



**Efectos *in situ* de la radiación solar (UV y PAR) sobre la fluorescencia del fitoplancton del Lago Titicaca (Lago Menor, Bolivia)**

**Tesis de grado para optar al título de Licenciatura**

**Presentado por Stéfany Rocha Lupa**

**Tutor: Julio Pinto**

**Asesor Científico : Xavier Lazzaro, Walter Helbling, Virginia Villafañe**

**La Paz Bolivia**

**2015**

## **Agradecimientos**

Agradezco a los coordinadores de las unidades participantes del proyecto Titicaca sensores, David Point (GET), Xavier Lazzaro (BOREA), Alexis Groleau (IPGP), gracias por haberme permitido ser parte del proyecto y desarrollar mi tesis.

A Franck Timouk y Fred Satge del GET/IRD, por la facilitación de los datos de la estación meteorológica Meteo Campbell Scientific.

A Darío Achá director de la Carrera de Biología y director del laboratorio de Calidad Ambiental, por abrirme las puertas del laboratorio y permitirme trabajar en sus instalaciones. Así mismo al personal del laboratorio. A la universidad Mayor de San Andrés, en especial a la carrera de Biología y a todos los amigos que ahí forme durante este tiempo.

Agradezco a Xavier Lazzaro, por enseñarme el uso de los equipos que facilitaron el desarrollo de la tesis, por su confianza al permitirme usar y ser responsable de los mismos y por guiarme en el campo de la limnología, por su paciencia y amistad. A Julio Pinto por su tiempo, buenas sugerencias y buen humor en todo momento.

Un agradecimiento muy especial a la Estación de Fotobiología en Chubut Argentina, por abrirme las puertas y ser una guía muy importante en este campo y la vida. A Walter Helbling y Virginia Villafañe infinitas gracias. A Norma mil gracias por hospedarme.

A Ramón Catari, técnico de limnología de la UL/UMSA y Máx Catari propietario de la lancha "Inti" con la cual se realizó la toma de datos y muestras. A mis amigos dentro del proyecto que participaron de los muestreos Carlos Heredia, María Elena Espinoza, Marizol Flores, Ana Julia Flores, Pablo Fernandez, Valeria Ramos.

A Karina Gonzales, Gustavo Lanza, Claudia Piza, Karen Losantos amigos biólogos por tomarse el tiempo y hacerme sugerencias.

Gracias a Alexis Groleau, por sus valiosas sugerencias y apoyo en todo momento.

Gracias a mi familia por la comprensión, gran paciencia y por todo el amor.

Gracias a Dios.

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES  
CARRERA DE BIOLOGÍA**

**TÍTULO:**

**EFFECTOS *IN SITU* DE LA RADIACIÓN SOLAR (UV Y PAR) SOBRE LA  
FLUORESCENCIA DEL FITOPLANCTON DEL LAGO TITICACA (LAGO  
MENOR, BOLIVIA)**

**POR:**

**Stéfany Alejandra Rocha Lupa**

**TUTOR:**

-----  
Júlio Pinto , MSc

**ASESORES CIENTÍFICOS:**

-----  
Xavier Lazzaro, Ph.D

-----  
Walter Helbling, Ph.D

-----  
Virginia Villafañe, Ph.D

**TRIBUNAL REVISOR:**

-----  
Isabel Morales Belpaire, Ph.D

-----  
Darío Achá Cordero, Ph.D

-----  
Marcos Andrade, Ph.D

**PRESIDENTE TRIBUNAL:**

-----  
Ph.D Darío Achá Cordero

**LA PAZ- BOLIVIA  
2015**

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>Introducción:</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Marco teórico:</b> .....	<b>9</b>
2.1	Radiación solar.....	9
2.2	Fotobiología en cuerpos de agua.....	12
2.3	Fluorescencia del fitoplancton.....	15
2.4	Lago Titicaca.....	17
<b>3</b>	<b>Planteamiento del problema</b> .....	<b>21</b>
3.1	Interrogante de tesis.....	21
3.2	Hipótesis.....	21
3.3	Objetivos .....	21
3.3.1	<i>Objetivo general</i> .....	21
3.3.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	21
<b>4</b>	<b>Área de estudio</b> .....	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>Material y Métodos</b> .....	<b>23</b>
5.1	Medición de Fluorescencia.....	25
5.2	Medición de perfiles de radiación.....	26
5.3	Análisis de datos .....	27
5.3.1	<i>Procedimiento para el análisis estadístico</i> .....	29
<b>6</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>30</b>
6.1	Escala temporal.....	30
6.1.1	<i>Condiciones meteorológicas</i> .....	30
6.1.2	<i>Ambiente acuático</i> .....	33
6.1.3	<i>Relaciones entre condiciones meteorológicas y la fluorescencia total de Chl-ay de los 4 grupos de fitoplancton.</i> .....	37
6.2	Escala vertical .....	39
6.2.1	<i>Huatajata</i> .....	39
6.2.1.1	<i>Coeficiente de atenuación (kd) de la radiación solar en la columna de agua en Huatajata</i> .....	40
6.2.1.2	<i>Distribución de fluorescencia, temperatura y radiación solar en la columna de agua en Huatajata</i> .....	42
6.2.2	<i>Chúa</i> .....	45

6.2.2.1	Coeficiente de atenuación ( $k_d$ ) de la radiación solar en la columna de agua en Chua.....	46
6.2.2.2	Distribución de fluorescencia, temperatura y radiación solar en la columna de agua en Chúa.....	48
<b>7</b>	<b>Discusión .....</b>	<b>51</b>
7.1	Relaciones entre la fluorescencia del fitoplancton y las condiciones meteorológicas en Huatajata .....	52
7.2	Fluorescencia <i>in vivo</i> a lo largo de perfiles verticales en las estaciones somera (Huatajata, $\leq 5$ m) y profunda (Chúa, 40 m) y su relación con la RS.....	54
7.2.1	Estacionalidad de los perfiles verticales.....	55
7.3	Comparación del valor de $k_d$ , entre la tesis actual con los datos de Lazzaro (1981) y Villafañe <i>et al.</i> (1999) .....	59
7.4	Comparación de los $k_d$ (UV y PAR) en el Lago Titicaca y otros lagos de alta montaña (tropicales y polares).....	60
<b>8</b>	<b>Conclusión .....</b>	<b>61</b>
<b>9</b>	<b>Perspectivas y recomendaciones .....</b>	<b>63</b>
<b>10</b>	<b>Bibliografía: .....</b>	<b>64</b>
<b>11</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>73</b>
11.1	Anexo 1: Proyecto Titicaca Sensores .....	73
11.2	Anexo 2: Relación entre las sondas FP XL y AG.....	74
11.3	Anexo 3: Calculo de $k_d$ .....	75
11.4	Anexo 4: Pasos sucesivos .....	76
11.5	Anexo 5: Bloom de algas .....	77
11.6	Anexo 6: Distribución de la fluorescencia en un periodo diurno. ....	78
11.7	Anexo 7: Sucesión entre grupo de algas .....	79

## **Abreviaciones**

chl-*a*: clorofila-*a*, del inglés chlorophyll-*a*.

COD: carbono orgánico disuelto.

DCM: profundidad del máximo de clorofila, del inglés depth chlorophyll maximum.

FP: sonda Fluoroprobe (bbe).

kd: coeficiente de atenuación ( $m^{-1}$ ).

NTU: unidades nefelométricas de turbidez.

PAR: radiación fotosintéticamente activa, del inglés photosynthetic active radiation.

PSII: fotosistema II, del inglés Photosystem II.

RS: radiación solar.

RUV: radiación ultravioleta.

ur: unidades relativas.

UV-B: ultravioleta B (280-315 nm).

UV-A: ultravioleta A (315-400nm).

## Resumen

El Lago Titicaca es un gran lago ubicado a gran altitud (3810 msnm), en la zona tropical (16°S 68°W), durante todo el año recibe altos flujos de radiación solar (RS). Este estudio fue llevado a cabo en el Lago Menor del Titicaca durante un año (2013- 2014), con el objetivo de observar el efecto de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y radiación ultravioleta (RUV) sobre la fluorescencia del fitoplancton que en ambiente acuático es uno de los mayores captadores de CO<sub>2</sub> y productores de oxígeno en el Planeta.

Se combinaron dos escalas de medición: temporal (en Huatajata, estación somera ( $\leq 6\text{m}$ )) y vertical (en Huatajata y Chúa, estación profunda (40 m)).

A **escala temporal**, el Fluoroprobe bbe tomo datos de fluorescencia a 1.5 m de profundidad cada 45 min, de 4 grupos de fitoplancton; así mismo se tomaron datos meteorológicos (cada 15 min) de viento, PAR, precipitación etc. Mediante regresión lineal múltiple (RLM), se encontró una relación significativa ( $p < 0.05$ ) de la fluorescencia total de clorofila-a (chl-a) y de diatomeas/dinófitas con dosis de PAR y viento. Las criptófitas tuvieron relación significativa ( $p < 0.05$ ) con viento y precipitación. Sin embargo, clorófitas y cianófitas no tuvieron relación significativa con estas variables. A **escala vertical**, entre 15 y 18 días en Huatajata y Chúa se realizaron perfiles verticales en la columna de agua de radiación y fluorescencia total de Chl-a del fitoplancton. La distribución de fluorescencia mostró fotoinhibición de superficie, en Huatajata su inhibición de superficie fue 30 % menor a la que ocurrió en Chúa debido a su régimen de mezcla (polimíctico) causado por el viento. A la superficie del agua llega la RS completa UV-B+ UV-A+ PAR, se observó que por debajo de la profundidad del 1% de UV-B<sub>(313nm)</sub> (3m), la señal de fluorescencia comenzó a aumentar en ambas estaciones. En Chúa se encontró el máximo valor de fluorescencia por debajo de la profundidad a la que llegó el 1% de UV-A<sub>(380nm)</sub>, siempre dentro de la zona eufótica (Z1% PAR). Por debajo de la zona eufótica (9.45 m $\pm$ 2.1) la fluorescencia tuvo mayor relación con el gradiente de temperatura. En Huatajata, PAR no se atenuó en la columna de agua. En ambas estaciones, se observó que el coeficiente de atenuación (kd) de la RS tuvo relación con la señal de fluorescencia y ambos aumentaron sus valores hacia la época húmeda.

Los resultados muestran que los factores meteorológicos (dosis de PAR y viento), explican robustamente la fluorescencia del fitoplancton en Huatajata durante el periodo de estudio y que la distribución de la fluorescencia en la columna de agua en Huatajata y Chúa tuvo relación con la penetración de la RS y la temperatura.

## **Efectos *in situ* de la radiación solar (UV y PAR) sobre la fluorescencia del fitoplancton del Lago Titicaca (Lago Menor, Bolivia)**

### **1 Introducción:**

El planeta Tierra a lo largo del tiempo tuvo una variabilidad climática que es atribuible a causas naturales, por ejemplo, las erupciones volcánicas, forzamientos externos como cambios en la órbita terrestre, modulaciones de los ciclos solares y la cantidad de energía liberada por el sol (IPCC, 2007; 2014). Sin embargo, las actividades humanas asociadas a la revolución industrial (siglo XVIII) también han cambiado la composición atmosférica global y el uso de suelo; a este cambio en la naturaleza, atribuible a la actividad antrópica, se denomina cambio global (Smith & Smith 2001).

El cambio global puede evidenciarse en las cambiantes precipitaciones, en el aumento de la temperatura media, en el retroceso de los glaciares que afecta al sistema hidrológico y en el cambio de la composición atmosférica (i.e menor concentración de ozono) que afectará a la cantidad de radiación solar que llega a la superficie de la tierra (i.e aumento de la radiación ultra violeta) (IPCC, 2001). En las últimas décadas los cambios de clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todo el mundo (IPCC, 2014).

Estudios científicos fundamentales han analizado de qué manera y con qué magnitud estos cambios globales pueden afectar los ecosistemas acuáticos (ríos, lagos, mares, océanos). De hecho, en estos ecosistemas, mediante la fotosíntesis de las algas (i.e. fitoplancton), se produce la mayor cantidad de oxígeno y materia orgánica del planeta (Behrenfeld *et al.* 2006). Entre las temáticas de mayor importancia está **la fotobiología** que analiza las interacciones entre la radiación solar (RS) y la biota.



Por su ubicación en latitud (16°C) y en altitud (3810 msnm), la cuenca del Lago Titicaca es una de las regiones del mundo donde los modelos climáticos prevén los mayores aumentos de temperatura del aire (+/- 4°C) hasta 2090 (Bradley et al. 2006) con la intensificación de los períodos secos y lluviosos generando desarreglos estacionales. El altiplano boliviano está situado entre 3650 y 3900 msnm, con montañas nevadas que llegan hasta 6500 m. El Lago Titicaca es parte del sistema Hídrico del altiplano conocido como el sistema TDPS (Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa), que es muy sensible a las variaciones climáticas (Pillco & Bengeston 2007).

En el Lago Titicaca se realizaron algunos trabajos de fotobiología, cuya descripción se ampliará posteriormente. Sin embargo, no se cuenta con información actualizada y el propósito de esta tesis de licenciatura es de reiniciar este estudio específico generando nueva información basada en los efectos que la RS pueda tener en la fluorescencia del fitoplancton a escala temporal y vertical. La fluorescencia nos brinda una información instantánea *in vivo* e *in situ*, sobre la abundancia, composición y actividad del fitoplancton.

## **2 Marco teórico:**

### **2.1 Radiación solar**

La RS, es una variable importante para el funcionamiento del planeta Tierra ya que regula su funcionamiento ecológico/trófico (Wetzel 2003). Esta energía electromagnética consta de fotones (unidades indivisibles). Un rayo de luz solar en el vacío es un flujo de fotones que viajan a la velocidad de  $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$  (Kirk 1994).

La RS es radiación electromagnética que puede ser clasificada de acuerdo a su longitud de onda (Fig. 1), en radiación infrarroja, ultravioleta, rayos gama, rayos X y visible. La radiación electromagnética visible utilizada en la fotosíntesis por los productores primarios se denomina PAR, (del inglés Photosynthetically Active Radiation; Zaratti 2003).

La PAR es la cantidad de radiación integrada en el rango de 400 a 770 nm de longitud de onda. Estas longitudes de onda son capaces de producir actividad fotosintética en las plantas, algas y bacterias.

La RS más fotoquímicamente activa es a radiación ultravioleta (RUV), que se subdivide en ultravioleta C (UV-C, rango 200-280 nm de longitud de onda), ultravioleta B (UV-B, rango 280-315 nm) y ultravioleta A (UV-A, rango 315 - 400 nm).

Debido a la importancia y el efecto que tienen, esta tesis se basó principalmente en la RUV (280-400 nm) y la PAR (400 – 700 nm).

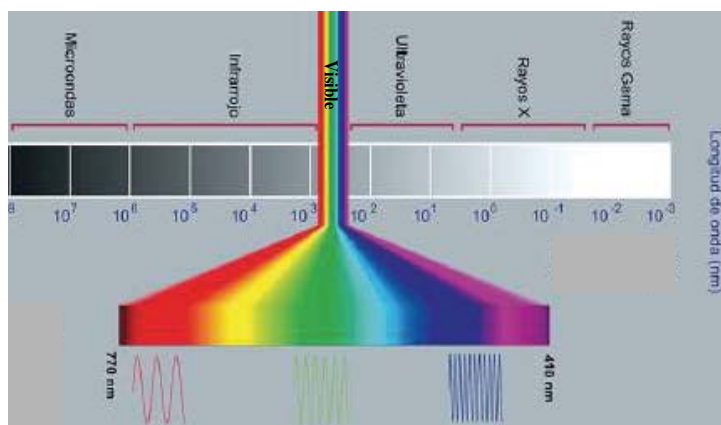


Fig. 1: Radiación Solar con sus componentes. (Adaptado de Zaratti et al. 2003).

Los términos irradiancia o intensidad ( $\text{W m}^{-2}$ ) y Dosis ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ tiempo}^{-1}$ ) son comúnmente usados para medir la energía electromagnética de la RS que llega a cierta superficie (Tierra, agua, fitoplancton, etc.). La irradiancia es la energía recibida en un segundo por unidad de área (flujo de fotones por unidad de área), dosis es la energía acumulada en un cierto período de tiempo por unidad de área (irradiancia integrada en el tiempo).

La intensidad de la PAR también puede ser cuantificada en  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , esta es una medida del flujo de fotones fotosintéticos por área, también se expresa en  $\text{Einstein m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , que es una unidad que se define como la energía en un mol ( $6,022 \times 10^{23}$ ) de fotones por área. Un sensor de energía de PAR realizará lecturas en  $\text{W m}^{-2}$  y un sensor de cantidad de PAR dará lecturas en  $\mu\text{Ecm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

La RS, interactúa con los gases que se encuentran en la atmósfera, tales como oxígeno, nitrógeno, esencialmente con el ozono y también con aerosoles. Dependiendo de su longitud de onda, la RS, puede ser absorbida o dispersada por estos (i.e. ozono absorbe radiación ultravioleta), (Andrade 2003, Salby 1996). Sin embargo, la PAR no es afectada por estos gases (Zaratti 2003).

La concentración de gases en la atmósfera es de 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 0.0001% de ozono (Andrade 2003). Sin embargo, y a pesar de su baja concentración, el ozono ( $O_3$ ) es gran responsable de la evolución de la vida en la Tierra, ya que tiene la característica de filtrar la parte más energética y dañina de la RUV. La UV-C es totalmente absorbida por el ozono y no llega a la Tierra. La UV-B es parcialmente absorbida, pero la UV-A no es absorbida (Posso 1999, Cacho 2003).

El ozono y la UV-B, están inversamente relacionados, sólo sí, otros factores como nubosidad y aerosoles en la atmósfera se mantienen constantes (Díaz *et al.* 2000) ya que estos también condicionan a la UV-B.

Hace más de 30 años la concentración de  $O_3$  disminuyó en la Antártida (Farman *et al.* 1985; Fig. 2), esta disminución de ozono estratosférico está asociada con el aumento de RUV-B a la superficie terrestre (Posso 1999). Esta disminución de la capa de  $O_3$  se debe a la emisión de compuestos clorofluorocarbonados (CFC) hacia la atmósfera generados por actividades humanas, ya que el cloro contenido en estos compuestos tiene la capacidad de destruir catalíticamente al  $O_3$  (Cacho 2003).

Por otro lado, la intensidad de la RUV no es la misma en toda la superficie del Planeta ni en diferentes épocas del año, ni siquiera a diferentes horas del día (Kirk 1994, Zaratti 2003). Esto, además del espesor de la capa de  $O_3$ , se debe al ángulo cenital solar, la altitud sobre el nivel del mar, la posición geográfica (i.e. cercanía a la línea del Ecuador, zona tropical), la nubosidad, los aerosoles en la atmósfera, y el albedo (Blumthaler & Rehwald 1992, Cacho 2003, Andrade 2003, Zaratti 2003).

En La Paz (3.600 msnm), la concentración de ozono medida en unidades Dobson (UD), tiene un valor promedio de 254.8 (Zaratti 2003). Comparado con los 450 UD en los Polos (Stolarski et al. 1992), este valor es bajo debido principalmente a la mayor cercanía al Ecuador (Zaratti 2003), no así a la disminución de concentración de la capa de ozono por causa de la actividad antrópica.

En ecosistemas acuáticos, la PAR (dependiendo de su intensidad) y la RUV son factores de estrés (Tucker & Williamson 2011, Litchman & Neale 2005, Helbling & Zagarese 2003), en especial en cuerpos de agua de alta montaña. Esto se debe a la transparencia de las aguas en estos sitios (Villafañe 1999, Sommaruga 2001, Aguilera *et al.* 2013) y al incremento del flujo de radiación respecto al nivel del mar, dado que la UV-B, que es la radiación biológicamente dañina, aumenta entre 7 y 20% por cada 1000 m de altura (Blumthaler & Rehwall 1992, Zaratti *et al.* 2003).

## **2.2 Fotobiología en cuerpos de agua**

La fotobiología es el estudio científico de las interacciones entre la RS y los seres vivos. La RS provee la energía para la fotosíntesis, que en ambiente acuático, realizan el fitoplancton y las macrófitas. El fitoplancton es de los mayores productores de oxígeno gracias a la fotosíntesis y es responsable (al igual que las plantas), de captar el exceso de carbono que hay en el Planeta a raíz de la actividad antrópica (Behrenfeld *et al.* 2006; Smith & Smith 2001).

El fitoplancton es un grupo de organismos autótrofos (algunos son mixotróficos), por lo general algas unicelulares, que representan el primer eslabón en la cadena trófica en el sistema acuático, condicionan la productividad global del ecosistema, es decir su estado trófico. Por lo tanto, el hecho de entender qué ocurre y cómo se ve afectado el funcionamiento del fitoplancton a consecuencia de los cambios globales es importante.

Hace unos 55 años, los estudios referentes a la fotobiología en ecosistemas acuáticos comienzan a resaltar la importancia de la RUV en lagos alpinos. Así, Brehm (1938) detectó compuestos fotoprotectores en zooplancton y Mecker

(1940) concluyó que en cuerpos de agua continentales la materia orgánica disuelta (MOD) era el principal absorbente de la RUV. Sin embargo, estudios más profundos sobre la fotobiología se iniciaron a raíz de la disminución de la concentración de ozono en la Antártida desde hace más de 30 años (Villafañe *et al.* 1999).

En la columna de agua, la intensidad de la RUV está principalmente atenuada por las concentraciones de carbono orgánico disuelto (COD), (Morris *et al.* 1995, Sommaruga 2001, Aguilera & Coronel 2009), así como material orgánico colorido disuelto (MOCD), las partículas disueltas y el fitoplancton. Para la PAR, el mayor atenuante es el fitoplancton, que usa esta radiación como su principal fuente de energía (Helbling & Zagarese 2003; Bukaveckas *et al.* 2009; Kirk 1994).

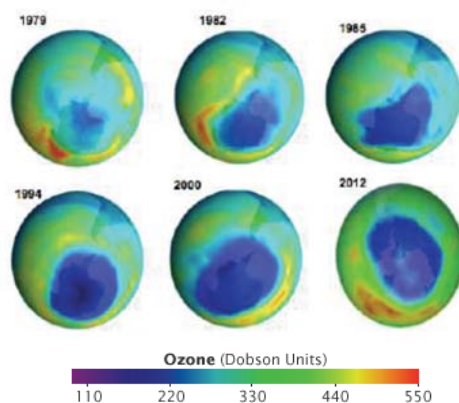


Fig. 2: Disminución de la capa de ozono los últimos 30 años en la Antártida, generando el agujero de Ozono. Nótese la barra de concentración en unidades Dobson (UD). Adaptado de Nasa (2015).

La RS se absorbe exponencialmente con la profundidad, el coeficiente de atenuación ( $k_d$ , en  $m^{-1}$ ) refleja el nivel de transparencia del agua, es decir la capacidad que tiene la luz de penetrar en la columna de agua. Cuanto mayor el valor de  $k_d$ , menor la transparencia del agua (Kirk 1994). Los valores del  $k_d$  son mayores para longitudes de onda menores, es decir, son más altos para UV-B, que para UV-A, y PAR.

La profundidad de atenuación dependerá del tipo de lago (eutrófico, meso eutrófico, oligotrófico). Sin embargo, en general en todos los lagos, la UV-B

penetra de unos pocos centímetros (i.e. 40 cm) hasta unos pocos metros (i.e. 5 m) (Wetzel 2003). La UV-A penetra más (i.e., 7 m en un lago meso-eutrófico), y la PAR puede llegar a más de 10 m (Kirk 1994) en un lago oligotrófico.

La profundidad límite de cada banda (RUV y PAR), está definida como la profundidad a la cual llega solamente 1% de la radiación superficial ( $Z_{1\%}$ ), para PAR esto define la zona eufótica, dentro la cual se realiza la fotosíntesis.

Al penetrar la superficie de la columna de agua, la RUV afecta al ciclo biogeoquímico del sistema acuático y los flujos de energía (Litchman & Neale 2005). Sobre el fitoplancton provoca daños fisiológicos en su ADN (i.e. forma dímeros de pirimidina) que afecta la producción primaria (Buma *et al.* 2003; Helbling *et al.* 2001) y a las redes de interacciones tróficas en ecosistemas acuáticos a escalas locales y globales (Zaratti 2003, Litchman & Neale 2005, Harrison & Smith 2009, 2011).

Sobre la fotosíntesis, el efecto de la RUV, es negativo al afectar la producción de oxígeno, la incorporación de carbono, en el ciclo de las xantófilas y en la fluorescencia del fotosistema II (PSII, del inglés Photosystem II), (Helbling *et al.* 2011, Kinzie *et al.* 1998).

También afecta el metabolismo de nutrientes (fosforo y nitrógeno) (Behrenfeld *et al.* 1995, Villafañe *et al.* 2003). Así también la composición y/o la fisiología de los organismos (Cabrera *et al.* 1997).

Para protegerse de estos efectos nocivos, el fitoplancton puede migrar verticalmente en la columna del agua para evitar el exceso de radiación solar (Richter *et al.* 2007; Figueroa *et al.* 1997), y algunos son capaces de sintetizar compuestos fotoprotectores que directa o indirectamente absorben UV-B (i.e. acumulación de microsporina tipo aminoácidos – MAA's-), que coadyuvan a atenuar el dañino efecto de la UV-B (Sommaruga *et al.* 1999).

### 2.3 Fluorescencia del fitoplancton

Los pigmentos del fitoplancton proporcionan una función vital, absorbiendo la energía solar necesaria para realizar la fotosíntesis. La fotosíntesis comienza cuando la luz es absorbida por los pigmentos de los complejos antena del PSII, parte de la energía absorbida es transferida a los centros de reacción donde ocurren los procesos químicos (separación de cargas), otra parte puede ser disipada como calor y en menor grado es re emitida como fluorescencia (Moreno *et al* 2008).

El pigmento principal es la clorofila-a (Chl-a, del inglés chlorophyll-a), este pigmento está en todos los grupos de fitoplancton (Clorófitas - algas verdes, Cianófitas - cianobacterias, Criptófitas- flageladas, Diatomeas , y Dinófitas - algas cafés). Las mediciones de las concentraciones en Chl-a son frecuentemente utilizadas como medios estándares de estimar la biomasa y/o la productividad del fitoplancton (Sugget *et al.* 2010).

Los métodos clásicos para estimar la composición y biomasa de fitoplancton son: El método Ütermohl (1951), en el que por microscopía invertida se realiza un conteo y medición geométrica de células de fitoplancton, entonces se obtiene un biovolumen ( $\text{mm}^3/\text{L}$ ) y este es comparable con la concentración de chl-a.

Otro método clásico es la extracción de Chl-a, con solventes, para esto se concentra una muestra de agua mediante un filtro (i.e.Filtro Wattman GF/F), posteriormente, de este filtro se realiza una extracción con solvente (acetona o metanol), finalmente se realiza una medición del extracto en un espectrofotómetro según las longitudes de onda que requiera la fórmula elegida (i.e Jeffrey & Humphrey (1975)) para realizar el cálculo de concentración de Chl-a.

Ambos métodos, toman tiempo y la mayor dificultad es la incapacidad de cuantificar nano o picoplancton y detectar una migración vertical de las algas por el conteo y extracción (Carrick & Schelske 1997).

En cuanto a los métodos clásicos para estimar fotosíntesis, citamos, las mediciones *in situ* que están basadas, en la incorporación de carbono (con  $C_{\text{radioactivo}}$ ) en el fitoplancton (Steeman 1952) o en el cambio de las concentraciones de oxígeno disuelto en un volumen de agua (Hanelt 1995).

Para estos métodos básicamente se necesita incubar muestras de agua en frascos (Eppley 1980), para posteriormente (luego de la incubación) calcular o el carbono incorporado ( $\mu\text{g C L}^{-1}$ ) o el oxígeno disuelto ( $\text{mgL}^{-1}$ ). La desventaja es que estos métodos aíslan las muestras de su variabilidad ambiental inherente (Kolber & Falkowski 1993).

Con la intención de hacer estos análisis, más rápido y menos invasivos, se emplean métodos basados en fluorescencia. Las mediciones de fluorescencia iniciaron hace más de 30 años así como los perfiles de esta en ambientes acuáticos (Kiefer 1973). Estas mediciones son derivadas de la cuantificación de la Chl-a (Holm Hansen *et al.* 1965).

Estos métodos van desde la cuantificación de Chl-a *in vivo* (Pinto *et al.* 2001; Gregor *et al.* 2004), la posibilidad de discriminar por fluorescencia diferentes grupos de algas (Beutler *et al.* 2002, Paresys *et al.* 2005), a estimar el rendimiento cuántico (i.e. fotones absorbidos/ fotones que fluorescen) (Helbling *et al.* 2011 Genty *et al.* 1989), con diferentes tipos de fluorímetros.

La fluorescencia describe un fenómeno óptico donde la luz absorbida a una longitud de onda es re emitida en otra longitud de onda mayor (Moreno *et al.* 2008, Suggett *et al.* 2010). En fotosíntesis, la clorofila absorbe la luz, un electrón de está recibe un cuanto de luz, este electrón se excita, cuando éste vuelve a su estado inicial la energía se libera en forma de calor o fluorescencia (Cosgrove & Borowitzca 2010; Huot & Babin 2010).

La intensa RS en especial la RUV puede reducir la actividad de fotosíntesis lo que causa una fotoinhibición (Hanelt 1996; 1992). Esta fotoinhibición resulta de una



excesiva excitación de los aparatos fotosintéticos (Osmod 1994). Es un proceso que ocurre cuando la luz incidente en el PSII excede la capacidad de transporte de electrones. Las consecuencias funcionales de la fotoinhibición son una disminución en el rendimiento cuántico, y en la proporción luz- saturación de fotosíntesis (Osmod 1994).

La fluorescencia de Chl-a de fitoplancton, varía como resultado de **cambios en la biomasa** (Beutler *et al.* 2002), y **en el rendimiento cuántico** (Cosgrove & Borowitzca 2010). El oxígeno se produce y se libera del PSII (Huot & Babin 2010); a temperatura ambiente, casi toda la fluorescencia (95%), ocurre en el PS II (Krause & Weis 1991 ;Papageorgiou *et al.* 2007), es por esto que cambios en el rendimiento cuántico de fluorescencia están directamente relacionados con la capacidad de realizar fotosíntesis (Suggett *et. al.* 2009; Kolber & Falkowski 1993; Kooten & Snel 1990).

Los fluorímetros son instrumentos que realizan mediciones de esta fluorescencia, *in vitro* (en el laboratorio) y/o *in situ* (en el campo). En el sistema acuático estos fluorímetros cuentan con sensores de fluorescencia sumergibles que tienen diodos que al emitir luz excitan a la clorofila. En esta tesis se usó el FluoroProbe bbe (FP; Moldaenke- Alemania) del que se detalla en el capítulo de material y métodos.

## 2.4 Lago Titicaca

El Lago Titicaca es el mayor lago de América del Sur (8400 km<sup>2</sup>), así como uno de los veinte lagos más antiguos. Se originó hace 9.000 años por un movimiento tectónico de placas durante el Pleistoceno (Era Cenozoica), lo que influye en su composición química (Hutchinson 1956 ).

Está ubicado en la zona tropical del Planeta (16° Lat. Sur), (Fig. 3), es el Lago navegable más alto (3810 msnm) de los grandes lagos del Mundo. La capa atmosférica a esa altitud y latitud es delgada y el Lago Titicaca recibe una radiación solar entre 10 y 50% más alta que al nivel del mar (Pillco & Bengeston 2007).

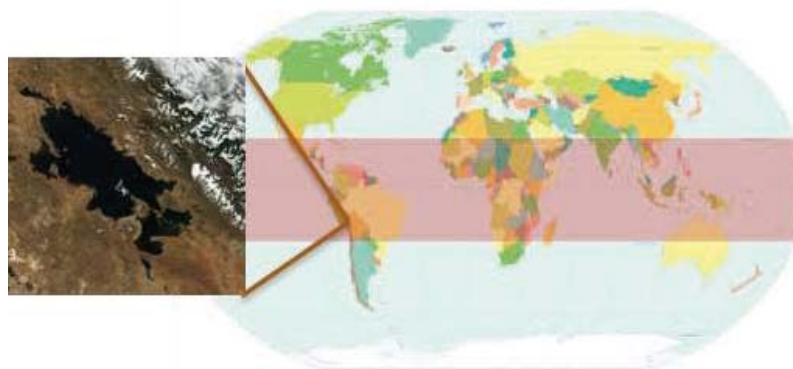


Fig. 3: Lago Titicaca ubicado en la zona tropical (dentro la marca roja). Adaptado de Google earth

El Lago Titicaca es el mayor lago transfronterizo del continente, compartido entre la República del Perú y el Estado Plurinacional de Bolivia. Es caracterizado como un lago endorréico porque el drenaje de sus aguas superficiales no alcanza a llegar al mar sino sólo hasta depresiones y salares del sur del Altiplano. Es considerado como un lago andino de alta montaña debido a que se encuentra a más de 3.000 msnm ( Hutchinson 1956, Aguilera 2013).

La cuenca del Lago con una extensión de 56.270 km<sup>2</sup> está dividida en sub cuencas. El 66% del aporte de agua al Lago depende de las cuencas de los ríos Ramis, Coata, Llave, Huancane, en el Perú, y Suchez en Bolivia, así como más del 50 % debido a las lluvias. Como exutorio, el río Desaguadero recibe las aguas del Lago Titicaca, las cuales llegan al Lago Poopó. Esta pérdida representa apenas un 2%, en cuanto el 90% es debido a la evapotranspiración (Carmouze & Aguize 1981, Carmouze *et al.* 1997).

El Lago se divide, al norte el “Lago Mayor” y al sur el “Lago Menor” que se conectan por el estrecho de Tiquina. El Lago Mayor (7.131 km<sup>2</sup>) tiene una profundidad media de 180 m y una máxima de 281 m. El Lago Menor (1.426 km<sup>2</sup>) tiene una profundidad media de 9 m (somero) y una máxima de 40 m (profundo) y una mínima  $\leq 1$  m en la región de la Bahía de Cohana.

El Lago Menor somero es polimíctico (en continua mezcla), debido a su régimen de vientos. La velocidad del viento es bien conocida por ser el principal motor de la mezcla vertical en lagos someros, en especial altas velocidades (Schloss *et al.* 2002). En contraparte, la parte más profunda del Lago Menor (Chúa 40 m), y el Lago Mayor, son monomícticos estivales, aunque su estratificación térmica sea muy débil (Richerson 1977).

Por su altitud, el lago Titicaca comparte ciertas características con lagos alpinos de alta montaña, como los intensos vientos, las temperaturas bajas, baja concentración de materia orgánica disuelta (MOD) y la intensa RS, en particular la RUV. En cuanto a las diferencias, el Lago Titicaca, al ser tropical, no se estratifica verdaderamente en verano y sus aguas nunca se congelan en superficie en invierno (Hutchinson 1956). La radiación solar incidente es más alta en esta región (tropical), que en los lagos alpinos que están en zonas de mayor latitud (Cabrol *et al.* 2009; Löffler 1961). Estas características hacen del Lago Titicaca un laboratorio natural para el estudio de la fotobiología.

En el Lago Titicaca, desde 1977 se realizaron trabajos relacionados con la fotobiología. Richerson *et al.* (1977) y Lazzaro (1981) realizaron mediciones de perfiles verticales de biomasa (por el método de extracción de chl-*a*) y producción primaria del fitoplancton, relacionando estos con PAR, nutrientes y temperatura.

En el Lago Mayor se realizaron experimentos de fotosíntesis y se notó una fuerte inhibición de superficie del agua (5 primeros metros), con tasas máximas de fotosíntesis al fondo entre 5 y 10 metros (Richerson *et al.* 1992). Neale & Richerson (1987), atribuyeron esta inhibición de superficie principalmente a PAR, sin embargo, Villafañe *et al.* (1999) con experimentos *in situ* relacionados a la fijación de carbono, demostraron un 80% de foto inhibición en la superficie del Lago (Chúa) debido a la RUV y un 20% debido a altos niveles de PAR. También observaron que el fitoplancton del Lago tiene baja concentración de compuestos fotoprotectores, pero que esta concentración era mayor en zooplancton.

Helbling *et al.* (2001b) analizaron en Chúa cómo la RUV afecta al ADN del fitoplancton a través de la formación de dímeros de pirimidina, encontrando mayor concentración de estos al exponer el fitoplancton a UV-B pero no con UV-A. Sin embargo, observaron también que este daño en células del fitoplancton era relativamente bajo comparado con otros lagos que están a gran altitud (i.e. en los polos). Posteriormente no se cuenta con información actualizada sobre fotobiología en el Lago.

El cambio global también afecta al Lago. Un ejemplo, es el crecimiento demográfico, ya que entre Perú y Bolivia, en las poblaciones ribereñas, en los últimos años los habitantes llegan a 3 millones, esto genera mayor cantidad de residuos sólidos y líquidos (Fontúrbel 2004; Dolbeth *et al.* 2003).

Estos residuos llegan al lago y posteriormente podrían ocasionar procesos de eutrofización al incrementarse la concentración de ciertos nutrientes (Northcote 1991; Fontúrbel *et al.* 2003) generando mayor producción de materia orgánica en el agua, lo que afectará a la cadena trófica. Este proceso se traducirá en turbidez del agua reduciendo la penetración de PAR (Fontúrbel 2004; Smith & Smith 2001).

Los cambios que pueden contaminar y dañar al Lago Titicaca, afectarán también social, cultural y económicamente esta región. Es por esto que es importante generar información que permita entender el estado del Lago Titicaca para preservar su funcionamiento ecológico, social y cultural (Lazzaro & Gamarra 2014).

### **3 Planteamiento del problema**

#### **3.1 Interrogante de tesis**

En base a los antecedentes citados nos formulamos la siguiente interrogante:

¿Cuáles son los efectos de la radiación solar (UV y PAR) sobre la distribución de fluorescencia del fitoplancton del Lago Menor del Titicaca?

#### **3.2 Hipótesis**

a) La Dosis de PAR influye de manera diferente sobre la fluorescencia de los 4 los grupos de algas (Clorófitas, Cianófitas, Criptófitas, Diatomeas/Dinófitas) así como la precipitación y el viento en la zona somera del Lago Menor, Huatajata.

b) Los perfiles verticales de fluorescencia total de Chl-a del fitoplancton en la columna de agua en la estación somera de Huatajata y la profunda de Chúa difieren, siendo influenciados por las profundidades de atenuación de las radiaciones solares (RUV y PAR)

#### **3.3 Objetivos**

##### **3.3.1 Objetivo general**

Analizar la fluorescencia *in vivo e in situ* del fitoplancton en escala temporal con relación a la radiación solar, viento y precipitación y en escala vertical, con relación a la atenuación de la radiación solar en la columna de agua del Lago Menor del Titicaca.

##### **3.3.2 Objetivos específicos**

- a. Analizar la fluorescencia, a escala temporal continua de los 4 grupos de algas y su relación con la radiación solar (PAR), viento y precipitación.
- b. Analizar la distribución de fluorescencia total de chl-a, a escala vertical y su relación con la atenuación de la radiación solar (UV y PAR) en una estación somera (Huatajata,  $\leq 6$  m) y en una estación profunda (Chúa, 40 m).

#### 4 Área de estudio

En el Lago Menor del Titicaca, se han realizado estudios en Huatajata, una estación somera ( $\leq 6$  m de profundidad), y una estación profunda, la Fosa de Chúa (40 m de profundidad), distantes de unos 8 km (Fig. 4).

Huatajata es una estación muy característica del Lago Menor. Su fondo esta colonizado por *Charas sp* (algas no enraizadas). Los vientos que soplan diariamente (sobre todo en las tardes con mayor intensidad) son suficientes para mezclar la totalidad de la columna de agua y por esto su régimen de mezcla es polimíctico. Debido al bajo nivel de agua, el Lago Menor tiene contenidos de materia orgánica mayores a los del Lago Mayor (Rodrigo *et al.* 1991).

La Fosa de Chúa, la zona más profunda del Lago Menor, tiene una columna de agua semejante a las del Lago Mayor. De hecho, la influencia del viento solamente mezcla los primeros metros, permitiendo el desarrollo de una termoclina estival débil ( $\leq 1$  °C entre varios metros de profundidad), por lo cual la Fosa de Chúa es considerada monomíctica (Lazzaro 1981).

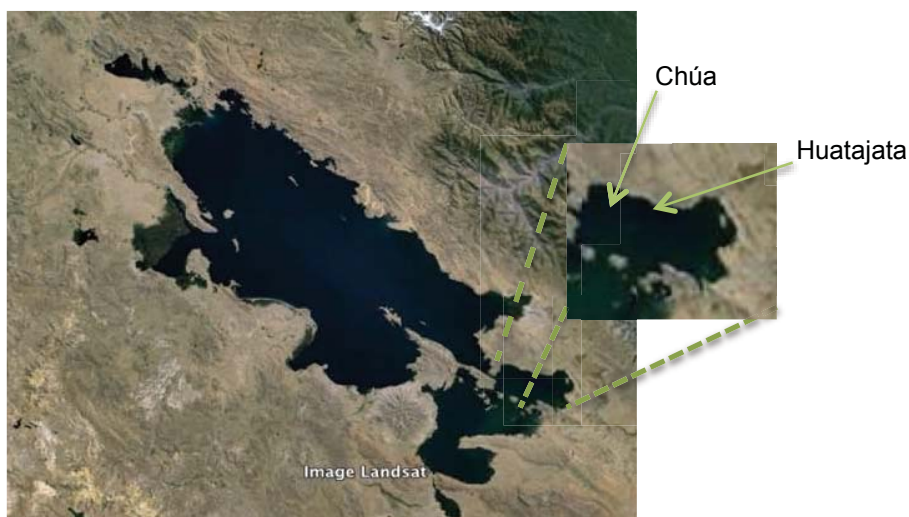


Fig. 4: Área de estudio en el Lago Menor del Titicaca, con las estaciones de Chúa y Huatajata distantes 8 km entre si. Adaptado de Google Earth.

## 5 Material y Métodos

La tesis fue desarrollada dentro del ámbito del proyecto Titicaca sensores (TTKs; Point *et al.* 2013). Este proyecto cooperativo entre Francia y Bolivia, implementó a 300 metros de la costa de Huatajata a 1.5 m de profundidad, una plataforma de sondas automáticas que realizaron mediciones continuas del agua (Anexo 1).

Para lograr los objetivos planteados se realizaron dos tipos de mediciones:

- a) A **escala temporal**, en Huatajata a 1.5 m de profundidad, se realizó una medición continua durante un año de:
  - Fluorescencia (en unidades relativas; ur), cada 45 min con la sonda FluoroProbe bbe (FP, Moldaenke, Alemania).
  - Datos físico-químicos cada 15 min con la sonda multiparámetro (MP, NKE-Francia). La MP (Fig. 5,A), registró temperatura (°C), presión (nivel del agua), conductividad ( $\mu\text{scm}^{-2}$ ), pH, oxígeno disuelto (%).
  - Datos meteorológicos cada 15 min, tomados mediante la estación meteorológica Campell (Campell Scientific). Esta estación, ubicada en tierra a 300 m de la plataforma TTKs (Fig. 6), registró desde el año 2012, la velocidad del viento (m/s), la precipitación (mm), la temperatura (°C) y la presión atmosférica (mm Hg). A partir del 7 de junio del 2013 se comenzó a registrar la radiación visible PAR ( $\text{W/m}^2$ ).
- b) A **escala vertical**, en Huatajata y Chúa, cada 15 ó 18 días se realizó perfiles verticales en el agua de:
  - Fluorescencia (ur) con la sonda FP (Fig. 5, B), esta obtuvo datos cada 3 seg.
  - Datos físico-químicos con Hanna HI 9828 o Hydrolab DS5 (Hanna Instruments, USA; OTT-Hydromet, Alemania), a una frecuencia de toma de datos de 3 y 30 seg respectivamente. Al inicio de tesis se usó la sonda Hanna, ésta midió temperatura (°C), pH, oxígeno disuelto (%) y conductividad ( $\mu\text{scm}^{-2}$ ). En noviembre 2013 se empezó a usar la sonda Hydrolab, que registró los mismos datos de Hanna y además midió



radiación visible (PAR;  $\mu \text{Ecm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) y turbidez (NTU, del inglés Nephelometric Turbidity Unit).

En cada perfil, la FP se sumergía unida a Hanna ó Hydrolab para realizar medidas simultáneamente (Fig. 5,C). Cada 50 cm de profundidad se tomaron datos por 1 min (20 de fluorescencia y 20 ó 2 datos fisicoquímicos)

- Perfil de RS, con el radiómetro C-OPS (Biospherical Instruments Inc., EEUU). A una velocidad de descenso de  $30 \text{ cm s}^{-1}$ .

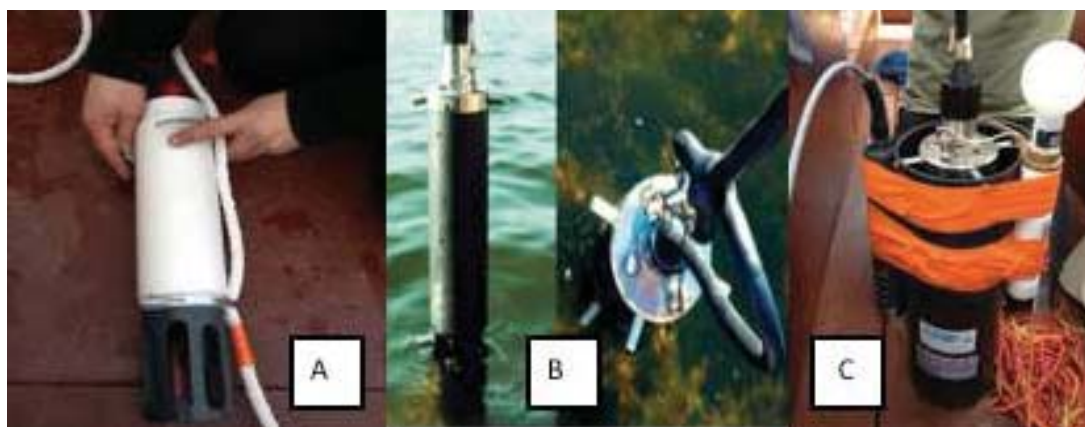


Fig. 5: A) Sonda multiparamétrica NKE MP; B) FluoroProbe bbe Moldaenke; C) Fluoroprobe bbe con sonda multiparamétrica Hana y sonda Li-Chor (PAR) juntos para el perfil vertical.

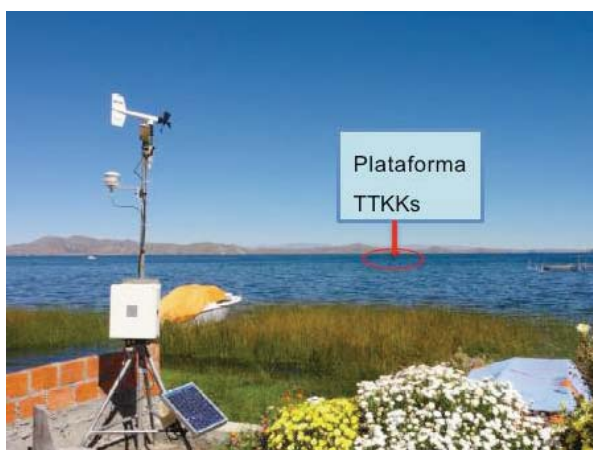


Fig. 6: Estación Meteorológica Campell Scientific. Ubicada a 300 m de la plataforma Titicaca sensores.



## 5.1 Medición de Fluorescencia

Para las mediciones de fluorescencia se contó con la sonda FluoroProbe bbe (FP; Moldaenke- Alemania), que puede distinguir por fluorescencia a los grupos de algas. Este instrumento cuenta con 5 LEDs para excitar a la clorofila, cada LED emite pulsaciones de luz a longitudes de onda seleccionadas para diferenciar cuatro grupos taxonómicos de fitoplancton, los diferencia a partir de las respuestas espectrales de los pigmentos (fluorescencia del PSII), estas respuestas son detectadas por un fotomultiplicador y luego pasan a una computadora.

De esta manera distingue a las Clorófitas que emiten fluorescencia a 450 nm lo que corresponde a la excitación de la clorofila a y b. Las Cianófitas emiten a 610 nm característico de su pigmento ficocianina. El pigmento xantófila fucoxantina de las Diatomeas emite a 525 nm al igual de las Dinófitas por su pigmento peridinin. Finalmente se distingue *las* Criptófitas que fluorescen a 570 nm por su pigmento ficobilina (Beutler *et al* 2002; Fig. 7 ). La fluorescencia de clorofila total es dada por la suma de todas las fluorescencia de Chl-a de estos grupos.

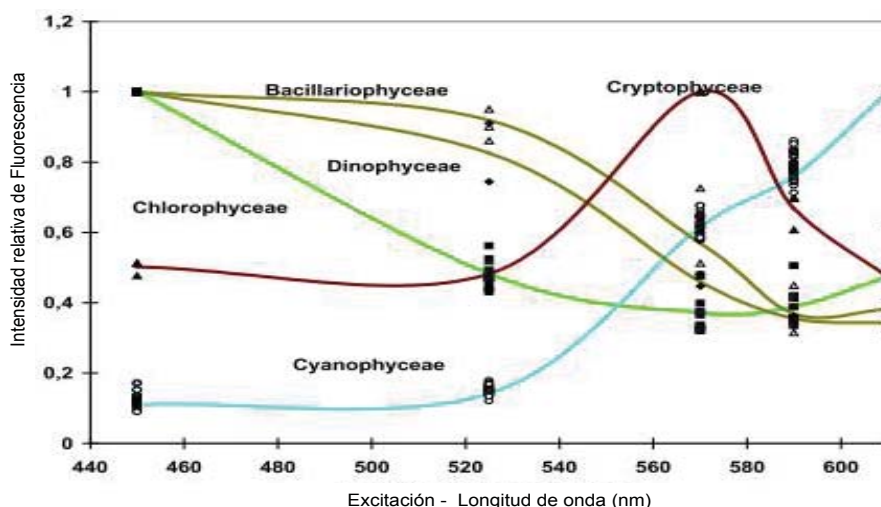


Fig. 7: Muestra las intensidades relativas de 5 divisiones de fitoplancton, multiplicado por la intensidad del LED y normalizado al máximo de intensidad para cada división. Se observa que a este nivel de diferenciación no es posible diferenciar Diatomeas (Bacillariofita) de Dinófitas pues tienen la misma fluorescencia. Pero sí es posible distinguir 4 grupos de algas Clorófitas, Cianófitas, Criptófitas y Diatomeas/Dinófitas. (Información Fluorprobe bbe -Moldaenke, Alemania).

Debido a la autonomía limitada de su batería se alternaron las sondas FP (acrónimos AG y XL) se realizó una intercomparación en marzo del 2013, por aproximadamente dos semanas, en este periodo las dos sondas fueron simultáneamente encendidas (Anexo 2). Este procedimiento permitió determinar que la diferencia es mínima y por consecuencia se tiene un registro continuo y homogéneo (independiente de la sonda utilizada) durante el período de estudio.

## 5.2 Medición de perfiles de radiación

Los perfiles de radiación solar (RUV y PAR) fueron realizados con el espectro radiómetro C-OPS (Biospherical Instruments Inc., EEUU), que cuenta con dos radiómetros sincronizados a través de un DeckBox (Fig. 8 C). Un radiómetro es aéreo (Ed0) y el otro sumergible (EdZ) (Fig. 8, A y B). El EdZ realizó mediciones de la luz incidente en el agua mientras se sumergía. Ambos midieron la RS en varias longitudes de ondas de UV-B (305, 313 nm) UV-A (320, 340, 380, 395 nm), y PAR (412 y para la banda PAR <sub>(integrada)</sub> 400-700 nm). Los registros de los dos radiómetros son almacenados en una computadora Panasonic conectada al DeckBox. El Radiómetro obtuvo datos de irradiancia para cada longitud de onda en  $Wcm^{-2}nm^{-1}$  y para la banda integrada de PAR los datos fueron en  $\mu Ecm^{-2}s^{-1}$ .

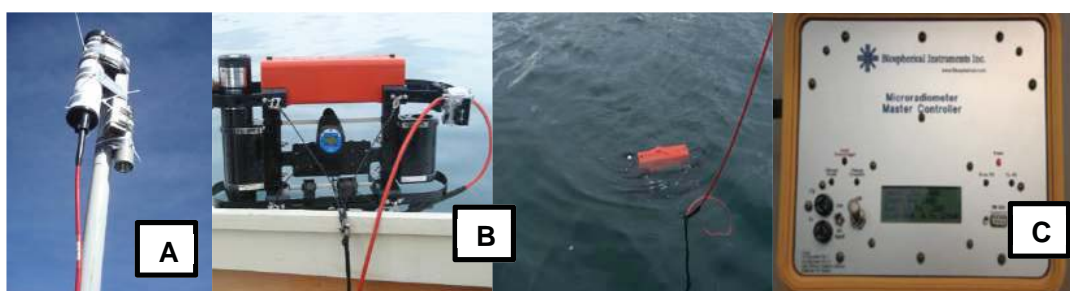


Fig. 8: Espectroradiómetro Biospherical Instruments Inc. C-OPS (Compact Optical Profiling System): (A) Radiómetro aéreo (Ed0) montado en el mástil de la lancha Inti; (B) Radiómetro sumergible (EdZ); (C) Deckbox

### 5.3 Análisis de datos

Los resultados son presentados en días julianos (días del año), la tesis comienza el día juliano 91 (1 de Abril 2013) y para tener continuidad la tesis termina el día 476 (21 de Abril 2014).

#### a) Escala temporal

Se analizaron los datos de fluorescencia y meteorológicos desde el día 91, sin embargo, para analizar las **variaciones de fluorescencia en relación a las condiciones meteorológicas**, se tomó en cuenta los datos desde el día 158 (7 de junio del 2013, día que se comenzó a medir PAR), al día 390 (25 de enero del 2014). No se cuentan con datos hasta Abril 2014 debido a una falla de la alimentación de la estación meteorológica.

Con el fin de tener solo un dato por día se realizaron las siguientes operaciones:

Se obtuvo el promedio diario de los datos de:

- Fluorescencia (32 datos por día), de cada grupo de fitoplancton,
- Físico químicos (96 datos por día) de: pH, conductividad, saturación de oxígeno y temperatura.
- Meteorológicos (96 datos por día) de: Temperatura y de irradiancia de PAR (entre 7:00 y 18:00 horas).

Se integró los datos diarios de irradiancia de PAR para obtener la dosis diaria de irradiancia en Mega joule  $m^{-2}$  ( $MJ m^{-2}$ ). Se sumaron los datos diarios de la precipitación (mm) y se obtuvo el valor máximo diario de la velocidad del viento ( $ms^{-1}$ ).

#### b) Escala vertical

Para analizar la **influencia de la RS en la fluorescencia de los perfiles verticales** se tomó en cuenta los perfiles realizados desde el día 99 (9 de abril 2013) hasta el día 465 (10 de abril 2014). Se trató de realizar los perfiles a las misma hora cada vez, entre 9:00 y 10:00 para Chúa, y entre 13:00 y 14:00 en Huatajata. En total se realizaron 16 perfiles en cada estación, de los cuales se presentan 12.

Para cada perfil:

- se promediaron los datos cada 50 cm de profundidad para la fluorescencia total de Chl-a (20 datos/min) y datos fisicoquímicos (20 ó 2 datos/min).
- Se obtuvo el valor y la profundidad del máximo de fluorescencia de Chl-a (DCM, del inglés depth chlorophyll maximum).
- se calculó el gradiente de fluorescencia ( $df/dz$ ;  $z$ =profundidad) en  $\mu\text{r m}^{-1}$  y temperatura ( $dt/dz$ ) en  $^{\circ}\text{C m}^{-1}$ .
- Se obtuvo el valor y la profundidad del máximo gradiente de fluorescencia de Chl-a.
- Se obtuvo el gradiente mínimo de temperatura y se determinó la profundidad a la que este se encontraba, profundidad, que es el inicio de la termoclina (capa de agua donde la temperatura cambia más).
- Se calculó el porcentaje de inhibición de superficie de la fluorescencia (Fig. 9), como sigue:

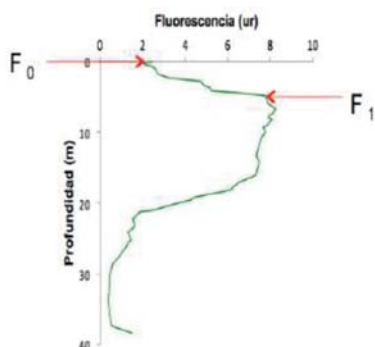


Fig. 9: Gráfica de un perfil de fluorescencia, muestra el valor de la fluorescencia  $F_0$  y  $F_1$  para calcular la inhibición superficial

$$\text{inhibición de sup.} = \frac{F_1 - F_0}{F_1} \times 100$$

Donde:

$F_1$  = primer pico de fluorescencia en profundidad.

$F_0$  = fluorescencia de superficie.

**Para los perfiles verticales de radiación :**

- Se calculó la profundidad a la que llega el 1% de energía de UV-B<sub>(313nm)</sub>, UV-A<sub>(380nm)</sub>, PAR<sub>(integrada)</sub>, considerando que en la superficie de agua se tenía un 100% de energía de la RS .

- Se determinó el coeficiente de atenuación ( $k_d$ ) de las irradiancias con la pendiente de la regresión lineal del logaritmo de la irradiancia en función a la profundidad (Morris *et al.* 1995; ver Anexo 3). Esto puede expresarse con la ley de Beer Lambert.

$$I_z = I_0 e^{-k_d z}$$

según la Ley de Beer-Lambert    Fórmula (2)

donde:

$I_z$  = radiación incidente en la profundidad  $Z$

$I_0$  = radiación incidente en la superficie

$k_d$  = coeficiente de atenuación ( $m^{-1}$ )

$e$  = exponencial natural (neperiano).

### 5.3.1 Procedimiento para el análisis estadístico

**Escala temporal:** Se realizó una regresión lineal múltiple (RLM) para relacionar la fluorescencia del fitoplancton con las variables climáticas (PAR, viento, lluvia). La variable dependiente fue la fluorescencia.

Se analizó la RLM sin intercepto, porque analizar la fluorescencia al origen implicaría que el valor de la Dosis de PAR sea cero y eso no es posible.

Se calculó el mejor modelo, con regresión de pasos sucesivos; en la que se va agregando una variable a la vez y determina las variables importantes.

En los análisis estadísticos se presenta la prueba global del modelo Anova (F). Para estas prueba estadística se aplicó la probabilidad límite clásica de  $p < 0.05$ , para identificar una relación significativa.

**Escala vertical:** se realizó una estadística descriptiva, que permitió ordenar, analizar y representar los datos con el fin de describirlos en gráficas.

## 6 Resultados

### 6.1 Escala temporal

#### 6.1.1 Condiciones meteorológicas

Se analizó los datos de **precipitación** y se diferenció claramente una época húmeda y seca para el periodo comprendido entre abril 2013 y febrero 2014 en el Lago Titicaca (Fig. 10). La tesis comenzó en época seca, la que se extendió hasta septiembre 2013 aportando con un 25 % de lluvias para ese periodo. La época húmeda comenzó en Octubre 2013 y se extendió 5 meses que aportaron con el 75% de lluvia hasta febrero 2014. La precipitación llegó a un máximo de 26 mm el día 348 (14 de diciembre). Por comparación con el año 2012 y 2013, los meses marzo y abril 2014 fueron considerados dentro la época seca.

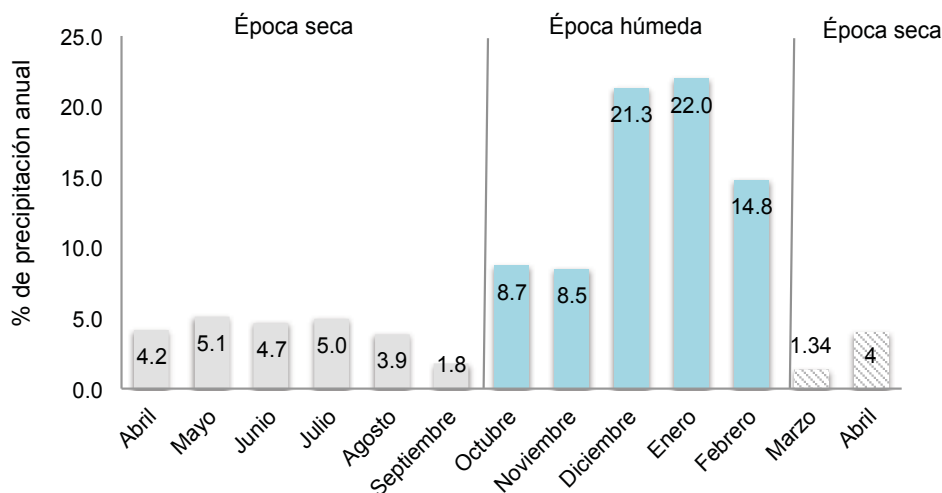


Fig. 10: Porcentaje de precipitación anual de abril 2013 a abril 2014, define época seca (plomo) y húmeda (celeste). Los meses marzo y abril 2014 (achurados) se contemplan dentro la época seca por tener porcentajes de precipitación bajos durante los años 2012 y 2013. Estación - Meteo Campbell Scientific.

La velocidad diaria máxima del **viento** (Fig.11, A) tuvo un valor promedio de  $4.81 \text{ ms}^{-1}$ , una máxima de  $10.2 \text{ ms}^{-1}$  el día 334 (30 noviembre) y una mínima de  $1.9 \text{ ms}^{-1}$  el día 227 (15 de agosto). La media en época seca fue de  $4.4 \pm 1.3 \text{ ms}^{-1}$  y para la época húmeda fue de  $5.3 \pm 1.7 \text{ ms}^{-1}$ . Se observó una leve tendencia a aumentar en época húmeda. Por los datos, se notó que la variabilidad diaria de la velocidad del viento era muy alta, (i.e.  $0.1$  a  $4 \text{ ms}^{-1}$ ) (no se muestra en la figura).

La **temperatura** media del aire (Fig. 11,B), tuvo un mínimo de 5°C el día 163 (12 de junio) y un máximo de 13°C el día 336 (2 de diciembre). En época seca esta tuvo una media de  $8.7 \pm 1.5$  °C, para época húmeda la media fue de  $10.7 \pm 1.1$ °C.

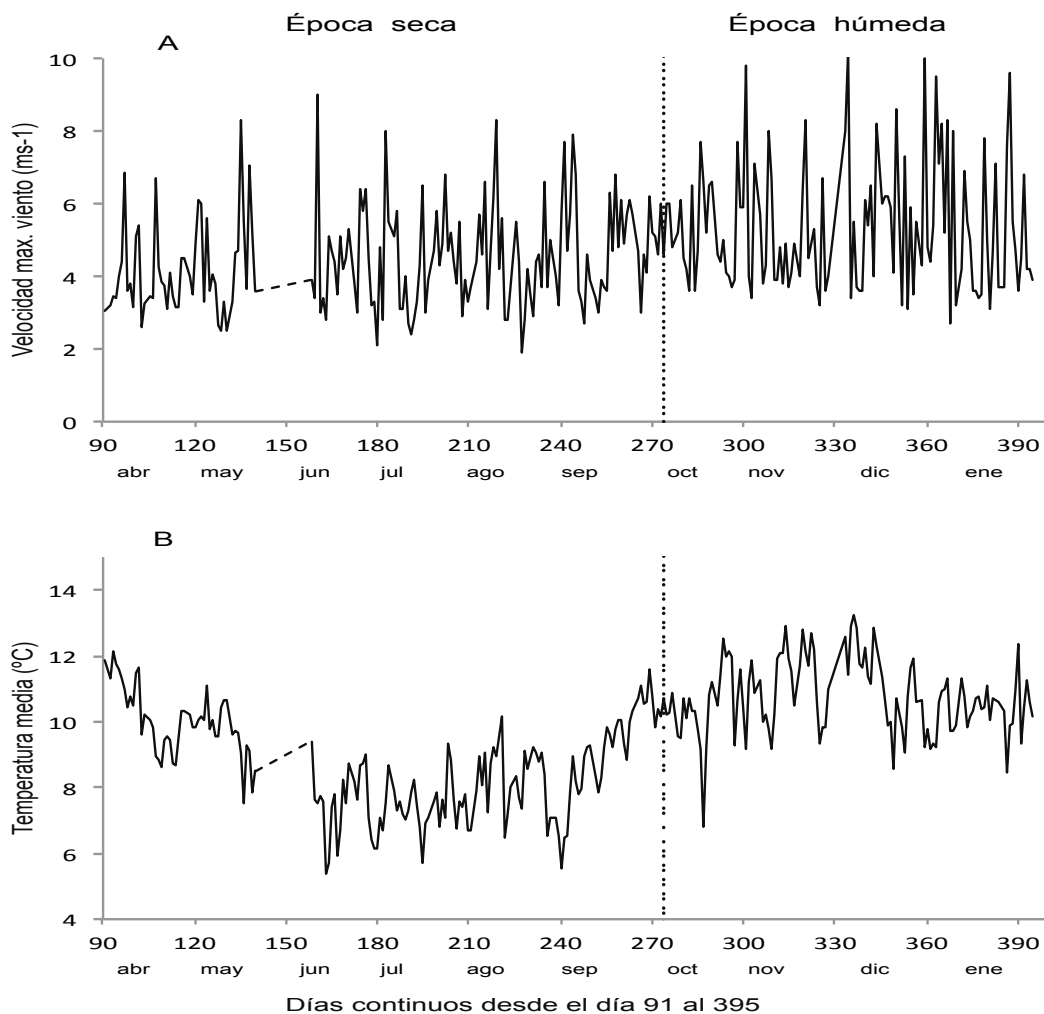


Fig. 11: A) Gráfica de la velocidad máxima del viento ( $m s^{-1}$ ); B) gráfica de la temperatura ( $^{\circ}C$ ); en función del número de días continuos, iniciando el día 91 al 395 (abril 2013 a enero 2014). Estación - Metéo Campbell Scientific.

La **irradiancia** media de **PAR**, tuvo un promedio de  $234 Wm^{-1}$ , mostró valores mínimos en época seca ( $229.2 \pm 44 Wm^{-2}$ ), el valor mínimo fue de  $100 Wm^{-2}$  el día 163 (12 de junio). Los valores más altos fueron registrados en época húmeda ( $238.6 \pm 60 Wm^{-2}$ ), con un máximo de  $329 Wm^{-2}$  el día 326 (22 de noviembre).

La **dosis de PAR** (Fig. 12), es decir, la irradiancia integrada en un día, tuvo valores menores en la época seca que coincide con la temporada de invierno (junio- septiembre) y la media para esta época fue de  $9.1 \pm 2.1 \text{ MJm}^{-2}$ . Hacia la época húmeda, el valor de la dosis aumentó progresivamente, este aumento coincide con la temporada de primavera (septiembre-diciembre), en este tiempo llegó a un máximo de  $14.73 \text{ MJm}^{-2}$  el día 327 (23 de noviembre) y la media fue de  $10.5 \pm 2.6 \text{ MJm}^{-2}$ . Se observó que aproximadamente a partir del día 346 al 395 (12 de diciembre – 30 de enero) la dosis redujo su valor, lo que coincide con la época de mayor precipitación (Fig. 10), caracterizada por tener gran cobertura de nubes.

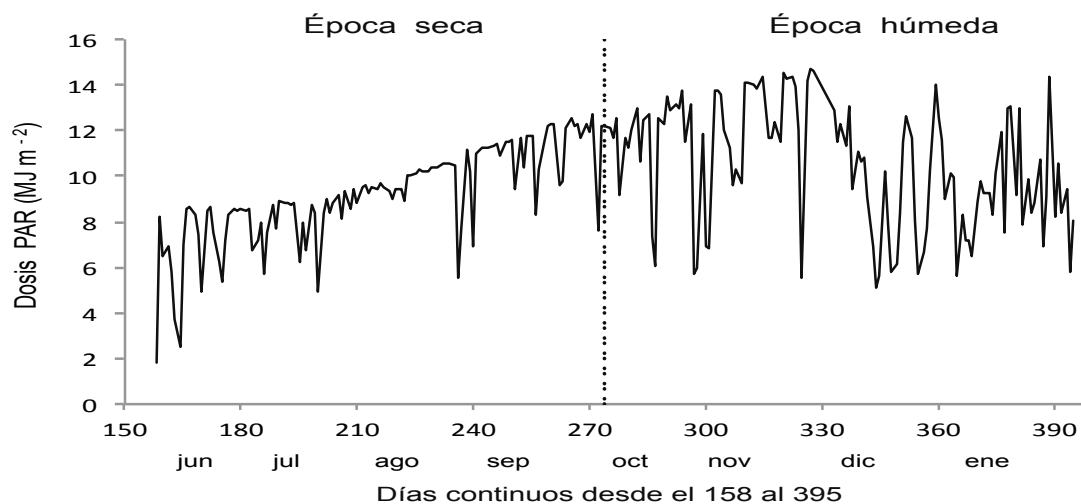


Fig. 12: Gráfica de la dosis diaria de PAR, en Mega Joules  $\text{m}^{-2}$  en función del número de días continuos, iniciando el día 91 al 395 (abril 2013 a enero 2014. Estación - Meteo Campbell Scientific.



### 6.1.2 Ambiente acuático

En Huatajata, la **temperatura** media del agua (Fig. 13, rojo), tuvo un valor mínimo de 11.4 °C en época seca el día 176 (25 de junio - invierno), en esta época la media fue de  $12.45 \pm 0.7$  °C. El valor máximo se registró en época húmeda el día 337 (3 de diciembre - primavera) con 16.8 °C y la media fue de  $15.45 \pm 0.7$  °C.

El porcentaje de **saturación de oxígeno** osciló entre un mínimo de 76 % el día 236 (24 de agosto) y un máximo de 120% el día 333 (29 de noviembre), con un promedio de 94% en todo el periodo (Fig. 13, plomo). En época seca la media fue de  $94.5 \pm 9.9\%$  y en época húmeda la media fue de  $94.1 \pm 8.1\%$ .

La **conductividad** y el **pH** del agua tuvieron un promedio  $1202.5 \mu\text{s cm}^{-1}$  y 8.7 unidades y respectivamente; ambos aumentaron levemente su valor hacia la época húmeda.

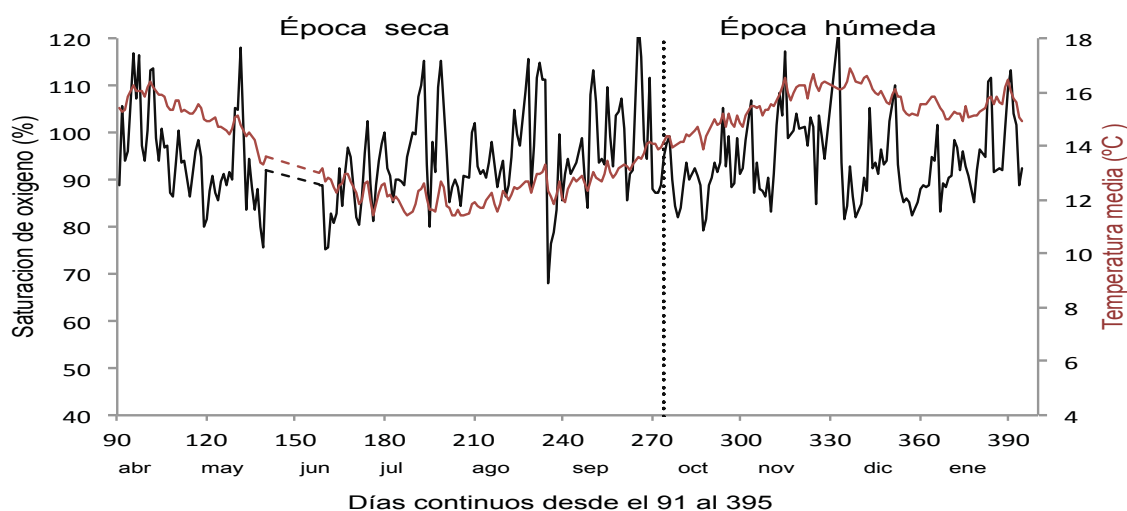


Fig. 13: Gráfica del promedio diario de temperatura (°C) y saturación de oxígeno (%), en función del número de días continuos, iniciando el día 91 al 395 (abril 2013 a enero 2014) . Multiparametro MP, Plataforma proyecto Titicaca Sensores.

La fluorescencia total de Chl-a (Fig. 14), tuvo un promedio de 7.64 ur, un máximo de 16.1 ur el día 385 (20 de enero) a un mínimo aproximado de 3 ur los días 193 y 315 (12 de junio y 11 de noviembre). Se observó que los valores medios de la fluorescencia tienden a aumentar hacia la época húmeda. En época seca la media de la fluorescencia fue de  $6.8 \pm 2.1$  ur y en época húmeda fue de  $8.7 \pm 3$  ur.

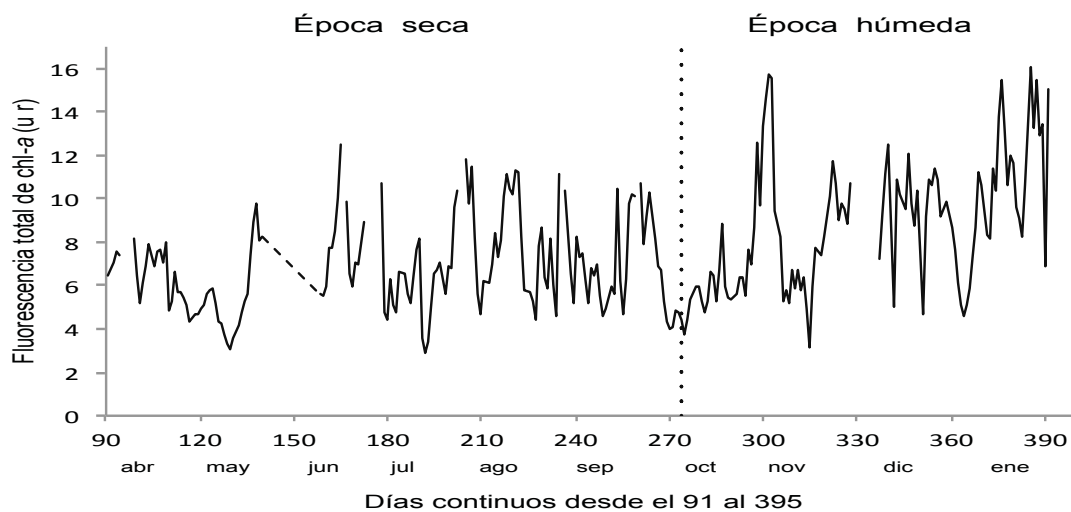


Fig. 14: Gráfica del promedio diario de fluorescencia total de Chl-a en unidades relativas, en función del tiempo en días continuos, iniciando el día 91 al 395. (Abril 2013- Enero 2014). FluoroProbe bbe , Plataforma proyecto Titicaca Sensores.

En cuanto a la fluorescencia de los grupos de fitoplancton, se observó que las que menos señal emitieron fueron las cianófitas con un máximo de 1.4 ur; las clorófitas llegaron a un máximo de 2.3 ur; las criptófitas llegaron a un máximo de 5.3 ur; y las que mayor señal de fluorescencia emitieron fueron las diatomeas/dinófitas con un máximo de 13.7 ur (Fig. 15).

En la Fig. 15, se puede observar sucesión entre los grupos de algas, y aunque no existe una clara relación (Anexo 7), se observó que cuando las clorófitas y cianófitas, entre abril y mayo, emitieron mayor señal de fluorescencia las diatomeas/dinófitas emiten menor señal. En temporada de invierno (junio-septiembre), las diatomeas/dinófitas tienen mayor señal de fluorescencia mientras que para clorófitas y cianófitas esta señal se redujo, pasa lo mismo en época húmeda. Entre criptófitas y clorófitas ocurre lo mismo, mientras más señal emiten las clorófitas menos emiten criptófitas.

Esto se detalla a continuación:

Para clorófitas y cianófitas, se observó que la señal de fluorescencia entre mayo y junio (época seca) redujo notoriamente en comparación con el mes de abril (entre 58 y 70% respectivamente) mantuvo la señal baja en temporada de invierno (junio-septiembre), esta señal aumentó (cerca de un 80%) en época húmeda (Fig. 15, A y B). Para criptófitas ocurrió lo mismo, su señal de fluorescencia tendió a bajar (~30%) en temporada de invierno, sin embargo, al llegar a la época húmeda, esta señal incremento su valor (70%) lo que coincide con la temporada primavera-verano (octubre a enero), ( Fig 15,C).

Por el contrario, las diatomeas/dinófitas, emitieron una baja señal de fluorescencia durante abril y mayo, comparado con la señal que emitieron en temporada de invierno, donde la fluorescencia aumentó un 70%. A inicios de la época húmeda esta señal redujo un 50%, sin embargo, esta señal aumentó (50%) nuevamente el la temporada primavera-verano ( Fig. 15,D).

Por otro lado, es importante recalcar que el FP, no puede distinguir entre diatomeas/dinófitas, sin embargo, por los conteos preliminares que tenemos sabemos que las dinófitas son las micro algas dominantes con el género *Ceratium*, seguidas de las diatomeas del género *Fragilaria* (Anexo 5).

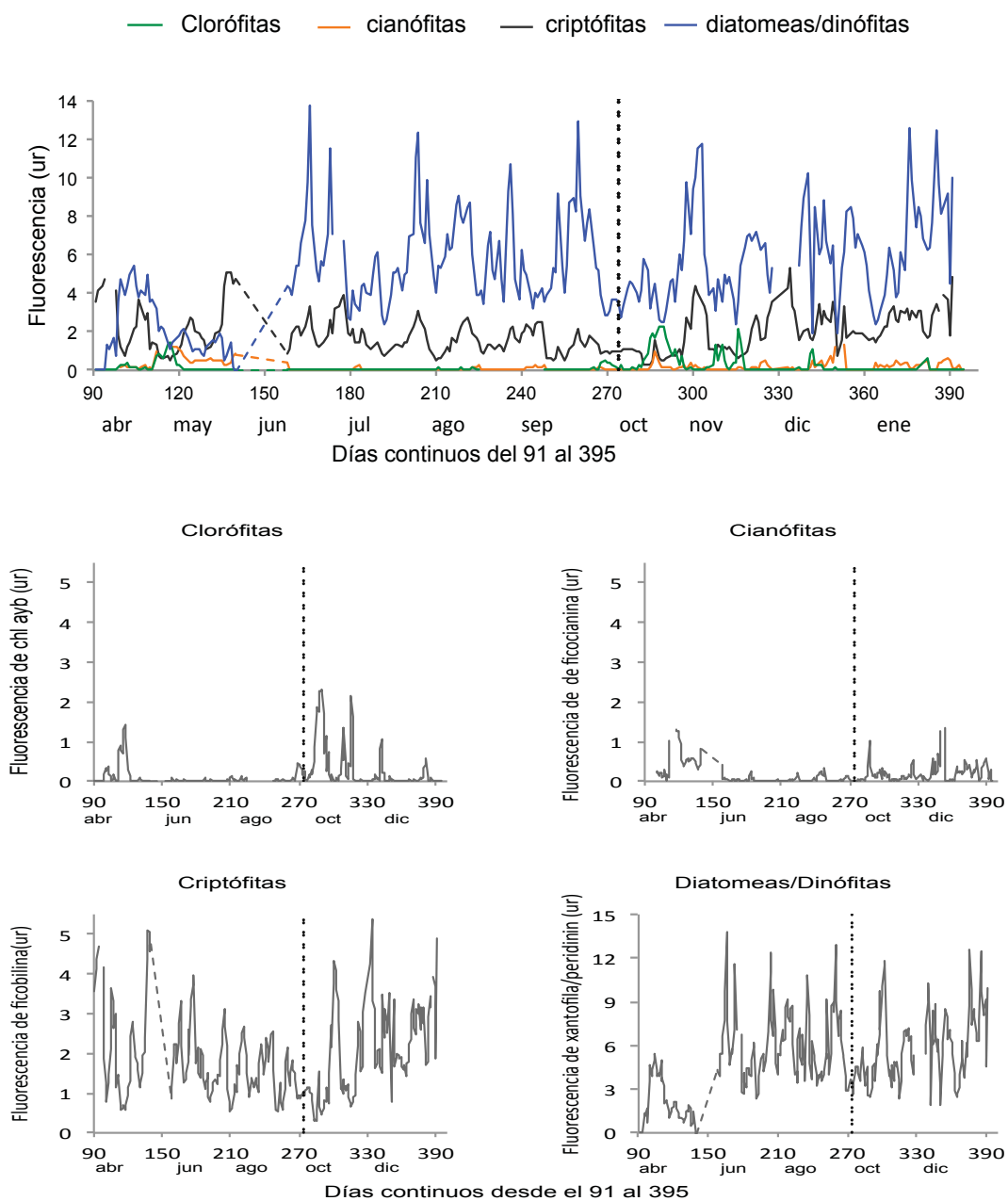


Fig. 15: Gráfica de Fluorescencia en ur de las 4 clases de algas. Clorófitas (chl-a:yb), Cianófitas (ficocianina), Criptófitas(ficobilina), Diatomeas/Dinófitas (xantofila/peridinin); en función del tiempo en días continuos, iniciando el día 91 al 395 (Abril 2013- Enero 2014). Nótese la escala para Diatomeas/Dinófitas. La línea punteada paralela al eje Y, separa la época seca (días 91-173) de la época húmeda (días 174-395). FluoroProbe bbe, Plataforma proyecto Titicaca Sensores.

### 6.1.3 Relaciones entre condiciones meteorológicas y la fluorescencia total de Chl-a y de los 4 grupos de fitoplancton.

El modelo, de RLM, con mejor correlación entre las condiciones meteorológicas y la fluorescencia se obtuvo al retroceder por un día los datos de fluorescencia respecto a los datos meteorológicos (i.e. se analizó los datos de fluorescencia del día 159 con los datos meteorológicos del día 158 y así sucesivamente).

Las variables independientes fueron: dosis de PAR, viento y precipitación. Sin embargo, se determinó las variables importantes por pasos sucesivos (Anexo 4). De esta manera se observó que existe una relación lineal significativa entre fluorescencia total de Chl-a con la dosis de PAR y el viento ( $F_{2,213} = 2442.94$ ;  $p < 0.05$ ;  $R^2$  corregido = 0.96) el modelo es el siguiente:

**Fluorescencia total** =  $0.49 \cdot \text{Dosis de PAR} + 0.57 \cdot \text{Viento}$ .

La fluorescencia de cada grupo (Clorófitas, Cianófitas, Criptófitas y Diatomeas/Dinófitas), también se ajustó con una relación lineal múltiple (RLM). No fue posible ajustar significativamente la fluorescencia de las Clorófitas ni de las Cianófitas, por ser muy baja o nula (Fig. 15).

Para diatomeas/dinófitas se observó que si existe una relación lineal significativa de la fluorescencia con la dosis de PAR y la velocidad del viento ( $F_{2,213} = 1488.59$   $p < 0.05$  y  $R^2$  corregido = 0.93). El modelo es el siguiente :

**Fluorescencia de Diatomeas/dinófitas** =  $0.463 \cdot \text{Dosis de PAR} + 0.392 \cdot \text{Viento}$ .

Para criptófitas la dosis de PAR no fue tan importante y existe relación significativa entre viento y precipitación ( $F_{2,213} = 93.33$ ,  $p < 0.05$  y  $R^2$  corregido = 0.5). El modelo es el siguiente:

**Fluorescencia de Criptófitas** =  $0.196 \cdot \text{Precipitación} + 0.197 \cdot \text{Viento}$

Para la fluorescencia total y para la fluorescencia de diatomeas/dinófitas la variable más importante es dosis de PAR (Anexo 4). Para la fluorescencia de criptófitas el viento resultó ser la variable más importante.

En resumen:

Fluorescencia de:	coeficiente de Dosis de PAR	Coeficiente de vel. del viento	coeficiente de precipitación	R <sup>2</sup>	p
Total de chl- <i>a</i>	0.495	0.57		0.96	< 0.05
Diatomeas/dinófitas	0.463	0.392		0.93	< 0.05
Criptófitas		0.197	0.196	0.5	< 0.05

Los modelos para fluorescencia (Fig. 16) se ajustan bien para los valores medios pero no a los valores altos o bajos.

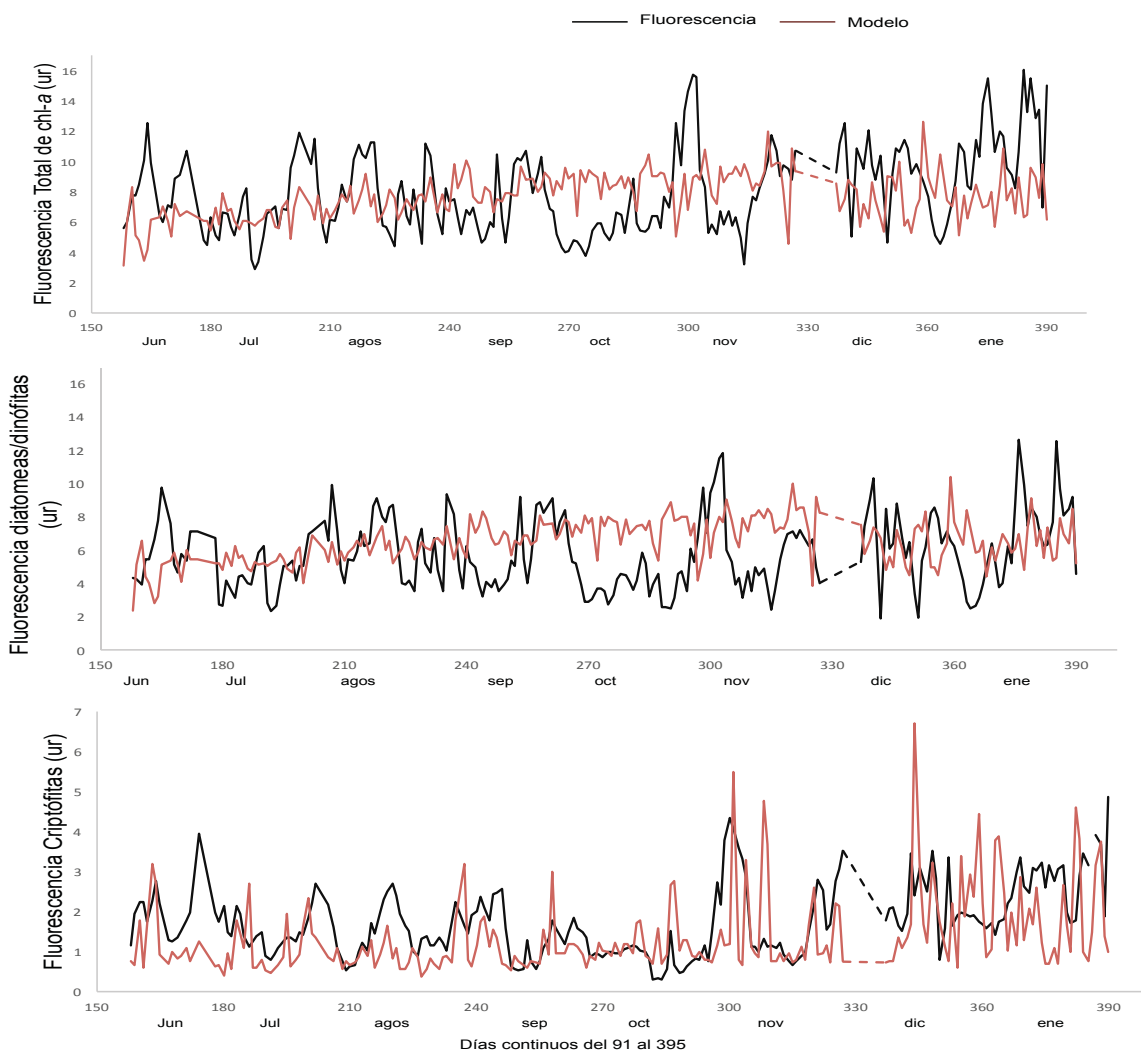


Fig. 16: Evolución temporal de la fluorescencia y modelo (en rojo) de regresión lineal múltiple para: la fluorescencia total, la fluorescencia de las Diatomeas/dinófitas, y la fluorescencia de las Criptófitas. En unidades relativas en función del tiempo en días julianos iniciando el día 158 al 390 (Junio 2013- Enero 2014)

## 6.2 Escala vertical

### 6.2.1 Perfiles verticales en Huatajata

En la estación de Huatajata, por comparación con los datos de la estación meteorológica se consideró como pertenecientes a la época seca a los perfiles realizados los días 99,159,185,225 (de abril a agosto 2013) y 429,445,476 (de marzo a abril 2014). Para la época húmeda están los perfiles realizados los días 311,333,353,375, y 416 (de noviembre 2013 a febrero 2014).

Como se mencionó (en área de estudio), Huatajata esta colonizada en el fondo por *Charas sp.* (entre 4.5 y 6 m de profundidad); se observó que estas afectaron los datos físico-químicos y de fluorescencia incrementando o reduciendo repentinamente sus valores por lo que cada perfil es presentado hasta una profundidad de 5 m.

Los datos físico-químicos mostraron que:

La **conductividad** se mantenía más o menos constante a lo largo de cada perfil y tuvo una media de  $1400 \mu\text{Scm}^{-1}$  para los 12 perfiles variando entre  $1175 \mu\text{Scm}^{-1}$  en época seca y llegó a  $1500 \mu\text{Scm}^{-1}$  en época húmeda.

El valor del **pH** no varió en la columna de agua durante los 12 perfiles, sin embargo, a lo largo del año de tesis varió entre 8.58 y 8.69.

Se observó por las medidas de la **saturación de oxígeno**, que la columna de agua en Huatajata se mantuvo bien oxigenada (entre una media de 87 y 100% de saturación) a lo largo de los perfiles, la saturación de oxígeno no mostró altas variaciones.

La **turbidez** varió entre 2 y 7 NTU, tuvo cierta relación con la fluorescencia de fitoplancton ( $r^2 = 0.52$ ), esta tendía a aumentar hacia el fondo, por la presencia de material orgánico en suspensión proveniente de las *Charas sp.* del fondo.

La **temperatura** en la columna de agua no varió significativamente (Fig. 18 y Fig. 19), exhibiendo una ligera reducción desde la superficie al fondo. Se observó que el mínimo gradiente de temperatura es bajo (Tabla 2), varió entre -0.07 a un

excepcional  $-1.3\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$  en época seca y en época húmeda varió entre  $-0.7$  y  $-0.9\text{ }^{\circ}\text{Cm}^{-1}$ .

La **fluorescencia** de fitoplancton, mostró una tendencia a aumentar hacia el fondo ( $r^2= 0.85$ ; Fig. 18 y Fig. 19). Los valores máximos de fluorescencia de Chl-a (Tabla 2) para la época seca estuvieron distribuidos entre 2.5 y 4.7 metros de profundidad con valores de entre 2 y 6 con un excepcional de 10 ur el día 429 (3 de marzo). Para la época húmeda los máximos de fluorescencia estaban distribuidos entre 3 y 4 m, variaron entre 3 ur y llegaron a un máximo excepcional de 19.7 ur el día 375 (10 de enero).

### 6.2.1.1 Coeficiente de atenuación ( $k_d$ ) de la radiación solar en la columna de agua en Huatajata

Los valores del  $k_d$  para la época seca fueron menores a los de la época húmeda (Fig. 17), lo que indica que en época seca la penetración de la radiación fue mayor, en especial para la temporada de invierno (junio- septiembre). El  $k_d$  de la PAR para todos los perfiles tuvo los valores más bajos comparados con las longitudes de onda de UV-B y UV-A (Tabla 1).

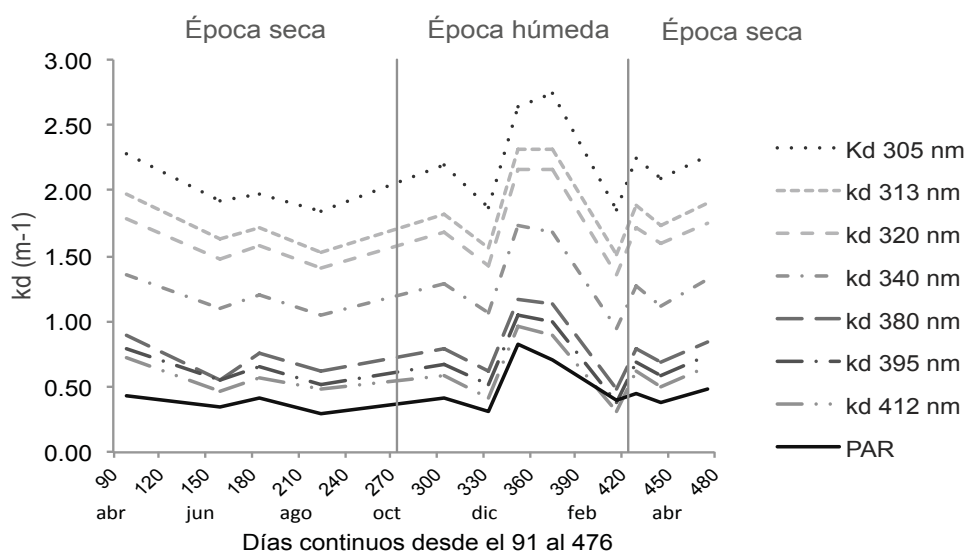


Fig. 17: Gráfico de los  $K_d$  de Huatajata para las diferentes longitudes de onda en función al tiempo en días continuos entre Abril 2013 (día 90) y Abril 2014 (día 476). Espectro radiómetro C-OPS (Biospherical Instruments Inc.)



En época seca la media de UV-B<sub>(313 nm)</sub> fue de  $1.7 \pm 0.7 \text{ m}^{-1}$ , para UVA<sub>(380 nm)</sub> fue  $0.7 \pm 0.1 \text{ m}^{-1}$  y para PAR la media fue  $0.4 \pm 0.1 \text{ m}^{-1}$ .

En época húmeda la media de UV-B<sub>(313 nm)</sub> fue  $1.9 \pm 0.4 \text{ m}^{-1}$ , para UVA<sub>(380 nm)</sub> fue de  $0.8 \pm 0.3 \text{ m}^{-1}$  y para PAR la media fue  $0.5 \pm 0.2 \text{ m}^{-1}$ .

Para el total de los 12 perfiles, la media de UV-B<sub>(313 nm)</sub> fue de  $1.82 \pm 0.27 \text{ m}^{-1}$ ; para UVA<sub>(380 nm)</sub>  $0.8 - 0.21 \text{ m}^{-1}$  y para PAR  $0.45 - 0.16 \text{ m}^{-1}$ , el rango de variación para estas longitudes de onda fue de 0.8, 0.7 y 0.5 respectivamente lo que muestra que PAR, durante este tiempo es la que menos cambió comparado con UV-B<sub>(313 nm)</sub> y UVA<sub>(380 nm)</sub>.

Tabla 1: Valores de kd para cada longitud de onda y para cada perfil realizado entre Abril 2013 (día 99) y Abril 2014 (día 465). Espectro radiómetro C-OPS (Biospherical Instruments Inc.).

Huatajata	Mes	Día	UV-B		UV-A			PAR		
			kd 305 nm (m-1)	kd 313 nm (m-1)	kd 320 nm (m-1)	kd 340 nm (m-1)	kd 380 nm (m-1)	kd 395 nm (m-1)	kd 412 nm (m-1)	kd PAR (m-1)
Época seca	Abr	99	2.28	1.98	1.78	1.36	0.89	0.79	0.72	0.44
	Jun	159	1.93	1.62	1.48	1.10	0.56	0.55	0.48	0.35
	Ag	185	1.98	1.71	1.58	1.20	0.76	0.65	0.58	0.42
	Sep	225	1.84	1.54	1.41	1.05	0.63	0.52	0.48	0.29
Época Húmeda	Nov	311	2.20	1.82	1.68	1.28	0.80	0.68	0.58	0.42
	Nov	333	1.87	1.56	1.43	1.07	0.63	0.52	0.42	0.32
	Dic	353	2.64	2.31	2.16	1.73	1.17	1.05	0.97	0.82
	Ene	375	2.74	2.32	2.16	1.69	1.14	1.00	0.90	0.71
	Feb	416	1.85	1.50	1.36	0.95	0.48	0.37	0.30	0.39
Época seca	Mar	429	2.25	1.88	1.71	1.28	0.80	0.69	0.63	0.45
	Mar	445	2.09	1.74	1.59	1.12	0.69	0.58	0.50	0.38
	Abr	476	2.26	1.91	1.75	1.33	0.85	0.74	0.66	0.48

### 6.2.1.2 Distribución de fluorescencia, temperatura y radiación solar en la columna de agua en Huatajata

La inhibición de fluorescencia en la superficie (fórmula 1), llegó a valores máximos los días 159 (8 de junio), 305 (1 de noviembre) y 476 (21 de abril) con 72, 65 y 68% respectivamente. El época húmeda la inhibición varió entre 40 a 60 % en. En época seca la inhibición de superficie varió entre un 19 y 72% (Tabla 2).

Tabla 2: Muestra el gradiente mínimo de temperatura y su profundidad (termoclina), el gradiente máximo de Chl-a y su profundidad, el máximo de Chl-a y su respectiva profundidad (DMC). También la profundidad a la que llega el 1% de energía de UV-B y UV-A y finalmente el porcentaje de inhibición superficial para Huatajata durante las épocas seca y húmeda

Huatajata	Mes	Día	Gradiente Min. de T (°C m-1)	Termoclina (m)	Prof. Grad. Max.deChl-a (m)	Gradiente Max.deChl-a (ur m-1)	Max. de Chl-a (ur)	Prof. Max. de Chl-a (m)	Prof UV-B 313 nm (m)	Prof UV-A 380 nm (m)	% Inhibición
Época seca	Abr	99	-0.23	2.21	2.21	1.49	2.43	2.9	2.19	4.56	25
	Jun	159	-0.42	0.88	1.73	2.67	5.96	2.5	2.32		72
	Ag	185	-0.19	2.27	3.29	0.83	4.11	4.64	2.48		19
	Sep	225	-0.07	3.51	3.51	0.39	2.1	3.95	2.84		27
Época Húmeda	Nov	311	-0.73	2.88	2.88	3.52	6.940	4.4	2.35	4.61	65
	Nov	333	-0.71	2.19	2.8	9.57	9.64	3.49	2.77	4.72	52
	Dic	353	-0.21	1.39	3.13	2.39	3.22	4.24	2.08	4.98	40
	Ene	375	-0.43	2.8	2.8	18.91	19.70	3.46	2.09	4.04	49
	Feb	416	-0.99	4.74	3.54	5.71	4.45	4.05	2.44		49
Época seca	Mar	429	-1.29	3.82	3.82	15.08	10.32	3.93	2.43		54
	Mar	445	-0.12	4.38	1.48	1.00	4.15	4.68	2.58		21
	Abr	476	-0.21	2.01	2.23	1.44	3.25	4.41	2.28		68

En todos los perfiles se observó el máximo de fluorescencia de Chl-a por debajo de la profundidad a la que llegaba el 1% de UV-B<sub>(313 nm)</sub>,  $2.4 \pm 0.24$ m (Fig.18 y Fig.19).

La profundidad a la que llega el 1% de energía de UV-A<sub>(380 nm)</sub>, se observó casi totalmente en época húmeda entre 4 y 5 m, época en la cual kd fue mayor (Tabla 1), y no pareció afectar a forma del perfil de fluorescencia. La PAR no llegó a atenuarse en ninguna época en la columna de agua de Huatajata.

Se observó que la fluorescencia en algunos casos aumentó de forma concomitante con la reducción de la temperatura, pese a que el gradiente de temperatura es bajo y la relación no es significativa ( $r^2= 0.2$ ; Fig. 18 días 99,429 y Fig. 19 días 311,375). Esto se puede observar con la profundidad de la termoclina, que es donde más baja la temperatura (gradiente mínimo de temperatura), a esta misma, o cerca de esta profundidad se detecta el gradiente máximo de fluorescencia de Chl-a, lo que significa que es el punto donde más aumentó la fluorescencia (Tabla 2).

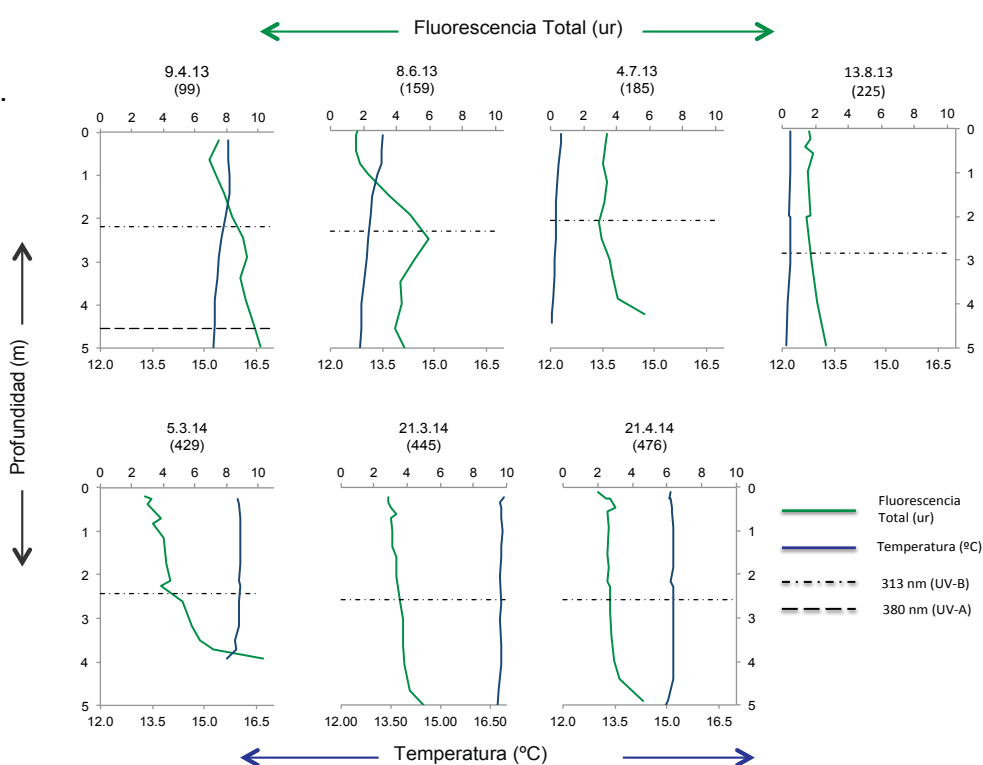


Fig. 18: Gráfica de perfil de Fluorescencia total de Chl-a (ur) y temperatura (en °C) en función de la profundidad; En líneas paralelas punteadas se muestra la profundidad a la que llega el 1% de la radiación solar (UV-B, UV-A) para la época seca en Huatajata. FluoroProbe bbe (Moldaenke GmbH, Alemania); Espectro radiómetro C-OPS (Biospherical Instruments Inc.)

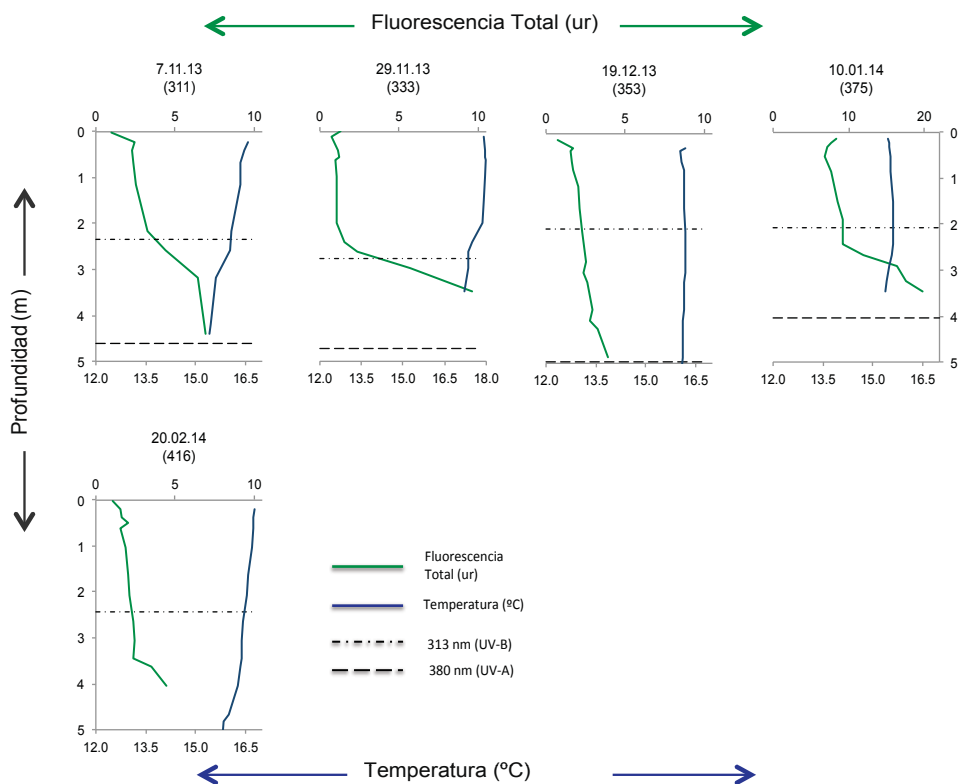


Fig. 19: Gráfica del perfil de Fluorescencia total de Chl-a (en ur) y temperatura (en °C) en función de la profundidad. En líneas paralelas punteadas se muestra la profundidad a la que llega el 1% de la radiación solar (UV-B, UV-A) para la época húmeda en Huatajata. Nótese la escala de fluorescencia para el día 375. FluoroProbe bbe (Moldaenke GmbH, Alemania); Espectro radiómetro C-OPS (Biospherical Instruments Inc.)

## 6.2.2 Perfiles verticales en Chúa

Se evaluaron 12 perfiles verticales entre abril 2013 y abril 2014 . Se puede considerar que las condiciones meteorológicas registradas por la estación meteorológica Campbell en la orilla de Huatajata son también válidas para Chúa apenas distante de 8 km. Entonces por comparación con la estación meteorológica se consideró como pertenecientes a la época seca a los perfiles realizados los días 99, 161, 225, 248 (de abril a septiembre 2013) y 429,445, 465 (para marzo y abril 2014). En la época húmeda se realizaron perfiles los días 311, 333, 353, 375 y 416 (de noviembre 2013 a febrero 2014).

Los datos fisicoquímicos mostraron que:

La **conductividad** no varió significativamente a lo largo de cada perfil, esta tuvo una media en época seca de  $1289 \mu\text{Scm}^{-1}$  y en época húmeda de  $1335 \mu\text{Scm}^{-1}$ . El **pH** tampoco varió en cada perfil pero si en el periodo de tesis entre 8.50 y 8.67.

El **oxígeno** tuvo la particularidad de reducir su porcentaje de saturación de la superficie al fondo (100% a 79%), este tuvo cierta relación con la fluorescencia ( $r^2=0.5$ ). La **turbidez** mostro sus valores máximos entre los primeros 10 m de profundidad variando entre 3.5 NTU y 12.1 NTU, a mayor profundidad el valor reducía.

La **temperatura** de los 12 perfiles osciló entre  $12 \text{ }^\circ\text{C}$  el día 225 (13 de agosto, época seca) y  $16.5 \text{ }^\circ\text{C}$  el día 333 (29 de noviembre, época húmeda).

El gradiente mínimo de temperatura, en época seca tuvo una media de  $-0.6 \text{ }^\circ\text{Cm}^{-1} \pm 0.5$ , y su posición vertical media fue de 15 m. El mínimo gradiente para esta época fue de  $-1.6 \text{ }^\circ\text{Cm}^{-1}$  a 33 m de profundidad el día 465 ( 10 de abril).

Para época húmeda, el gradiente mínimo de temperatura, tuvo una media de  $-0.6 \text{ }^\circ\text{Cm}^{-1} \pm 0.4$  a una profundidad media de 4 m. El mínimo gradiente para esta época es de  $-1.3 \text{ }^\circ\text{Cm}^{-1}$  a 19 m, el día 333 (29 de noviembre) (Tabla 4).

El valor máximo de fluorescencia de Chl-a en época seca tuvo una media de 15 ur  $\pm$  5, ubicados a una profundidad media de 8m ; el valor máximo para esta época fue de 25.2 ur a 7 m, el día 248 ( 5 de septiembre).

En época húmeda, el máximo de fluorescencia tuvo una media de 38 ur $\pm$  12 a una profundidad media de 6 m. El valor máximo para esta época fue de 226 ur, pero tratándose de un bloom de algas para el día 311 (7 de noviembre), de tomó el 2º valor más alto que es de 46 ur a una profundidad de 5 m el día 333 (29 de noviembre) (Tabla 4).

### 6.2.2.1 Coeficiente de atenuación (kd) de la radiación solar en la columna de agua en Chúa

Se observó una clara diferencia del kd entre época seca y húmeda (Fig. 20).

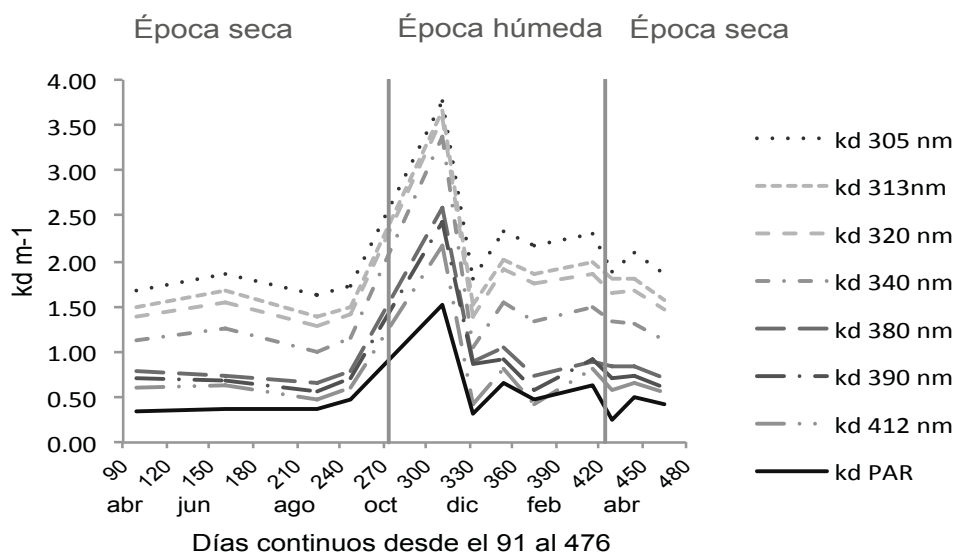


Fig. 20: Gráfico de los Kd de Chúa para las diferentes longitudes de onda en función en días continuos entre Abril 2013 (día 90) y Abril 2014 (día 476). Espectro radiómetro C-OPS (Biospherical Instruments Inc.)

Los valores más altos se calcularon en época húmeda (Tabla 3), en esta época la media de UV-B<sub>(313)</sub> fue de 1.8–0.2 m<sup>-1</sup>; para UVA<sub>(380)</sub> 0.90 –0.1 m<sup>-1</sup> y finalmente para la PAR fue de 0.5 –0.1. El día 311 (7 de noviembre), se calculó los kd más altos.

En época seca la media de UV-B<sub>(313)</sub> fue 1.6–0.2 m<sup>-1</sup>; para UV-A<sub>(380)</sub> 0.7 –0.1 m<sup>-1</sup> y para la PAR fue de 0.4 –0.1 m<sup>-1</sup>.

En la gráfica (Fig. 20), es posible ver los perfiles realizados en temporada de invierno (junio-septiembre) tuvieron los kd más bajos.

Para el total de los perfiles la media del kd de UV-B<sub>(313)</sub> fue 1.68–0.21 m<sup>-1</sup>; para UVA<sub>(380)</sub> fue 0.80 –0.11 y finalmente para la PAR fue de 0.44 –0.12; el rango de variación para estas radiaciones fue de 0.64 para UV-B y 0.40 para UV-A y PAR, lo que indica que la radiación que más varió fue la UV-B<sub>(313nm)</sub> (para calcular la media no se consideró el valor del día 311 por tratarse de un valor extremo).

Tabla 3: Valores de kd para cada longitud de onda y para cada perfil realizado entre Abril 2013 (día 99) y Abril 2014 (día 465) en Chúa. Espectro radiómetro C-OPS (Biospherical Instruments Inc).

Chua	Mes	Día	UV-B		UV-A				PAR	
			kd 305 nm (m-1)	kd 313 nm (m-1)	kd 320 nm (m-1)	kd 340 nm (m-1)	kd 380 nm (m-1)	kd 395 nm (m-1)	kd 412 nm (m-1)	kd PAR (m-1)
Época seca	Abr	99	1.68	1.48	1.40	1.13	0.79	0.71	0.60	0.35
	Jun	161	1.86	1.68	1.55	1.25	0.73	0.69	0.63	0.37
	Ag	225	1.63	1.39	1.28	1.00	0.65	0.56	0.48	0.37
	Sep	248	1.72	1.50	1.41	1.14	0.80	0.70	0.61	0.47
Época Humeda	Nov	311	3.76	3.67	3.57	3.37	2.60	2.44	2.18	1.52
	Nov	333	1.82	1.51	1.38	1.04	0.90	0.87	0.42	0.32
	Dic	353	2.32	2.03	1.91	1.54	1.05	0.92	0.82	0.65
	Ene	375	2.18	1.87	1.74	1.35	0.74	0.57	0.42	0.49
	Feb	416	2.30	1.99	1.87	1.50	0.90	0.91	0.82	0.63
	Mar	429	1.89	1.80	1.64	1.33	0.83	0.72	0.58	0.25
Época seca	Mar	445	2.09	1.80	1.67	1.30	0.85	0.74	0.66	0.50
	Abr	465	1.85	1.57	1.46	1.12	0.71	0.62	0.55	0.41

### 6.2.2.2 Distribución de fluorescencia, temperatura y radiación solar en la columna de agua en Chúa

En época húmeda la inhibición de superficie fue mayor (Tabla 4), tuvo una media de 84%, y en época seca esta inhibición tuvo una media de 76%.

Tabla 4: Muestra el gradiente mínimo de temperatura y su profundidad (termoclina), el gradiente máximo de Chl-a y su profundidad, el máximo de chl- a y su respectiva profundidad (DCM). También la profundidad a la que llega el 1% de energía de UV-B<sub>(313 nm)</sub>, UV-A<sub>(380 nm)</sub>, PAR y finalmente el porcentaje de inhibición superficial para Chúa durante las épocas seca y húmeda.

Chua	Mes	Día	Gradiente Min. de T (°C m <sup>-1</sup> )	Termoclina (m)	Prof. Grad. Max.deChl-a (m)	Gradiente Max.de Chl-a (ur m <sup>-1</sup> )	Max. de Chl-a (ur)	Prof. Max. de Chl-a (DCM) (m)	Prof. UV-B 313 nm (m)	Prof. UV-A 380 nm (m)	Prof. PAR Integrado (m)	% Inhibición
Época seca	Abr	99	-0.3	2.7	5.80	2.32	14.00	10.99	3.03	6.62	11.41	77
	Jun	161	-0.1	1.5	4.64	4.18	13.74	7.10	2.86	5.44	10.67	85
	Ag	225	-0.2	2.7	2.75	8.79	15.42	5.97	3.39	6.15	10.27	78
	Sep	248	-0.3	1.8	1.80	11.50	25.22	7.18	3.35	5.40	10.41	89
Época Húmeda	Nov	311	-0.7	3.6	2.60	209.36	<u>226.00</u>	2.86	1.31	1.85	3.41	99
	Nov	333	-0.4	1.6	4.28	41.89	46.20	4.60	3.08	4.81	8.60	98
	Dic	353	-1.3	19.4	4.47	37.10	44.40	5.22	2.51	4.31	8.24	99
	Ene	375	-0.4	22.64	3.38	31.80	41.70	3.67	2.27	4.06	7.67	91
	Feb	416	-0.3	27.7	2.80	8.69	19.90	12.38	2.36	4.82	9.71	33
Época seca	Mar	429	-0.6	29.2	3.08	13.63	11.22	12.93	2.31	4.90	9.96	66
	Mar	445	-0.9	32.3	2.91	11.28	17.11	6.63	2.46	5.30	10.73	66
	Abr	465	-1.6	33.0	4.27	5.53	8.27	6.84	2.81	6.11	12.37	72

Se puede observar que independiente de la época, la fluorescencia aumentó su señal por debajo de la profundidad media ( $2.64 \pm 0.57$  m) a la que llega el 1% de energía de UV-B (Fig. 21 y Fig. 22).

El 1% de energía de UV-A<sub>(380nm)</sub> llegó entre 4 y 6 m en época húmeda y seca respectivamente. Aunque el valor de fluorescencia comenzó a aumentar, se observó, que por lo general la profundidad del máximo de fluorescencia se dio después de la profundidad del 1% de UV-A (Fig. 21 y Fig. 22; Tabla 4).

La profundidad a la que llegó el 1% de la PAR (zona eufótica), varió en época seca y húmeda entre  $10.83 \pm 0.81$  y  $7.53 \pm 2.4$  m respectivamente; y se observó que la profundidad del máximo de fluorescencia (DCM) estuvo dentro de esta zona (entre 8 y 5 m respectivamente) (Fig. 21 y Fig. 22).



La forma del perfil de fluorescencia varió por época. Para la época húmeda, presenta una forma en punta (ahusada) con el máximo de fluorescencia entre los 5 primeros metros (con excepción del día 416 (20 de febrero)). En la época seca, tiene una forma más homogénea que se extiende con la profundidad, con un máximo de fluorescencia ubicado entre 5 a 13 m. Se observó en todos los perfiles que luego de la zona eufótica ( $9.45 \pm 2.1$ ) la fluorescencia tiene relación con el gradiente de temperatura, esto es más fácil de observar en temporada de verano (diciembre-marzo) (Fig. 21 y Fig. 22).

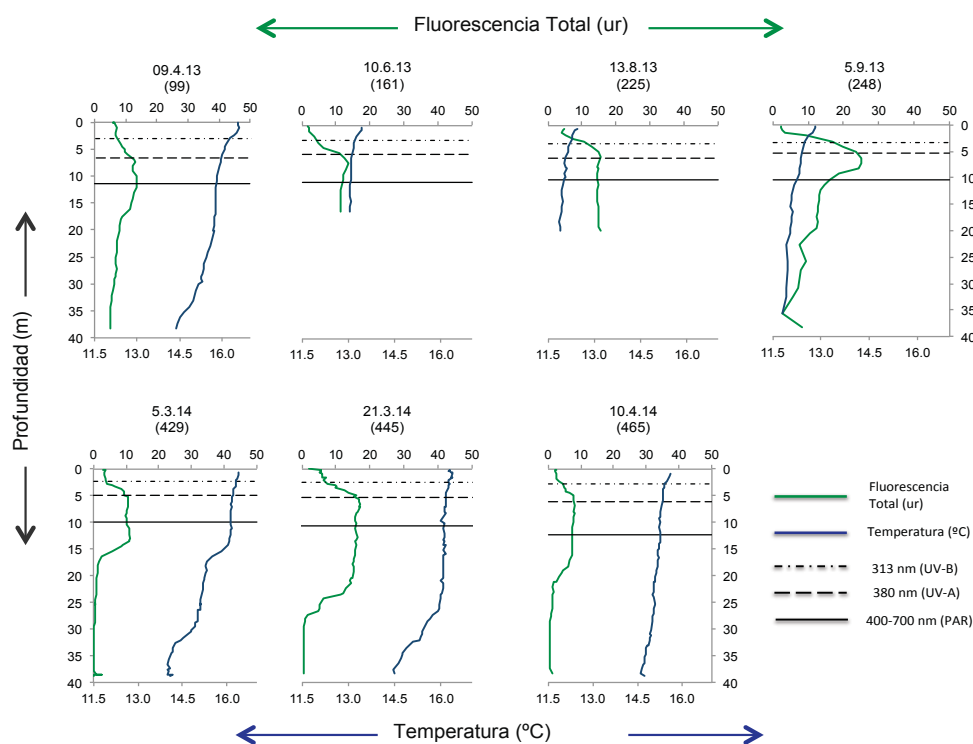


Fig. 21: Gráfico del perfil de Fluorescencia total de Chl-a (en ur) y temperatura (en °C) en función de la profundidad. En líneas paralelas punteadas se muestra las profundidades a las que llega el 1% de la radiación solar (UV-B; UV-A; PAR) para la época seca en Chúa. (En el perfil de los días 161 y 225 no se registraron datos hasta el fondo) FluoroProbe bbe (Moldaenke GmbH); Espectro radiómetro C-OPS (Biospherical Instruments Inc).

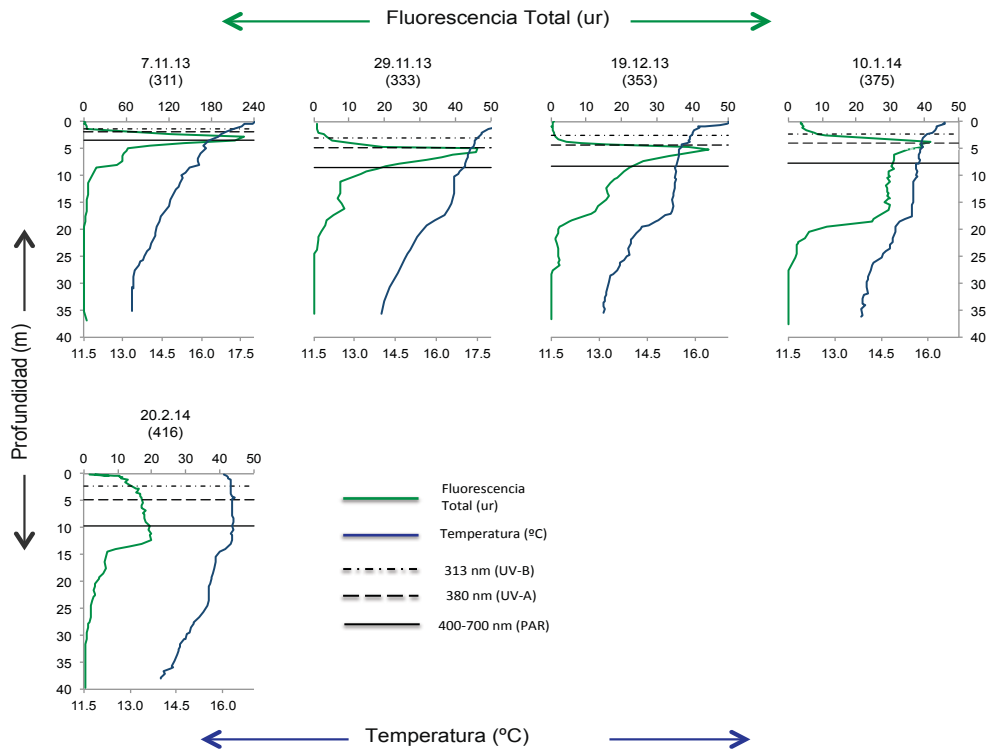


Fig. 22: Gráfico del perfil de Fluorescencia total de Chl-a (en ur) y temperatura (en °C) en función de la profundidad. En líneas paralelas punteadas se muestra las profundidades a las que llega el 1% de la radiación solar (UV-B; UV-A; PAR) para la época Húmeda en Chúa. FluoroProbe bbe (Moldaenke GmbH); Espectro radiómetro C-OPS (Biospherical Instruments Inc).

## 7 Discusión

Las respuestas de la fotosíntesis del fitoplancton a factores estresantes de la radiación solar, como la intensidad de la radiación ultravioleta (RUV) y la radiación fotosintéticamente activa (PAR), son estudiados experimentalmente desde hace 3 décadas (Villafañe 2003. Harrison & Smith 2009).

Los experimentos involucran enfoques *in vitro* e *in situ*, de cómo los factores estresantes (intensidad de la RUV y PAR) afectan al fitoplancton. Por ejemplo estudio de las respuestas de la fotosíntesis a estos factores (i.e captura de carbono) (Villafañe *et al.*1999) y como la RUV afecta al ADN del fitoplancton (Helbling *et al.* 2001 b).

También se realizaron estudios para caracterizar las condiciones ópticas del agua en lagos de alta montaña (Sommaruga 2001; Laurion *et al.* 2000), realizando mediciones de variables como concentraciones de carbono orgánico disuelto (COD) y clorofila-a (chl-a) que son atenuantes de la radiación solar (RS).

Para esta tesis no se realizó experimentos, si no, mediciones de fluorescencia de fitoplacton. Medir la fluorescencia es un medio rápido de obtener información *in vivo* e *in situ* de cómo la RS puede estar afectando al fitoplancton. Dependiendo del fluorímetro que se utilice, autores sostienen que brinda información semi cuantitativa sobre la fotosíntesis (Koote & Snel 1990) y permite ver rápidamente cómo se distribuye el fitoplancton en la columna de agua (Beutler *et al.* 2002).

### 1.1. Estimación de la concentración en clorofila-a a partir de la fluorescencia *in vivo*

Los datos del FluoroProbe (FP) genera información *in vivo* e *in situ* de fitoplancton que es equivalente a la concentración de Chl-a (eq- $\mu\text{g/L}$  de chl-a). Sin embargo, para obtener valores más precisos de la biomasa en chl-a, se debe realizar una corrección utilizando la razón media entre la Chl-a y el biovolumen considerando todos los grupos de fitoplancton (Catherine *et al.* 2012). Así, para estimar la concentración en chl-a, la fluorescencia obtenida con el FP debe ser calibrada a partir de la extracción con solvente (i. e. acetona, metanol) y de conteos de

celulares como Utermöhl (Escoffier *et al.* 2014). Sin embargo, la concordancia entre el conteo de células y los datos del FP puede ser enmascarada por las variaciones inter- e intra-específicas en las concentraciones celulares de Chl-a (MacIntyre *et al.* 2002) y de biovolumen celulares (Catherine *et al.* 2012), así como por la incapacidad para cuantificar el picofitoplancton utilizando el método Utermöhl.

Estos experimentos y metodología de calibración requiere de incubadoras que permitan cultivar fitoplancton con luz y temperatura reguladas (Fitotron). Por esta razón la calibración no se realizó en esta tesis para relacionar la fluorescencia con la concentración de chl-a, y se considerará la fluorescencia en unidades relativas, sin intentar relacionarla con concentraciones de clorofila-a, de los estudios antes realizados en el Lago. Sin embargo, trabajos como los de Catherine *et al.* (2012) y Escoffier *et al.* (2014) demostraron que la fluorescencia del FP tiene relación con la biomasa obtenida con el método de extracción de Chl-a.

## **7.1 Relaciones entre la fluorescencia del fitoplancton y las condiciones meteorológicas en Huatajata**

Las relaciones existentes entre el fitoplancton y las condiciones meteorológicas fueron previamente descritas por varios autores (Helbling & Zagarese 2003; Kirk 2011). Los autores resaltan el comportamiento de la RS en el agua y cómo influye en la producción y composición de fitoplancton, además de cómo la profundidad de mezcla (que es influenciada por vientos) modula la exposición de los organismos acuáticos a la RUV.

En la tesis, se encontró una relación significativa entre la fluorescencia total de Chl-a con dosis de PAR y viento ( $R^2=0.96$   $p<0.05$ ), esto ocurrió al recorrer un día los datos de fluorescencia, lo que nos permite inferir que en Huatajata la fluorescencia del fitoplancton responde con un día de retraso a las condiciones atmosféricas (viento, RS). Esto es lógico ya que como explica Moreno *et al.* 2008, en condiciones naturales (*in vivo*) la fluorescencia de los sistemas fotosintéticos cambia continuamente siguiendo su adaptación al ambiente cambiante (i.e. cambios en la intensidad luminosa).

Villafañe & Helbling (2003) resaltan que los niveles de RS que llega a la superficie de la Tierra exceden los niveles requeridos por los organismos fotosintéticos (irradiancia de PAR entre 50 y 60  $\text{Wm}^{-2}$ ). En el Lago Titicaca, para el periodo diurno de junio 2013 a enero 2014, la media de irradiancia de PAR llegó a 234  $\text{Wm}^{-2}$ , indicando que el fitoplancton en la superficie de Huatajata esta bajo estrés lumínico, lo que podría ocasionar foto inhibición inducida por PAR (Villafañe *et al.*1999).

En el modelo obtenido por RLM para fluorescencia total de Chl-a (Fig. 16) la dosis de PAR es una variable que explica la fluorescencia total de chl-a, sin embargo, el viento también es una variable significativa, ya que genera mezcla de agua, de esta manera como el fitoplancton está en constante movimiento, la PAR es fluctuante por lo que el efecto negativo que podría tener no es ni directo ni permanente (Ferrero *et al.*2006, Helbling *et al.* 2013). Además, es importante resaltar que a 1.5 m de profundidad la energía de PAR será menor que en la superficie.

También es importante tomar en cuenta que, Villafañe *et al.* (1999), demostraron que en el Lago Titicaca, el fitoplancton está adaptado a altos niveles de RS (i.e.500  $\text{Wm}^{-2}$ , en un día soleado sin nubes) y es menos sensible a la RUV que el fitoplancton de zonas polares, debido a que está adaptado a estos altos flujos de radiación por ser parte de un lago de gran altitud (3810msnm) y baja latitud (16°S).

En cuanto a la fluorescencia de cada grupo, no se encontró relación para Clorófitas y Cianófitas con estos factores climáticos, posiblemente por su baja fluorescencia durante este periodo. Escoffier *et al.* (2014) observaron que el FP tiene ciertas dificultades al reconocer los grupos espectrales que emiten señal de fluorescencia menor a 5 ur. La señal de fluorescencia de Clorófitas y Cianófitas fue menor 2 ur. Estos valores bajos hubieran podido impedir la definición de

relaciones significativas. Con mayor de señal de fluorescencia (5 - 13 ur), fue posible una relación significativa.

Para diatomeas/dinófitas (Fig. 15, D) la relación fue significativa con dosis de PAR y viento ( $R^2 = 0.93$ ,  $p < 0.05$ ). PAR fue más importante. Sin embargo, la relación con la velocidad máxima del viento coincide con los resultados de un estudio llevado a cabo en un lago somero por Carrick *et al.* (1993), sobre la composición y biomasa de fitoplancton, este mostró que las altas velocidades de viento tenían buena relación con la biomasa de diatomeas o micro algas (dinófitas), no así bajas velocidades, y como ya se mencionó, la mezcla en la columna de agua reduce el efecto negativo que la RS pueda tener.

Para las criptófitas el viento y la precipitación fueron variables significativamente importantes ( $p < 0.05$ ) aunque la relación no fue muy alta ( $R^2 = 0.5$ ). El viento tuvo levemente mayor importancia. Esto se debe a que por lo general algunas especies de las criptófitas prefieren habitar en el fondo del agua evitando la luz (Lane *et al.* 2008; Wilk *et al.* 1999), entonces su señal de fluorescencia (a 1.5 m de profundidad) fue mayor después de la influencia de mayores velocidades de viento y también de días lluviosos.

Este estudio muestra que en el Lago menor del Titicaca (Huatajata) los datos meteorológicos (RS y Viento) fueron suficientes para explicar la fluorescencia del fitoplancton durante el año 2013 al 2014. Esto es consistente con otros trabajos (Carrick & Schelske 1997; 2002, Carrick *et al.* 1993) que comprobaron que en lagos someros la luz y el viento son los principales factores que influyen en la fotosíntesis y la biomasa del fitoplancton.

## **7.2 Perfiles verticales de fluorescencia *in vivo* en relación a la RS en estaciones somera (Huatajata, $\leq 5$ m) y profunda (Chúa, 40 m).**

El máximo de fluorescencia de clorofila para Huatajata en todos los perfiles realizados esta entre 2 y 19 ur , lo que es bajo comparado con la estación de Chúa que llega a 46 ur (época húmeda). Era de esperarse, que a) al ser somera,

b) tener el fondo colonizado por macrófitas y c) tener su columna de agua mezclada por los vientos térmicos, Huatajata presentaría mayor valor de fluorescencia de fitoplancton, por tener mayor disponibilidad de materia orgánica en suspensión (Rodrigo *et al.* 1999). Sin embargo, es importante tomar en cuenta que en Huatajata, en el fondo, donde se encuentran las *Charas* sp, el fitoplancton puede protegerse de la UV-B pero parcialmente de la UV-A (Fig. 19). Es por esto que en algunos casos (Fig. 18 y Fig.19) el máximo de fluorescencia se observó a proximidad del fondo, estos valores podrían corresponder a una biopelícula en suspensión.

Scheffer *et al.* (1993), demostraron que los lagos someros pueden encontrarse en dos estados estables alternativos, un estado de aguas claras dominado por macrófitas acuáticas, y un estado de aguas turbias caracterizado por altas biomásas de fitoplancton. Huatajata estaría en un estado claro, con la dominancia de *Charas* sp. en el fondo.

Por otro lado, si se comparan los  $k_d$ , el valor medio de  $k_d$  para PAR y UV-A<sub>(380nm)</sub> en todos los perfiles de radiación es de 0.45 y 0.80  $m^{-1}$  en Chúa y Huatajata, mientras que el  $k_d$  de UV-B<sub>(313)</sub> de Huatajata (1.81  $m^{-1}$ ) es 7 % mayor que el  $k_d$  de Chúa (1.68  $m^{-1}$ ). Esto sugiere que la columna de agua de Huatajata podría tener más partículas disueltas (ie. sedimento) o COD que en Chúa, ya que son estos los principales atenuantes de RUV, como varios autores citan (Hargreaves 2003; Sommaruga & Augustin 2006; Bracchini *et al.* 2005). Sin embargo, Huatajata es de agua clara y esta aparente mayor concentración de partículas disueltas podría deberse al sedimento que es removido por el viento.

### **7.2.1 Estacionalidad de los perfiles verticales.**

Se definió una época seca y húmeda en este estudio no sólo con los datos que se obtuvieron en este periodo, sino también, comparando con información del clima en el altiplano publicada por Garreaud, R *et al.* (2003), que mostró que la época húmeda inicia a fines de año (noviembre- diciembre) y se extiende hasta enero-febrero.

En el transcurso de cada época (seca y húmeda), se observaron diferencias en los valores de cada variable (i.e. Fluorescencia, radiación, temperatura) y se los describe a continuación.

Se observó una estacionalidad en los valores de  $k_d$  (Fig. 17 y Fig. 20), estos aumentaron hacia la época húmeda entre 7 y 15 % para UV-B ( $_{313\text{ nm}}$ ); 12 y 14 % para UV-A ( $_{380\text{ nm}}$ ), 24 y 22 % para PAR en Huatajata y Chúa respectivamente, en esta época también se notó mayor velocidad de viento (Fig. 11). Para los meses de mayor precipitación (Fig. 10) se calculó el mayor  $k_d$  de PAR (Tabla 1y Tabla 3) y esto coincide, con una menor Dosis diaria de PAR (Fig. 12).

Somaruga & Augustin 2006, en un lago alpino de Austria, relacionaron la estacionalidad de  $k_d$  con la biomasa de fitoplancton. En este trabajo los valores de  $k_d$ , tuvieron relación con la fluorescencia de fitoplancton.

En Huatajata, en época húmeda, se observó que la fluorescencia de los distintos grupos de fitoplancton aumentó, lo que influyó en el  $k_d$ . Para este tiempo, el mayor aumento corresponde a las clorófitas y cianófitas (Fig. 15), lo que puede estar en relación al ciclo de vida de estas algas, que pudiera estar favorecido por el aumento de temperatura (Fig. 13) marcando también la estacionalidad.

Estudios (Villafañe *et al.* 2004; Helbling *et al.* 2001a), demostraron que comunidades invernales de fitoplancton son más sensibles a la RUV. En este trabajo, los valores de  $k_d$  en temporada de invierno (junio-septiembre), tuvieron los valores más bajos (Fig. 17 y Fig. 20) y mayor penetración de la RS, esta situación podría afectar más al fitoplancton. Para esta época, en los perfiles se notó menor señal de fluorescencia, así como en escala temporal, en especial para clorófitas y cianófitas (Fig.15).

En Chúa, hacia la época húmeda, la fluorescencia también aumentó su valor al igual que  $k_d$ . El Bloom de algas registrado en el día 311 (7 de noviembre), es un



ejemplo claro de cómo el fitoplancton es capaz de aumentar el valor de  $k_d$  y de reducir las profundidades de penetración de la RS (Fig. 22; Anexo 5).

Por otro lado, Hargreaves (2003), explica que si la irradiancia de RUV es capaz de causar daño a la biota, se observa un rango de profundidades de estrés. En Huatajata y Chua esto fue observado, en superficie existió una inhibición de fluorescencia (Tabla 2 y Tabla 4). Sin embargo, en Huatajata la inhibición de superficie (Anexo 6) es 30% menor que en Chúa, donde alcanzó un 99% en época húmeda.

Es importante notar que la superficie es el peor escenario para el fitoplancton ya que recibe la UV-B + UV-A + PAR. Tal como explican Villafañe *et al.* (1999) y Helbling *et al.* (2001b), la inhibición inducida por la RUV se reduce con la profundidad. Esto ocurrió en ambas estaciones, se observó que la fluorescencia de chl-*a*, independientemente de la época, comienza a aumentar su señal por debajo de la profundidad a la que llega el 1% de UV-B<sub>(313 nm)</sub> (Fig. 18 y Fig.22).

Villafañe *et al.* (1995), en un experimento de fotosíntesis llevado a cabo en la Antártica, demostraron que cuando UV-B era excluida, el rendimiento fotosintético mejoraba un 40% y adicionalmente un 80% cuando UV-A era excluida.

En este trabajo se observó que en Chúa, después de la presencia de UV-B, en la porción en la que quedaba UV-A<sub>(380 nm)</sub> + PAR la fluorescencia iba aumentando su valor, sin embargo, la máxima señal de fluorescencia de Chl-*a* se detectó por lo general solo después de la profundidad del 1% de UV-A pero dentro de la zona eufótica (la profundidad a la que llega el 1% de PAR). La zona eufótica en este periodo de estudio llegó a una media de  $9.45 \text{ m} \pm 2.1$  (Fig. 21 y Fig. 22).

Villafañe *et al.* (1999), en Chua, por medio de experimentos relacionados a la captura de carbono, demostraron un 80% de fotoinhibición superficial debido a RUV, (es decir, en la superficie, la captura de carbono por el fitoplancton era menor que en el fondo). El 20 % de esta inhibición se debió a UV-B y el 60 % a

UV-A. En los perfiles presentados en este trabajo, no se puede precisar cuánto de la inhibición se debió a UV-B, UV-A o PAR, sin embargo es claro que la presencia de UV-B incremento esta inhibición.

En Huatajata, por ser una estación somera, la PAR no se atenuó en la columna de agua, UV-A solo llegó a atenuarse en época húmeda, la máxima señal de fluorescencia estuvo entre 2.5 y 5 m, lo que nos muestra que el régimen de mezcla polimíctico hace que la radiación que llega al fitoplancton sea muy fluctuante e incapaz de causar daños o reacciones a corto plazo, en este caso debido a UV-A. Esta característica en lagos someros polimícticos fue observado por Kinzie *et al.* (1998), en el lago Waiau en Hawái y también por Villafañe *et al.* (2007) en un lago somero de China, indicando que la mezcla vertical no sólo contrarrestó el efecto de RUV sino que incluso mejoró la eficiencia fotosintética.

En Chúa, por ser una estación profunda, se observó un perfil de fluorescencia que mostró claramente la profundidad del máximo de señal de Chl-a (DCM, del inglés Depth Chlorophyll maximum) entre 8 y 5m en época seca y húmeda respectivamente. Según varios autores (Sommaruga 2001), estas DCM resultan de la evitación del fitoplancton a la RUV.

Rodhe *et al.* (1966; 1962) y Ras *et al.* (2008), en lagos alpinos oligotróficos y en aguas híper oligotróficas del Pacífico respectivamente, mostraron que las concentraciones de Chl-a en la superficie son bajas y las DCM profundas, lo que es una idea que hace pensar que estos perfiles de fluorescencia tienen una gran relación con la concentración de chl-a.

En cuanto a la forma del perfil fluorescencia de chl-a, en Huatajata se observó que la señal aumentaba más hacia el fondo en época húmeda. En Chúa, se ve más claramente que la forma en época seca fue más homogénea que en época húmeda que presentó picos ahusados entre los 5 primeros metros.

Estas diferencias en el perfil (Chúa), tienen relación en los primeros 13 m con la penetración de la RS, sin embargo, para ambas épocas (en temporada de verano

diciembre- abril) por debajo de la zona eufótica ( $9.78 \text{ m} \pm 1.7$ ), se observó (Fig. 21 y Fig. 22) que la fluorescencia baja su intensidad en relación a la termoclina de verano ( $27.4 \text{ m} \pm 5.3$ ). Lo que implica que en el epilimnio, la mezcla de agua (ocasionada por el viento, el calentamiento del sol) tiene también influencia en la forma del perfil. Helbling *et al.* 1994 mostró que la profundidad del epilimnio y la velocidad de mezcla influyen en la cantidad de energía límite que llega al fitoplancton para causar fotoinhibición.

### 7.3 Comparación del valor de $k_d$ , entre la tesis actual con los datos de Lazzaro (1981) y Villafañe *et al.* (1999)

Se compararon los valores de  $k_d$  que se obtuvieron de la zona de Chúa por tres diferentes trabajos, y se observó una gran diferencia ocurrida en los últimos 16 años (Tabla 5)

Tabla 5: Muestra los datos de  $k_d$  y zona eufótica obtenidos en la estación de Chúa por tres estudios diferentes.

Año	Mes	Radiómetro	$k_d$ UV-B (m-1)	$k_d$ UV-A (m-1)	$k_d$ PAR (m-1)	Zona eufótica (m)	Referencia
1979-1980	Febrero a marzo	Li-Cor 192S y Li-Cor185 <sup>a</sup>			$0.24 \pm 0.03$	20	Lazzaro (1981)
1997	Septiembre	IL-1700	0.66	0.24	0.22	20	Villafañe <i>et al.</i> (1999)
2013-2014	Abril a abril	C-OPS Biospherycall	$1.68 \pm 0.2$	$0.8 \pm 0.1$	$0.44 \pm 0.1$	$9.45 \pm 2.1$	Tesis actual *

\*  $k_d$  para UV-B(313nm),UV-A(380nm)

Para la PAR, el valor del  $K_d$  no cambió significativamente entre 1980 y 1997. Sin embargo, en este estudio luego de 16 años, el valor del  $k_d$  se duplicó llegando a  $0.45 \text{ m}^{-1}$  y la zona eufótica se redujo a la mitad (de 20 a 10m).

Para los  $k_d$  de la RUV, Villafañe *et al.* (1999) presentaron valores integrados de  $K_d$  para UV-B y UV-A. En el presente estudio tenemos las medias de los dos  $K_d$  para las longitudes de onda UV-B<sub>(313)</sub> y UV-A<sub>(380)</sub>. Sin embargo, podemos sugerir que en relación a 1997 el valor de UV-B incrementó al doble y para UV-A a más del triple.

Estos cambios en los valores de  $K_d$  nos indican que la claridad del agua se ha reducido; se ha vuelto más oscura que hace 16 años, para esta parte del Lago Menor del Titicaca.

Como sugiere Helbling (2014), en el Lago Titicaca están ocurriendo dos fenómenos: (1) eutrofización, que es generada por el aumento de nutrientes en el agua lo que coadyuva a mayor producción primaria (mayor biomasa), mayor materia orgánica que atenúa principalmente a PAR (Fontúrbel 2004 ), y/o (2) aumento de la materia particulada (i. e. Por remoción de tierra, lluvias viento ), o COD que atenúan principalmente a la RUV.(Sommaruga 2006, 2001; Hargreaves 2003)

Lazzaro X., Achá D. & Nuñez J.,(en perspectiva); evidenciaron en la Bahía de Cohana (ubicada en el Lago Menor) que la eutrofización en esta zona comenzó a ocurrir durante la última década. Esta podría ser relacionada con el crecimiento demográfico de la región litoral entre Huarina, Huatajata y Tiquina, y en menor proporción con la expansión de la mancha urbana de la ciudad de El Alto que descarga sus aguas residuales en la Bahía de Cohana (al Sur-Este).

#### **7.4 Comparación de los kd (UV y PAR) en el Lago Titicaca y otros lagos de alta montaña (tropicales y polares).**

Los trabajos de Morris *et al.* (1995) y Laurion *et al.* (2000) realizaron el cálculo de kd para cada longitud de onda con la pendiente de una regresión lineal entre la radiación y la profundidad, como fue para esta tesis. Aguilera *et al.* obtuvo los valores de kd a partir de un modelo empírico desarrollado por Morris *et al.* 1995, a partir de la concentración de COD en el agua.

Se puede observar (Tabla 6) que las mayores variaciones de kd en los diferentes lagos son para la RUV; para kd 305 en valor del Lago Titicaca es relativamente bajo, sin embargo la diferencia se hace más pequeña hacia longitudes de onda mayores. Para PAR el kd del Lago Titicaca se mantiene en un nivel medio comparación estos lagos.

En esta tesis no se tiene el valor de COD, sin embargo, se puede especular con el valor de kd del agua y se observa que en Chúa no habría altas concentraciones de COD como para el lago Toolik en o a Willow Creek y que quizá la concentración de COD esté más cerca al Lago Belle.

Tabla 6: muestra los valores de  $kd\ m^{-1}$  para las longitudes de onda 305,320,340,380 en diferentes lagos de alta montaña en la zona tropical y polar .

Lugar	Latitud	UVB 305 nm	320 nm	UVA 340 nm	380 nm	PAR	COD mgL-1	Referencia
Belle EEUU	45°56 N	2,43	2,25	1,9	1,24	0,44	2.52	
Willow Creek EEUU	45°N	11.04	8.59	6.73	3.82	0.68	5.26	
Toolik Alaska	68°37 N		13,98	10.67	5,79	0.75	5.07	Morris <i>et al</i> 1995
Nahuel Huapi, Bariloche	44°55 S	0.63	0.49	0.38	0.17	0.23	0.24	
Escondido, Bariloche	41°05 S	8.8	7.68	5.8	3.03	0.46	2.66	
Estany Tor Alps Austria	42°33 N	3.46	2.5	1.98	1.2	0.48	2.14	Laurion <i>et al</i> 2000
Lagunas del Tunari Bolivia	17° S		7,1	2,9			2.99	Aguilera <i>et al</i> 2013
Chua Lago Titicaca	16°14 S	1,95	1,58	1,24	0.81	0.44		Tesis Actual

## 8 Conclusión

Los resultados obtenidos en este trabajo, ayudan a comprender cómo el fitoplancton del Lago Titicaca (Lago Menor) responde *in vivo* e *in situ* a factores climáticos externos como la penetración de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y la radiación ultravioleta (RUV). Para esto se plantearon 2 hipótesis:

La primera hipótesis planteó que los factores climáticos influían de manera diferente en la fluorescencia de los grupos de fitoplancton. Esto se evidenció, combinando datos de mediciones de alta frecuencia con la herramienta de regresión lineal múltiple (RLM). Se mostró que dos factores climáticos, dosis de PAR y viento, están significativamente relacionados con la fluorescencia del fitoplancton en Huatajata.

Estos factores influyen de manera diferente en la fluorescencia de las criptófitas en la que el viento es un factor más importante que para diatomeas/dinófitas, siendo que a mayor velocidad de viento las criptófitas (que usualmente habitan al fondo de la columna de agua) aumentan su señal de fluorescencia.

La información obtenida es consistente con otros estudios en los que remarcan la importancia de la Luz y el viento en la composición y fotosíntesis del fitoplancton en lagos poco profundos. Además resaltan que la mezcla vertical en la columna de agua está relacionada con la fotoinhibición del fitoplancton.

La segunda hipótesis planteaba que los perfiles de fluorescencia de Chl-a del fitoplancton en la columna de agua en Huatajata (estación somera) y Chúa (estación profunda) se ven influenciados por la penetración de RUV y PAR y son diferentes. Se mostró que la forma de los perfiles de fluorescencia tienen relación con la penetración de la RS y también con la época húmeda y seca.

En ambas estaciones la fluorescencia y el coeficiente de atenuación ( $k_d$ ) aumentaron en época húmeda y la penetración de RUV y PAR en el agua disminuyó.

En Chúa se detectó un máximo de fluorescencia en el fondo, en general siempre 1) dentro de la zona eufótica (PAR Z1%) y 2) por debajo de la profundidad a la que llegaba el 1% de UV-B y UV-A. En Huatajata UV-A se atenuó en época húmeda cerca del fondo pero PAR no llegó a atenuarse ni en época húmeda ni seca.

En ambas estaciones el mayor causante de inhibición de superficie (0 a 3 m) fue la presencia de UV-B. Sin embargo, la inhibición fue menor en Huatajata que en Chúa, debido al régimen de mezcla que ésta tiene (polimíctico).

En Chúa la profundidad del máximo de fluorescencia tuvo relación con la época húmeda y seca. En época seca esta posición fue más profunda que en época húmeda, esto está relacionado con penetración de la RS que es más profunda en época seca que en húmeda. Sin embargo, luego de la zona eufótica la fluorescencia tuvo mayor relación con la temperatura (termoclina).

La distribución vertical de fluorescencia en Chúa fue comparable con otros trabajos mostrando la misma forma de distribución usando métodos clásicos (extracción de Chl-a o biovolumen). Por otro lado los datos proporcionados por este trabajo mostraron que la zona eufótica en la estación de Chúa ha reducido a la mitad lo que significa que la claridad de agua está reduciendo.

Finalmente, los datos que presenta esta tesis son únicos para el Lago, ya que se trata de un monitoreo continuo, y los datos de fluorescencia in vivo son nuevos para el Lago. Dado que estas observaciones fueron comparables con otros trabajos realizados con diferentes metodologías, nos hace pensar que medir fluorescencia en el Lago Titicaca es una herramienta instantánea que puede facilitar monitoreos permanentes.

## **9 Perspectivas y recomendaciones**

El proyecto Titicaca Sensores ha generado en el Lago Menor, un nuevo conjunto de datos a escala de tiempo diferente (frecuencia de 45 min y cada dos semanas), y para dos tipos de profundidad (somero y profundo). Estas mediciones proporcionan informaciones nuevas y complementarias, por comparación con los métodos clásicos, pero profundamente esenciales, para el recuento de la cuantificación de biomasa y el fitoplancton celular (biovolumen).

En particular este trabajo de tesis se realizó con el propósito de reiniciar el estudio fotobiológico en el Lago. Los modelos estadísticos generados tanto para la fluorescencia total de diatomeas /dinófitas y de criptófitas podrían permitir realizar simulaciones empíricas que proporcionarían información pertinente a fin de estudiar las predicciones del escenario debido al cambio global (es decir, aumento de la RS y vientos). Sin embargo se hace necesario ampliar las variables (i.e. DOC, nutrientes, temperatura) para entender, por ejemplo, cuánto y cómo se absorbe y dispersa la RUV en el agua, porque de esto dependerá el efecto que ésta tenga sobre el fitoplancton.

Se hace claro que la ampliación de la escala de tiempo a alta frecuencia (en lugar de promedios) nos permitirá cuantificar parámetros diarios del metabolismo del ecosistema.

El siguiente paso sería combinar las mediciones de alta frecuencia de fluorescencia y oxígeno disuelto para cuantificar la producción primaria neta, la respiración del ecosistema y la producción primaria bruta. Este enfoque está en marcha de equipos de investigación, en Francia o en América del Norte, para los grandes ríos.

El conjunto de datos de esta tesis es suficientemente relevante para la aplicación de esta metodología al Lago Menor del Titicaca. El éxito de esta perspectiva permitirá observar y cuantificar los procesos biogeoquímicos, que no estaban siendo capaces de observar previamente.

En el Lago Titicaca, está en proceso el proyecto de una planta de monitoreo continuo que envuelve a instituciones entre Perú y Bolivia, como la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), al Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), la Alta Institución del Lago Titicaca (ALT), el Instituto del mar del Perú (IMARPE), el Proyecto Especial para el Lago Titicaca (PELT), y el Ministerio de Medio Ambiente y Aguas (MMAA). Este proyecto que reúne especialistas en medio ambiente pretende monitorear el Lago Titicaca y generar información que ayude a prevenir procesos como la eutrofización, contaminación, que ayude con el control de pesca etc. Este monitoreo reviste gran importancia y la única forma de preservar al Lago Titicaca.

## 10 Bibliografía:

- Aguilera, X. D. C., Coronel, J. S., & Lazzaro, X. T. (2013). Tropical high-altitude Andes lakes located above the tree line attenuate more strongly UV-A radiation than typical temperate alpine lakes. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 1-9. doi:10.1039/c3pp25285j
- Aguilera, X., & Coronel, J. S. (2009). Radiación ultravioleta en lagunas altoandinas de Bolivia : atenuación por COD y su efecto sobre los organismos acuáticos, . *Rev. Bol. Ecol. Y Cons. Amb.* 26: 1-8.
- Andrade M. (2003). Aspectos físicos de la atmosfera. En: La Radiación Ultravioleta en Bolivia, Zaratti F.S. & Forno R.G. (eds), Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS) & Laboratorio de Física de la Atmósfera (IIF-UMSA) pp. 3-11.
- Beutler, M., Wiltshire, K. H., Meyer, B., Moldaenke, C., Lüring, C., Meyerhöfer, M., Dau, H. (2002). A fluorometric method for the differentiation of algal populations *in vivo* and *in situ*. *Photosynthesis research*, 72(1), 39-53. doi:10.1023/A:1016026607048
- Blumthaler M. & Rehwald W. (1992). Solar UV-A and UV-B radiation fluxes at two alpine stations at different altitudes. *Theoretical Applied Climatology* 46: 39-44.
- Behrenfeld, M. J., (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature* 444: 752–755, doi:10.1038/nature05317
- Behrenfeld, M. J., Lean D.R.S., Lee, H. (1995). Ultraviolet B radiation effects on inorganic nitrogen uptakes by natural assemblages of oceanic plankton. *J. Phycol.*, 31 25-36.



- Bracchini L., Cózar A., Dattilo A.M., Picchi M.P., Arena C., Mazzuoli S. & Loïselle S.A. (2005). Modelling the components of the vertical attenuation of ultraviolet radiation in a wetland lake ecosystem. *Ecological Modelling* 186: 43–54.
- Bradley, R. S., M. Vuille, H. F. Diaz, and W. Vergara (2006), Threats to water supplies in the tropical Andes, *Science*, 312, 1755 – 1756, doi:10.1126/science.1128087.
- Bukaveckas P.A. & Robbins-Forbes M. (2000). Role of dissolved organic carbon in the attenuation of photosynthetically active and ultraviolet radiation in Adirondack lakes. *Freshwater Biology* 43: 339-354.
- Buma A.G.J., Boelen P. & Jeffrey W.H. (2003). UVR-induced DNA damage in aquatic organisms. En: *UV effects in aquatic organisms and ecosystems*, Helbling E.W. & Zagarese H.E. (eds), The Royal Society of Chemistry, Cambridge: 291-327.
- Cabrera S., Lopez M. & Tartarotti B. (1997). Phytoplankton and zooplankton response to ultraviolet radiation in a high-altitude Andean lake: short- versus long-term effects. *Journal of Plankton Research* 19: 1565-1582,
- Cabrol N. A., E. A. Grin, G. Chong, E. Minkley, A. N. Hock, Y. Yu, L. Bebout, E. Fleming, D. P. Häder, C. Demergasso, J. Gibson, L. Escudero, C. Dorador, D. Lim, C. Woosley, R. L. Morris, C. Tambley, V. Gaete, M. E. Galvez, E. Smith, I. Uskin-Peate, C. Salazar, G. Dawidowicz and J. Majerowicz. (2009). The high lakes project, *J. Geophys. Res.: Bio- geoscience*, 114, DOI: 10.1029/2008jg000818 g00d06.
- Cacho J. (2003). La capa de ozono y el agujero antártico. En: *La Radiación Ultravioleta en Bolivia*, Zaratti F.S. & Forno R.G. (eds), Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS) & Laboratorio de Física de la Atmósfera (IIF-UMSA) pp. 15–25.
- Carmouze, J.P., Aquize, E.. (1981). La régulation hydrique du lac Titicaca et l'hydrologie de ses tributaires. - *Rev. Hydro- biol.trop.E*, 311-328.
- Carmouze, J. P., C. Arce & J. Quintanilla, 1977. La regulation hydrique des lacs Titicaca et Poopo. *Cah. O.R.S.T.O.M., ser. Hydrobiol.* 11: 269-283.
- Carrick, H.J, & Schelske ,C.L., (1997). Have we overlooked the importance of small phytoplankton in productive waters? *Limnol Oceanogr* 47: 1613–1621
- Carrick, H. J., Aldridge, F. J., & Schelske, C. L. (1993). Wind Influences phytoplankton biomass and composition in a shallow, productive lake. *Limnology and Oceanography*, 38(6), 1179-1192. doi:10.4319/lo.1993.38.6.1179
- Catherine, a, Escoffier, N., Belhocine, a, Nasri, a B., Hamlaoui, S., Yéprémian, C., ... Troussellier, M. (2012). On the use of the FluoroProbe®, a phytoplankton quantification method based on fluorescence excitation spectra for large-scale

- surveys of lakes and reservoirs. *Water Research*, 46(6), 1771–84. doi:10.1016/j.watres.2011.12.056
- Cosgrove, J., Borowitzka, M., (2010). Chlorophyll Fluorescence Terminology: An Introduction. En: Suggett, D.J., Prášil, O., Borowitzka, M., (eds). *Chlorophyll-a Fluorescence in Aquatic Sciences: Methods and Applications*, Developments in Applied Phycology 4, DOI 10.1007/978-90-481-9268-7\_1, " Springer Science+Business Media B.V.
- Dolbeth, M., Pardal, M.A., Lilleblo, A.I., Azeiteiro, U. & Marques, J.C., (2003). Short- and long-term effects of eutrophication on the secondary production of an intertidal macrobenthic community. *Marine Biology*, 10.1007, 1133-1135.
- Eppley, R. W., (1980). Estimating phytoplankton growth rates in the central oligotrophic oceans, p. 231-242. *Primary productivity in the sea*. Brookhaven Symp. Biol. 31. Plenum.
- Escoffier, N., Bernard, C., Hamlaoui, S., Groleau, A., & Catherine, A. (2014). Quantifying phytoplankton communities using spectral fluorescence: the effects of species composition and physiological state. *Journal of Plankton Research*, 0, 1–15. doi:10.1093/plankt/fbu085
- Farman J.C., Gardiner B.G. & Shanklin J.D (1985). Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction. *Nature* 315 (6016): 207.
- Ferrero E., Eöry M., Ferreyra G., Schloss I., Zagarese H., Vernet M. & Momo F. 2006. Vertical mixing and ecological effects of ultraviolet radiation in planktonic communities. *Photochemistry and Photobiology* 82: 898–902.
- Figuerola, F. L., Salles, S., Aguilera, J., Jiménez, C., Mercado, J., Viñegla, B., Flores-Moya, A., & Altamirano, M. (1997). Effects of solar radiation on photoinhibition and pigmentation in the red alga *Porphyra leucosticta*, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 151, 81–90.
- Fontúrbel, F. (2004). Modelo operacional ambiental y aspectos sociales relevantes del proceso de eutrofización localizada en cuatro estaciones experimentales del lago Titikaka. *Publicaciones Integrales*, La Paz. 241 p.
- Fontúrbel, F. (2003) . Algunos criterios biológicos sobre el proceso de eutrofización a orillas de seis localidades del lago Titikaka. *Ecología Aplicada*, 2, 75-79.
- Genty B, Briantais J-M, Baker NR (1989) The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochim Biophys Acta* 990:87–92

- Goericke, R., . Montoya J. P. (1998). Estimating the contribution of microalgal taxa to chlorophyll a in the field-variations of pigment ratios under nutrient- and light-limited growth. *Marine Ecology Progress Series*. 169: 97-112.
- Gregor, J., Maršálec, B., (2004). Freshwater phytoplankton sa quantification by chlorophyll a: a comparative study of *in vitro*, *in vivo* and *in situ* methods. *Water Research* 38, 517e522.
- Hanelt, D., Uhrmacher, S., Nultsch, W., (1995). The effect of photoinhibition on photosynthetic oxygen production in the Brown alga *Dictyota dichotoma*. *Bot Acta* 108:99–105
- Hargreaves B. R. (2003). Water column optics and penetration of UVR. En: Helbling, E. W. & H. E. Zagarese (eds.): UV effects in aquatic organisms and ecosystems. *Comprehensive Series in Photochemical and Photobiological Sciences*. The Royal Society of Chemistry. Cambridge, U. K. pp. 59-105
- Harrison J.W. & Smith R.E.H. 2011. The spectral sensitivity of phytoplankton communities to ultraviolet radiation-induced photoinhibition differs among clear and humic temperate lakes. *Limnology and Oceanography* 56(6): 2115–2126, doi:10.4319/lo.2011.56.6.2115
- Harrison, J. W., & Smith R. E. H. (2009). Effects of ultraviolet radiation on the productivity and composition of freshwater phytoplankton communities. *Photochem. Photobiol. Sci.* 8:1218–1232, doi:10.1039/b902604e
- Helbling E.W., Carrillo P., Medina-Sánchez J.M., Durán C., Herrera G., Villar-Argaiz M. & Villafañe V.E. (2013). Interactive effects of vertical mixing, nutrients and ultraviolet radiation: *in situ* photosynthetic responses of phytoplankton from high mountain lakes in Southern Europe. *Biogeosciences* 10(2): 1037–1050. doi:10.5194/bg-10-1037-2013
- Helbling E.W., Villafañe V.E. & Barbieri E.S. (2001a). Sensitivity of winter phytoplankton communities from Andean lakes to artificial ultraviolet-B radiation. *Revista Chilena de Historia Natural* 74: 273-282.
- Helbling E.W., Villafañe V., Buma A., Andrade M. & Zaratti F. (2001b). DNA damage and photosynthetic inhibition induced by solar ultraviolet radiation in tropical phytoplankton (Lake Titicaca, Bolivia). *European Journal of Phycology* 36(2): 157–166, doi:10.1080/09670260110001735308.
- Helbling E.W. & Zagarese H. (eds) 2003. UV effects in aquatic organisms and ecosystems. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.

- Helbling, W., (2014). Impacto de la radiación solar sobre el fitoplancton del Lago Titicaca . En Xavier Lazzaro (Presidente), Simposio sobre el Lago Titicaca. Simposio llevado a cabo en La Paz Bolivia. Organizado por el IRD y la ALT.
- Huot, Y., & Babin, M., (2010). Overview of Fluorescence Protocols: Theory, Basic Concepts, and Practice. En: Suggett, D.J. , Prášil, O., Borrowitzca, M., (eds). Chlorophyll-a Fluorescence in Aquatic Sciences: Methods and Applications, Developments in Applied Phycology 4, DOI 10.1007/978-90-481-9268-7\_1, ~ Springer Science+Business Media B.V.
- Holm-Hansen, O., Lorenzen, C.J., Holmes, R.W., Strickland, J.D.H., (1965). Fluorometric determination of chlorophyll. ICES Journal of Marine Science 30, 3e15.
- Hutchinson & H. Löffler. (1956). The thermal classification of lakes, in Proceedings of National Academic of Science of Washington. En: The limnology of tropical high-mountain lakes, ed. H. Löffler, Verh. Internat. Verein. Limnol., vol. 15, pp. 176–193.
- Jeffrey, S. W. & Humphrey, G. F.(1975). New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. Biochem. Physiol. Pflanzen 167: 191–194. Jokiel, P. L., 1980.
- Kiefer, D.,A., (1973). Fluorescence properties of natural phytoplankton populations. Mar Biol 22: 263–269.
- Kinzie R.A., Banaszak A.T., Lesser M.P. & Box P.O. (1998). Effects of ultraviolet radiation on primary productivity in a high altitude tropical lake. Hydrobiologia 385: 23–32.
- Kirk J.T.O. (1994). Light and photosynthesis in aquatic ecosystems, Cambridge University Press UK. 59
- Krause G., Weis, E., (1991). Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 42, 313–249
- Kolber, Z., & Falkowski, P. G. (1993). Use of active fluorescence to estimate phytoplankton photosynthesis *in situ*, 38(8), 1646-1665.
- Kooten, V., & Snel J, (1990). The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. Photosynthesis Research, 25, 147–150
- Lane CE, Archibald JM (2008) New marine members of the genus *Hemiselmis* (Cryptomonadales, Cryptophyceae). J Phycol 44(2):439–450.
- Laurion I., Ventura M., Catalan J., Psenner R. & Sommaruga R. (2000). Attenuation of ultraviolet radiation in mountain lakes: Factors controlling the among- and within-lake variability. Limnol. Oceanogr. 45: 1274–1288.

- Lazzaro X., (1981). Biomasses, peuplements phytoplanctoniques et production primaire du lac Titicaca. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale* 14: 249-380.
- Lazzaro X. & Gamarra C.P. (2013). Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca. En: Pouilly, Lazzaro X. & Point (eds.) Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca. IRD - UICN, Quito, Ecuador. 307 pp.
- Litchman E. & Neale P.J. (2005). UV effects on photosynthesis, growth and acclimation of an estuarine diatom and cryptomonad, *Marine Ecology Progress Series* 300: 53-62. DOI:10.3354/meps300053
- Löffler H., (1961). The limnology of tropical high-mountain lakes, *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 15, 176–193.
- Moreno, S. G., Vela, H. P., & Alvarez, M. O. S. (2008). La fluorescencia de la clorofila a como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas, 27(4), 119-129.
- Morris D.P., Zagarese H., Williamson C.E., Balseiro E.G., Hargreaves B.R., Modenutti B., Moeller R. & Queimalinos C. (1995) The attenuation of solar UV radiation in lakes and the role of dissolved organic carbon. *Limnol. Oceanogr.* 40: 1381-1391.
- Neale, P.J. & Richerson, P.J. (1987). Photoinhibition and the diurnal variation of phytoplankton photosynthesis. I. Development of a photosynthesis–irradiance model from studies of *in situ* responses. *J. Plankton Res.*, 9: 167–193. Neale,
- Northcote, T., (1991). Eutrofización y problemas de polución. pp. 563-572. In Dejoux, C. & A. Iltis (eds.), *El Lago Titicaca: Síntesis Del Conocimiento Limnológico Actual*. Hisbol - ORSTOM, La Paz.
- Osmond, C.,B., (1994). What is photoinhibition? Some insights from comparisons shade and sun plants. En: Baker, N.,R, Bowyer, JR., (eds) *Photoinhibition of photosynthesis from molecular mechanism to the field*. Bio Scientific publishers, Oxford p 1-24.
- Papageorgiou, G., Tsimilli-Michael, M., Stamatakis, K., (2007). The fast and slow kinetics of chlorophyll a fluorescence induction in plants, algae and cyanobacteria: a viewpoint. *Photosynth Res* 94:275–290
- Parsys, G., Rigart, C., Rousseau, B., Wong, A., Fan, F., Barbier, J., Lavaud J., (2005). Quantitative and qualitative evaluation of phytoplankton communities by trichromatic chlorophyll fluorescence excitation with special focus on cyanobacteria. *Water Resercher* 39:911–921
- Pinto, A., Sperling, E., Moreira, R.M., (2001). Chlorophyll- a determination via continuous measurement of plankton fluorescence: a methodology development. *Water Research* 35, 3977e3981.

- Point D., Lazzaro X. & Groleau A. (2013). Titicaca Sensors: a Joint IRD-IPGP research initiative – *in situ* biogeochemical and ecological sensing of Lake Titicaca. Rapport IRD-IPGP, Février 2013, 17 pp.
- Posso F. (1999). El agujero en la capa de ozono: origen, evolución. pp. 157-189 Geoenseñanza. Vol.4-1). Semestral. Déposito Legal pp.97-0009. ISSN 1316-6077.
- Ras, J., Claustre, H., and Uitz, J. (2008). Spatial variability of phytoplankton pigment distributions in the Subtropical South Pacific Ocean: comparison between *in situ* and predicted data, *Biogeosciences*, 5, 353–369, doi:10.5194/bg-5-353-2008.
- Richerson P.J., Alfaro R., Lazzaro X., Neale P.J., Vincent W. & Wurstbaugh W. (1992) Patterns of planktonic primary production and algal biomass. In: C. Dejoux & A. Ittis (eds.), *Lake Titicaca: A Synthesis of Limnological knowledge*, Kluwer Academic Publishers: 196-217.
- Richerson P.J., Widmer C. & Kittel T. (1977). The limnology of Lake Titicaca (Peru-Bolivia), a large high altitude tropical lake. University of California Davis, Institute of Ecology, 14, 78 pp.
- Rodrigo L., Wirrmann, D. (1991). Aspecto general de la sedimentación actual. En *El Lago Titicaca, síntesis del conocimiento limnológico*. Ed. Claude Dejoux y André Ittis.
- Schloss, I., & Ferreyra, G. (2002). Primary production, light and vertical mixing in Potter Cove, a shallow bay in the maritime Antarctic. En: W. Arntz & A. Clarke (Eds.), *Ecological Studies in the Antarctic Sea Ice Zone SE - 16* (pp. 117-124). Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-59419-9\_16.
- Scheffer, M. (1993), *Ecology of Shallow Lakes*, 357 pp., CRC Press, Boca Raton, Fla.
- Smith, R.,L., & Smith, T.,M., (2001). *Ecología*. 4º edición. Addison Wesley, Madrid, pp. 639.
- Sommaruga, R., & Augustin, G. (2006). Seasonality in UV transparency of an alpine lake is associated to changes in phytoplankton biomass. *Aquatic Sciences*, 68(2), 129–141. doi:10.1007/s00027-006-0836-3
- Sommaruga R. (2001). The role of solar UV radiation in the ecology of alpine lakes. *Journal of Photochemistry and Photobiology. B, Biology*, 62(1-2): 35–42.
- Sommaruga, R. and Garcia-Pichel, F. (1999). UV-absorbing mycosporine-like compounds in planktonic and benthic organisms from a high-mountain lake. *Arch. Hydrobiol.*, 144, 255–269
- Steeman Nielsen, E. (1952). The use of radiocarbon (<sup>14</sup>C) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Explor. Mer*, 18: 117–140.

- Stolarski, R.; Bojkov, R.; Bishop, L.; Zerefos, C.; Staehelin, J.; Zawodny, J. (1992). Measured trends in stratospheric ozone. En: Science. s.l.: s.e. 256, 342-9.
- Suggett, D.J. , Prášil, O., Borrowitzca, M., (2010). Chlorophyll-a Fluorescence in Aquatic Sciences: Methods and Applications, Developments in Applied Phycology 4, DOI 10.1007/978-90-481-9268-7\_1, " Springer Science+Business Media B.V.
- Suggett, D.,J., Moore, C.,M., Hickman, A.,E., Geider, R.,J., (2009). Interpretation of fast repetition rate (FFR) fluorescence: signatures of phytoplankton community structure versus physiological state. Mar Ecol Prog Ser 376:1–19
- Tucker A.J. & Williamson C.E. (2011). Lakes in a new light : indirect effects of ultraviolet radiation. Freshwater Reviews 4: 115-134. doi:10.1608/FRJ-4.2.474
- Villafañe V., Andrade M., Lairana V., Zaratti F. & Helbling E.W. (1999). Inhibition of phytoplankton photosynthesis by solar ultraviolet radiation: studies in Lake Titicaca, Bolivia. Freshwater Biology 42(2): 215–224.
- Villafañe V. & Helbling W. (2003). Radiación ultravioleta solar en el Lago Titicaca, Bolivia: Efectos y adaptaciones de los organismos planctónicos. En: La Radiación Ultravioleta en Bolivia, Zaratti F.S. & Forno R.G. (eds), Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS) & Laboratorio de Física de la Atmósfera (IIF-UMSA): 85-98
- Villafañe , V. E., Sundback, K., Figueroa, F. L. and Helbling, E. W.(2003) Photosynthesis in the aquatic environment as affected by UVR. En Helbling, E.W. and Zagarese,H. E. (eds), UV Effects in Aquatic Organisms and Ecosystems. Comprehensive Series in Photochemical and Photobiological Sciences. The Royal Society of Chemistry, UK, pp. 357–397.
- Villafañe , V. E., Barbieri ,E. S., & Helbling E. W. (2004). Annual patterns of ultraviolet radiation effects on temperate marine phytoplankton off Patagonia, Argentina. J. Plankton Res. 26: 167–174, doi:10.1093/plankt/fbh011
- Villafañe V.E., Gao K., Li P., Li G. & Helbling E.W. (2007). Vertical mixing within the epilimnion modulates UVR-induced photoinhibition in tropical freshwater phytoplankton from southern China. Freshwater Biology 52(7): 1260–1270. doi:10.1111/j.1365-2427.2007.01762.x
- Wetzel G. (2003). Solar radiation as an ecosystem modulator. En: Helbling E.W. & Zagarese H. (eds.) UV effects in aquatic organisms and ecosystems. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK. Chap. 1: 3-20.
- Wilk, K.,E, Harrop, S., J. , Jankova L., Edler , D., Keenan G, Sharples F., Hiller, R.,G. & Curmi, P., M. (1999). Evolution of a light-harvesting protein by addition of new subunits and rearrangement of conserved elements: Crystal structure of a



cryptophyte phycoerythrin at 1.63-Å resolution. Proc Natl Acad Sci USA 96(16):8901–890

Zaratti F. 2003. La radiación ultravioleta solar En: La Radiación Ultravioleta en Bolivia, Zaratti F.S. & Forno R.G. (eds), Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS) & Laboratorio de Física de la Atmósfera (IIF-UMSA): 27–35.

#### **Páginas web:**

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001). Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J. T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Da, K. Maskell, C.A. Johnson. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 996 pp. [http://www.ipcc.ch//publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.htm/](http://www.ipcc.ch//publications_and_data/publications_and_data_reports.htm/).(acceso enero 2015).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, U. K. and New York, NY, USA, 996pp. [http://www.ipcc.ch//publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_effects\\_of\\_UV\\_r](http://www.ipcc.ch//publications_and_data/publications_and_data_effects_of_UV_r) (acceso enero 2015).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). Contribution of Working Group II to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field, C., S., Barros, V., Doken, j., Mash, K., Mastrandrea, M., (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, U.K. [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5\\_wgII\\_spm\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf) (acceso enero 2015).

National Agency of Space and Aeronautics (NASA), USA. Stratospheric Ozone. [http://www.ccpo.odu.edu/SEES/ozone/oz\\_class.htm/](http://www.ccpo.odu.edu/SEES/ozone/oz_class.htm/)  
<http://nasasearch.nasa.gov/search?utf8&affiliate=nasa&query=OZOno+concentration&commit=Search> (acceso enero 2015).



## 11 Anexos

### 11.1 Anexo 1: Proyecto Titicaca Sensores

Este proyecto es llevado a cabo entre las unidades GET - *Géosciences Environnement Toulouse*, y BOREA - *Biologie des Organismes et Ecosystèmes Aquatiques*, ambas del IRD - *Instituto francés de Investigación para el Desarrollo*, el IPGP - *Institut de Physique du Globe de Paris* y la UCA – *Unidad de Calidad Ambiental* de la UMSA – *Universidad Mayor de San Andrés*, La Paz, Bolivia.

Iniciado en diciembre 2012, el proyecto TTKKs implementa en la estación de Huatajata (Fig. 6), a 300 m de la costa, una plataforma equipada de varias sondas automáticas sumergidas a dos profundidades: a 1,5 m (fluorímetro FP; la sonda MP) y a 4,7 m, la sonda SDOT (NKE, Francia) mide el oxígeno disuelto y la temperatura; sonda SP2T (NKE, Francia) mide la temperatura y la presión, indicando el nivel del agua). Estas mediciones *in situ* fueron realizadas durante 2 años hasta diciembre 2014, con frecuencia de 10 min (SP2T) a 45 min (FP).

Durante este mismo período a lo largo perfiles verticales en las estaciones de Huatajata y Chúa, a cada 18-20 días (paso del satélite Landsat 8) realizamos mediciones físicas y biogeoquímicas usando las sondas automáticas (FP, multiparamétricas Hanna o Hydrolab y el espectroradiómetro C-OPS, así como colectas de fito- y zooplancton.

La alta frecuencia (entre 10 y 45 min) de las mediciones a escala temporal en la plataforma en Huatajata de las sondas automáticas permite estimar los cambios desde la escala horaria hasta diurna/nocturna, mientras que las mediciones y los muestreos verticales (Huatajata y Chúa) complementan datos que permiten enfocar los cambios estacionales y permite comparar estas dos estaciones que tienen diferente régimen de mezcla.

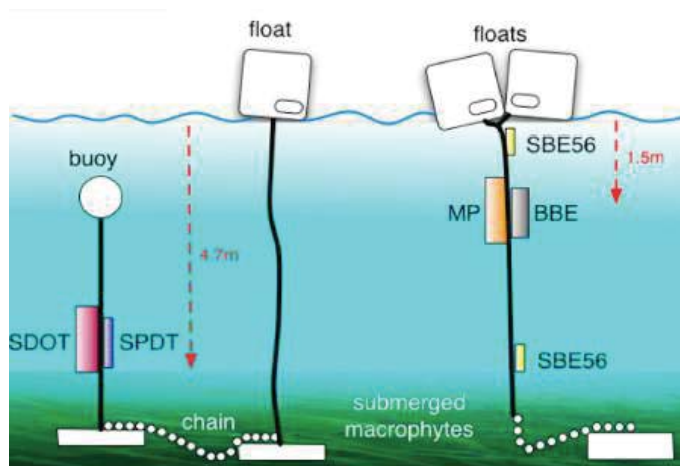


Diagrama de la disposición de las sondas automáticas del Proyecto Titicaca Sensores (TTKKS) con mediciones a cada 10 min para la temperatura, oxígeno, cada 15 min para la conductividad, pH, oxígeno disuelto, y cada 45 min para la fluorescencia (FP) del fitoplancton, en la estación de Huatajata (cf. Point et al. 2013).

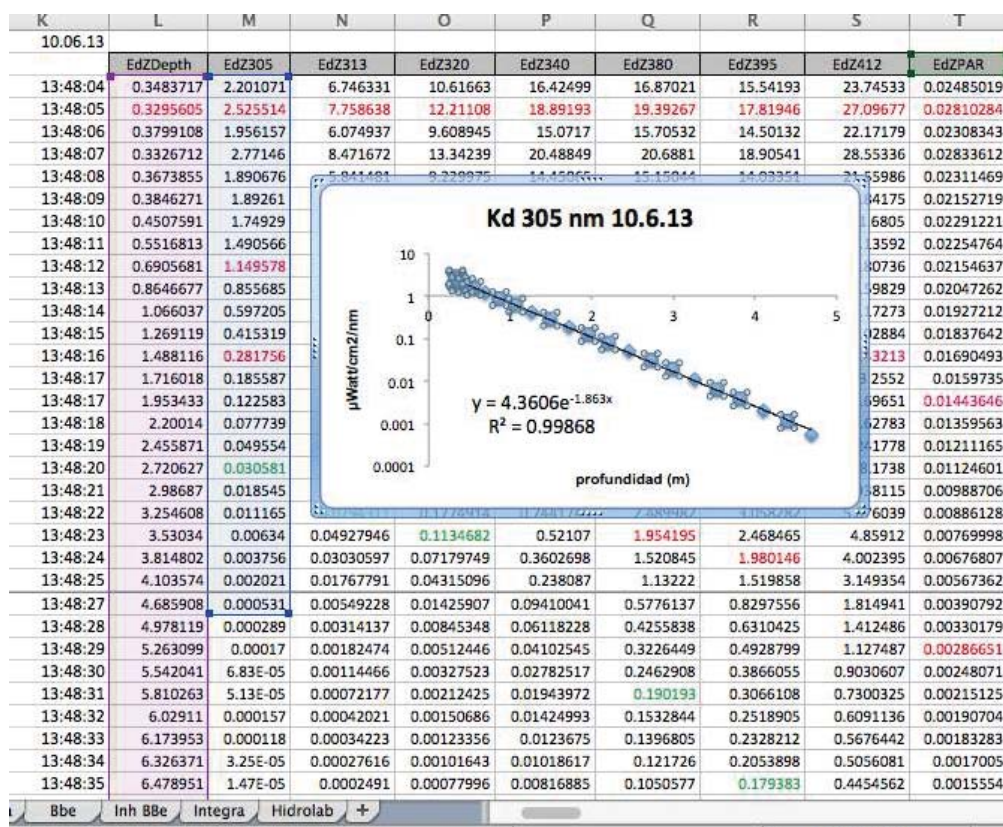
## 11.2 Anexo 2: Relación entre las sondas Fluoroprobe XL y AG

Medición simultánea de dos en marzo 2013. Se observa que las sondas tienen buena relación.

	Chl-a total	Clorófitas	Diatomeas/ dinófitas	Criptófitas	Cianófitas
R <sup>2</sup>	0,99	0,91	0,99	0,89	0,95
Ecuación	$y = 0,8532x - 0.2635$	$y = 0,543x + 0.0009$	$y = 0,7812x - 0.0202$	$y = 1,1152x + 0.0432$	$y = 0,8298x - 0.0008$

### 11.3 Anexo 3: Calculo de kd

Muestra la manera de obtener Kd para la fecha 10/06/13 para la longitud de onda de 305; el Kd correspondiente es de 1.86 m<sup>-1</sup>. Cada perfil de radiación generaba entre 500 y 1000, datos que se deben “limpiar” para realizar este proceso y repetirlo para cada longitud de onda.



## 11.4 Anexo 4: pasos sucesivos

En busca del mejor modelo se realizó regresión con pasos sucesivos, las variables más importantes se determinan con el valor beta de los coeficientes tipificados (el valor alto entre dos o tres variables de cada modelo determina mayor importancia). Los coeficientes que se utilizan para el modelo son el valor de B de coeficientes no estandarizados.

### Fluorescencia Total de Chl-*a*

Modelo	R	R cuadrado corregida	Anova F	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados		Sig.	
				B	Error típ.	Beta	t		
F con	PAR	0.947	0.947	3816.444	0.878	0.014	0.973	61.67	0
F con	PAR	0.958	0.958	2447.94	0.495	0.052	0.549	9.54	0
	viento				0.57	0.075	0.438	7.61	0
F con	PAR				0.586	0.055	0.65	10.65	0
	viento	0.96	0.961	1753.38	0.383	0.086	0.295	4.46	0
	precipitacion				0.143	0.036	0.074	4.01	0
Variables excluidas									
Modelo		Beta dentro	t	Sig.					
	precipitacion	0.119	7.312	0					
	viento	0.438	7.616	0					
	precipitacion	0.74	4.016	0					
Variables predictoras en el modelo: WSms (M.s-1), MJ/m2									
Variable dependiente: total_conc									

### Fluorescencia de diatomeas/dinófitas

Modelo	R2	R cuadrado corregida	Anova F	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados		Sig.	
				B	Error típ.	Beta	t		
F con	PAR	0.926	0.925	2659.36	0.727	0.014	0.962	51.56	0
F con	PAR	0.934	0.93	1488.59	0.463	0.055	0.613	8.4	0
	viento				0.392	0.079	0.36	4.94	0
F con	PAR				0.527	0.06	0.697	8.82	0
	viento	0.936	0.935	1020.58	0.264	0.093	0.242	2.03	0.005
	precipitacion				0.099	0.039	0.061	2.56	0.011
Variables excluidas									
Modelo		Beta dentro	t	Sig.					
	viento	0.36	4.949	0					
	precipitacion	0.098	4.787	0					
	precipitacion	0.061	2.56	0.011					
Variables predictoras en el modelo: WSms (M.s-1), MJ/m2									
Variable dependiente: Diatomeas/dinófitas									

### Fluorescencia de criptófitas

Modelo	R2	R cuadrado corregida	Anova F	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados		Sig.	
				B	Error típ.	Beta	t		
F con	viento	0.409	0.406	146.5	0.277	0.023	0.639	12.106	0
F con	viento				0.197	0.027	0.454	7.222	0
	precipitacion	0.69	0.464	93.33	0.196	0.04	0.304	4.912	0

### Variables excluidas

Modelo	Beta dentro	t	Sig.
PAR	-0.497	-2.3	0.022
precipitacion	6.309	4.912	0
PAR	-0.087	-0.381	0.076
Variables predictoras en el modelo: W (m.s-1), mm			
Variable dependiente: Criptófitas			

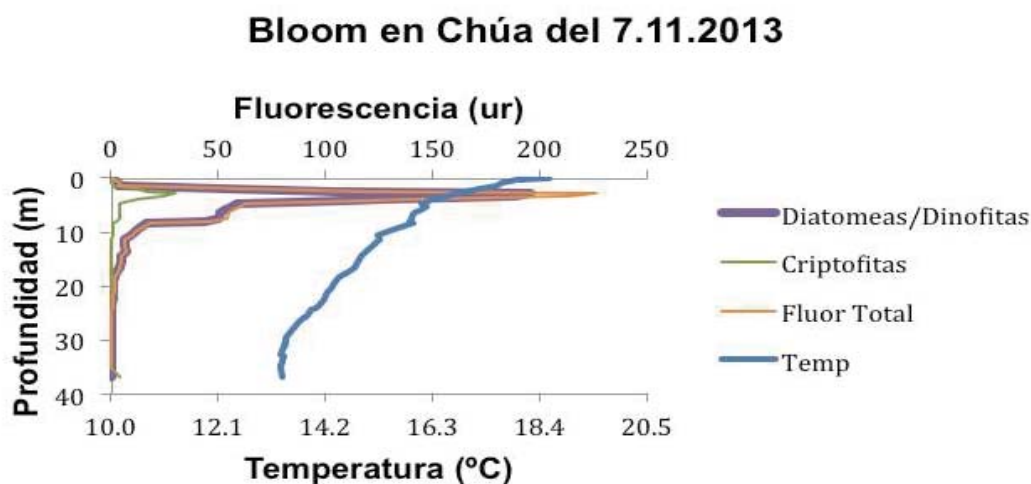
### 11.5 Anexo 5: Abundancia y Bloom de algas

La FP nos indica que la composición del Lago ha cambiado, ya que en los estudios realizados por Lazzaro (1981) y Villafañe *et al.* (1999), las clorófitas eran el mayor grupo de algas en Chúa, sin embargo, ahora tanto la FP como los conteos parciales nos muestran que el grupo que ahora domina tanto Chúa y Huatajata son las dinófitas con el género *Ceratium*, seguidas por las diatomeas del género *Fragilaria*.

Dominancia de <i>Ceratium</i> sp.			
Estación	Profundidad (m)	Densidad (%) [promedio ± SE]	n
Chúa	0	52 ± 7	11
	1	52 ± 13	6
	3	64 ± 8	10
	5	69 ± 8	6
	7	59 ± 9	8
Huatajata	10	58 ± 11	5
	0	11 ± 4	5
	1	24 ± 9	11
	4.5	32 ± 9	11

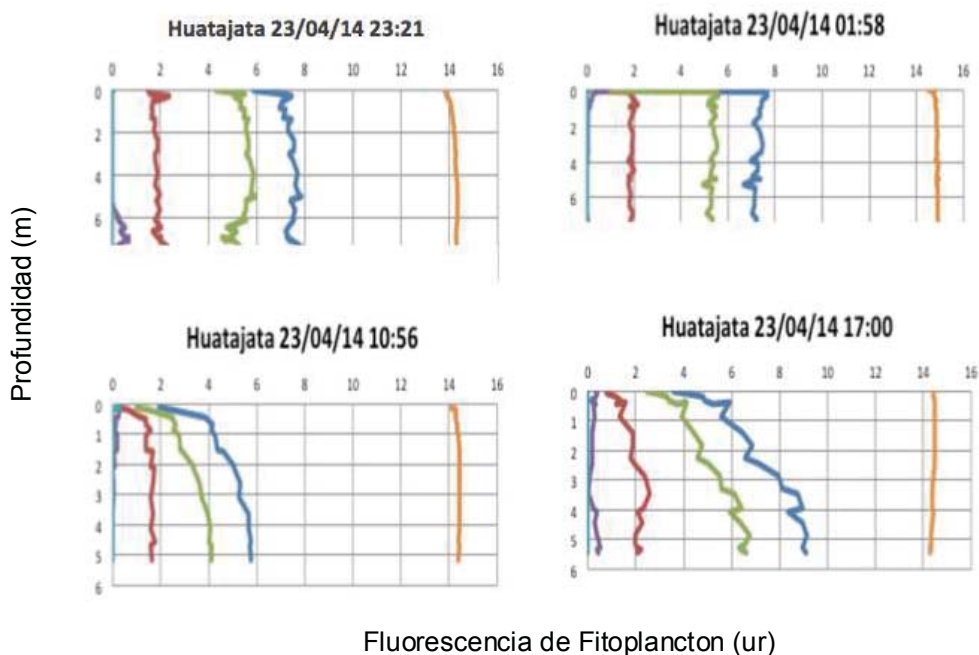
La tabla muestra la dominancia promedio (± error estandar) de *Ceratium* sp. (Dinofita) como proporción (%) de la densidad total de microalgas a cada profundidad de los perfiles verticales (n) de cada estación. determinada a partir de los conteos por microscopia invertida luego de sedimentación Utermohl.

Este **Bloom de algas** muestra que la mayor fluorescencia se debe a las Diatomeas/ Dinófitas, se realizó una observación al microscopio con el método Utermöhl, y se verificó que este máximo de fluorescencia corresponde a las Dinófitas con el Género *Ceratium*.



### 11.6 Anexo 6 distribución de la fluorescencia en un periodo diurno.

En Huatajata se observó que PAR no se atenúa en la columna de agua, UV-A lo hizo en época húmeda cerca al fondo. En mediciones de fluorescencia de un ciclo diario, podemos observar como la UV-B afecta a la fluorescencia de superficie. Se observa una distribución de fluorescencia a lo largo del día. Durante la noche (23:21 y 01:58) esta señal de fluorescencia es homogénea a lo largo de toda la columna, a la mitad de la mañana (10:56), cuando existe RS la fluorescencia se ve inhibida en la superficie, pero también en toda la columna de agua y por la tarde (17:00) cuando la RS no es tan intensa la inhibición de superficie reduce. Sin embargo esta inhibición no es tan alta como la que ocurre en Chúa, y esto se debe a que Huatajata es una estación de régimen de mezcla polimictico y el viento coadyuva a reducir los efectos de la RUV.



Temperatura ———

Fluorescencia Total ———

Diatomeas/dinófitas ———

Criptófitas ———



### 11.7 Anexo 7 sucesión entre grupo de algas

Se trató de evidenciar la sucesión de grupos de algas mediante un gráfico de dispersión y aunque no se encontró una buena relación para todos los datos, el valor negativo de la pendiente nos indica que si hay una relación opuesta entre Clorófitas y diatomeas/dinófitas, entre Cianófitas y diatomeas/dinófitas y también entre clorófitas y criptófitas.

