-Lambert**:

$$I_z = I_0 * \exp (-Kd * z)$$

Donde  $I_z$  = la energía en la profundidad  $z$ ,  $I_0$  = la energía sub-superficial (100%), **Kd** = el **coeficiente de extinción** ( $m^{-1}$ ); así la energía en la profundidad eufótica o límite inferior ( $I_{z_{1\%}}$ ) es:

$$I_{z_{1\%}} = I_0 \exp (-Kd * z_{1\%}), \text{ o sea } 0,01 * I_0 = I_0 * \exp (-Kd * z_{1\%})$$

entonces, dividiendo ambos lados de la ecuación por  $I_0$ , y multiplicándolos por  $\ln$ , se llega a

$$0,01 = \exp (-Kd * z_{1\%}) \text{ y } \ln (0,01) = -Kd * z_{1\%}$$

donde,  $\exp$  = exponencial, y  $\ln$  = el logaritmo neperiano.

$$\text{lo que llega a: } -4,61 = -Kd * z_{1\%}, \quad \boxed{z_{1\%} = 4,61 / Kd \text{ y } Kd = 4,61 / z_{1\%}}$$



Para calcular el coeficiente de extinción **Kd** mediante una hoja de cálculo en Excel, se ajustó una función exponencial negativa a los valores de energía incidente registrados por el sensor del espectroradiómetro **Biospherical C-OPS**.

Dado que el sensor opera con una frecuencia de adquisición de **1 Hz (1 registro por segundo)** y desciende a una velocidad de **30 cm/segundo**, se generan aproximadamente **3 datos por metro** en la columna de agua. Para garantizar la precisión de los datos, se realizaron **cinco descensos sucesivos** del C-OPS desde la superficie hasta el fondo.

Se tomaron precauciones para evitar sesgos en la medición, absteniéndose de realizar perfiles con el C-OPS mientras otros participantes manipulaban la **draga de sedimento o el ancla**, con el fin de evitar la influencia de partículas y microalgas en suspensión.

Finalmente, se seleccionó el perfil que presentó el mejor ajuste, con un coeficiente de determinación  **$R^2 \geq 0,9$** . A partir del **Kd** obtenido para la radiación solar fotosintéticamente activa (**PAR, 400-700 nm**), se calculó la **profundidad eufótica ( $z_{1\%}$ )** utilizando la fórmula correspondiente.

Una vez obtenido el valor de *Kd* para la radiación fotosintéticamente activa (PAR, 400-700 nm), se calculó la profundidad eufótica  $z_{1\%}$  utilizando la fórmula mencionada anteriormente.

## 7.- EQUIPOS UTILIZADOS, PARÁMETROS Y METODOLOGÍAS

Para evaluar las condiciones limnológicas y el estado trófico, se empleó la sonda multiparamétrica YSI EXO2, equipada con siete sensores ópticos para medir: clorofila-*a* (Chl-*a*) y ficocianina (PC o "Phycocyanin" en inglés) en unidades de fluorescencia relativa (RFU) y  $\mu\text{g/L}$ ; conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ ); oxígeno disuelto (en % de saturación y  $\text{mg/L}$ ); nitratos ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{mg/L}$ ); temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ); turbidez (FNU o NTU); sólidos disueltos totales (TDS,  $\text{mg/L}$ ); y salinidad (PSU). La adquisición de datos se realizó a una frecuencia de 0,5 Hz (un registro cada 2 segundos).

Estos parámetros, fundamentales en limnología (ciencia que estudia los lagos, equivalente a la oceanografía para mares y océanos), fueron medidos mediante perfiles verticales descendentes desde la superficie hasta el fondo. Se mantuvo la sonda durante 1 minuto en la superficie (entre 10 y 20 cm de profundidad), obteniendo 60 registros. En ambientes poco profundos ( $\leq 5$  m), como la Bahía Interior de Puno, se registraron datos durante 30 segundos en distintas profundidades (0,25 m, 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, etc.) hasta 25-30 cm del fondo, evitando la resuspensión de partículas de sedimento y microalgas del fitobentos. Para garantizar datos precisos, solo se analizaron los registros obtenidos durante el descenso, debido a que la velocidad de ascenso es mayor y podría afectar la calidad de los datos. Los valores obtenidos fueron exportados en formato *csv*, convertidos a *xlsx* para su análisis y la elaboración de gráficos.

Para determinar la transparencia del agua y calcular las profundidades de atenuación ( $z_{1\%}$ ) de diferentes radiaciones solares, se utilizó el espectroradiómetro subacuático Biospherical C-OPS. Este dispositivo mide la energía incidente en ocho longitudes de onda:

- UV-B: 305 y 313 nm (medidos en  $\mu\text{W/cm}^2/\text{nm}$ )



- UV-A: 320, 340, 380 y 395 nm (medidos en  $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ )
- PAR (radiación fotosintéticamente activa): 412 y 400-700 nm (medidos en  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ )

Para simplificar el análisis, se consideraron únicamente cuatro longitudes de onda representativas: 313 nm (UV-B), 380 nm (UV-A), 412 nm y el espectro completo de 400-700 nm (PAR). Mientras que las radiaciones UV-B y UV-A son perjudiciales para los organismos acuáticos, la radiación PAR es utilizada por el fitoplancton para la fotosíntesis.

Debido a la elevada altitud del Lago Titicaca, la radiación ultravioleta es particularmente intensa y penetrante, lo que genera un impacto en la distribución del fitoplancton. En lugar de concentrarse en la superficie, las mayores biomásas suelen ubicarse en capas más profundas, cerca del fondo o en la profundidad  $z_{1\%}$  (límite inferior de la zona eufótica).

El coeficiente de extinción  $K_d$  se calculó ajustando una función exponencial negativa al decrecimiento de la energía solar incidente con la profundidad, según la ley de Beer-Lambert (ver detalles arriba):

$$I_{z_{1\%}} = I_0 \cdot \exp(-K_d * z_{1\%})$$

El espectralradiómetro C-OPS, con una densidad ligeramente mayor a la del agua, desciende de manera autónoma a una velocidad de 30 cm/s, registrando datos a razón de un valor por segundo (1 Hz) en cada una de las ocho longitudes de onda. Para calcular el coeficiente  $K_d$ , se utilizó la función de ajuste de tendencias de Excel, obteniendo así los valores de  $I_0$  y  $K_d$ . Solo se consideraron los registros del descenso, evitando interferencias en los datos. Los resultados fueron procesados en formato *mdb* (Microsoft Data Base), convertidos a *csv* y posteriormente a *xlsx* para su análisis.

## Notas

- 1) También se utilizó la sonda fluorométrica **FluoroProbe bbe**, diseñada para estimar la **concentración total de clorofila-a**, así como las concentraciones de clorofila-a en **cuatro clases de microalgas fitoplanctónicas: Clorofíceas (algas verdes), Criptofíceas, Diatomeas y Cianobacterias**, expresadas en  $\mu\text{g}/\text{L}$ .

Sin embargo, a pesar de haber sido cargada durante toda la noche, la batería de la sonda no logró mantener su carga, lo que impidió la obtención de datos confiables. Solo se registraron algunos valores en el punto **BInte02**, por lo que esta información no pudo ser utilizada.

Dado que la sonda **bbe** tiene más de **15 años de servicio**, será necesario verificar su estado, realizar posibles reparaciones y reemplazar su batería. Para ello, deberá enviarse a la sede del fabricante **Moldaenke**, ubicada en **Schwentinental, Alemania**.

- 2) La **ficocianina** (Phycocyanin en inglés) es un pigmento accesorio exclusivo de las **cianobacterias**, utilizado para captar la energía luminosa en el proceso de fotosíntesis. Este pigmento pertenece a la familia de las **ficobiliproteínas** y desempeña un papel clave en la absorción de luz en el rango de **620-650 nm**, permitiendo a las cianobacterias



optimizar la fotosíntesis incluso en condiciones de baja luminosidad. Su concentración es utilizada como un **indicador de la biomasa de cianobacterias** en ecosistemas acuáticos, ya que su presencia puede estar asociada con la proliferación de **floraciones algales nocivas (HABs, por sus siglas en inglés)**.

- 3) **Leyendas y conversiones de unidades:** Clorofila-*a* = Chl-*a*; Ficocianina = Phycocyanin (PC); Sonda YSI-EXO2:

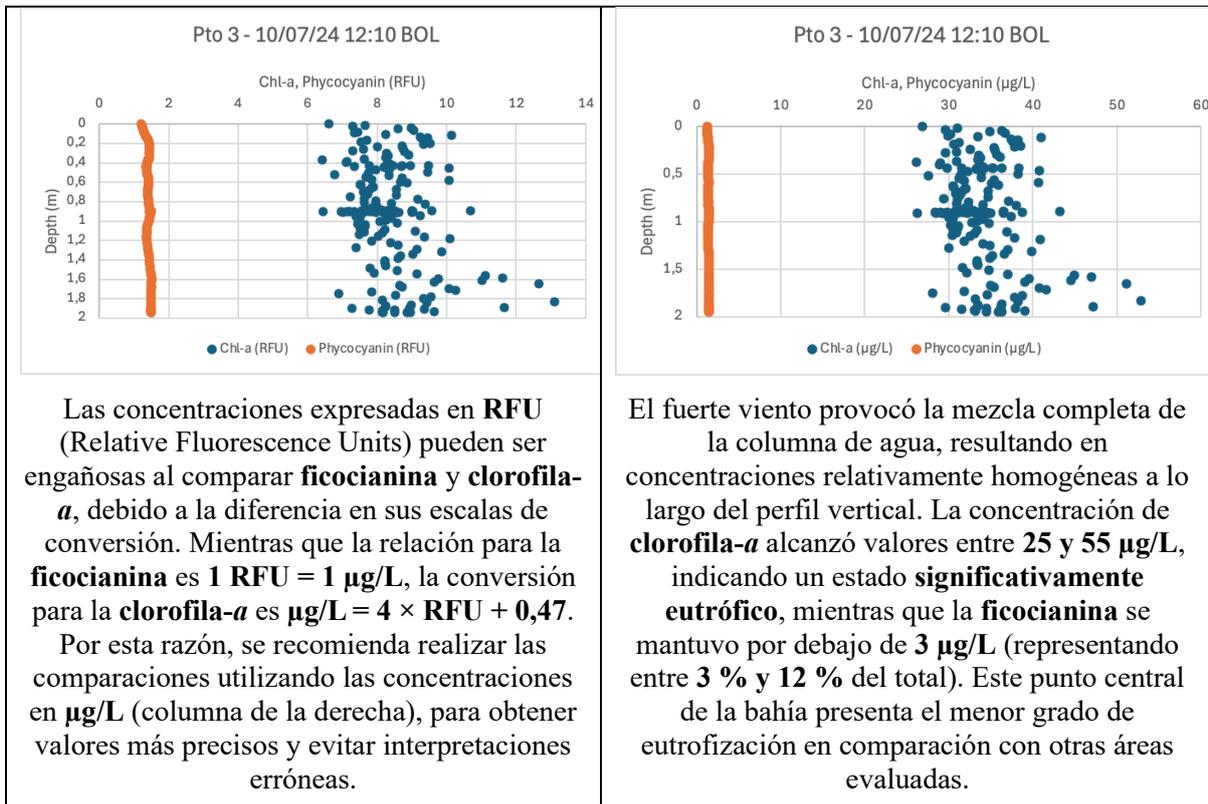
$$\text{Chl-}a \text{ (}\mu\text{g/L)} = 4,00 * \text{Chl-}a \text{ (RFU)} + 0,47$$

$$\text{PC (RFU)} = \text{PC (}\mu\text{g/L)}$$

$$\text{Chl-}a \text{ (}\mu\text{g/L, EXO2)} = 0,46 * \text{Chl-}a \text{ (}\mu\text{g/L, bbe)} + 0,20$$

## 8.- Características bio-físicas por la sonda multiparamétrica YSI EXO2

**Punto BInte03** (en el centro de la bahía interior) archivo <Kor EXO BInte03 100724 1210 trabajado.xlsx>



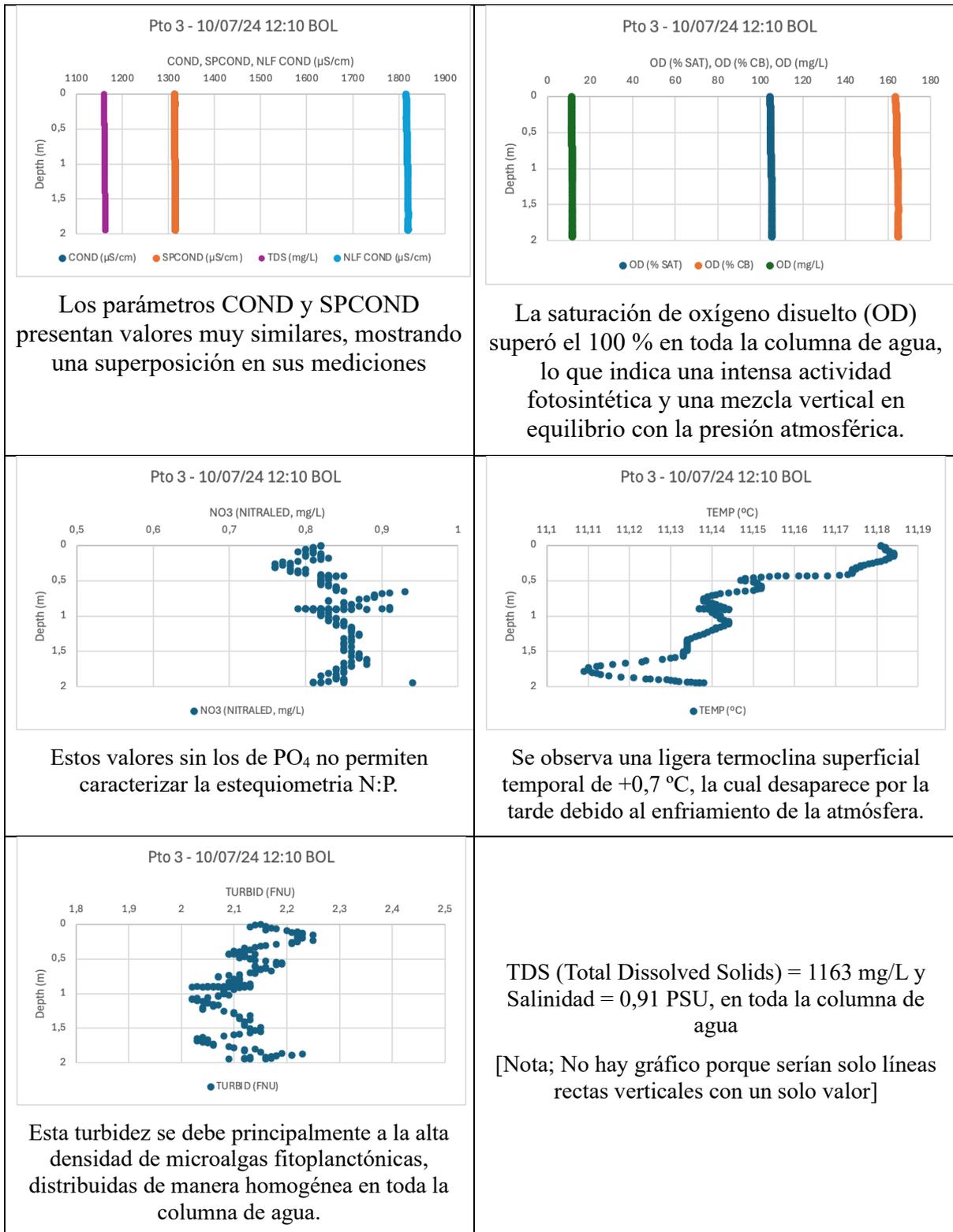
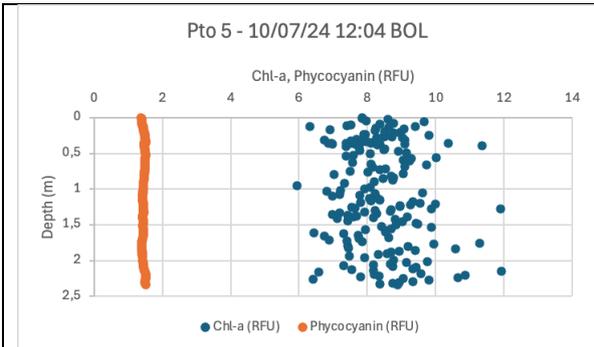


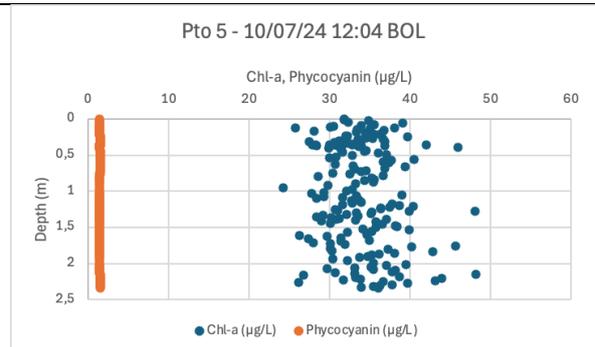
Figura 2 – Perfiles verticales de los parámetros en el punto BInte03.



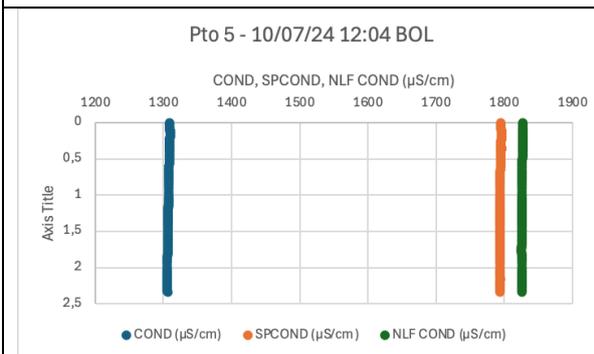
**Punto BInte05** archivo <Kor EXO BInte05 100724 1240 trabajado.xlsx>



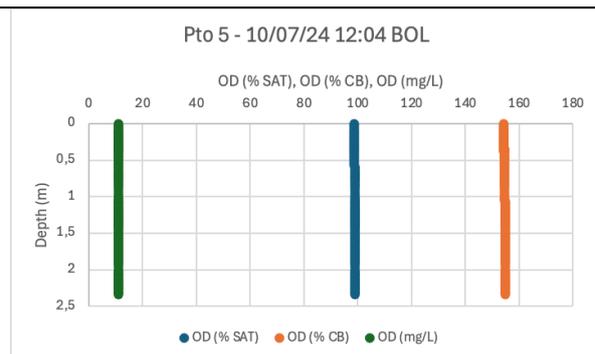
Ídem que para el punto BInte03.



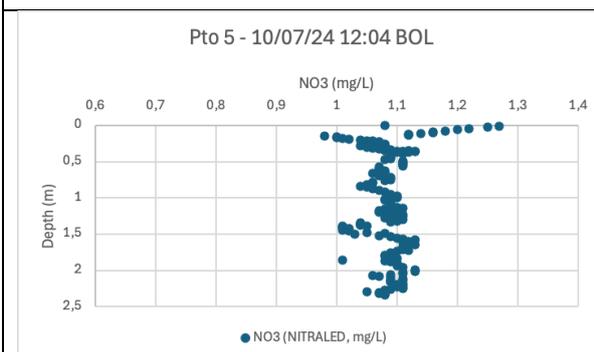
Las concentraciones de **clorofila-a** (22-48 µg/L) son **ligeramente inferiores** a las registradas en el punto **BInte04**, lo que se debe a su mayor distancia con respecto a la descarga de aguas residuales de la **PTAR de Espinar**. Por otro lado, la concentración de **ficocianina** se mantuvo en valores de **≤ 3 µg/L**.



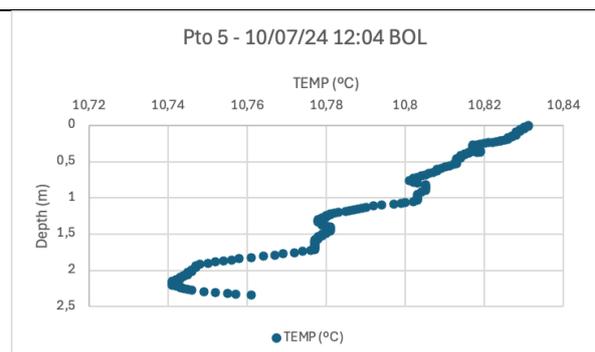
La conductividad específica SPCOND es superior (1800 µS/cm) a la del punto BInte03.



Igualmente, la columna está saturada en OD (> 100%).



A pesar de encontrarse a mayor distancia de la PTAR de Espinar, las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  son más elevadas (1-1,3 mg/L) en comparación con el punto BInte03 (0,7-1,1 mg/L).



Presencia de una frágil termoclina superficial temporaria (amplitud < 0,1 °C).

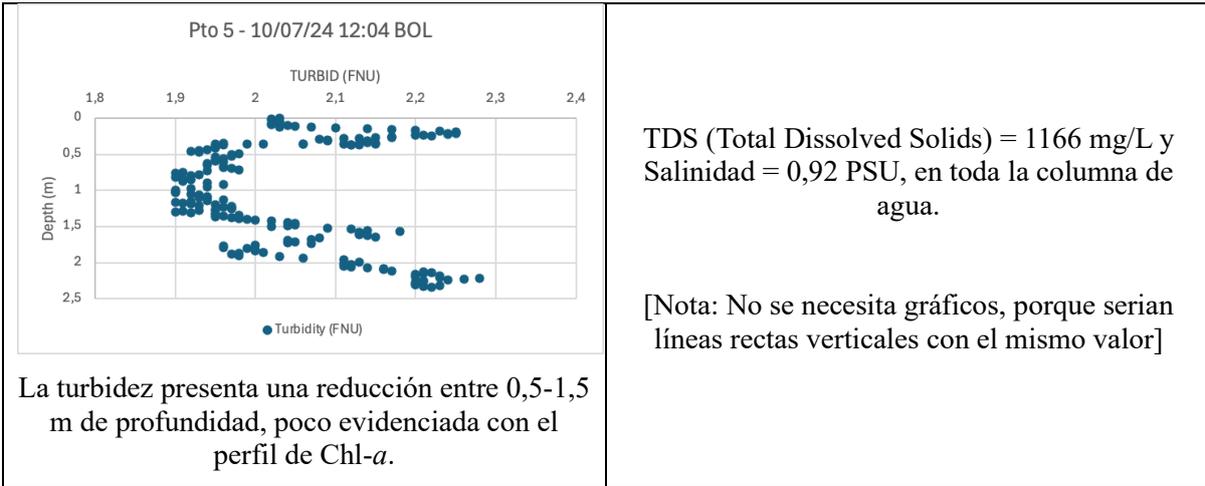
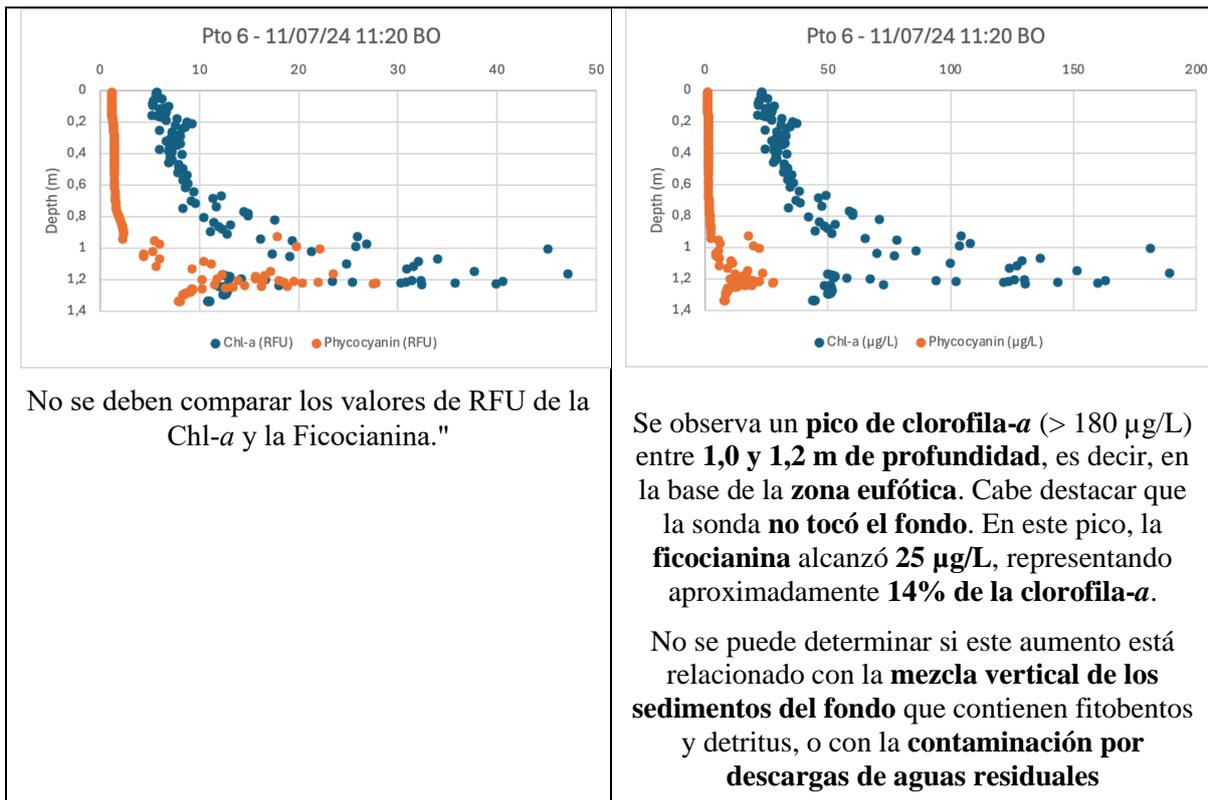


Figura 3 – Perfiles verticales de los parámetros en el punto BInte05.

**Punto BInte06** (frente al total del Hotel Titicaca) archivo <KorEXO BInte06 110724 1030 trabajado.xlsx>



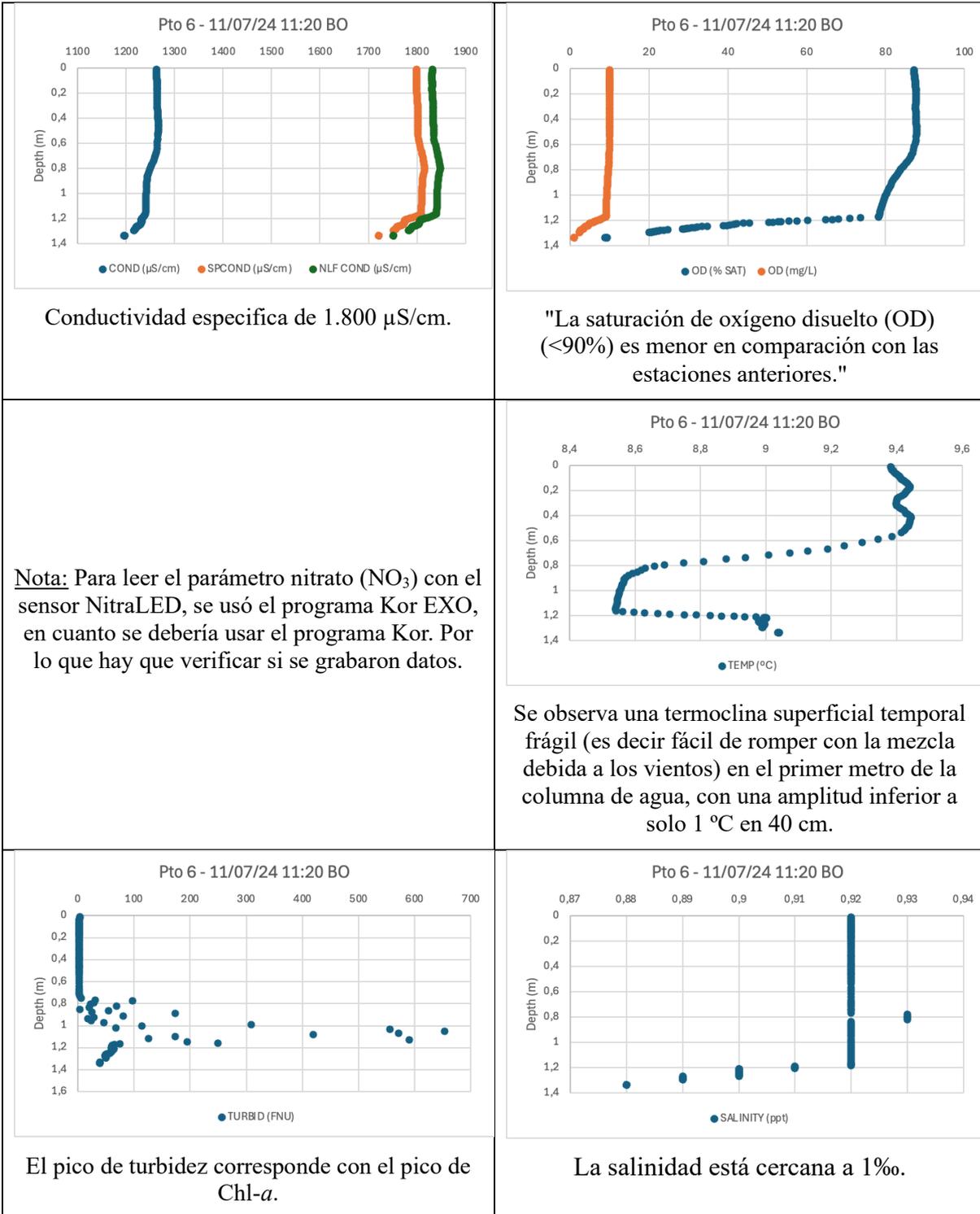
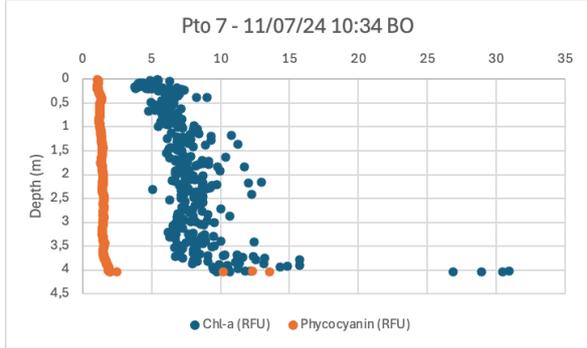


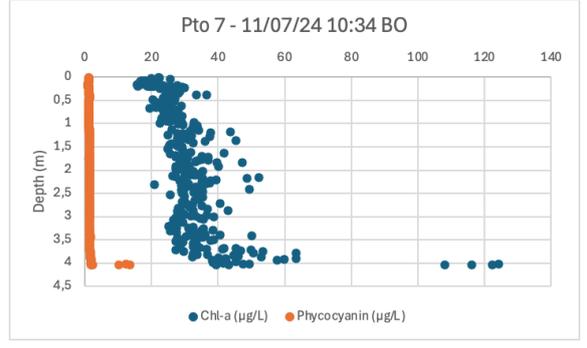
Figura 4 – Perfiles verticales de los parámetros en el punto BInte06.



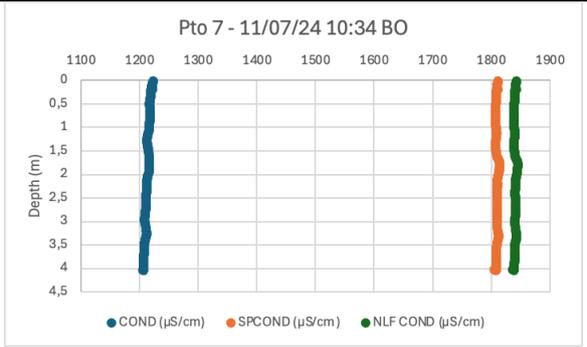
**Punto BInte07.** Archivo <KorEXO BInte07 110724 0945 trabajado.xlsx>



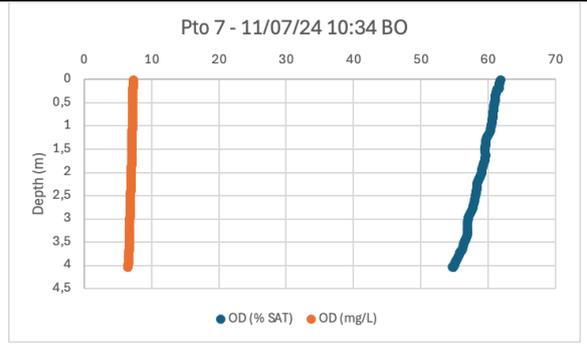
Los valores de Chl-*a* y Ficocianina no son comparables en base a la unidad RFU.



Este punto, al ser el más alejado de la PTAR de Espinar, presenta concentraciones de **clorofila-*a*** (20-50 µg/L) ligeramente inferiores en la columna de agua. Sin embargo, los valores superiores a **120 µg/L en el fondo** podrían estar relacionados con la **resuspensión de fitobentos**.

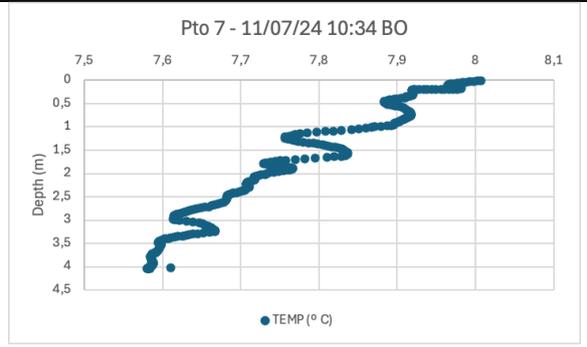


Conductividad específica ~1.800 µS/cm.



La saturación de oxígeno disuelto (OD%) es baja y disminuye hacia el fondo (<60%), posiblemente debido a la degradación de la abundante materia orgánica proveniente del fitoplancton en descomposición.

Nota: Precisa-se verificar si se grabó el parámetro NO<sub>3</sub> con el sensor NitraLED. Para esto hay que recuperar los datos con el programa Kor.



Frágil termoclina superficial temporaria (amplitud < 0,4 °C en 4 m).

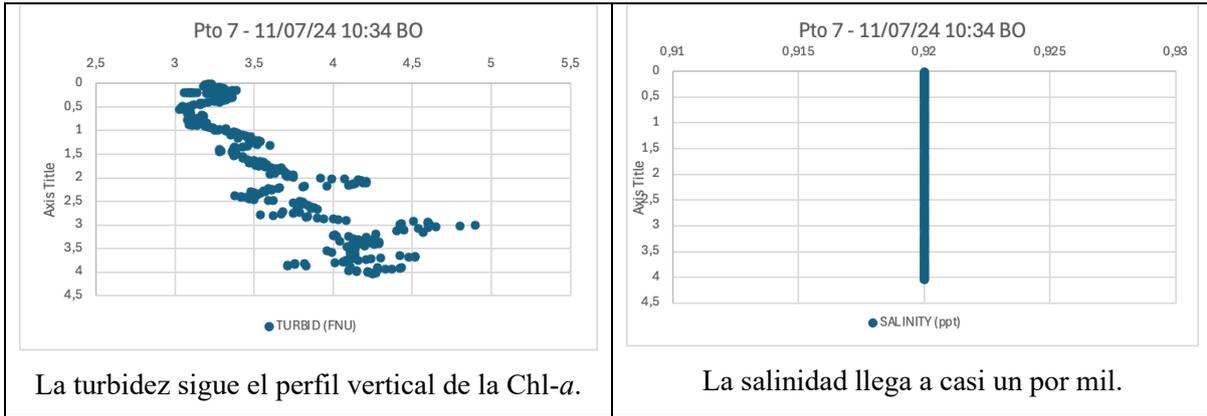
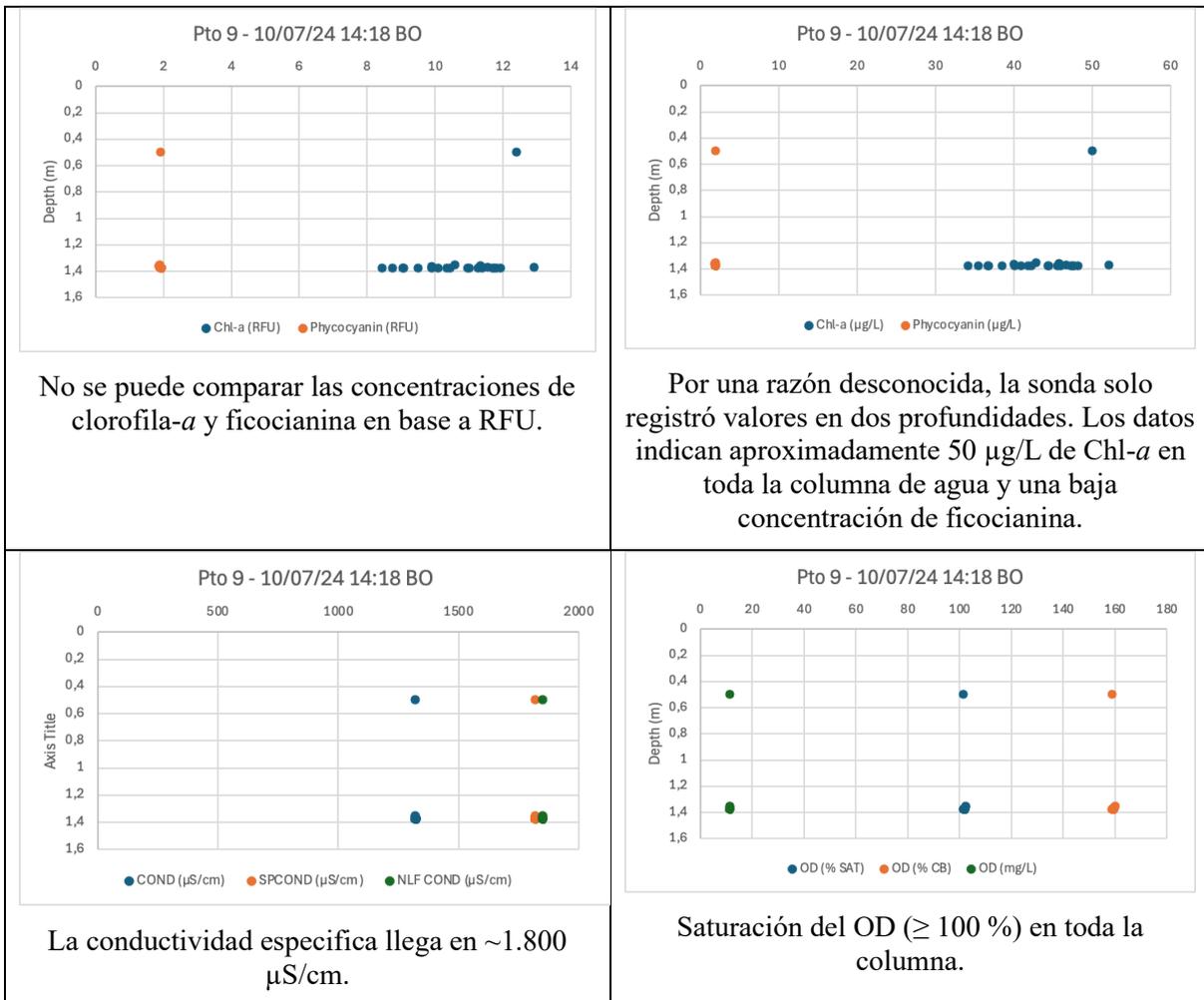


Figura 5 – Perfiles verticales de los parámetros en el punto BInte07.

**Punto BInte09.** Archivo <Kor EXO BInte09 100724 1240 trabajado.xlsx>



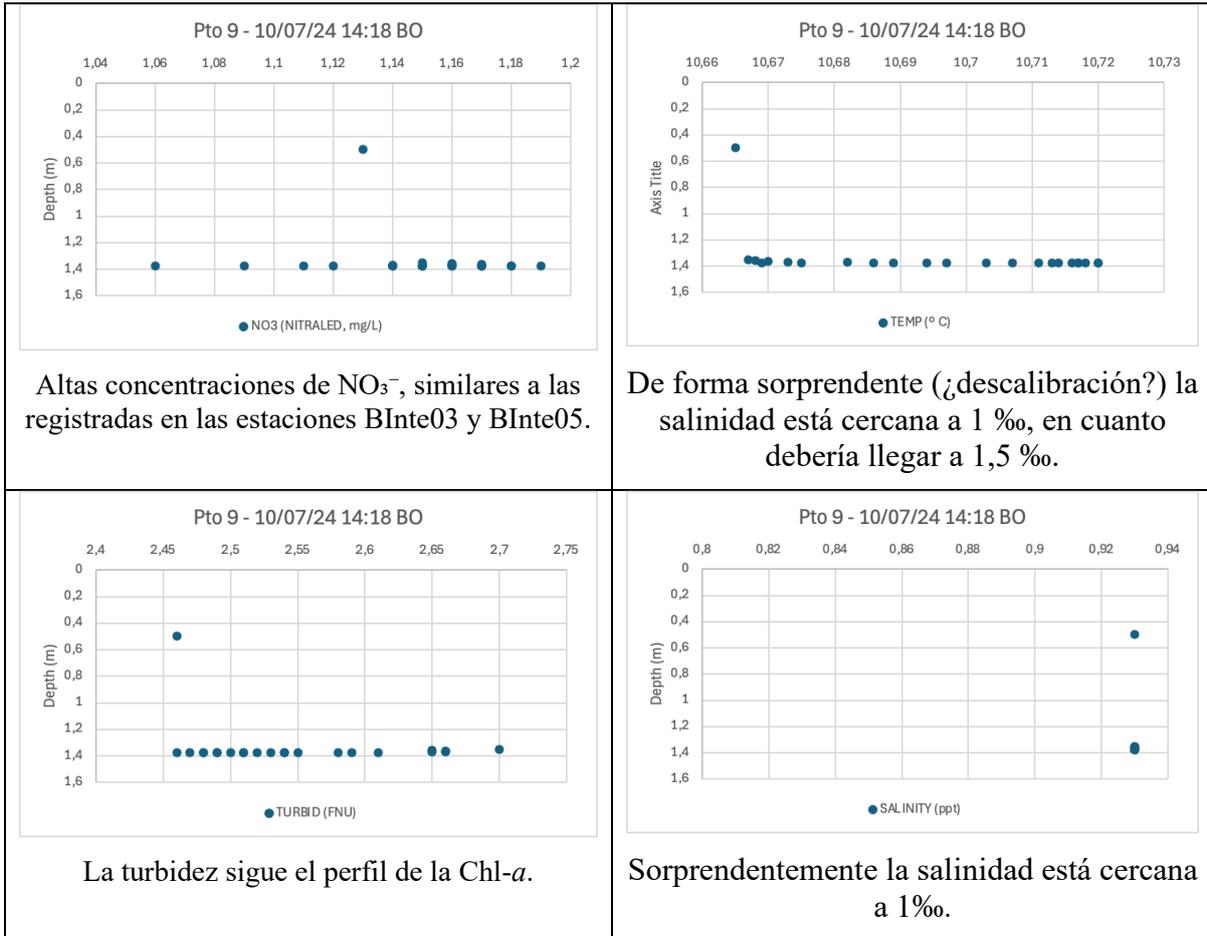
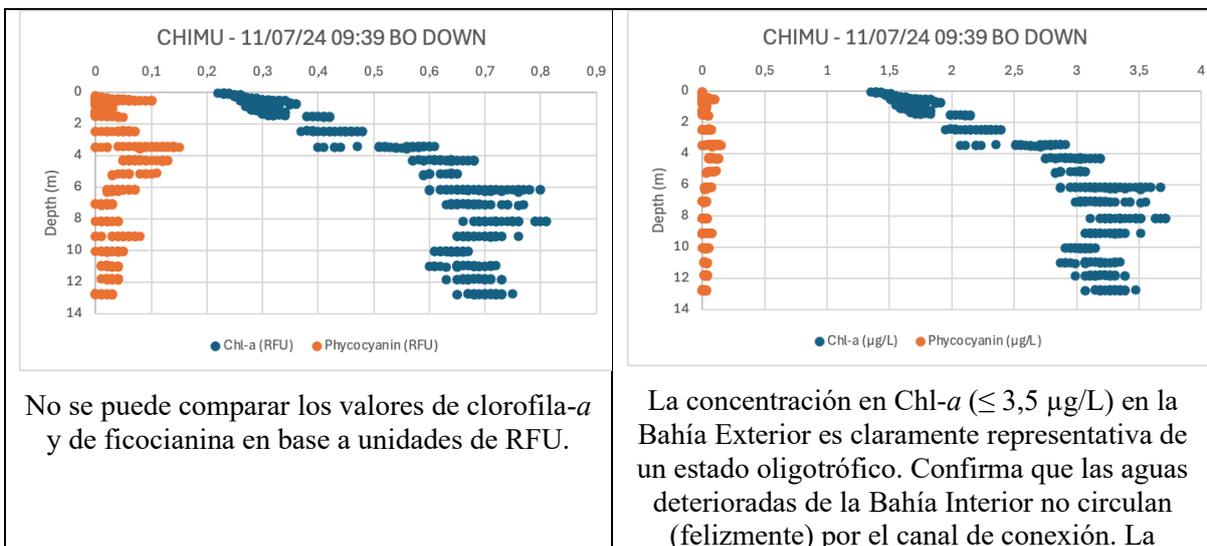


Figura 6 – Perfiles verticales de los parámetros en el punto BInte09.

**Punto BExte12 ‘Chimu’** (frente a la estación de bombeo de Puno, en la entrada de la Bahía Exterior) archivo <Kor EXO CHIMU 110724 0920 trabajado.xlsx>

Solo los valores obtenidos durante el descenso de la sonda fueron utilizados para los análisis.



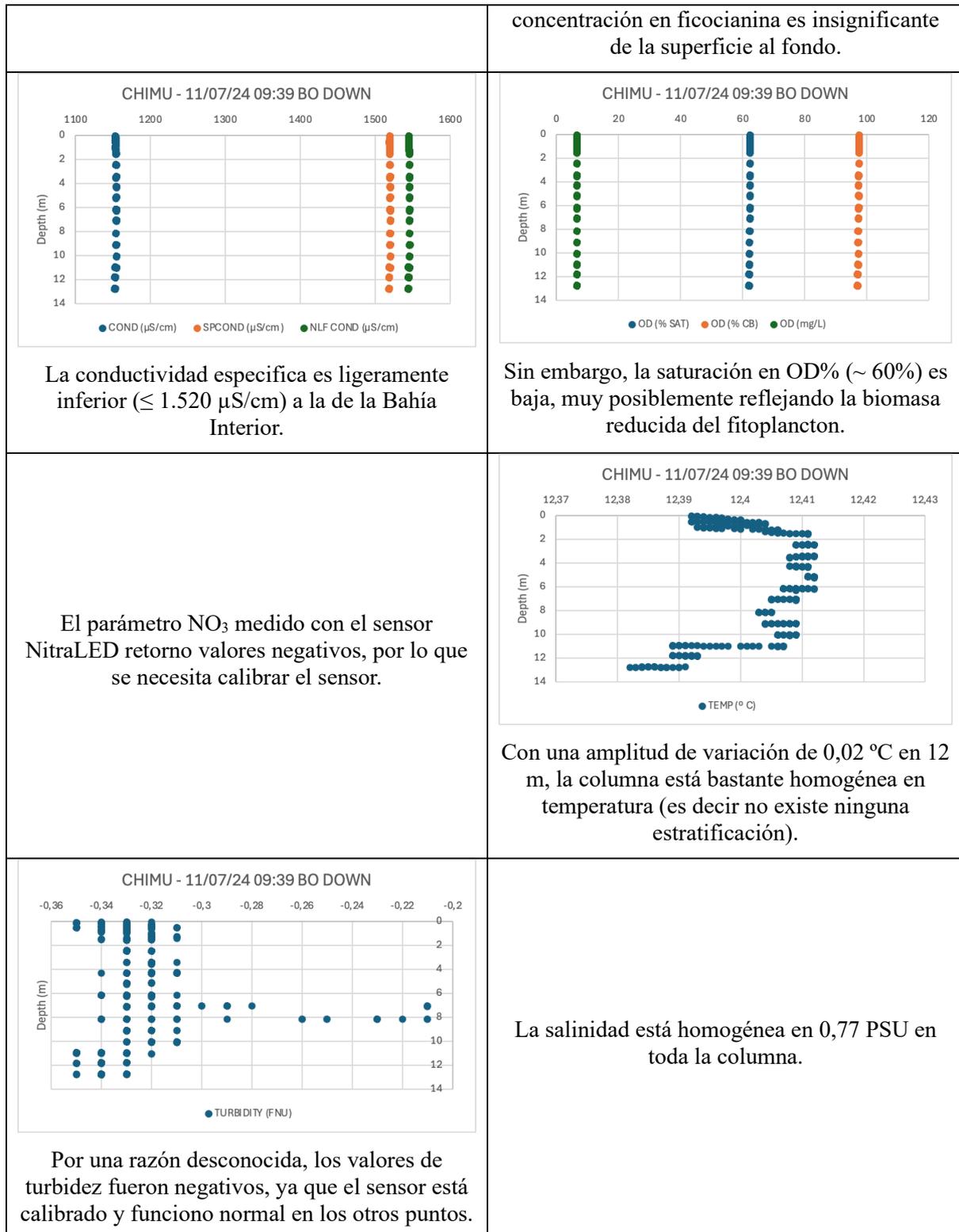


Figura 7 – Perfiles verticales en bajada de los parámetros en el punto BExt12 - Chimu.

**Nota de advertencia:** ¡No usar los valores obtenidos durante esta subida de la sonda EXO2!

**Nota importante:** Se identificó un artefacto entre 12 y 14 m de profundidad (ver gráficos de la Fig. 8 abajo). Durante el ascenso, se registraron altos valores de clorofila-*a*, ficocianina

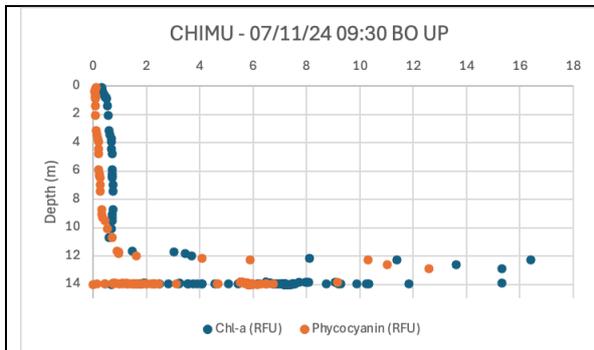


y nitrato ( $\text{NO}_3$ ), así como bajos niveles de oxígeno disuelto (OD). Sin embargo, estos valores **no coinciden** con las mediciones obtenidas en el descenso, donde se observó agua clara.

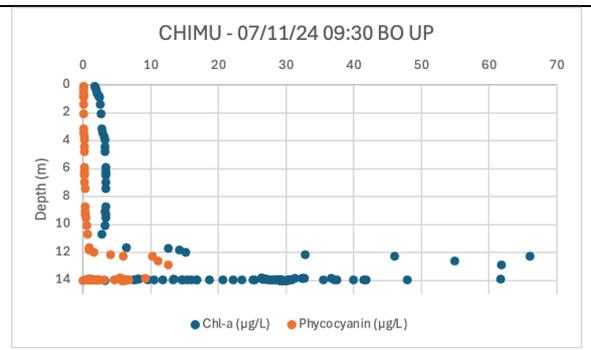
En la bajada, se evitó que la sonda EXO2 tocara el fondo, por lo que no se levantó fitobentos. Es probable que los valores elevados de **clorofila-a** ( $> 60 \mu\text{g/L}$ ) y **ficocianina** ( $> 15 \mu\text{g/L}$ ) en el fondo fueran causados por el **reposicionamiento del ancla o de la draga de sedimento**, los cuales fueron lanzados desde la popa del buque cerca del perfil vertical de la sonda EXO2. Este movimiento posiblemente **removió sedimentos y fitobentos**, generando una nube en suspensión. Por lo tanto, no hay que considerar estos datos generados a la subida (ver los gráficos abajo).

Entre **12 y 14 m de profundidad**, dentro de esta nube de sedimento fino y microalgas, se detectaron **concentraciones de  $13 \mu\text{g/L}$  de ficocianina y  $65 \mu\text{g/L}$  de clorofila-a**, lo que sugiere que el sedimento **alberga una importante reserva de cianobacterias en el fitobentos**.

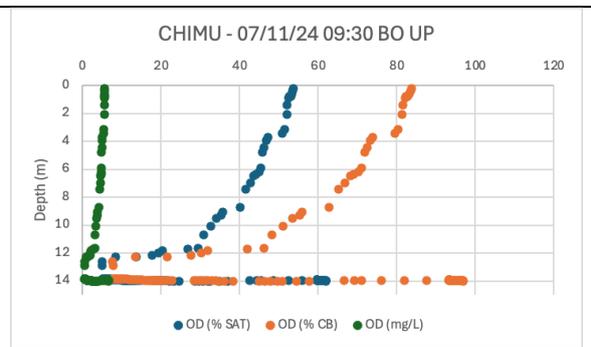
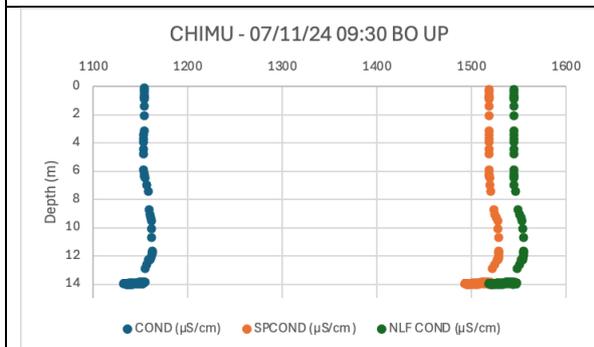
Esto es particularmente **preocupante** debido a la cercanía de la **tubería de la estación de bombeo de agua potable para Puno**. Si se produce una **mezcla vertical** a causa del viento, estas cianobacterias podrían **colonizar la columna de agua y complicar el tratamiento del agua bombeada**. En ese contexto es recomendable realizar un **monitoreo permanente** de las concentraciones de **clorofila-a y ficocianina**. En caso de valores elevados, se debe realizar un **análisis microscópico** para identificar la composición de las microalgas del fitoplancton, y realizar un tratamiento más profundo.



No comparar los valores en base a RFU.



Es posible que el pico entre 12 y 14 m proviene de una interferencia con el manejo del ancla y/o de la draga que levanta las partículas de sedimento y las microalgas del fitobentos.



La baja saturación de OD% (~anoxia) próximo al fondo muy posiblemente proviene de la

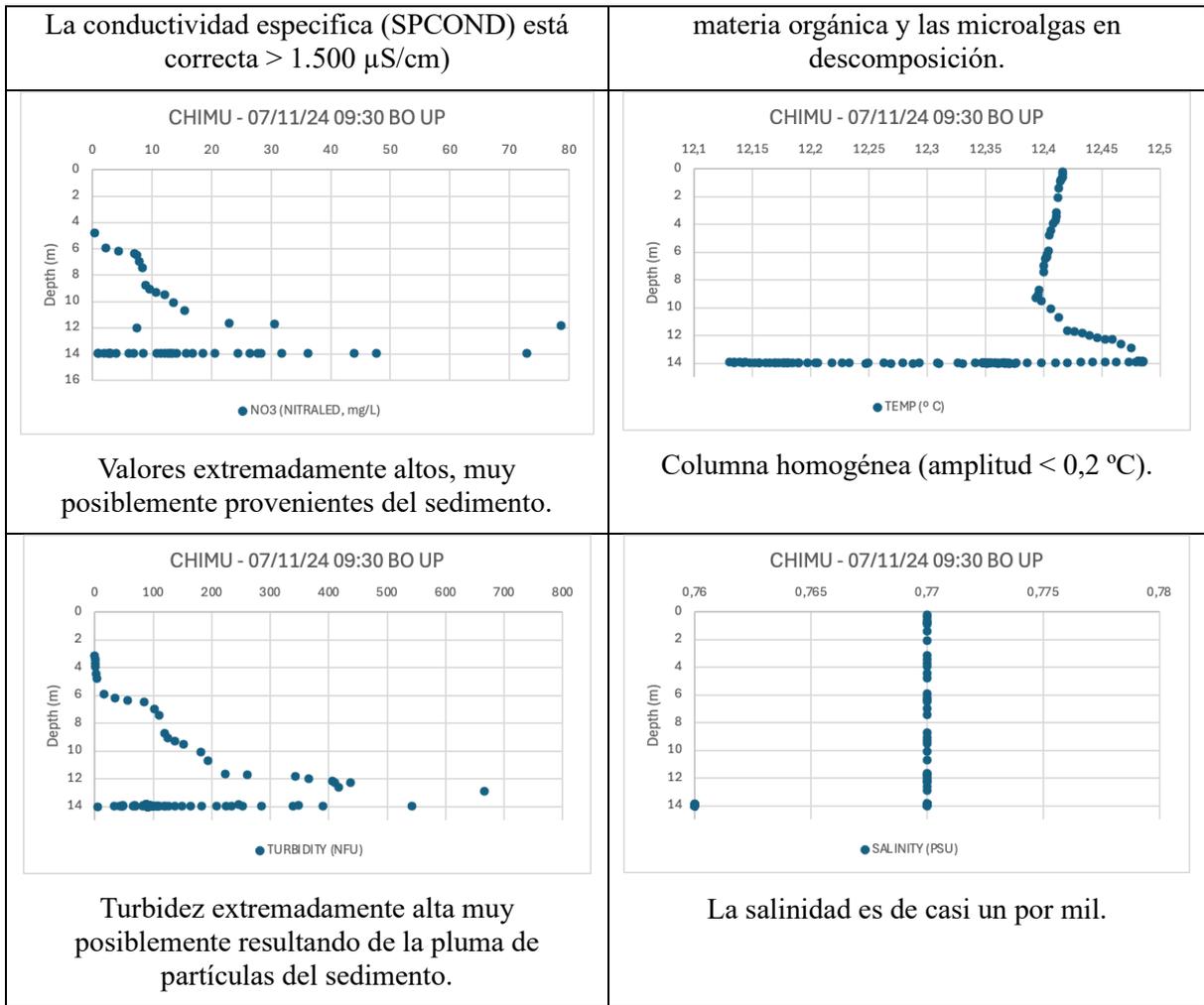


Figura 8: Perfiles verticales en subida de los parámetros en el punto BExte12 - Chimu.

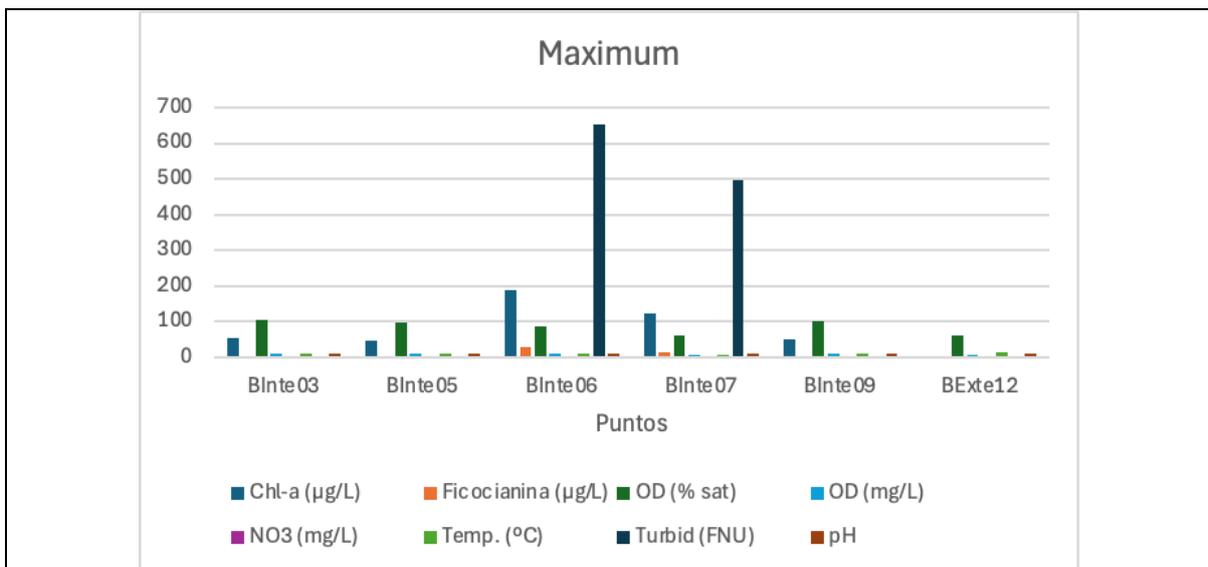
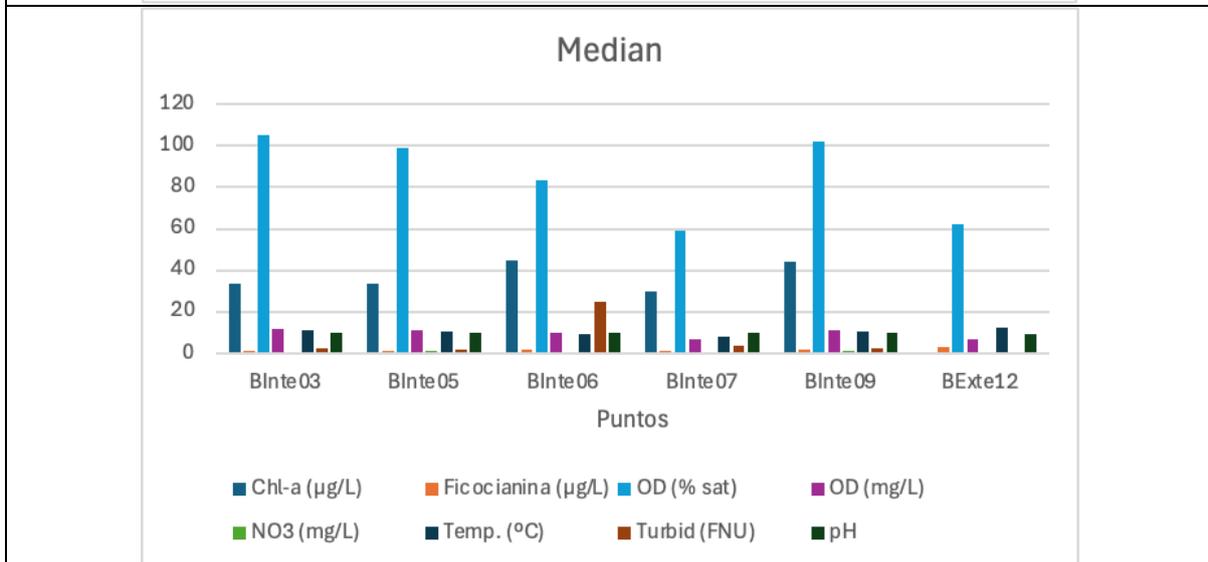
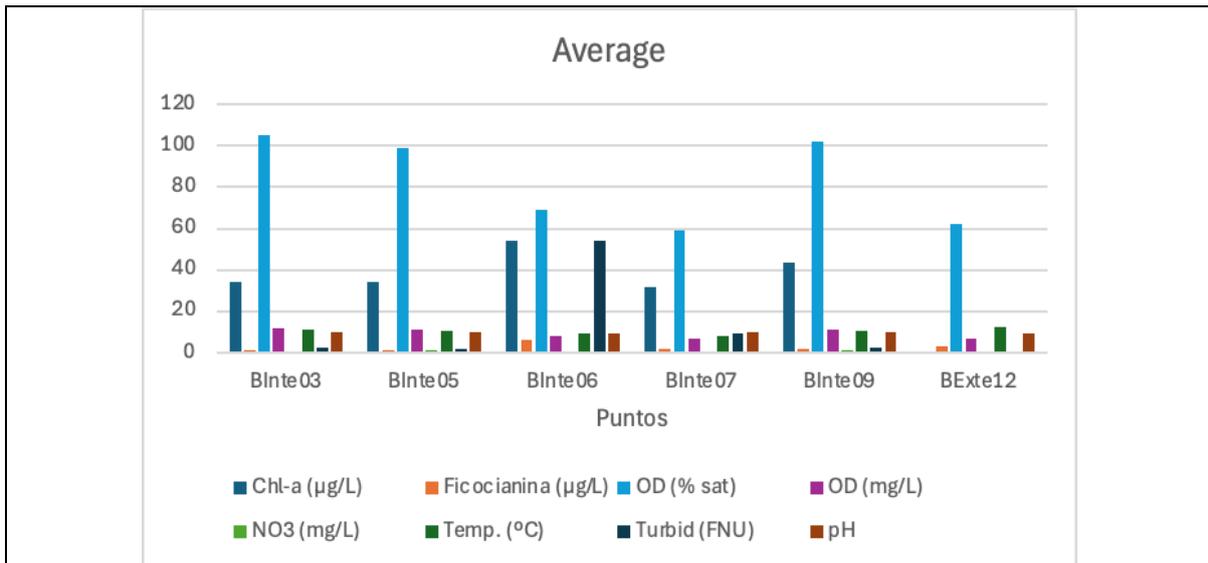


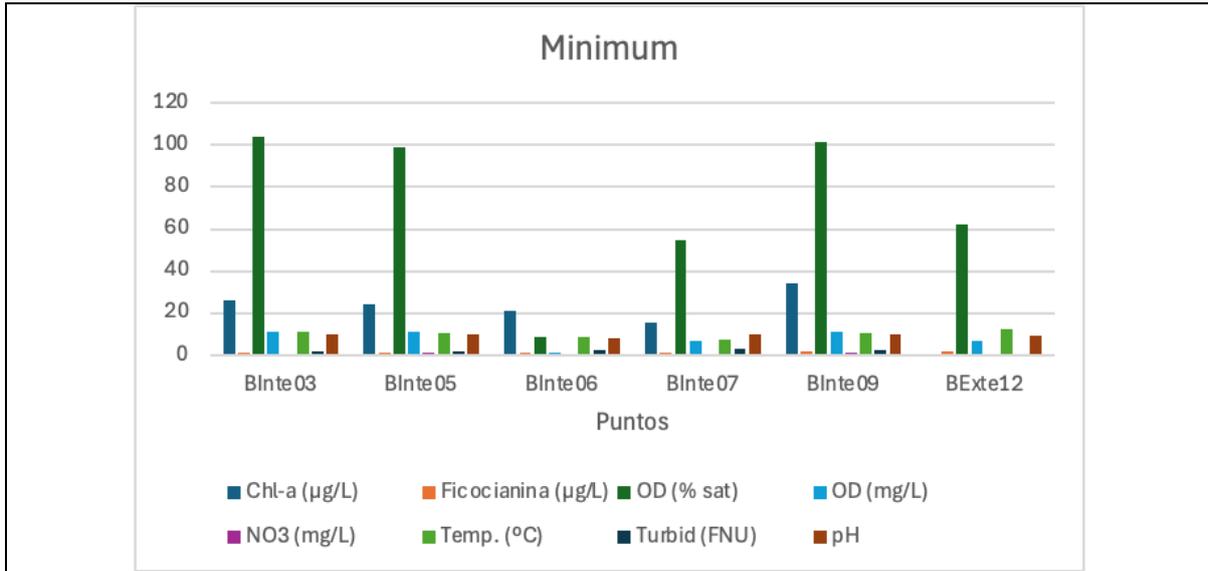
**Tabla 4: Síntesis de los valores estadísticos de los parámetros medidos por la sonda EXO2 para cada punto de la campaña.**

Punto	Estadísticas	Chl-a (µg/L)	Fico (µg/L)	SpCond (µS/cm)	OD (% sat.)	OD (mg/L)	NO <sub>3</sub> (mg/L)	Temp. (°C)	Turbid (FNU)	pH
BInte03	media	34,18	1,43	1787	105	11,48	0,84	11,15	2,12	9,89
	mediana	33,55	1,44	1787	105	11,48	0,84	11,14	2,11	9,89
	máx.	52,87	1,50	1789	105	11,52	0,94	11,18	2,25	9,89
	mín.	26,11	1,21	1784	104	11,40	0,76	11,11	2,02	9,89
BInte05	media	34,03	1,45	1794	98,93	10,90	1,09	10,79	2,05	9,85
	mediana	33,79	1,45	1794	99,00	10,90	1,09	10,80	2,02	9,85
	máx.	48,15	1,51	1795	99,10	10,94	1,27	10,83	2,28	9,85
	mín.	24,23	1,38	1793	98,70	10,86	0,98	10,74	1,90	9,85
BInte06	media	54,40	6,36	1790	69,01	7,91	-	9,07	54,06	9,27
	mediana	44,78	2,06	1799	83,15	9,64	-	9,01	24,53	9,88
	máx.	188,93	27,81	1816	87,90	10,00	-	9,44	653,89	9,89
	mín.	21,35	1,17	1721	8,90	1,03	-	8,54	2,26	7,90
BInte07	media	31,93	1,49	1809	58,89	6,97	-	7,76	9,15	9,76
	mediana	29,53	1,42	1809	59,30	7,02	-	7,75	3,53	9,76
	máx.	124,30	13,58	1814	61,90	7,28	-	8,01	495,60	9,78
	mín.	15,65	1,04	1804	54,70	6,51	-	7,58	3,03	9,74
BInte09	media	43,27	1,91	1818	101,83	11,24	1,15	10,70	2,55	9,84
	mediana	44,31	1,91	1818	101,80	11,24	1,15	10,70	2,53	9,84
	máx.	52,15	1,94	1819	102,20	11,29	1,19	10,72	2,70	9,84
	mín.	34,19	1,86	1818	101,50	11,21	1,06	10,67	2,46	9,83
BExte12	media	2,74	0,04	1519	62,26	6,62	-0,29	12,40	-0,32	9,04
	mediana	3,03	0,03	1519	62,30	6,62	-0,29	12,41	-0,33	9,04
	máx.	3,71	0,15	1520	62,40	6,63	-0,26	12,41	-0,21	9,06
	mín.	1,51	0,00	1518	62,00	6,59	-0,31	12,38	-0,35	9,03

**Notas:** \* Los valores negativos de NO<sub>3</sub> y turbidez en rojo indican que están por debajo del umbral de detección de los sensores. \*\* Los valores de pH en rojo son poco confiables ya que la validez del módulo de reemplazo del sensor de pH estaba vencida, solo dura 6-9 meses. Se recomienda reemplazar los módulos de OD de las dos sondas YSI-EXO2 en el distribuidor BASE FLOW de XYLEM Inc. (Miami, USA). Las nuevas soluciones de calibración para los sensores de pH, ORP, conductividad y turbidez, recién fueran adquiridas de BASE FLOW por la ALT.

Los gráficos abajo sintetizan las medias, las medianas, los máximos y los mínimos de los parámetros por cada punto.

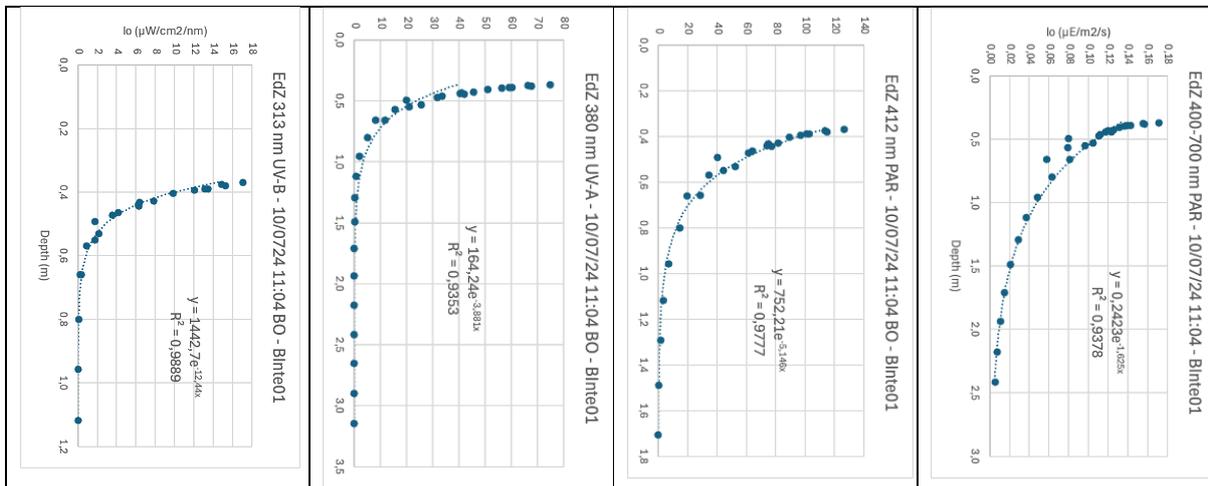




**Figura 9** – Valores promedio, medianos, máximos y mínimos de los parámetros por cada punto de la Bahía Interior de Puno (BInte03 a BInte09) y del punto frente a la estación de bombeo de Chimu (BExte12), a la salida del canal de Chimu, en la Bahía Exterior de Puno. Las unidades en el eje vertical son las indicadas al lado de la leyenda de los parámetros (abajo)

## 9.- Atenuación vertical de la penetración de las radiaciones solares incidentes ultravioletas (UV-B, UV-A) y fotosintéticamente activa (PAR) por el espectro radiómetro C-OPS

**Punto BInte01** archivo <001\_240710\_110207\_URC\_BInte01.xlsx>

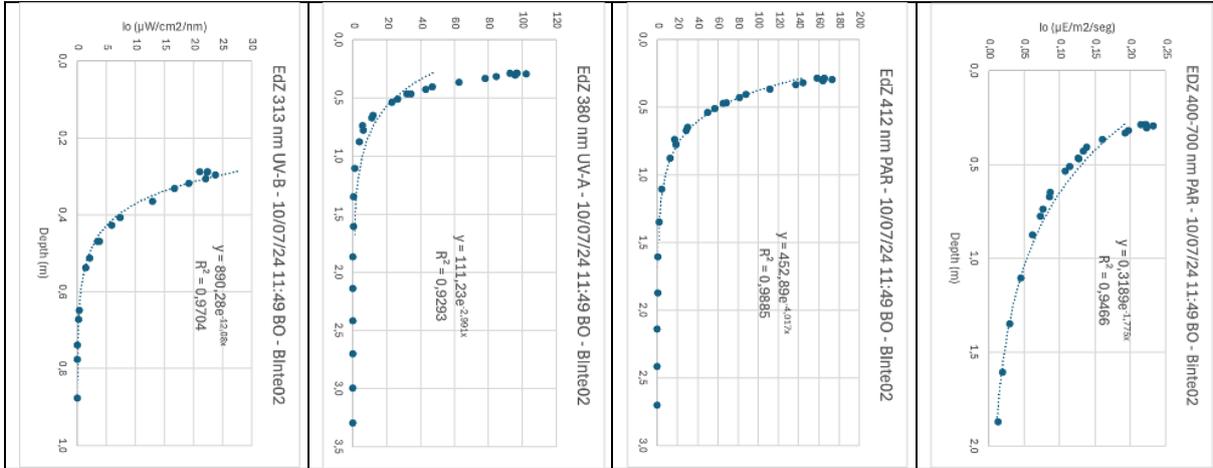


El orden de profundidades crecientes de atenuación ( $Z_{1\%}$ ) de las radiaciones es: UV-B < UV-A < PAR. Los ajustes exponenciales son excelentes con  $R^2 > 0,9$ . El eje vertical es la profundidad y el eje horizontal corresponde a la intensidad de la radiación solar (en  $\mu W/cm^2/nm$  para las longitudes de onda de 313, 380 y 412 nm; y en  $\mu E/m^2/s$  para las longitudes 400-700 nm). Se observó lo propio en cada uno de los puntos.

**Figura 10** – Perfiles verticales de atenuación de las radiaciones solares, con sus ecuaciones, en el punto BInte01.

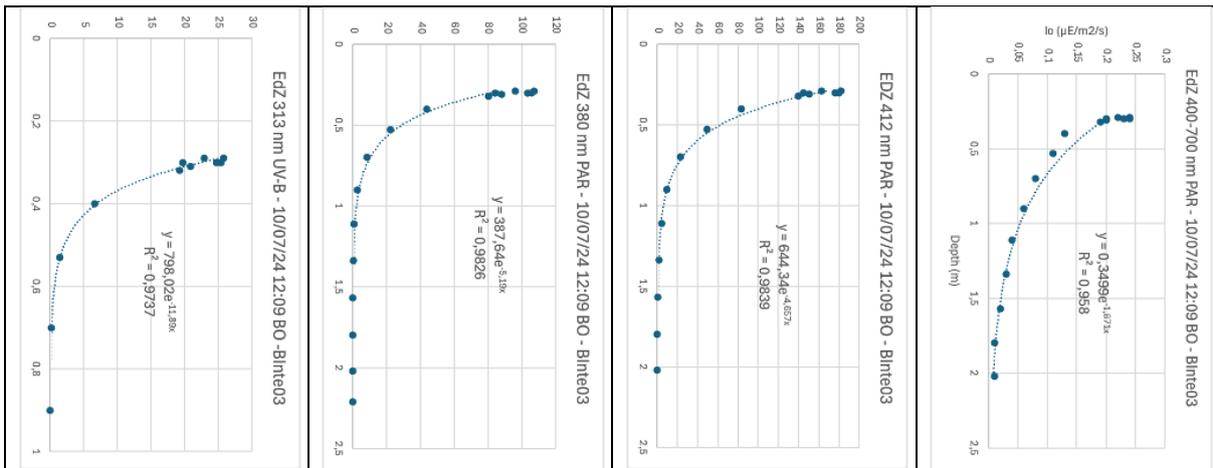


**Punto BInte02** archivo <004\_240710\_114957\_URC\_BInte02.xlsx>



**Figura 11** – Perfiles verticales de atenuación de las radiaciones solares, con sus ecuaciones, en el punto BInte02.

**Punto BInte03** archivo <002\_240710\_120906\_URC\_BInte03.xlsx>



**Figura 12** – Perfiles verticales de atenuación de las radiaciones solares, con sus ecuaciones, en el punto BInte03.

**Punto BInte04** archivo <001\_240710\_130919\_URC\_BInte04.xlsx>

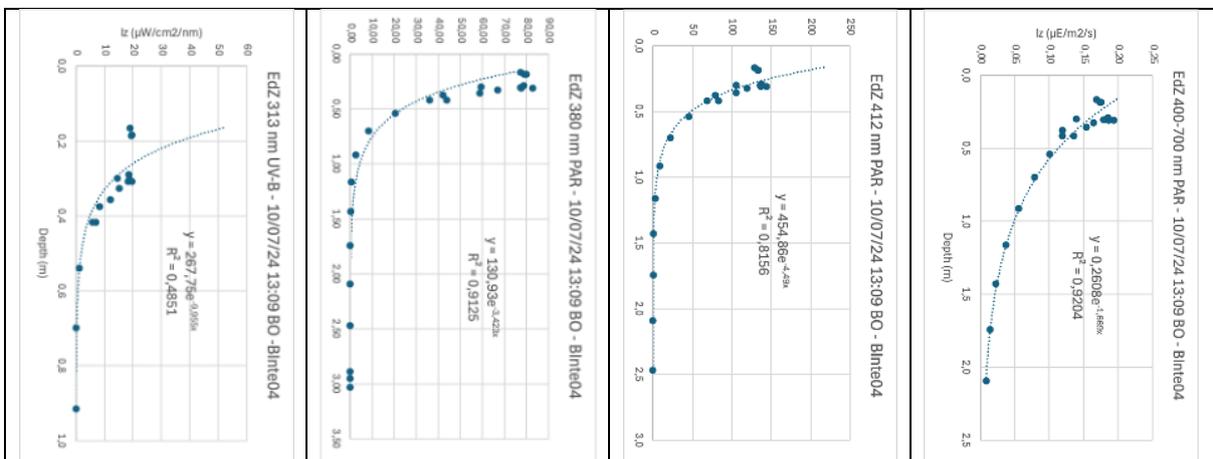




Figura 13 – Perfiles verticales de atenuación de las radiaciones solares, con sus ecuaciones, en el punto BInte04.

**Punto BInte05** archivo<001\_240710\_135601\_URC\_BInte05.xlsx>

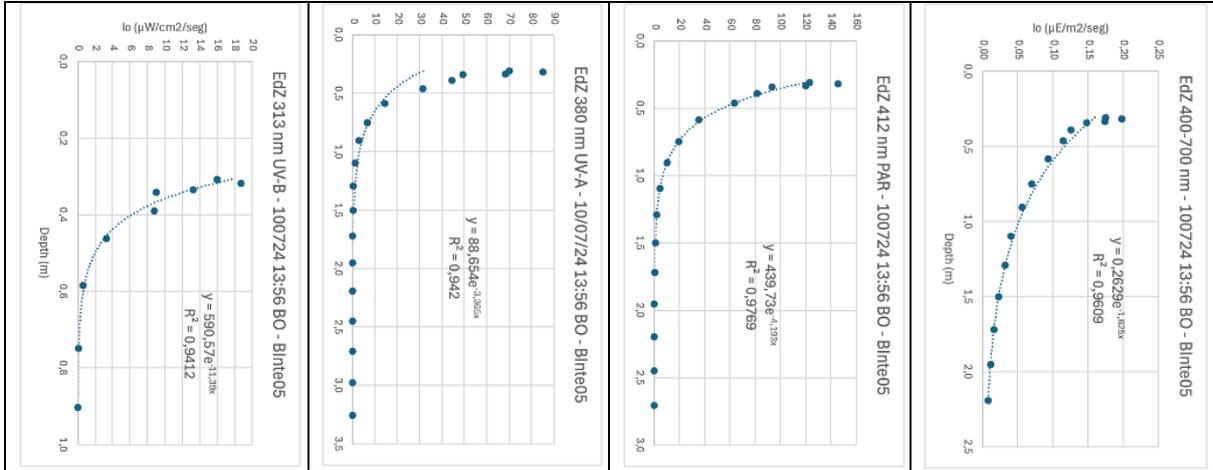


Figura 14 – Perfiles verticales de atenuación de las radiaciones solares, con sus ecuaciones, en el punto BInte05.

**Punto BInte07** archivo <001\_240711\_105904\_URC\_BInte07.xlsx>

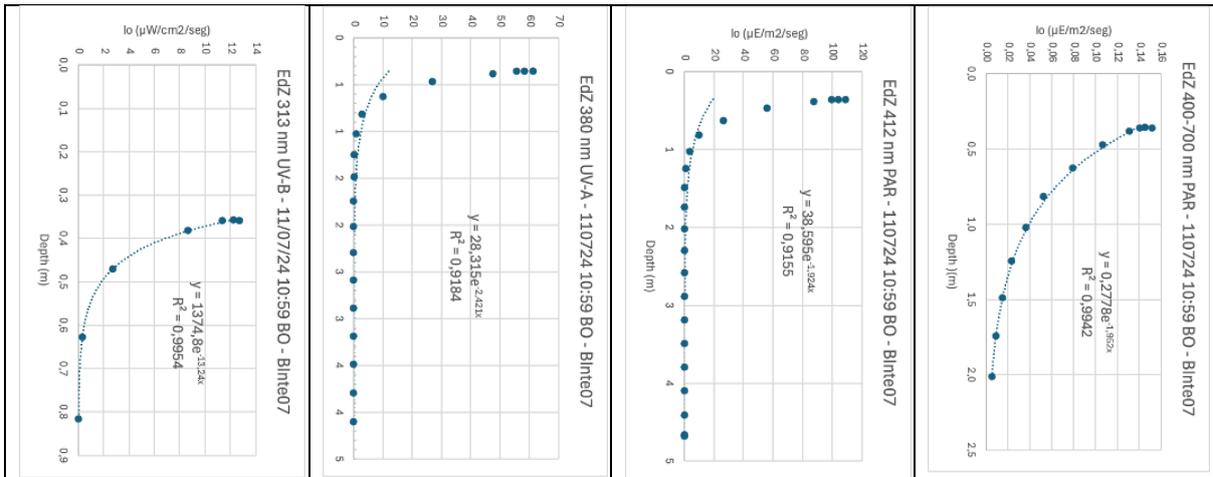
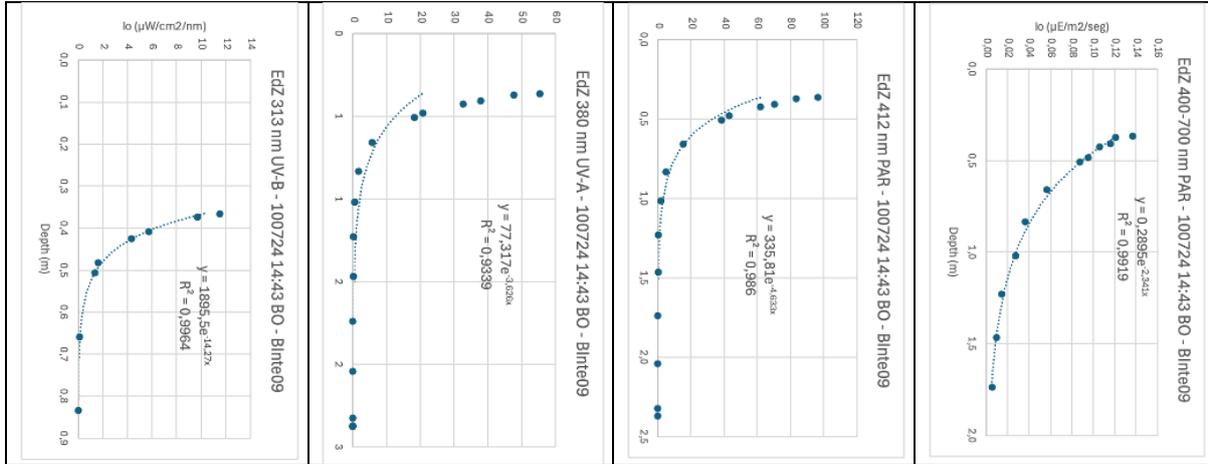


Figura 15 – Perfiles verticales de atenuación de las radiaciones solares, con sus ecuaciones, en el punto BInte07.

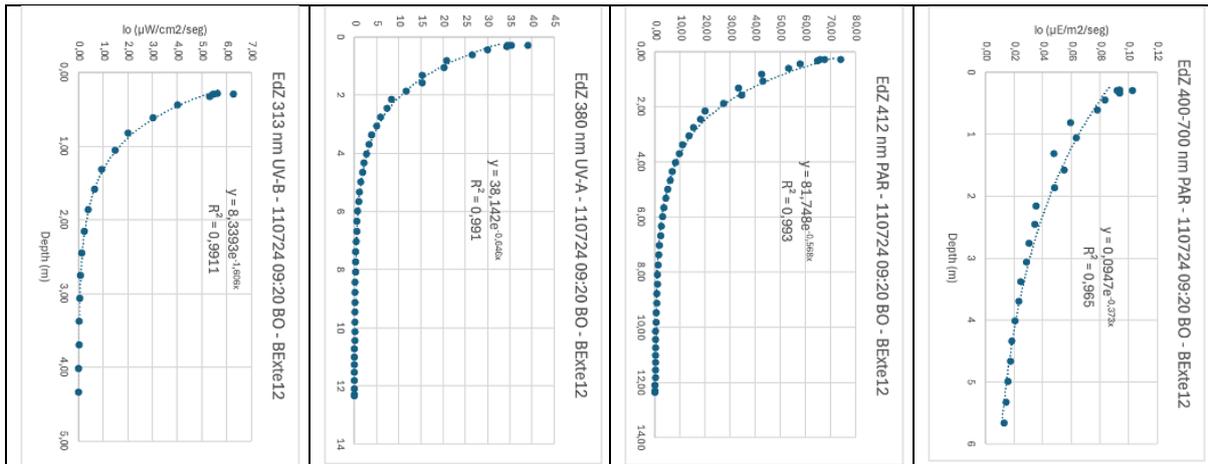


**Punto BInte09** archivo <003\_240710\_144304\_URC\_BInte09.xlsx>



**Figura 16** – Perfiles verticales de atenuación de las radiaciones solares, con sus ecuaciones, en el punto BInte09.

**Punto BExte12 - Chimu** (Bahía Exterior de Puno, frente a la estación de bombeo de agua) archivo <002\_240711\_092008\_URC\_BExte12.xlsx>



**Figura 17:** Perfiles verticales de atenuación de las radiaciones solares, con sus ecuaciones, en el punto BExte12 - Chimu.

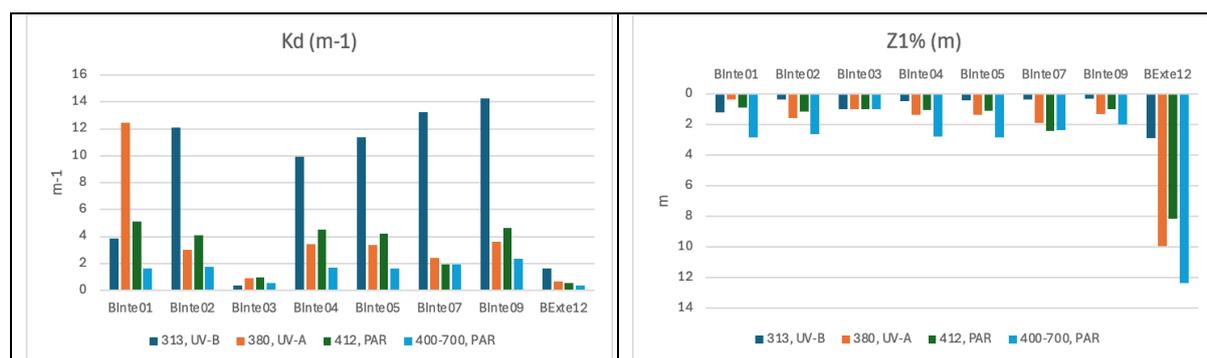
**Tabla 5** – Síntesis de los valores estadísticos de los parámetros medidos por el espectrorradiómetro C-OPS para cada punto de la campaña.

Punto	Fecha Hora (BO)	Longitud de onda (nm)	I0 (μW/cm <sup>2</sup> /nm o μE/m <sup>2</sup> /seg)	Kd (m <sup>-1</sup> )	Z <sub>1%</sub> (m) = 4,61 / Kd	R <sup>2</sup>
BInte01	10/07/24 11:04	313, UV-B	164,24	3,881	1,19	0,9353
		380, UV-A	1442,7	12,44	0,37	0,9889
		412, PAR	752,21	5,146	0,90	0,9777
		400-700, PAR	0,2423	1,625	2,84	0,9378
BInte02	10/07/24 11:49	313, UV-B	890,28	12,08	0,36	0,9704
		380, UV-A	111,23	2,991	1,54	0,9293
		412, PAR	452,89	4,071	1,13	0,9885
		400-700, PAR	0,3189	1,775	2,60	0,9466
BInte03	10/07/24 12:09	313, UV-B	11,89	0,39	0,97	798,02
		380, UV-A	5,19	0,89	0,98	387,64
		412, PAR	4,657	0,99	0,98	644,34
		400-700, PAR	1,871	0,54	0,96	0,3499



Punto	Fecha Hora (BO)	Longitud de onda (nm)	I0 ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ o $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{seg}$ )	Kd ( $\text{m}^{-1}$ )	Z1% (m) = $4,61 / \text{Kd}$	R <sup>2</sup>
BInte04	10/07/24 13:09	313, UV-B	267,75	9,955	0,46	0,4851
		380, UV-A	130,93	3,423	1,35	0,9125
		412, PAR	454,86	4,49	1,03	0,8156
		400-700, PAR	0,2608	1,669	2,76	0,9204
BInte05	10/07/24 13:56	313, UV-B	590,57	11,39	0,40	0,9412
		380, UV-A	88,654	3,365	1,37	0,942
		412, PAR	439,73	4,193	1,10	0,9769
		400-700, PAR	0,2629	1,625	2,84	0,9609
BInte07	11/07/24 10:59	313, UV-B	1374,8	13,24	0,35	0,9954
		380, UV-A	28,315	2,421	1,90	0,9184
		412, PAR	38,595	1,924	2,40	0,9155
		400-700, PAR	0,2778	1,952	2,36	0,9942
BInte09	10/07/24 14:43	313, UV-B	1895,5	14,27	0,32	0,9964
		380, UV-A	77,317	3,626	1,27	0,9339
		412, PAR	335,81	4,633	1,00	0,986
		400-700, PAR	0,2895	2,341	1,97	0,9919
BExte12	11/07/24 09:20	313, UV-B	8,3393	1,606	2,87	0,991
		380, UV-A	38,142	0,646	9,92	0,9911
		412, PAR	81,748	0,568	8,12	0,993
		400-700, PAR	0,0947	0,373	12,36	0,965

La Tabla arriba sintetiza las características ópticas de los puntos, graficadas en la Fig. 18 abajo.



**Figura 18:** Valores del coeficiente de atenuación ( $K_d$ ) y de la profundidad de extinción ( $z_{1\%}$ ) para distintas longitudes de onda (UV-B, UV-A y PAR) en los puntos de la Bahía Interior de Puno (BIP) y en el punto BExte12, ubicado frente a la estación de bombeo de Chimu, en la Bahía Exterior de Puno (BEP).

En el gráfico a izquierda, se comparan los valores del coeficiente de atenuación ( $K_d$ , en  $\text{m}^{-1}$ , en el eje vertical) para las radiaciones UV-B, UV-A y PAR en los distintos puntos de muestreo. En el gráfico a derecha, se presentan las profundidades de extinción ( $z_{1\%}$ , en m, en el eje vertical con valores en orden creciente de arriba hacia abajo) para estas radiaciones, lo que permite una interpretación más sencilla de la profundidad de atenuación lumínica en cada estación.

Se observa que, en todos los puntos de muestreo, la radiación PAR es la que penetra a mayor profundidad.

En la Bahía Exterior, especialmente en el punto BExte12 frente a la estación de bombeo de Chimu, la gran transparencia del agua es evidente:

- La radiación PAR alcanza más de 12 m de profundidad, lo que indica una alta penetración de la luz.
- La radiación UV-B penetra hasta más de 2 m, y
- La radiación UV-A llega hasta 10 m.



Estos valores, junto con las **bajas concentraciones de clorofila-*a*** ( $\leq 1,5 \mu\text{g/L}$  en superficie y  $\leq 3,5 \mu\text{g/L}$  al fondo), confirman el carácter **oligotrófico** del agua, lo que es **ideal para el abastecimiento de agua potable**.

## 10.- CONCLUSIONES

- La evaluación limnológica realizada en la **Bahía Interior de Puno (BIP)** confirma su **estado crítico de hiper-eutrofización**, con **niveles extremadamente elevados de clorofila-*a* y ficocianina**, lo que evidencia una proliferación incontrolada de fitoplancton, especialmente cianobacterias. Las concentraciones de clorofila-*a* en la BIP superan los  $190 \mu\text{g/L}$ , comparadas con valores históricamente bajos ( $<3 \mu\text{g/L}$ ) registrados hace medio siglo. Este ecosistema, que alguna vez proporcionó servicios ambientales y económicos clave, ha perdido su capacidad natural de autorregulación y ahora funciona como una laguna de decantación debido a la ausencia de macrófitas acuáticas y la continua descarga de aguas residuales sin tratar.
- En contraste, la **Bahía Exterior de Puno (BEP)**, específicamente en el punto BExte12 frente a la **estación de bombeo de Chimu**, mantiene características **oligotróficas** con niveles de clorofila-*a* entre  $1.5$  y  $3.5 \mu\text{g/L}$ . Sin embargo, el monitoreo ha identificado la **presencia de ficocianina en los sedimentos**, lo que podría representar un **riesgo ambiental y sanitario** si estas **cianobacterias** se resuspenden en la columna de agua.
- Los parámetros registrados por la sonda EXO2, especialmente los niveles de clorofila-*a* ( $> 25 \mu\text{g Chl-}a/\text{L}$  en superficie, hasta  $60 \mu\text{g Chl-}a/\text{L}$  en profundidad, e incluso superiores a  $190 \mu\text{g Chl-}a/\text{L}$ ), junto con la ficocianina ( $\leq 3 \mu\text{g Fico/L}$ ), confirman que **todos los puntos de la Bahía Interior de Puno (BIP) presentan condiciones de hiper-eutrofización**, según los índices de Carlson (1977), Carlson & Simpson (1996) y la clasificación de la OCDE (1982). Sin embargo, estos valores podrían estar **subestimados**, ya que la fotosíntesis ocurre durante el día (momento del muestreo), mientras que la duplicación celular del fitoplancton y el aumento de biomasa suelen darse durante la noche, lo que podría incrementar aún más la concentración real de clorofila-*a*. Sin embargo, la presencia de **ficocianina en el fitobentos del sedimento** y la proximidad de la desembocadura del canal que transporta aguas de las **islas flotantes turísticas de los Uros** (zona con alto tráfico de embarcaciones) podrían representar un **riesgo ambiental y sanitario**. Por esta razón, **se recomienda un monitoreo continuo** de la calidad del agua y una **adaptación del tratamiento del agua bombeada**, en función de los resultados de los análisis químicos.
- La **crisis ambiental en la BIP es irreversible** a corto plazo sin intervenciones drásticas. Su degradación ha impactado la biodiversidad, el turismo y la salud pública, convirtiéndola en una fuente de contaminación con efectos socioeconómicos negativos para la región.
- En la **Bahía Interior de Puno (BIP)**, los coeficientes de atenuación ( $K_d$ ) y las profundidades de extinción de la energía solar ( $z_{1\%}$ ), calculados a partir de las mediciones del espectraloradiómetro C-OPS, indican que la radiación fotosintéticamente activa (PAR) alcanza el fondo ( $\geq 3 \text{ m}$ ). Esto significa que la zona eufótica abarca toda la columna de



agua, lo que favorece el crecimiento de una alta biomasa de fitoplancton. Por otro lado, las radiaciones ultravioletas (UV-B y UV-A) solo penetran hasta 1-2 m, limitando el desarrollo del fitoplancton en la capa superficial. No obstante, las **cianobacterias** más resistentes, capaces de flotar y fijar nitrógeno atmosférico (N<sub>2</sub>), podrían proliferar en condiciones favorables.

- En la **Bahía Exterior, frente a la estación de bombeo de Chimu**, la transparencia del agua es significativamente mayor. La radiación PAR alcanza profundidades de  $\geq 12$  m, la UV-B penetra hasta  $\sim 3$  m y, sorprendentemente, la UV-A llega hasta  $\sim 10$  m, lo que sugiere una menor presencia de partículas en suspensión y fitoplancton en esta zona.
- La **situación es crítica**. Los resultados de esta campaña de medición confirman un **deterioro extremo e irreversible** en el funcionamiento ecológico de la Bahía Interior de Puno (BIP), alcanzando un nivel de hiper-eutrofización sin precedentes. Este **colapso ambiental** se debe principalmente a las descargas constantes de aguas residuales domésticas no tratadas, provenientes de diversas fuentes puntuales y difusas de la ciudad de Puno. Para dimensionar la magnitud del problema, basta comparar los niveles históricos de clorofila-*a* con los valores actuales. Hace medio siglo, las concentraciones eran de  $\leq 1,5$   $\mu\text{g Chl-}a/\text{L}$  en el norte del Lago Mayor (1973, 1981-1982) y  $\leq 3$   $\mu\text{g Chl-}a/\text{L}$  en el Lago Menor (1979-1980) (Richerson et al. 1986; Lazzaro 1981; Richerson et al. 1992). Hoy, estas cifras han aumentado de manera alarmante, acompañadas por la presencia de ficocianina, lo que evidencia un ecosistema profundamente alterado.
- La **BIP** ya no puede considerarse un ecosistema natural. Se ha convertido en un **entorno completamente antropizado**, caracterizado por **floraciones permanentes de fitoplancton** con biomasas equivalentes a las de lagunas de decantación de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs). La ausencia total de macrófitas acuáticas, que en condiciones naturales actuarían como un filtro biológico, ha agravado aún más este proceso de eutrofización.
- Dado que la **PTAR de Espinar** ha dejado de funcionar hace décadas, la BIP ha asumido, en la práctica, el papel de planta de tratamiento de aguas residuales de Puno, recibiendo sin filtro ni control la carga contaminante de toda la ciudad.

## 11.- RECOMENDACIONES

- Es **imprescindible abordar la recuperación de la Bahía Interior de Puno (BIP)** desde una perspectiva integral, **combinando urbanismo y restauración ambiental** para optimizar los recursos y la coordinación institucional **en beneficio de la población**. Es alarmante haber permitido que la contaminación y la eutrofización alcancen este nivel crítico, exacerbado por los efectos del cambio climático, como el descenso progresivo del nivel del lago tras una década de sequía.
- Resulta paradójico que, en una ciudad donde **el turismo es una de las principales actividades económicas**, el Lago Titicaca sea ignorado y descuidado tanto por la autoridad regional como del gobierno central, cuando precisamente debería ser su mayor



atractivo. El litoral de Puno, y en particular el Puerto Muelle, cercano al punto BInte01, constituye el principal (y casi único) punto de acceso de los turistas hacia las islas flotantes de los Uros. Este espacio podría convertirse en un verdadero ícono turístico si se implementaran mejoras adecuadas.

- Para revertir esta situación, es **indispensable financiar proyectos urbanísticos innovadores y visionarios**, estrechamente vinculados a la restauración de la calidad ambiental de la BIP. Un enfoque ambicioso y coordinado permitirá no solo recuperar el ecosistema de la bahía, sino también potenciar el turismo y dinamizar la economía local, devolviendo a Puno y al Lago Titicaca el protagonismo que merecen.
- **Monitoreo Permanente:** Implementar un **sistema de vigilancia continua** para detectar floraciones algales extremas, especialmente aquellas dominadas por cianobacterias potencialmente tóxicas. Se recomienda el uso de **imágenes satelitales** (Sentinel-2 y Sentinel-3) para un monitoreo remoto y más eficiente, complementado con **campañas de muestreo *in situ* solo cuando se detecten eventos críticos**.
- **Implementación de Tecnología de Remediación:** Aplicar tecnologías innovadoras entre ellas la **aplicación de filtros verdes**, como la **aplicación de ozono y oxígeno con irradiación ultravioleta** para eliminar microorganismos dañinos y reducir la carga de materia orgánica. Para lograr una recuperación efectiva, estas intervenciones deben acompañarse de la **eliminación progresiva de fuentes de contaminación**.
- **Gestión de Aguas Residuales:** Es fundamental la construcción de una **nueva Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)** eficiente. Mientras tanto, se deben implementar **humedales artificiales** (construidos) con macrófitas para el filtrado biológico de los vertidos antes de su ingreso a la bahía.
- **Cooperación Binacional y Capacitación:** Se recomienda la creación de un **equipo interdisciplinario de monitoreo integrado** por instituciones como IMARPE, PELT, ANA, ALT, la Municipalidad Provincial del Puno (MPP), para compartir conocimientos y estrategias de mitigación ambiental.
- Estas acciones son **esenciales para evitar el colapso definitivo** del ecosistema de la Bahía Interior de Puno y garantizar la sostenibilidad del Lago Titicaca como fuente de vida y desarrollo para la región, así como para prevenir la contaminación de la fuente de captación de agua potable, Chimu.

## 12.- LITERATURA CITADA

- Beltrán Farfán, D.F., Palomino Calli, P.P., Moreno Terrazas, E.G., Gamarra Peralta, C., Montesinos-Tubée, D.B. (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.
- Carlson, E. (1977) A trophic state index for lakes. Limnology & Oceanography 22(2), 361-369.
- Carlson, R.E. & Simpson, J. (1996) A Coordinator's Guide to Volunteer Lake Monitoring Methods. North American Lake Management Society. 96 pp.
- Komárková, J., Montoya, H. & Komárek, J. (2016) Cyanobacterial water bloom of *Limnospira robusta* in the Lago Mayor of Lake Titicaca. Can it develop? Hydrobiologia 764: 249–258.



- Lazzaro, X. (1981) Biomasses, peuplements phytoplanktoniques et production primaire du lac Titicaca. *Rev. Hydrob. Trop.* 14(4): 349-380.
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) (1982) Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. Final Report. OECD Cooperative programme on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control), Environment Directorate, OECD, Paris, 154 p.
- Richerson, P.J., Widmer, C. & Kittel, T. (1977) The limnology of Lake Titicaca (Peru-Bolivia), A large, high-altitude tropical lake. Institute of Ecology Publication #14, University of California, Davis, USA, June 1977, 43 p.
- Richerson, P.J., Neale, P.J., Alfaro Tapia, R., Carney, H.J., Lazzaro, X., Vincent, W. & Wurtsbaugh, W. (1992) Patterns of planktonic primary production and algal biomass. In: Dejoux, C. & Iltis, A. Eds., *Lake Titicaca – A Synthesis of Limnological Knowledge*. Kluwer Academic Publishers. ISBN 0-7923-1663-0, 196-217.
- Richerson, P.J., Neale, P.J., Wurtsbaugh, W., Alfaro, R.T. & Vincent, W. (1986) Patterns of temporal variation in Lake Titicaca. A high-altitude tropical lake. I. Background, physical and chemical processes, and primary production. *Hydrobiologia* 138: 205-220.
- Northcote, T.G. (1979) Investigation and recommendations on the hydrobiological resources of the Lake Titicaca system, Peru. Report FAO.OPER.76.022, 156 p.
- Northcote, T.G. (1991) Eutrophication and pollution problems. In: Dejoux, C. & Iltis, A., Eds. *Lake Titicaca – A Synthesis of Limnological Knowledge*. Kluwer Academic Publishers, 626 p.
- Northcote, T.G., Morales S., P., Levy, D.A. & Greaven, M.S., Eds. (1991) *Contaminación en el Lago Titicaca, Perú: Capacitación, Investigación y Manejo*. Westwater Research Centre, University of British Columbia, Vancouver, Canada; Instituto de Aguas Alto Andinas, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, 278 p. ISBN/ISSN/DL: 978-0-920146-38-5.
- Richerson, P.J., Neale, P.J., Wurtsbaugh, W., Alfaro, R.T. & Vincent, W. (1986) Patterns of temporal variation in Lake Titicaca. A high-altitude tropical lake. I. Background, physical and chemical processes, and primary production. *Hydrobiologia* 138: 205-220.
- Ryding, S.-O. & Rast, W, Eds. (1989) *The Control of Eutrophication of Lakes and Reservoirs*. MAB - Man and the Biosphere Series, Vol. 1. UNESCO Paris and The Parthenon Publishing Group, ISBN 1-85070-257-8, 314 p.
- Salazar-Torres, A., Robles, D., Reyes, A., Santa-Maria, M.C. & Venail, P. (2023) Evaluation of planktonic cyanobacteria in Peruvian freshwater lentic water bodies: prevalence and regulatory framework to aid policy making. *Environmental Monitoring and Assessment* 195, article # 852.