



### **B-3**

## ***FUNCIONAMIENTO LIMNOLÓGICO Y FOTOBIOLOGIA DEL LAGO TITICACA***

## ***LIMNOLOGICAL FUNCTIONING AND PHOTOBIOLOGY OF LAKE TITICACA***

Xavier Lazzaro – UMR BOREA IRD 207/CNRS 7208/MNHN/ UPMC – Laboratorio de Calidad Ambiental, Instituto de Ecología, UMSA, La Paz, Bolivia - xavier.lazzaro@ird.fr

César Gamarra Peralta – IMARPE, Coordinador del Laboratorio Continental de Puno, Perú - cgamarra@imarpe.gob.pe

### **RESUMEN:**

El objetivo de este capítulo es analizar los avances más significativos del estado actual del conocimiento limnológico sobre el Lago Titicaca, mediante la información científica disponible. Para alcanzar este objetivo, se consideraron los aspectos siguientes: (a) Revisión bibliográfica cronológica de la literatura publicada en revistas científicas internacionales, completada por la predominante literatura gris proveniente de informes y síntesis institucionales, presentaciones en simposios y talleres, así como de tesis universitarias, para intentar de identificar tendencias temporales para ciertas variables importantes de calidad de agua; (b) Análisis de los pocos estudios existentes sobre fotobiología, o sea la importante contribución de la radiación ultravioleta y visible en la estructuración y el funcionamiento ecológico de las comunidades de plancton, como la atenuación de la fotosíntesis del fitoplancton, la alteración del DNA, las migraciones verticales y los modos de pigmentación del zooplancton; (c) Evaluación de los vacíos de información y de la comparabilidad entre datos; (d) Recomendaciones sobre la intercalibración de los métodos y de los equipos, las innovaciones tecnológicas que permiten afinar el nivel de observación y monitoreo de los fenómenos ; y (e) Perspectivas de investigación y gestión integrada gracias a las colaboraciones entre instituciones y la implementación del Observatorio Ambiental Binacional del Lago Titicaca, liderado por la ALT (Autoridad Autónoma Binacional del Lago Titicaca - TDPS), con apoyo de las instituciones involucradas, tales como IMARPE (Instituto del Mar del Perú), PELT (Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca), UNA-

PUNO (Universidad Nacional del Altiplano), UMSA (Universidad Mayor de San Andrés) e IRD (Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo).

**PALABRAS CLAVE: NITRÓGENO, FÓSFORO, RAZÓN ESTEQUIOMÉTRICA N:P, TURBIDEZ, CLOROFILA-A, PRODUCCIÓN PRIMARIA, RADIACIÓN ULTRAVIOLETA, RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA**

**SUMMARY:**

The aim of this chapter is to analyze the most significant advances in the current knowledge of the limnology of Lake Titicaca, based on the available scientific information. To achieve this goal, we considered the following steps: (a) A chronological review of the literature published in international scientific journals, supplemented by a predominantly gray literature arising from institutional reports and summaries, presentations at symposia and workshops, as well as academic theses, to try to identify trends over time for certain major water quality variables; (b) an analysis of the few existing studies on photobiology, that is the important contribution of ultraviolet and visible radiation on the ecological structure and functioning of plankton communities, as attenuation of phytoplankton photosynthesis, DNA alteration, vertical migration, modes of zooplankton pigmentation; (c) An assessment of information gaps and data comparability; (d) Some recommendations about inter-calibration of methods and equipment, technological innovations that allow tuning the level of observation and monitoring of the phenomena; and (e) new research and management perspectives from collaborations between institutions and the implementation of the Binational Environmental Observatory of Lake Titicaca, led by ALT (Binational Autonomous Authority of Lake Titicaca - TDPS), with the support of the institutions involved, such as IMARPE (Sea Institute of Peru), PELT (Special Binational Project of Lake Titicaca), UNA-PUNO (Altiplano National University, Puno), UMSA (Major University of San Andrés) and IRD (French Research Institute for Development).

**KEYWORDS: NITROGEN, PHOSPHORUS, N:P STOICHIOMETRIC RATIO, TURBIDITY, CHLOROPHYLL-A, PRIMARY PRODUCTION, ULTRAVIOLET RADIATION, PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION**

### **B3.1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo trataremos exclusivamente del funcionamiento limnológico de la columna de agua de las zonas litorales y pelágicas del Lago Titicaca. La zona litoral recibe suficiente luz para el crecimiento de las macrófitas enraizadas. Más allá se extiende la zona pelágica ( $\geq 7$  m de profundidad en el Lago Titicaca), o sea la zona de aguas abiertas donde la luz no penetra hasta el fondo del lago que corresponde a la zona bentónica (cuyo funcionamiento está excluido en el presente capítulo). A partir de la literatura disponible, discutiremos sobre todo del estado trófico, la biomasa (clorofila) y producción primaria del fitoplancton. Intentamos identificar sus variaciones durante las últimas décadas, en respuesta a los cambios globales (sin poder separar las contribuciones respectivas del calentamiento global y de la presión antropogénica). Por falta de información adecuada, contrariamente a lo previsto, no se ha podido analizar las interacciones con el zooplancton, los macroinvertebrados, peces, y macrófitas acuáticas. Los

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

resultados son aislados espacio-temporalmente, y principalmente publicados en informes institucionales (literatura gris), siendo pocos artículos de revistas internacionales. Sin embargo, buscaremos las tendencias de evolución de las características más importantes durante las tres últimas décadas. Además, presentaremos la situación de ciertas áreas contaminadas y/o eutrofizadas, así como unas tentativas de restaurarlas. De hecho, no existen estudios de monitoreo a largo plazo de ningún área en particular del Lago Titicaca, a pesar de la importancia de este ecosistema tan único.

El Lago Titicaca es el mayor lago de agua dulce de América del Sur con una reserva de más de novecientos mil millones de metros cúbicos, así como el más alto (3.810 m s.n.m.) de los grandes lagos del Mundo. Con unos 3 millones de años, es uno de los veinte lagos más antiguos en la Tierra. Como se lo conoce actualmente se formó hace unos 9.000 años, después de una larga historia geológica, como resultado de una sucesión de lagos altiplánicos, y también a causa de cambios climáticos bruscos durante el curso de los últimos 25.000 años, después del último máximo glacial (Baker *et al.* 2001) y del calentamiento durante la última transición interglacial (Seltzer *et al.* 2002): del Lago Mataro (55.000 años AP), el Lago Cabana (50.000 años), el Lago Ballivián (40.000 años), el Lago Michin (30.000 a 20.000 años), hasta el Lago Tauca (14.000 a 10.00 años) (Argollo & Mourguiart 2000).

Cubre 8.300 km<sup>2</sup> y de Noroeste a Suroeste se extiende sobre 190 km. El estrecho de Tiquina separa al Norte al Lago Mayor profundo (media 180 m, máxima 280 m) y al Sur al Lago Menor somero (media 9 m, máxima 40 m) o Huinaymarca. Está ubicado en una amplia cuenca (58.000 km<sup>2</sup>) que comprende la mayor parte del Altiplano entre las Cordilleras Oriental y Occidental de los Andes Norte que culminan a más de 6.400 m en la Cordillera Real. Veinticinco ríos alimentan el Lago Titicaca, siendo el río Ramis, al Noroeste, el mayor (con 2/5 del drenaje) de la Cuenca. El río Desaguadero (un pequeño río) sirve de exutorio al extremo sur, evacuando solamente un 5 % del exceso de agua del Lago, en cuanto a los 95% restantes se pierden por evaporación a consecuencia de la intensa radiación solar y de los fuertes vientos que soplan en el Altiplano seco.

A pesar de sus características únicas, se conoce todavía muy poco el funcionamiento ecológico y la biogeoquímica del Lago Titicaca, así como de su contribución importante al microclima local de la región, responsable del desarrollo de especies animales y vegetales endémicas, y de condiciones ideales para la agricultura y actividad pecuaria. Estas llevaron el florecimiento en sus orillas de varias notables civilizaciones andinas prehispánicas (Pukara, Tiwanaku, Colla Lupaka e Inca), hasta el presente (Binford *et al.* 1996, Contreras 2010, Miller *et al.* 2010). Actualmente, más de 5 millones de habitantes, la mayoría en Bolivia, dependen directamente o

### *B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca*

indirectamente de los recursos del Lago Titicaca.

El maravilloso Lago Titicaca y sus poblaciones ribereñas, esencialmente en mayor estado de pobreza (84% en Perú y 98% en Bolivia), están expuestos a riesgos frente a los cambios globales en marcha, con bastante incertidumbre en relación a las previsiones de los modelos globales que no se aplican directamente, por el relieve extremo de los Andes (Andrade 2008, Urrutia 2008, Urrutia & Vuille 2009, Bush *et al.*, 2010, Herzog *et al.* 2011). Esta situación justifica la necesidad de sintetizar el conocimiento actual, apuntar los vacíos, y coordinar los esfuerzos hacia un programa de monitoreo integral a largo plazo, direccionado a evitar la contaminación/polución, restaurar las áreas degradadas, y mejorar la utilización racional y sostenible de los recursos hídricos y acuáticos. El verdadero desafío es preservar el funcionamiento ecológico del ecosistema en su conjunto, respetando la vida cultural y productiva de las sociedades que lo habitan, promocionando también el valor turístico de innumerables sitios de impactante belleza y arqueológicos, frente a la presión antropogénica y al desarrollo industrial. Así, en base al progreso socioeconómico que pueden proveer las ruinas arqueológicas del Tiwanaku y los monumentos ceremoniales en Copacabana, las ruinas arqueológicas en la Isla del Sol y de la Luna y los activos intangibles tales como música, festivales, idiomas, costumbres y tradiciones de aymaras y quechuas, el Banco Mundial propuso un Proyecto de Desarrollo Sostenible Local del Lago Titicaca, para el período 2008-2013 (Banco Mundial 2007).

#### **B3.2. CONTEXTO**

La dificultad para redactar este Capítulo, así como varios de los otros, proviene de la escasez de literatura científica validada en revistas especializadas de difusión nacional e internacional, de la limitación espacial y temporal de los estudios siendo en su mayoría puntuales (pocas investigaciones integrales), de la predominancia de informes institucionales (“literatura gris”) de calidad muy variada (por ausencia de comité editorial). Sin embargo, las tesis de licenciatura y maestría, revisadas por un comité científico, ofrecen una información validada, pero son frecuentemente de difícil acceso. La mayoría de los documentos no se encuentran en formato digital (pdf) lo que dificulta su divulgación. Se carece de portales Internet actualizados dedicados a proporcionar la información técnico-científica sobre el Lago Titicaca y la cuenca TDPS. Por lo tanto, puede ser problemático comparar los datos originales. No siempre los protocolos de muestreo y de análisis siguen normas internacionales, o son basados en procedimientos estándares. Justamente, la evolución de las técnicas y de los equipos requiere de una inter-calibración para poder comparar efectivamente los resultados históricos con los

actuales. No tomar en cuenta estos sesgos puede llevar a conclusiones y previsiones erróneas, por tanto a decisiones inadecuadas.

Se vuelve difícil no solamente obtener una lista de literatura gris, sino localizar los documentos físicos correspondientes, más frecuentemente depositados en las bibliotecas y/o oficinas de las instituciones que los editaron. Muy pocos de estos documentos son escaneados en medio digital (formato pdf), por tanto no están disponibles en páginas Web. A pesar de los esfuerzos individuales e institucionales, no existen centros de documentación, tanto en Perú como en Bolivia, que dispongan del material bibliográfico exhaustivo sobre el Lago Titicaca y la cuenca del TDPS - ni siquiera las bibliotecas de la ALT, UMSA e IRD en La Paz, y UNA en Puno - que tengan la capacidad de localizar, fotocopiar, escanear y difundir el último ejemplar de una publicación agotada. Capitalizar la información disponible y los conocimientos acumulados es un mayor desafío para poder enfrentarse, bien preparado, a los cambios futuros ya en marcha.

Determinar el estado trófico de un lago al menos requiere caracterizar: (a) La estructura físico-química (régimen de estratificación vs. mezcla) y planctónica de la columna de agua de la zona pelágica, así como su dinámica estacional, (b) Las concentraciones en nutrientes (sobre todo  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{PO}_4$ ), la razón estequiométrica nitrógeno:fósforo (molar) que determina el tipo y nivel de limitación nutritiva, las composiciones (taxonómica y por grupos funcionales), biomásas (clorofila para el fitoplancton), productividades (cuando fuera posible) de las comunidades fito- y zooplanctónicas, sus interacciones tróficas (depredación, herbivoría), (c) La importancia de la zona litoral, de la vegetación acuática (macrófitas) flotante, sumergida y/o emergente, sus interacciones (procesos de competición, antagonismo) con el fitoplancton de la zona pelágica, y (d) El régimen de atenuación de la luz solar (ultravioleta y fotosintéticamente activa) en la columna de agua y las variables que lo controlan (carbono orgánico disuelto, clorofila, substancias coloidales, partículas en suspensión, etc.). La combinación de características extremas del Lago Titicaca – por ser tropical, de gran altura, y en parte muy profundo – hace más difícil caracterizar su estado trófico. De hecho, el Lago Titicaca no encuadra en las clasificaciones desarrolladas para lagos típicamente de clima templado o tropical. Por ejemplo: (a) Sus concentraciones en nutrientes son bajas no por ser un lago pobre si no por la eficiencia de utilización, (b) La transparencia de sus aguas es bien alta, (c) Su estacionalidad es débil comparada a las variaciones interanuales u ocasionadas por eventos meteorológicos súbitos, (d) La intensa y profunda penetración de la luz ultravioleta limita más la producción primaria del fitoplancton que la disponibilidad en nutrientes por si, y controla el patrón de distribución nictemeral (durante 24 hrs.) vertical del zooplancton, (e) La radiación solar incidente es intensa todo el año manteniendo una productividad poco variable, (f) La estratificación térmica vertical

### *B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca*

es débil ( $\leq 3$  °C en varios metros) en zonas profundas, mientras que las zonas someras ( $\leq 10$  m de profundidad) permanecen homogéneas, etc. Por las razones expuestas, por su extensión geográfica, y por ser único en su tipología, no es fácil caracterizar el estado trófico del Lago Titicaca. La discrepancia entre los resultados de los estudios lo comprueba. A pesar de estas limitaciones, intentaremos identificar patrones y tendencias.

### **B3.3. LAGO TITICACA**

El libro editado por Dejoux & Ittis (1992) es una compilación de los trabajos limnológicos realizados durante el último siglo, incluyendo los realizados en los años 1970-1980 conjuntamente por los investigadores de ORSTOM (sigla previa del IRD) y de la UMSA (La Paz) en ambos lados del Lago. Esta síntesis es aún la más completa (desde geomorfología, clima, hidrología, plancton, bentos, ictiofauna, contaminación, socio-economía, etc.) y sirve de referencia para la comparación con los datos actuales. Recientemente, los trabajos publicados en el I y II Simposio Internacional del Lago Titicaca (2011 y 2013, respectivamente), organizados en Puno, han presentado una actualización sobre los estudios en curso.

#### **B3.3.1. LAGO MAYOR**

Los primeros trabajos científicos sobre el Lago Titicaca fueron los trabajos naturalistas de Alcide d'Orbigny (Royal Geogr. Soc., London, 1837), Agassiz (1876a,b), Agassiz & Garman (1876) y Neveu-Lemaire (1906). Los primeros datos hidrológicos, hidroquímicos y ecológicos fueron colectados durante 6 meses (abril a septiembre de 1937) en las aguas abiertas del Lago Mayor y del Lago Menor, por los miembros de la expedición Percy Sladen liderada por H. Cary Gilson (1939, 1940, 1955; siendo observaciones, colecciones, 20 informes principalmente de estudios taxonómicos). En esta ocasión, se realizaron las primeras determinaciones sistemáticas del zooplancton: por De Bauchamp (1939) para rotíferos y Harding (1955a,b) para copépodos y cladóceros, completados por Uéno (1967).

##### **B3.3.1.1. PERÍODO 1973**

De enero a diciembre de 1973, Richerson *et al.* (1977) realizaron el primer estudio del funcionamiento limnológico del Lago Titicaca. A intervalos de aproximadamente dos semanas (21 campañas), los autores realizaron perfiles de muestreos verticales en 7 estaciones profundas (100-200 m) en la parte Norte del Lago Mayor, cerca del pueblo de Capachica, Perú, en el mismo área de estudio de la expedición Percy Sladen Trust. Por la ubicación tropical del Lago, la estacionalidad es débil, entonces los perfiles termales mostraban una estratificación débil pero persistente en el período seco, con poca diferencia entre temperaturas epilimnéticas

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

(máx. 15,7 °C) y hipolimnéticas (11,1 °C). De febrero a mayo el Lago se estratificó con un epilimnio de 40 m de espesor que se profundizó a 70 m en junio. En plena temporada seca (julio), el Lago se volvió isotermal a 11,1-11,2 °C, mezclándose hasta por lo menos 100 m de profundidad. La profundidad de mezcla variable podía ser prevista empíricamente por la temperatura del aire y la velocidad del viento (0,89 m s<sup>-1</sup> en marzo a 1,30 m s<sup>-1</sup> en agosto; raramente 10-14 m s<sup>-1</sup> en la tarde o noche). Según Richerson *et al.* (1977), el Lago Titicaca sería oligotrófico monomítico con mezcla incompleta durante ciertos años, como en 1973 (*sensu* Hutchinson & Löffler 1956).

Las mediciones químicas fueron realizadas en la estación I (Fig. B3-1, Tabs. B3-1,2). Incluyeron OD (oxígeno disuelto, por método de Winkler), alcalinidad, pH, sílice, fosfatos (media 15-35 µg PO<sub>4</sub> L<sup>-1</sup>, 0-30 m, >30 m), nitrato (108-121 µg NO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>), calcio (66 mg L<sup>-1</sup>), magnesio (34 mg L<sup>-1</sup>), cloruro (260 mg L<sup>-1</sup>) y sulfato (282 mg L<sup>-1</sup>), basándose en los métodos APHA (1971). Las concentraciones de fosfato y nitrato se encontraron al límite de detección del método. Siendo así, la razón estequiométrica N:P no pasó de 6:1 a 12:1 (en molar) (Fig. B3-8, Tab. B3-5), es decir inferior a la razón de Redfield 16:1, lo que indica una limitación en nitrógeno, una situación común en lagos tropicales. La fuerte evaporación (~2 m año<sup>-1</sup>) combinada con la baja pérdida por el Desaguadero, genera que la concentración en sólidos disueltos sea muy sensible a las fluctuaciones climáticas. El pH del epilimnio se registró alrededor de 8,6 durante la mayor parte del año, bajando hasta 8,5 en el período isotermal, en cuanto que el pH del hipolimnio se quedó ≤ 8,4 (8,5 en período isotermal). A 140 m, la concentración de OD (2,4-4,8 mg L<sup>-1</sup>) llegó a la mitad de la de superficie. En agosto la mezcla vertical bajó a > 100 m de profundidad. Como los muestreos se realizaron al medio día, una supersaturación ocurrió frecuentemente en superficie (100% saturación 6,6 mg L<sup>-1</sup> a 13,5 °C) debido a la actividad fotosintética. Las más bajas concentraciones ocurrieron en noviembre a todas las profundidades. La más baja concentración (2,4 mg L<sup>-1</sup>) se encontró a 150 m, en relación con la descomposición de la materia orgánica. Sin embargo, la saturación puede ocurrir a 150 m durante la isoterma (Wayne Wurstbaugh, com. pers.).

La transparencia en febrero fluctuaba de 4,5-4,8 m (profundidad de desaparición del disco de Secchi), hasta un máximo de 10,5 m en agosto. La lluvia y la biomasa del fitoplancton (variables independientes) explicaban ≥ 75 % de la extinción de la radiación solar incidente (radiómetro casero más sensible en el verde). El fitoplancton fue colectado con botella de Van Dorn en la zona eufótica, filtrado en filtros Millipore (porosidad 0,45 µm) enumerado en 50-100 campos aleatorios en un microscopio invertido (conteo mínimo de 250-300 células). La biomasa promedio de 3,0 g C m<sup>-2</sup> era dominada por Clorofíceas y Cianobacterias, sin diferenciación

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

vertical de las poblaciones. La diatomea *Stephanodiscus astrada* fue dominante durante la estación seca. En promedio diario, la producción primaria neta llegaba a  $1,45 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , con fluctuación estacional entre  $0,75$  y  $2,75 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ . El zooplancton era dominado por el copépodo calanoida *Boeckella titicacae*, sin sucesión estacional, con biomasa en torno de  $0,89 \text{ g C m}^{-2}$ .

#### **B3.3.1.2. PERÍODO 1973-1976**

Básicamente, durante 1973-1976, Richerson *et al.* (1986) monitorearon una estación profunda (W; ver Fig. B3-1, Tab. B3-1) en la parte norte del Lago Mayor. Ellos publicaron estos datos unos diez años más tarde junto con los datos de un monitoreo mensual realizado durante dos años (1981-1982) en dos estaciones profundas, una cerca de la costa (W) y otra más adentro (Z). Este trabajo fue el fruto de una colaboración entre la Universidad de California y el IMARPE.

#### **B3.3.1.3. PERÍODO 1981-1983**

Richerson *et al.* (1986) realizaron un análisis de varianza y autocorrelación para identificar la existencia de patrones estacionales e interanuales de variación en variables físicas, químicas y biológicas, juntando sus datos de 1973 (Richerson *et al.* 1977; estación W en la Fig. B3-1) hasta agosto de 1976 con frecuencia de muestro de 15 días, y nuevos datos mensuales colectados entre diciembre 1980 a diciembre 1982 en la estación Z (Fig. B3-2).

Los lagos tropicales profundos demuestran un patrón monomíctico de estratificación termal, con una isotermita, o una casi isotermita en el caso de los lagos meromícticos profundos del Rift Africano durante la época más fría y seca (Talling 1966, Kittel & Richerson 1978). Sin embargo, el grado de estacionalidad es menos marcado en los lagos tropicales que en lagos templados. En compensación, otros tipos de efectos temporales afectan los lagos tropicales. Por ejemplo, los fenómenos meteorológicos pueden afectar la profundidad de estratificación, la producción primaria y la secuencia de sucesión de las comunidades fitoplanctónicas. También, la débil estacionalidad del balance de calor puede aumentar la sensibilidad a los cambios meteorológicos intra- y interanuales, causando variaciones irregulares en vez de ciclos anuales regulares. Para probar la generalidad de estas hipótesis, Richerson *et al.* (1986) compararon unas series temporales del Lago Titicaca con las de otros lagos tropicales y templados de baja altura.

Los autores encontraron que esta parte norte del Lago Titicaca se comporta físicamente en



muchos aspectos como un lago tropical estratificado de baja altura, a pesar de ser ubicado a gran altura y de las bajas temperaturas. Sin embargo, las diferencias entre temperaturas epiliméticas e hipolimnéticas no pasan de 3 °C y el patrón de mezcla es monomítico. Por otro lado, la baja presión parcial de OD debido a la altura que frena el proceso de re-oxigenación durante la isoterma, favoreciendo el desarrollo de unos déficits de oxígeno y de altas tasas de desnitrificación (Vincent *et al.* 1985). La producción primaria anual media llega a 1,13 g C m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, y la concentración en clorofila-*a* entorno de 1,5 µg L<sup>-1</sup>, valores semejantes a las de 1973. La amplitud reducida de variación de la insolación en el Lago Titicaca podría ser la mayor causa de la baja variación estacional en producción primaria. De forma similar en los periodos de baja radiación solar, la luz es mucho más intensa que durante un invierno templado, así que a pesar que el patrón de insolación es relativamente estacional, la producción primaria no lo es. Como se ha observado anteriormente la producción del fitoplancton era limitada por el nitrógeno (Vincent *et al.* 1984, Carney 1985, Wurtsbaugh *et al.* 1985). Los periodos de fijación del nitrógeno ocurrieron cuando la estratificación era más fuerte. Frecuentemente, ellos generaban una alta producción primaria; por ejemplo, en diciembre 1973 cuando las cianobacterias con heterocísticas fueron muy abundantes, y en 1982 cuando las tasas de fijación de nitrógeno eran altas. Así, eventos de alta o baja producción persistentes durante 1-4 meses pueden contribuir a patrones que parecen groseramente estacionales durante cualquier secuencia de 12 meses, pero no se repiten de un año al otro. Melack (1979) incluyó el Lago Titicaca en su tipo A de lagos con fluctuaciones estacionales, mientras que Richerson *et al.* (1986) sugieren que el termino 'casi-estacional' es más apropiado. Para que pueda identificarse patrones estacionales, los análisis espectrales necesitan largas series de muestras regularmente espaciadas, muy escasas en estudios limnológicos e inexistentes para el Lago Titicaca. Richerson *et al.* (1986) consideraron válida la hipótesis de Richerson *et al.* (1977) según la cual el Lago Titicaca y otros lagos tropicales estratificados mostrarían más variación interanual pero menos estacionalidad. Sin embargo, no hay evidencia de que el régimen de estratificación del Lago Titicaca sea tan diferente de un año al otro como lo previsto por Kittel & Richerson (1978).

Es sorprendente que el efecto del régimen de estratificación estacional sobre varios procesos limnológicos sea moderado. Sin embargo es consistente con la conclusión de Brylinsky & Mann (1973) según la cual la insolación tiene un mayor efecto que la concentración en nutrientes para explicar las variaciones latitudinales en producción primaria. Entonces, en la actualidad, sería muy importante profundizar el estudio de la estacionalidad y variación interanual en el Lago Titicaca, siendo que de forma similar para lagos templados existen muy pocas series temporales detalladas.

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Durante 1973 y 1981, el fitoplancton del Lago Mayor era dominado por clorofíceas, cianobacterias y diatomeas. Parece haber una similitud florística entre años y entre subcuencas, pero con una gran variación en abundancias relativas de los taxones. La cianobacteria *Anabaena spiroides*, dominaba durante la estación más estratificada, mientras que las cianobacterias permanecían poco abundantes en las áreas poco antropizadas, como en Huatajata y Chúa, Lago Menor. El patrón de sucesión estacional se parece de cierta forma a la versión tropical del patrón clásico observado por Lewis (1978). Generalmente, el orden de aparición de los taxones en el Lago Mayor es la dominancia de las diatomeas durante el período de mezcla más profunda, seguido por las clorofíceas, las cianobacterias y finalmente los dinoflagelados. Un patrón similar fue observado por Talling (1966) en el Lago Victoria (el lago más grande de África, reservorio principal del Nilo, entre Tanzania y Uganda) pero este patrón difiere de los patrones de los Lagos Lanao (Filipinas) y Valencia (el mayor lago de Venezuela) por tener solamente una secuencia mayor de sucesión, en vez de varias. El balance de calor del Lago Titicaca varía más entre años que un lago templado típico, pero menos que el Lago Valencia. Como el volumen del hipolimnion es muy grande, el Lago Mayor sufre raramente cambios bruscos en la profundidad de mezcla. Los descensos menores de termoclina afectan una fracción menor del hipolimnion. Entonces las concentraciones de nutrientes de la zona eufótica varían poco (Vincent *et al.* 1984, Wurtsbaugh *et al.* 1985). Solamente la circulación profunda durante la estación seca es capaz de iniciar una nueva secuencia de sucesión en el Lago Mayor. A pesar de las similitudes en la composición específica, este patrón de sucesión estacional (monomítico) es muy distinto del patrón en el Lago Menor (polimítico).

En este período se realizaron varios trabajos sobre la excreción de nitrógeno por el zooplancton (Pawley 1982), la variación cuantitativa del zooplancton en la zona pelágica del Lago Mayor (Moreno 1983), y su pastoreo selectivo por talla de organismos (Haney & Trout 1985).

#### **B3.3.1.4. PERÍODO 1984-1985**

La experiencia y los conocimientos adquiridos en el Lago Menor por Lazzaro (1981), en el ámbito del convenio UMSA-ORSTOM (1979), se aplicaron para realizar un estudio del Lago Mayor y elaborar un Atlas de distribución geográfica y estacional de los parámetros físico-químicos, en el ámbito del convenio UMSA-IMARPE (Quintanilla *et al.* 1987). Se establecieron 20 estaciones de muestreo (Fig. B3-1, Tabs. B3-1,3) para los parámetros físico-químicos (pH, alcalinidad total, CO<sub>2</sub>, temperatura, transparencia, OD y conductividad), y 10 estaciones para los nutrientes (fósforo, nitrógeno y sílice disuelto). Según la profundidad de cada estación se tomaron muestras de agua a 1, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, y 200 m. Se efectuaron 4 campañas estacionales a lo largo de un ciclo anual en: (1) Temporada seca o Invierno\* (agosto 1984), (2)

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Transición o Primavera\* (diciembre 1984), (3) Temporada de Lluvias o Verano\* (marzo 1985), y (4) Transición o Otoño\* (mayo 1985) (según la nomenclatura templada).

**Temperatura:** A lo largo del año, la zona Norte del estudio fue la más fría por los aportes del río Suchez. Se diferenciaban 4 estaciones: Invierno seco (jun.-ago.), época de mezcla de aguas, con ocasionales estratificaciones térmicas superficiales inestables; Primavera o Transición (set.-nov.), con estratificación térmica estable entre 0-50 m; Verano lluvioso (dic.-mar.), con termoclina estable entre 50-70 m de mayor gradiente ( $0,15\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$ ), debido a la ausencia de vientos fuertes y al calentamiento superficial; y Otoño o Transición (abr.-may.), con termoclina entre 65-90 m de gradiente más débil ( $0,06\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$ ); clasificando el Lago Mayor como monomítico caliente de Primer Orden.

**Oxígeno disuelto (OD):** La costa Norte tuvo mayores concentraciones de OD durante todo el año por ser de bajas profundidades y tener buena oxigenación por turbulencia (llegada del río Suchez al Lago). Las variaciones estacionales se produjeron en la capa de los 100 m.

**pH:** Durante todo el año se distinguieron 3 capas: (a) 0-50 m con valores elevados debido a la fotosíntesis; (b) 50-100 o 150 m intermediaria; (c)  $\geq 150$  m con valores bajos por óxido-reducción, mineralización, sedimentación, descomposición orgánica, etc.

**Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):** La concentración fluctuó entre  $5,0\text{ mg L}^{-1}$  en Verano y  $1,8\text{ mg L}^{-1}$  en Invierno seco, con un aumento gradual de la superficie al fondo (hasta  $7,0\text{ mg L}^{-1}$  en Verano), y menores valores en la desembocadura del río Suchez.

**Nitratos:** Mayor concentración en toda la columna de la zona pelágica frente a la Isla del Sol en Otoño ( $80\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$ ), menor en Primavera. No parecía haber influencia de la termoclina en su distribución vertical.

**Fosfatos:** Se mantuvieron una zona rica ubicada al Oeste y parte del Centro, una zona intermedia en la parte Central y Norte, una zona pobre al Sur-Este. Se identificaron dos capas: una superior ( $\leq 40$  m) la más pobre con disminución regular, una inferior  $\geq 50$  m con aumento regular y máximos valores al fondo.

**Relaciones entre factores físico-químicos y fitoplancton:** La máxima abundancia de fitoplancton ( $12,5 \times 10^5\text{ cel. L}^{-1}$  en Invierno seco con transparencia de 10 m) se encontró a 5-10 m, siendo el nivel óptimo para la fotosíntesis. A  $\geq 10$  m, la abundancia del fitoplancton se redujo por falta de luz, por lo que aumentaron las concentraciones de nutrientes no consumidos. La zona eufótica fue máxima en Primavera y Verano con 27 m, disminuyendo en Otoño a 23 m y 12 m en Invierno seco. Por su biomasa relativamente baja de fitoplancton, sus concentraciones

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

$\geq 5 \mu\text{g L}^{-1}$  en fosfatos,  $\leq 250 \mu\text{g L}^{-1}$  en nitratos, y su delicado equilibrio en aportes y pérdidas (hídricas y hidroquímicas), el Lago Mayor fue clasificado como oligotrófico a ligeramente mesotrófico.

#### B3.3.1.5. EVOLUCIÓN ENTRE 1985 Y ACTUAL

A pesar de los numerosos estudios sobre el fito- y zooplancton del Lago, no se puede identificar tendencias de evolución espacio-temporal en la composición y abundancia de las comunidades porque los trabajos son esencialmente puntuales y no existen monitoreos espacio-temporales. Para el fitoplancton, después del estudio taxonómico de Iltis (1984), Liberman & Miranda (1986,1987) estudiaron la variación estacional en ambos el Lago Menor (Huatajata, Chúa, Tiquina) y el Lago Mayor (Tiquina, Isla de la Luna, Bahía Santiago de Huata, Isla del Sol, Bahía del río Suchez, Bahía de Tanahuaca) entre agosto 1984 y mayo 1985, a partir de muestras colectadas con botellas hidrográficas desde la superficie hasta 50 m, con intervalos de 5 m. La composición (62 taxa, contra 115 taxa inventariados por Tutin (1940)) reveló una predominancia de Chlorophyta (55%), de Cyanophyta (19%) y Baciliariophyta (19%) con menor proporción de Pyrrophyta (5%) y Chrysophyta (2%).

Entre 1981 y 1988, Repelin et al. (1987, 1988) y Pinto (1992) determinaron la abundancia espacio-temporal del zooplancton (copépodos y cladóceros) en la parte Boliviana del Lago Mayor y Lago Menor, así como las migraciones nictemerales de algunos grupos. Las densidades medias variaban entre 24.000 y  $>100.000 \text{ org. m}^{-3}$  (temporada lluviosa; al Norte de la península de Tarraco, entre el estrecho de Tiquina y la Isla del Sol). Entre otros factores, estas densidades eran probablemente influenciadas por la depredación de poblaciones de peces zooplanctófagos, como *Orestias ispi* (Leblond 1982), *O. forgeti* y *O. pentlandii*, así como individuos jóvenes de pejerrey (*Basilichthys bonariensis*) y trucha arco iris (*Salmo gairdneri* en ese entonces, y actualmente *Onchorynchus mikiss*) (Loubens 1989) (ver Capítulo B2). Pawley & Richerson (1992) muestrearon el zooplancton del Lago Mayor cada 15 días en 1981 y 1982, durante la noche a lo largo de transectos entre Comina y Capachica. La falta de estrecha correlación con las principales variables físicas (como los ciclos de estratificación) condujo a los autores a concluir que, como para el fitoplancton, las complejas interacciones son más importantes para determinar las estructuras de las comunidades zooplanctónicas. A partir de muestreos estratificados, Pinto (1993) determinó que los copépodos realizan migraciones verticales, concentrándose a 5-7 m a medio día y dispersándose en toda la columna de agua durante la noche.

El informe PROINTEC/TYPSA (2004) reporta los datos de 4 cruceros realizados en 27 estaciones

### *B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca*

en todo el Lago Titicaca para caracterizar el estado trófico: (a) sector peruano, 27-30 Mayo 2003; sector boliviano, 23-25 junio 2003; (b) incluyendo la contaminación de los sedimentos, 19-25 agosto 2003; (c) 23-30 octubre 2003; (d) 26 enero a 2 febrero 2004. También se realizaron 2 campañas circunlacustres con embarcación ligera para determinar las zonas de contaminación litoral y de las desembocaduras de los principales afluentes: (1) campaña del 14-23 julio 2003; (2) campaña del 25 noviembre a 5 diciembre 2003. Faltó la localización geográfica de las estaciones. Sin embargo, la Unidad Operativa Boliviana (UOB) y el Proyecto Especial del Lago Titicaca (PELT) elaboraron una cartografía temática. No se presentaron los protocolos de análisis físico-químicos del agua. La unidad de concentración en clorofila-*a* es incorrecta ( $\text{mg L}^{-1}$  en vez de  $\mu\text{g L}^{-1}$ ). El cálculo de limitación en nutrientes a partir de la razón estequiométrica nitrógeno:fósforo de Redfield 16:1 está errada (para las concentraciones se usó  $\text{mg L}^{-1}$  en vez de  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ). Entonces, omitimos los resultados de este informe.

El proyecto PELT (2007) utilizó el barco de investigación científica BIC-PELT equipado de radar, ecosonda, GPS estacionario, radio comunicadores, sondas multiparamétricas (temperatura, profundidad, conductividad, pH, OD), espectrofotómetro UV-PAR, kits para determinación de alcalinidad y dureza, botellas tipo Van Dorn, disco de Secchi, winch eléctrico, estación meteorológica automática. Los análisis utilizaron los métodos estándares de EPA, APHA, AWWA y WEF. Se realizaron 4 campañas (28 mayo – 25 junio 2003; 20-23 agosto 2003; 25-30 octubre; 28 enero – 1 febrero 2004), muestreando 24 estaciones (profundidades hasta 210 m) en todo el Lago Titicaca (18 en el Lago Mayor y 6 en el Lago Menor). También se colectaron muestras de fito- y zooplancton.

Durante los cruceros anuales (excepto 2009) de evaluación de biomasa íctica a bordo del barco BIC IMARPE VIII, el programa IMARPE (2006-2012) también realizó mediciones limnológicas del Lago Titicaca (Fig. B3-3, Tab. B3-4). A nivel superficial, la temperatura del Lago durante este periodo osciló entre 10,9 °C (julio 2007) y 17,3 °C (diciembre 2012); el OD entre 4,21  $\text{mg L}^{-1}$  (abril 2010) y 8,85  $\text{mg L}^{-1}$  (diciembre 2007); la conductividad eléctrica entre 1.200  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (abril 2007) y 1.994  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (diciembre 2012); nitritos entre 0,003 (abril 2010) y 0,032  $\text{mg L}^{-1}$  (julio 2011); nitratos entre 0,021  $\text{mg L}^{-1}$  (diciembre 2012) y 4,00  $\text{mg L}^{-1}$  (abril 2007); fosfatos entre 0,05 y 1,00  $\text{mg L}^{-1}$ ; mientras que la clorofila-*a* en los cruceros de los años 2011 y 2012 se encontró entre 0,05 y 1,00  $\mu\text{g L}^{-1}$ . El pH indica aguas con tendencia alcalina (7,86 – 8,99). Los resultados de las principales actividades son publicados en forma resumida en el Anuario Científico del IMARPE:

[http://www.imarpe.pe/imarpe/index.php?id\\_seccion=I0138130000000000000000](http://www.imarpe.pe/imarpe/index.php?id_seccion=I0138130000000000000000)

### *B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca*

A nivel vertical, la temperatura mostró marcadas variaciones a lo largo del año (Fig. B3-4). Se observa una estratificación térmica en los meses de verano. En invierno seco (agosto), se observa el enfriamiento de la columna de agua, produciéndose una mezcla, y a partir de septiembre se inicia el calentamiento de la superficie del agua. El oxígeno disuelto disminuye conforme se incrementa la profundidad. En julio del 2011 (periodo de isotermita), se encontraron concentraciones de oxígeno entre  $7,0 \text{ mg L}^{-1}$  en la superficie y  $1,0 \text{ mg L}^{-1}$  por debajo de los 200 m de profundidad. El pH, básico, también mostró una disminución gradual conforme aumenta la profundidad. En las prospecciones realizadas en el 2011, la variación de pH registrada entre la superficie y el fondo estuvo entre 8,81 y 7,44, respectivamente.

## **B3.4. ZONAS LITORALES DEL LAGO TITICACA Y TRUCHICULTURA**

El Ministerio de la Producción del Perú otorgo concesiones para el cultivo intensivo de trucha en jaulas flotantes destinadas principalmente para pequeños productores (piscicultura artesanal). Ellas son mayoritariamente localizadas en la orilla del Lago Mayor, a lo largo del eje carretero Juliaca – Puno – Desaguadero, y también en el litoral norte en Huancané, Moho y Conima. Con el propósito de ampliar la actividad truchícola y evaluar su viabilidad económica y ecológica, el IMARPE realizo prospecciones para evaluar la aptitud de las características morfobatimétricas, hidrodinámicas y físico-químicas de las zonas litorales (IMARPE-FONCHIP 2008). Los estudios realizados muestran marcadas diferencias.

### **B3.4.1. ENSENADA CONIMA**

La Tabla B3-6 muestra valores medios de los parámetros fisicoquímicos encontrados en la zona de Conima (ver Fig. B3-1) durante las prospecciones de los años 2008 (diciembre), 2009 (julio y agosto), 2010 (mayo y agosto) y 2011 (julio y agosto), donde se destacó la estabilidad de la temperatura durante los periodos de evaluación, pero con marcadas variaciones interanuales. Se observó una alta estabilidad del pH con tendencia alcalina, una columna de agua con buena oxigenación, altos valores de  $\text{CO}_2$ , una buena reserva alcalina y aguas duras. Respecto a las trazas de metales todos los valores se encontraron por debajo de los límites establecidos por la Unión Europea para el cultivo de trucha ( $\text{Cd } 4 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ,  $\text{Pb } 30 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$  y  $\text{Cu } 100 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ) (ver mayores detalles en hidroquímica en el Capítulo A3).

### **B3.4.2. BAHÍA DE MOHO (LAKASANY)**

Los valores medios de los parámetros fisicoquímicos del agua registrados en la Bahía de Moho (ver Fig. B3-1) se presentan en la Tabla B3-7, donde se aprecia que las mayores variaciones de temperatura se dan por cambios estacionales. El pH mostró una gran estabilidad con tendencia

alcalina. El OD registro valores por encima de los 5,0 mg L<sup>-1</sup>. Los valores de CO<sub>2</sub> fueron altos. La masa de agua tenía una buena reserva alcalina, con rangos de dureza altos. Los niveles traza de metales pesados se encontraron por debajo de los límites establecidos por la Unión Europea para el cultivo de trucha.

#### **B3.4.3. ESTUARIO DEL RÍO RAMIS**

Durante el periodo 2009-2011 en el estuario del río Ramis (ver Fig. B3-1), el rango de variación de la temperatura mostró una tendencia relacionada con las condiciones climatológicas que se presentan en la región (Tab. B3-8). El OD en el agua reflejó una constancia en los valores medios alrededor de los 5,7 mg L<sup>-1</sup>. El pH registró valores elevados con tendencia alcalina. Los valores de CO<sub>2</sub> se encontraron por encima de los valores considerados normales para aguas naturales (entre 4 y 8 mg L<sup>-1</sup>), a excepción de marzo 2010. La alcalinidad aseguro una buena reserva de bases para evitar grandes variaciones en el pH. Los valores de dureza indicaron que las aguas eran “duras” y “muy duras”. Los valores medios de nitritos en marzo 2010 y fosfatos en mayo 2009 superaron el nivel recomendado para evitar procesos acelerados de eutrofización, mientras que la clorofila-*a* denotó un ambiente con características oligotróficas.

#### **B3.4.4. MUELLE BARCO – CHUCUITO**

La Tabla B3-9 muestra los valores mínimos, máximos y medios de los parámetros fisicoquímicos que caracterizan la zona de Chucuito (ver Fig. B3-1). Se aprecia que las mayores variaciones de la temperatura se dieron por cambios estacionales durante el año. El OD presentó valores medios constantes superiores a los 5,0 mg L<sup>-1</sup> en la mayoría de los casos. El pH alto con tendencia alcalina tuvo un valor medio cercano a 9,0. Los valores de CO<sub>2</sub> fueron elevados (máximos > 10 mg L<sup>-1</sup>). La masa de agua tenía una buena reserva alcalina y grado de dureza entre “dura” y “muy dura”. Los nitratos, nitritos y fosfatos se encontraron dentro del rango permisible para evitar procesos de eutrofización acelerada, a excepción del fosfato que en el 2009 registró un valor más alto de 1,1 mg L<sup>-1</sup>. Los valores medios de la clorofila-*a* evidenciaron la oligotrofia de la masa de agua, en mayoría ≤ 2,0 µg L<sup>-1</sup>. Sin embargo, un claro incremento en el 2011 cambió las condiciones hacia un estado de eutrofia.

#### **B3.4.5. MUELLE JULI**

La Tabla B3-10 muestra los valores mínimos, máximos y medios de los parámetros fisicoquímicos que caracterizan el Muelle de Juli (ver Fig. B3-1). Al igual que las zonas anteriores, las mayores variaciones de la temperatura fueron estrechamente influenciadas por las condiciones climatológicas. El OD presentó valores medios constantes alrededor de 6,0 mg L<sup>-1</sup>

### *B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca*

<sup>1</sup> en la mayoría de los casos. El pH alto tuvo tendencia alcalina y un valor medio próximo a 9,0. Los valores de CO<sub>2</sub> eran elevados pero cercanos a los valores normales que se encuentran en aguas libres. La masa de agua tenía una buena reserva alcalina y grado de dureza considerada como “dura”. Los nitratos, nitritos y fosfatos se encontraron dentro del rango permisible para evitar procesos de eutrofización acelerados, a excepción del fosfato que en el 2009 registro su valor más alto (0,98 mg L<sup>-1</sup>). Los valores medios de la clorofila-*a* evidenciaron la oligotrofia de la masa de agua, notándose un cambio hacia la eutrofia para el 2011.

#### **B3.4.6. ENSENADA DE YUNGUYO**

La Tabla B3-11 muestra los valores medios de los parámetros fisicoquímicos registrados en la ensenada de Yunguyo (ver Fig. B3-1), donde no se aprecian grandes fluctuaciones de temperatura en la columna de agua. El pH registró valores estables con tendencia alcalina. La columna de agua presento altos valores de oxígeno, por encima de los 5,0 mg L<sup>-1</sup>. Los valores de CO<sub>2</sub> eran altos. La masa de agua registró una buena reserva alcalina y un grado de dureza muy alta. Los niveles traza y metales pesados se encontraron por debajo de los límites establecidos por la Unión Europea para el cultivo de trucha.

#### **B3.4.7. BAHÍA INTERIOR DE PUNO**

Esta zona del Lago Mayor (ver Fig. B3-5) registro una escasa transparencia, una gran variación de la concentración de OD encontrándose en condiciones de sobresaturación. Los valores de pH fueron elevados con tendencia alcalina que alcanzo valores medios superiores de 10, altos valores de turbidez, sales totales disueltas expresadas en los valores de conductividad y sólidos totales suspendidos. Los valores de clorofila-*a* evidenciaron un medio acuático híper-eutrófico (Tabs. B3-12,13).

#### **B3.4.8. PENÍNSULA DE CAPACHICA**

Esta zona (ver Fig. B3-1) registró altos valores de transparencia y bajos valores de turbidez. En la superficie, la temperatura del agua registró ligeras variaciones. El pH presentó valores estables con tendencia alcalina. El OD se encontró en valores recomendados para el soporte de la vida acuática (> 5,0 mg L<sup>-1</sup>). Los nutrientes se encontraron en el rango óptimo para evitar procesos de eutrofización acelerados. Los valores bajos de clorofila-*a* denotaron una masa de agua en condición de oligotrofia. Sin embargo los altos valores de DBO<sub>5</sub> evidenciaron la perturbación del ambiente lacustre por ingreso de carga contaminante (Tab. B3-14).



#### **B3.4.9. SÍNTESIS (OTROS PARAMETROS DE CALIDAD DE AGUA)**

Los estudios realizados por IMARPE sobre calidad acuática se resumen en la Tabla B3-13. Ella muestra los valores medios de parámetros fisicoquímicos que miden el grado de contaminación en puntos seleccionados. Se observa grandes variaciones de pH, con valores mínimos en Ananea y máximos en Desaguadero y la Bahía Interior de Puno. Los sólidos totales suspendidos (SST) en Ananea, Suchez, Torococha, Bahía Interior de Puno y Yunguyo superaron los valores recomendados para la conservación del ambiente acuático, según los estándares nacionales de calidad para el agua. En todas las estaciones de muestreo los valores de aceites y grasas, sulfuros e hidrocarburos de petróleo (HATD) superaron los estipulados por los ECA (Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, aprobado por el Decreto Supremo 002-2008-MIMAN, [http://www.minam.gob.pe/dmdocuments/ds\\_002\\_2008\\_eca\\_agua.pdf](http://www.minam.gob.pe/dmdocuments/ds_002_2008_eca_agua.pdf)). La DBO<sub>5</sub> en las zonas de Torococha, Desaguadero y la desembocadura del río Llave registró altas concentraciones superiores al límite recomendado en los ECA. Los análisis evidenciaron que las concentraciones de metales pesados superan los valores recomendados por los ECA para la conservación del ambiente acuático: el plomo (en todos los puntos de muestreo), el arsénico (Chifron, Pomata, San Pedro de Hayllata y la desembocadura del río Suchez) y el mercurio (río Coata).

### **B3.5. LAGO MENOR**

El Lago Menor representa 16,6 % de la superficie total del Lago Titicaca. Se diferencia del Lago Mayor por su profundidad media de 9 m y máxima de 42 m (Fosa de Chúa) (Boulangé & Aquize 1981) (Fig. B3-6).

#### **B3.5.1. PERÍODO 1979-1980**

En el ámbito del convenio entre UMSA y ORSTOM (actual IRD), Lazzaro (1980, 1981, 1985) realizó el primer estudio de la evolución estacional de la comunidad fitoplanctónica, su biomasa y producción primaria (método del <sup>14</sup>C, incubaciones de 4 hrs. alrededor del mediodía, en varias profundidades a Chúa, 42 m, y Sukuta, 6 m). Las relacionó con las condiciones físico-químicas, en 8 estaciones representativas del Lago Menor (Fig. B3-7), entre febrero 1979 y mayo 1980, con una frecuencia de 16 días acompañando el paso del satélite Landsat 1. Lastimosamente, no se colectó zooplancton simultáneamente. Esta región del Lago fue caracterizada como polimíctica, excepto la zona más profunda de Chúa de tipo monomíctica como el Lago Mayor. Sus características eran semejantes a la de un lago tropical de baja altura, a pesar de su baja temperatura (8-14 °C). La transparencia (disco de Secchi) fue alta todo el año con hasta 7 m, y

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

coeficiente de extinción de la luz fotosintéticamente activa ( $K_d$  PAR) de 0,22-1,10  $m^{-1}$  (quantámetro Li-COR) (Tab. B3-15). La biomasa del fitoplancton (0,4-1,2  $g\ m^{-2}$ ; conteos por el método Uthermöhl) estaba dominada por Clorofíceas (60-90 %), siendo las cianobacterias escasas. La riqueza específica fue baja ( $\sim 20$  especies), pero la diversidad relativamente alta (2,0-3,7 bits  $cel.^{-1}$ ). Rara vez, las concentraciones de clorofila-*a* sobrepasaran 5  $mg\ m^{-2}$  (filtración con filtros GF/C y extracción con acetona), con mínimos  $\leq 0,5\ \mu g\ L^{-1}$  en invierno seco (jul.-sep.) y máximos  $\geq 2\ \mu g\ L^{-1}$  en verano en el conjunto del Lago Menor (Tab. B3-16). La biomasa promedio de carbono era 150  $mg\ C\ m^{-3}$  (calculada a partir del pH y de la alcalinidad), con un máximo en mayo (5  $g\ C\ m^{-2}$ ) correspondiendo con el máximo de producción primaria diaria (1,0  $g\ C\ m^{-2}\ d^{-1}$ ). Se consideró que los nutrientes (limitación del nitrógeno) no eran el factor limitante de la producción primaria, sino la inhibición sub-superficial de la radiación solar (RUV y PAR). El máximo de producción primaria,  $P_{opt}$ , se encontró entre 3-5 m, a veces 8 m de profundidad. La zona eufótica (profundidad recibiendo 1 % de la irradiancia PAR superficial) llegó a 17 m en Chúa. En esta zona, una producción primaria cercana de 1  $mg\ C\ m^{-3}\ h^{-1}$  era frecuente en invierno a más de 20 m de profundidad. La producción por unidad de biomasa (razón P:B) varió de 0,1-0,5  $d^{-1}$ , con una eficiencia fotosintética débil (0,05-0,20 %). La producción primaria anual alcanzó 50  $g\ C\ m^{-2}\ a^{-1}$ , clasificando el Lago Menor como oligotrófico, mientras Chúa era meso-eutrófico (200  $g\ C\ m^{-2}\ a^{-1}$ ), representando la transición con el Lago Mayor de tendencia más bien eutrófica (500  $g\ C\ m^{-2}\ a^{-1}$ ). El Lago Menor se distingue esencialmente del Lago Mayor, por su importante desarrollo de macrófitas acuáticas y de perifiton que representan la mayoría de la producción vegetal acuática.

Según Richerson *et al.* (1986), el perifiton y las macrófitas son muy importantes debido a que el Lago Menor es somero y transparente. Ambos pueden jugar un papel en el mantenimiento de bajas y relativamente constantes concentraciones de nutrientes, restringiendo así el rango de la sucesión temporal. La escasa importancia de cianobacterias fijadoras de nitrógeno en Lago Menor es desconcertante ya que las razones N:P disueltas son muy bajas, a menudo  $\leq 1:1$  (molar) (ver Lazzaro 1981; Fig. B3-8, Tab. B3-17), o sea revelando una importante limitación en nitrógeno. En contraste, en el Lago Mayor, la fijación de nitrógeno puede ser demostrada a veces como limitada por el fosfato y el hierro (Wurtsbaugh *et al.* 1985).

#### B3.5.2. EVOLUCIÓN ENTRE 1980 Y 2011-2013

En la ocasión del Iº Simposio Internacional del Lago Titicaca (Puno, 19-21 de octubre 2011), para comparar el estado limnológico actual del Lago Menor con la situación tres décadas atrás, Lazzaro & Point (2011) realizaron en junio 2011 una campaña de caracterización limnológica y

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

biogeoquímica en las mismas 8 estaciones del estudio de Lazzaro (1981). En relación a junio 1979, las mayores diferencias encontradas (Tabs. B3-18,19) fueron: el nivel de la superficie del agua bajo de  $2,0 \pm 0,4$  m (promedio  $\pm$  ES); la zona eufótica aumentó de  $0,5 \pm 1,8$  m; la transparencia de Secchi aumento de  $1,1 \pm 0,9$  m; la conductividad aumento a  $1.643 \pm 98 \mu\text{Si cm}^{-2}$  (+ 400); el pH aumento de 8,55-8,65 a  $9,6 \pm 0,06$ ; de  $2,34 \pm 0,43 \mu\text{g L}^{-1}$ ; la clorofila-*a* bajó de  $1,0 \pm 0,6 \mu\text{g L}^{-1}$  (-37 %; sin embargo no se puede comparar directamente el método inicial de la extracción por acetona con el actual de fluorescencia *in vivo* con una FluoroProbe bbe); la contribución de las Clorófitas a la biomasa fitoplanctónica bajó en 20-80% (pero no se puede comparar directamente las diferencias de proporciones iniciales en biovolúmenes y actuales en fluorescencia); la presencia de Cianobacterias es nueva y llega a 5-40% de la fluorescencia, lo que a pesar de representar concentraciones  $< 1 \mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$  no deja de representar un signo de eutrofización acompañado la limitación en nitrógeno. Esto sugiere que las áreas pelágicas del Lago Menor no se hubieran eutrofizado durante las últimas tres décadas. En 1979-1980 (Lazzaro 1981), las biomásas de clorofila eran bajas ( $\leq 5 \mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$ ) y dominaban Chlorophyta (60-90%). Actualmente (ver el proyecto "Titicaca sensores" abajo), las mediciones por fluorometría *in vivo* en Huatajata y Chúa muestran mayores biomásas ( $10-30 \mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$ ) donde dominan Bacillariophyta (diatomeas) y Cryptophyta, lo que tienen que confirmar los conteos de microscopía (Rocha & Lazzaro, en curso). Este remplazo de Chlorophyta por Bacillariophyta refleja el cambio clásico de un estado oligotrófico a mesotrófico (Reynolds 1980).

En el Lago Menor, Repelin *et al.* (1988) realizaron el primer estudio sobre distribución y migraciones nictimerales (período de 24 hrs.) del zooplancton. La mayor abundancia de organismos fue encontrada en las zonas profundas (correspondiente a las regiones de Santa Rosa y Taraco) y la menor en la zona somera (Puerto Pérez). La época de lluvias presentó la mayor proliferación de organismos, en relación a la época seca. Las migraciones se analizaron a nivel de grupos (copépodos adultos, copepoditos y nauplii; cladóceros) y para 2 especie de rotíferos (*Keratella quadrata* y *Filinia longiseta*). Los autores observaron un descenso de las poblaciones a mediodía y una dispersión de los organismos en toda la columna durante el día.

En Huatajata (10 m), Mendoza (2004) estudió la migración vertical de los cladóceros (*Daphnia pulex*, *Ceriodaphnia* sp., *Bosmina huaronensis* y *Simocephalus vetulus*) en relación a los factores físico-químicos. Ambos presentaron migración directa o nocturna también denominada normal. Esta tendencia es más clara y definida para *Daphnia pulex*, presentando una concentración mayor en superficie durante la noche, y una dispersión en estratos intermedios durante el día.

En diciembre 2012, Point *et al.* (2013) instalaron una plataforma de sondas automáticas de

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

última generación inmersas en una zona polimíctica  $\leq 5$  m de profundidad frente a Huatajata en el Lago Menor. Este proyecto "Titicaca Censores" está implementado en el ámbito de una colaboración entre las unidades GET (D. Point) y BOREA (X. Lazzaro) del IRD, el IPGP (A. Groleau), y el LCA/UMSA (D. Achá). En contradicción con los resultados de Lazzaro & Point (2011), durante los 6 primeros meses, las series temporales obtenidas a 1,5 m y 4,5 m de profundidad a Huatajata, así como los perfiles verticales realizados a cada 15 días en Huatajata y Chúa ( $> 40$  m), revelan características de condiciones mesotróficas y sugieren una mayor productividad planctónica que en el pasado. Así, los promedios ( $\pm$ SE) en concentración de clorofila obtenidos con una sonda FluoroProbe bbe (fluorescencia *in vivo*) son  $4,29 \pm 0,28 \mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$  (min. = 0,48 y máx. = 10,94  $\mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$ ) en Huatajata, y  $6,98 \pm 0,21 \mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$  (min. = 0,10 y máx. = 13,69  $\mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$ ) en Chúa. Estas biomásas fitoplanctónicas son en media 4-7 veces (máximo hasta  $> 10$  veces) mayores a las de 1979-1980 ( $\leq 1 \mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$ ) obtenidas con el método clásico de extracción con acetona. Estas discrepancias entre los resultados de los dos estudios y el posible sesgo relacionado con la diferencia de metodología requieren proseguir hasta por los menos completar dos ciclos anuales e intercalibrar los dos métodos.

## B3.6. CONTAMINACIÓN Y EUTROFIZACIÓN EN LAS BAHÍAS

El 6 de octubre del 2006, los Cancilleres del Perú y Bolivia emitieron el Memorándum Binacional por el cual dispone que la ALT efectúe un estudio y presente una propuesta para atender la contaminación de las bahías de Puno en el Perú y Cohana en Bolivia (ALT 2011).

### B3.6.1. BAHÍA DE PUNO (LAGO MAYOR, PERÚ)

Hasta el fin de la década de los setenta no se había prestado mucha atención a la limnología de la Bahía de Puno, a pesar de su extensión ( $552 \text{ km}^2$ ). Paradójicamente, la Bahía interior de Puno ( $16 \text{ km}^2$ ) también carecía de estudios a pesar de sustentar una población de 90.000 habitantes que afectaban la calidad de las aguas. En la ocasión de un estudio de la FAO encargado de evaluar soluciones contra el fracaso de la pesquería de trucha arco iris en el Lago, se destacó la necesidad de estudiar y combatir la contaminación y la eutrofización revelada por la proliferación de macrófitas flotantes (*Lemna* sp.).

Como lo presentaron Northcote *et al.* (1991), esta situación incentivó a la UNA (Universidad Nacional del Altiplano en Puno) en emprender estudios sobre eutrofización (Northcote 1979, 1981). Entonces, la Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (ACDI) apoyó financieramente el Westwater Research Centre de la Universidad de British Columbia (UBC), que estaba colaborando con la UNA, en montar en 1981 en la UNA (ubicada en la orilla de la

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

bahía interior) un centro de capacitación en el manejo de la calidad del agua y los recursos acuáticos. El objetivo fue dejar un centro autónomo capaz de solicitar la ayuda de organismos nacionales e internacionales. Los trabajos se concentraron en las zonas contaminadas de la Bahía de Puno por el drenaje de las aguas urbanas residuales (conteniendo basuras, etc.), debido a la casi ausencia de recolección y tratamiento. En consecuencia, más del 98% del fondo de la bahía interior de Puno es casi anóxico con niveles de oxígeno disuelto bajos, que determina la extinción de los organismos bentónicos. Así, el libro de Northcote *et al.* (1991) fue una contribución importante para fomentar la capacitación profesional, la investigación y el manejo de los recursos acuáticos en el Altiplano peruano. En base a las experiencias adquiridas, los autores (Pacoricona *et al.* 1991) sugirieron varias alternativas para suplir las deficiencias de la red de alcantarillado de la ciudad de Puno, en particular: (a) Desarrollar un programa amplio de saneamiento para la recolección y tratamiento *in situ* de los residuos de origen humano, con apoyo de organismos locales; (b) Proveer instalaciones sanitarias públicas en lugares de reunión (mercado, zonas comerciales); (c) Reparar y renovar las alcantarillas con método de bajo costo de tratamiento de aguas residuales; y (d) Combinar lagunas de aguas residuales con macrófitas acuáticas como solución alternativa barata, en base a investigaciones, evaluación de un modelo, y desarrollo de un proyecto piloto que también podrá ser adaptado a otros centros de población del Altiplano. Parte de estas recomendaciones fueron implementadas.

Más recientemente, considerando la relación costo beneficio, la ALT (2011) seleccionó varias otras medidas para la restauración: oxigenación hipolimnética en un área de 400 ha, mejoramiento de la eficiencia de la planta de tratamiento de Espinar (reducción de DBO en 31%, NT en 56% y PT en 69%), operación y mantenimiento, capacitación y sensibilización (elaboración de documental, spot publicitarios, difusión periodística, talleres participativos), cosecha mecánica de lenteja de agua (*Lemna.sp.*).

Desde la instalación de aireadores en 2007 y las campañas de cosecha de lenteja, hasta 2011 la bahía interior se había recuperado y no estaba cubierta por lentejas de agua, con los beneficios de mejorar la transparencia, el paisaje, reactivar las actividades en puerto de Puno y bahía Interior (navegación, transporte turístico, impacto visual). El mejoramiento de las características físico-químicas del agua llevó a una recuperación biológica, con aparente incremento en las poblaciones de perifiton, fito- y zooplancton, macrófitas, zoobentos y peces, lo que llevo al reinicio de las actividades de pesca artesanal. Paralelamente, se observó una sensible disminución de las macrófitas sumergidas, como las especies de *Chara*, *Elodea*, *Myriophyllum*, *Potamogetom*, *Cladophora*, *Hydrocotyle*, y las emergentes *Schoenolectus totora*. Por su parte el Municipio de Puno implementó el mejoramiento de las aguas de la pequeña laguna confinada

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

al interior del Malecón (Laguna de Kyacs), mediante la aplicación de bacterias ecoeficientes.

Sin embargo, estas medidas son paliativas. El sistema biológico natural en las orillas de la Bahía de Puno no es capaz, por sí solo, de absorber los nutrientes llevados por los efluentes urbanos, lo que podría nuevamente generar la proliferación de *Lemna*. Solo se detendrá el deterioro de la situación ambiental en la Bahía de Puno cuando se logre el tratamiento total de los efluentes urbanos.

Este progresivo deterioro de la calidad ambiental de la bahía interior de Puno, ha estado fuertemente asociado al evento de mortandad de peces suscitada en marzo de 2013. Un estudio realizado por IMARPE durante el evento, estimó una mortandad de peces de 2.3 TM y 119.440 individuos, siendo las especies carachi gris y amarillo, las más afectadas, en tallas juveniles y adultos. Los análisis demostraron una transparencia elevada para la Bahía Interior de Puno (máx. 5,4 m) en comparación con registros del año 2008 (prom. 1,21 m) y primavera del 2010 (prom. 0,97 m); la temperatura del agua elevada (18,3 y 18,9 °C); valores de pH bajos (7,71–7,89), menores a los registros de la estación fija Muelle Puno de IMARPE (MP) de los años 2011 (prom. 9,8) y 2012 (prom. 8,82), que se correlacionan con los altos valores de CO<sub>2</sub> encontrados (hasta 20 mg L<sup>-1</sup>). El oxígeno disuelto se encontró extremadamente disminuido (0,0 –1,26 mg L<sup>-1</sup>). Esta disminución de oxígeno disuelto está fuertemente relacionada con las bajas concentraciones de clorofila-*a* encontradas (1,54–5,01 µg L<sup>-1</sup>, y promedio 2,53 µg L<sup>-1</sup>), abundancias y diversidad de fitoplancton muy reducidas, presencia de aceites y grasas en la superficie del agua e importantes densidades de lenteja de agua. A su vez, se observó un pulso importante en las poblaciones del Cladóceros *Daphnia* sp., observándose densos grupos de color rojizo-marrón en la superficie del agua. Los nutrientes, principalmente el nitrógeno, se encontraron en altas concentraciones en sus formas de nitrógeno amoniacal y nitritos, que resultan tóxicos para peces de agua dulce.

El estudio histopatológico en ejemplares de peces colectados en estado moribundo reveló lesiones en branquias tales como: hiperplasia interlamelar, desorganización estructural de las lamelas y fusión de las mismas se encuentran asociadas a hipoxia y cambios en la temperatura del agua, lo cual coincide con los valores de oxígeno y nitrógeno amoniacal encontrados en la columna de agua. La observación de telangiectasia en branquias se encuentra asociada a las lesiones que pudiera estar provocando el parásito *Trichodina* sp. en las lamelas. Sin embargo existen otras causas que ocasionan dicha patología, como la presencia de residuos metabólicos o contaminantes químicos en el agua, comprometiéndose la función respiratoria por menoscabo de la misma.

### **B3.6.2. BAHÍA DE COHANA (LAGO MENOR, BOLIVIA)**

Al origen, la bahía de Cohana era una zona agrícola y de ganadería, con numerosos sitios de alta importancia arqueológica (terrazas incaicas, chulpas) y turística, un activo para el desarrollo económico. Los flamencos, el carachi y el pejerrey, batracios y varias especies de aves han desaparecido de esta región. Donde hace 20 años vivían prósperas comunidades, hoy sólo quedan pequeñas casas de adobe abandonadas. La contaminación y eutrofización de la Bahía de Cohana – que alcanza las islas de Paratí, Kalahuta, Suriqui, y se extiende a las bahías de Taraco y Puerto Pérez – está documentada por un diagnóstico de LIDEMA, dos informes de proyectos, y un proyecto todavía en proceso:

El estudio ambiental de contaminación realizado por la Prefectura del Departamento de La Paz, PDLP/DRNMA/UL-E-070/03 (PSID 2004) tuvo 7 objetivos ambiciosos: (a) Indicar las fuentes de descarga de aguas residuales y de contaminación natural, (b) Elaborar una línea base ambiental, (c) Formular una zonificación de fuentes de contaminación, (d) Realizar un monitoreo de calidad de agua, (e) Proponer medidas de mitigación mediante diseño de obras, en la Bahía y los afluentes (f) Definir acciones locales para promover la conservación de la diversidad biológica de los recursos naturales, y (g) Diseñar un sistema de educación ambiental para diferentes niveles de la sociedad civil. Al final, en base a datos provenientes de estudios anteriores, se propuso que para el cumplimiento de estos objetivos, las actividades propuestas serían ejecutadas en fechas posteriores a la entrega del informe. Por lo cual se quedó solamente como una propuesta.

Ribera (2008) (<http://solaris.bvsp.org.bo/textocompleto/ma0000001a.pdf>), coordinador de investigación y monitoreo de LIDEMA, presentó recientemente una reseña histórica de los acontecimientos. Este ilustra la dejadez de la gestión ambiental en los diversos aparatos del Estado como al origen de la magnitud de la contaminación urbano industrial, por la falta de coordinación entre las diversas instancias públicas como el Ministerio de Agua, de Planificación Territorial y Medio Ambiente, el MDRAMA, la Prefectura, y la ALT, sumado a la dispersión de esfuerzos de numerosas instituciones trabajando con escasa o ninguna coordinación, multiplicándose las iniciativas aisladas e inconexas. La sensibilización es muy reciente, por la prensa (El Diario 01/02/2001), debido al cambio de color del agua a más turbia por desborde de los ríos Pallina y Katari, acompañado por una alta mortandad de peces, ranas y aves en la zona lacustre (Puerto Pérez, Aygachi y Taraco), sin citar la Bahía de Cohana. Ni el “informe Freeman” (1980; Bolivia: State of Environment and Natural Resources/USAID), ni el Perfil Ambiental de

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Bolivia (1986), ni el Plan de Acción Ambiental de Bolivia (1992), tampoco el IIQ/UMSA, el PELT o LIDEMA (Quiroz 1992) mencionaron específicamente este problema. El primer análisis que identificó los agentes de impacto fue el estudio de J. Quintanilla (IIQ/UMSA) en Aguirre *et al.* (2001) haciendo referencia a la contaminación bacteriológica proveniente de Puno, El Alto y Viacha, debido a los desechos domésticos (basura y aguas servidas) y defectos en las redes de alcantarillado, por falta de planificación e implementación de un programa de saneamiento ambiental y el incumplimiento de la reglamentación, sobre el vertido de desechos líquidos y sólidos en los cuerpos de agua. El primer estudio específico fue la tesis de Chiqui (2001) cuyos resultados resaltan el pH alcalino (8-9,6), los DBO y DQO superando muchas veces el límite permitido según las normas de la Ley del Medio Ambiente, las altas concentraciones de amoníaco, fósforo, coliformes totales y fecales, pero la baja concentración de metales pesados (arsénico, cromo, cadmio), aunque no menciona la contaminación metalúrgica y minera de la zona de Viacha.

En 2004, la Propuesta estratégica del Plan Maestro de Biodiversidad del Sistema TDPS (Ribera 2005) de la ALT incorporaba como acción estratégica prioritaria la reducción de los niveles de contaminación doméstica e industrial en el Lago Titicaca, priorizando específicamente la Bahía de Cohana. El 5 de agosto 2004, se declaró las cuencas de los ríos Quelcata, Tujsahuirra, Pallina y Katari, como Zona de Desastre Ambiental y de Emergencia Hídrica, situación que paso desapercibida. En marzo 2006, se desencadenó el conflicto social por la movilización en El Alto de los pescadores del Lago Menor, exigiendo al gobierno dar solución al tema de la contaminación en Cohana. El movimiento social culminó con la salida en enero 2007 de la empresa "Aguas del Illimani" por incumplimiento de varios puntos de su contrato, como la remoción de fósforo, nitrógeno total y nitrógeno amoniacal por parte de la planta de tratamiento de aguas de Puchukollo. Por adelante, el control de emisiones de El Alto quedo bajo responsabilidad del Estado. Hasta el presente, el problema de la Bahía de Cohana carece de un tratamiento oficial, responsable, y no existen todavía proyecciones hacia una solución estructural en el corto plazo. Sólo se han dado respuestas paliativas y momentáneas, como la limpieza de la lenteja de agua (*Lemna gibba*) por la gente ribereña, y con apoyo de una pala mecánica de la ALT, siguiendo el modelo implementado en la Bahía de Puno.

El proyecto PROLAGO–USAID (2010-2013), ya finalizado, tuvo como objetivo práctico el manejar la contaminación en el eje hidrográfico El Alto – Lago Titicaca, en tres etapas: (a) limpiar el río Pallina en Viacha sensibilizando a los comunarios, (b) elaborar abono y biogas con desechos orgánicos, y (c) eliminar los altos niveles de contaminación al ingreso a la Bahía. También, se realizaron 7 campañas de muestreo de parámetros limnológicos (OD, Temp., pH,



DBO, DQO, Fosfato total, Nitrógeno total, bacterias, coliformes, Cromo, Clorofila) en 8 estaciones de la Bahía de Cohana. Lastimosamente, estos datos no son confiables por los protocolos empleados.

El proyecto IDH 2013-2014 “Enfoque socio-ambiental de la eutrofización, los causantes y los potenciales de biorremediación en el continuo entre el Lago Titicaca y la Ciudad de El Alto” (Achá *et al.* 2013) implica investigadores de la UMSA (UCA, UL, IIGEO, IFB) y del IRD. En la Bahía de Cohana, tiene como objetivos: (a) Estimar la magnitud de las áreas en proceso o riesgo de ser eutrofizadas, (b) Identificar marcadores de eutrofización y enriquecimiento orgánico (por ej., fraccionamiento isotópico de nitrógeno, estructura de comunidad fitoplanctónica y concentración relativa de clorofila-*a* entre grupos funcionales) que permitan detectar la eutrofización en estado incipiente y/o permitan identificar enriquecimiento orgánico antes de que el ambiente se torne eutrófico, (c) Evaluar la actividad microbiana para estudiar alternativas de bioremedicación en los afluentes más contaminados, y (d) Divulgar los resultados para las alcaldías de El Alto, Viacha, la ALT, y las comunidades pesqueras de la zona. Se toma muestras a lo largo de transectos partiendo de una zona con eutrofización verificada y se va alejando hasta llegar a una zona oligotrófica (Fig. B3-9). Se realizará la tercera campaña en septiembre 2013.

### **B3.6.3. BAHÍA DE COPACABANA**

Aunque la calidad de agua litoral se ve bastante impactada por los vertidos de aguas residuales de la ciudad, no hemos podido encontrar información técnico-científica sobre la evolución y el estado actual de la contaminación en la Bahía de Copacabana.

## **B3.7. FOTOBIOLOGIA: EFECTOS DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN EL PLANCTON**

La radiación ultravioleta (RUV) genera un impacto negativo en el plancton (Villafañe & Helbling 2003). Su incidencia en la superficie terrestre depende de la latitud y la altitud, así como de la nubosidad y del albedo (Zaratti 2003). También redefinen su incidencia las concentraciones de carbono orgánico disuelto (COD) (Sommaruga 2001, Rautio & Korhola 2002, Aguilera & Coronel 2009, Aguilera *et al.* 2013) y de clorofila (Laurion *et al.* 2000), así como de materia particulada (Bracchini *et al.* 2005), como además la mezcla vertical de la columna de agua (Ferrero *et al.* 2006, Villafañe *et al.* 2007, Helbling *et al.* 2013).

La exposición a la RUV (ver síntesis en Sommaruga 2001) produce una inhibición fotosintética

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

del fitoplancton (Villafañe *et al.* 1999, Helbling *et al.* 2001b), la alteración del DNA del zooplancton (MacFadyen *et al.* 2004) y la modificación de la estructura de las comunidades (Cabrera *et al.* 1997, Marinone *et al.* 2006). Los organismos tienen mecanismos de defensa para evitar, tolerar o reparar el daño causado. Ellos usan compuestos fotoprotectores (CPPs: e.g., carotenoides, aminoácidos tipo micosporinas (MAAs) y melanina; Helbling *et al.* 2002, Laurion *et al.* 2002, Rautio & Korhola 2002, Tartarotti *et al.* 2004, Tartarotti & Sommaruga 2006, Sommaruga 2010), exhiben migración vertical (Ritcher *et al.* 2007, Hylander & Hansson 2010) y horizontal (Zengling *et al.* 2010, 2013), así como realizan reparación enzimática del DNA (Sinha & Hadër 2002, MacFadyen *et al.* 2004).

A pesar de la intensa radiación solar (UV y PAR) en el Lago Titicaca, y de la necesidad de prever la evolución de la calidad de agua y recursos acuáticos frente al cambio global, se realizaron muy pocos estudios sobre sus efectos en el plancton y el funcionamiento trófico.

#### **B3.7.1. PERÍODO 1997-1999**

En una serie de estudios realizados en 1997-1999, en la zona de la Fosa de Chúa, Villafañe *et al.* (1999, 2003) y Helbling *et al.* (2001a,b, 2002) demostraron que, en la zona eufótica, las radiaciones UV-A (315-400 nm) y UV-B (280-315 nm) inhibían significativamente la fotosíntesis del fitoplancton en 60 % y 20%, respectivamente, con una pérdida de carbono del 14% y 3,4%. Tomando en cuenta la alta radiación recibida, la molécula de ADN fue poco dañada. El zooplancton (sobre todo el copépodo *Boeckella titicacae*) se reveló resistente a la RUV (en términos de mortalidad), siendo capaz de acumular pigmentos fotoprotectores. Esta alta resistencia de los organismos (comparado con aquella de regiones templadas y polares) no sorprende visto los altos niveles de RUV en el Lago Titicaca.

#### **B3.7.2. PERÍODO 2013**

En la región de Chúa, entre diciembre de 2012 y febrero de 2013 (estación lluviosa), Lazzaro (2013; ver una síntesis en Villafañe *et al.* 2013) realizó perfiles verticales de atenuación espectral de RUV-B (305 y 313 nm), RUV-A (entre 320 y 395 nm) y PAR (400-700 nm). Se observaron grandes diferencias en la transparencia respecto a los estudios anteriores (Tab. B3-20). Los valores actuales de Z1% (profundidad a la cual llega 1% de la radiación superficial) para UV-B, UV-A y PAR, son 3, 6 y 12 m, respectivamente, mientras que en septiembre 1997 (fin de la época seca) eran 6, 12 y 21 m, respectivamente. Esto sugiere que los procesos de eutrofización ya están en marcha, por lo menos en este área del Lago Menor, aunque aparentemente sea poco afectada por la presión antropogénica.

### **B3.7.3. PERSPECTIVAS FUTURAS CON EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA PRESIÓN ANTROPOGÉNICA**

En un contexto de cambio global, se prevén cambios físicos y químicos significativos en los ambientes lacustres. Se considera que las mayores temperaturas aumentarán la estratificación del epilimnión, así las células estarán expuestas a mayores niveles de radiación. Paralelamente, con la intensificación del uso de las tierras, la variación en la intensidad de las precipitaciones y los vientos etc., se incrementará a nivel global el aporte de materia orgánica disuelta (DOM) a los cuerpos de agua. Esto provocará una menor penetración de la radiación solar. Combinado con cambios en los patrones de vientos, resultará en un nuevo equilibrio y una mezcla vertical en la capa superficial. Entonces, el fitoplancton será expuesto no sólo a un campo lumínico distinto, sino también a una condición distinta de nutrientes (Villafañe *et al.* 2013). En consecuencia, se necesita estudiar la magnitud de ambos cambios para prever sus consecuencias sobre el funcionamiento ecológico del Lago.

## **B3.8. RECOMENDACIONES**

### **B3.8.1. VACÍOS DE INFORMACIÓN Y SESGOS**

La presente síntesis permite identificar una serie de vacíos de información y de sesgos:

- Aunque esté demostrado que la variabilidad interanual sea de mayor magnitud a la variación estacional en este ecosistema tropical de alta montaña, no existen estudios históricos de referencia con monitoreo durante varios años consecutivos a la escala del Lago Titicaca entero. Entonces, **no es posible evaluar la amplitud de los cambios en las características limnológicas** más importantes, en relación a la actualidad. También faltan comparaciones entre áreas eutrofizadas y áreas poco impactadas a lo largo de las décadas para poder evaluar la contribución relativa de los efectos de los cambios climáticos (calentamiento global) y antrópicos.
- En vista de las **discrepancias en los resultados entre varios estudios caracterizando el estado trófico** del Lago (entre oligotrófico y hiper-eutrófico), sería esencial diferenciar entre zonas litorales y pelágicas, someras y profundas, con y sin macrófitas (flotantes, sumergidas y/o emergentes), con y sin fuentes de contaminación puntuales o difusas. O sea, es indispensable interpretar los resultados en función de una tipología morfo-edáfica que, todavía, precisa implementar a la escala del Lago entero. Sería crucial acordarse en una(s) medida(s) estándar(es) de estado trófico ampliamente utilizadas, basadas en la profundidad de Secchi (o el coeficiente  $K_d$  de atenuación de la radiación solar PAR), las concentraciones de nitrógeno total, fósforo total, sólidos en suspensión, clorofila- $a$ , y la abundancia de macrófitas sumergidas

### *B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca*

(que son fuertemente correlacionados con las diferentes clases de estado trófico) – como por ejemplo, la clasificación de OECD (1982) adaptada para lagos tropicales (tomando en cuenta su frecuente limitación en nitrógeno y mayores niveles de productividad), discutida en Ryding & Rast (1989).

- Los **métodos y protocolos son frecuentemente incompatibles** entre estudios y las instituciones no colaboran para estandarizarlos y juntar esfuerzos, permitiendo lograr conclusiones confiables y de mayor porte. En particular, para eliminar los sesgos que resultan de diferencias entre protocolos analíticos (e.g., Cl-a: extracción con acetona u otros solventes vs. fluorescencia; DO: método de Winkler vs. captosres de tipo Clark o optodos; RUV: radiómetros de banda ancha vs. captosres espectrales; producción primaria del fitoplancton: incubaciones con <sup>14</sup>C, método al oxígeno con Winkler vs. micro-optodos).

- **No se tienen mediciones actuales de producción primaria del fitoplancton** para poder comparar con las condiciones 3 décadas atrás, y estimar la contribución relativa de los cambios climáticos y antropogénicos, comparando áreas poco y muy impactadas por actividades humanas.

- **No se tienen estudios recientes para evaluar el nivel de limitación de nutrientes** (nitrógeno, fósforo, o co-limitación), en función del nivel de eutrofización, para poder detectar posibles condiciones favorables al desarrollo indeseable de cianobacterias y poder controlarlo.

- No se conoce **en qué medida la atenuación de la radiación solar (RUV y PAR) ha cambiado** durante las últimas décadas, para poder estimar las evoluciones futuras posibles en función de la presión antropogénica (por ejemplo, las Bahías de Cohana, Copacabana y Puno), con una eventual sinergia del calentamiento global.

- Existe una serie de sustancias contaminantes (de origen minero, industrial y urbano) que vienen ingresando al Lago Titicaca en concentraciones indeseables para la salud del ecosistema, principalmente en la bahía interior de Puno y la bahía de Cohana. **No se conoce el efecto de mezcla de estos contaminantes** en las aguas del Titicaca y sus consecuencias sobre la biota acuática, la red trófica, el funcionamiento del propio ecosistema y la salud humana (ver los Capítulos C2 y C3 sobre contaminación por metales pesados) .

- La información actual sobre el conocimiento del Lago Titicaca y particularmente de su zona litoral, resulta ser escasa aún para realizar una **zonificación ecológica del Lago**. La misma que debería basarse principalmente en el funcionamiento del ecosistema, características morfobatimétricas, usos tradicionales, riesgos ambientales por ingresos de efluentes urbanos e industriales. Esto permitirá hacer un uso adecuado y sostenible de este ecosistema, asegurando

de esta forma su conservación y los servicios ambientales que provee.

### **B3.8.2. PROPUESTAS PRIORITARIAS**

En función de estos conocimientos dispersos y de los vacíos de información se puede proponer:

- **Remplazar la “cultura del informe” por la “cultura de la publicación en revista científica nacional o (mejor) internacional”** que garantiza la calidad y confiabilidad de los resultados, así como de las conclusiones, y que garantiza una amplia difusión de los conocimientos a la comunidad internacional. De hecho, la mayoría de las informaciones sobre el Lago Titicaca están publicadas en informes técnico-científicos, que además están desprovistos de un comité científico editorial que debería estar constituido por especialistas nacionales e internacionales, independientes de los autores y editores.
- **Analizar la estacionalidad vs. la variación interanual**, la magnitud de la estratificación. Compararla con la estacionalidad de los lagos templados, para los cuales las series temporales detalladas también son escasas.
- **Monitorear a largo plazo algunas estaciones representativas** en el Lago Mayor y en el Lago Menor que hayan sido estudiadas desde el mayor tiempo posible (ver los mapas de las figuras 1-5).
- **Realizar estudios experimentales sobre los impactos del calentamiento global y de la eutrofización**, sobre la dinámica y diversidad funcional de las comunidades planctónicas tomando en cuenta los efectos fotobiológicos de las radiaciones UV y PAR y las respuestas adaptativas de los organismos.
- **Implementar algunas plataformas *in situ* de sondas inmersas multiparamétricas automáticas operando en continuo en alta frecuencia de adquisición** (de algunos min. a decenas de min.; basándose en el modelo del proyecto “Titicaca Censores” o usando boyas equipadas de perfiladores) en algunas zonas representativas críticas (someras vs. profundas, poco impactadas vs. eutrofizadas y/o contaminadas) a fin de detectar y predecir posibles cambios indeseables y eventualmente mitigarlos.
- **Realizar estudios sobre los efectos ecotoxicológicos de los efluentes que ingresan a la bahía interior de Puno y bahía de Cohana**, tanto en el plancton como en peces; considerando el efecto de mezcla de los contaminantes, su transformación en formas orgánicas por las bacterias (en particular, el metilmercurio), su transferencia y a veces biomagnificación en la red trófica (ver el Capítulo C3), así como sus consecuencias en la salud humana.

### *B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca*

- **Realizar la zonificación ecológica del Lago Titicaca**, para mapear las áreas de usos ecosistémicos adecuados, con el concurso de instituciones tanto de Perú y Bolivia. Por ejemplo, actualizar los mapas litorales batimétricos, de zonación de sedimentos, de macrófitas acuáticas, de distribución espacial de piscifactorías en aulas flotantes, de fuentes contaminación y de zonas ribereñas de actividades agropastorales, turísticas, etc. La información generada debe servir de base para la implementación de instrumentos de gestión para el desarrollo de actividades económicas que se desarrollan en el Lago Titicaca, como el turismo y la acuicultura.
- **Reactivar las campañas plurianuales multidisciplinarias** (por lo menos dos veces al año) a la escala del Lago Titicaca entero (binacional, en el modelo de las campañas del PELT y del IMARPE), con la participación de especialistas del IRD y de la UMSA, entre otras instituciones científicas. O sea juntar esfuerzos, equipos y experiencias. Combinar estudios ecológicos, limnológicos y biogeoquímicos (e.g., contaminación por metales pesados, en particular el ciclo trófico del mercurio y metil-mercurio), a los cruceros de biomasa íctica.
- Implementar estas plataformas y las campañas en el **ámbito del Observatorio Ambiental Binacional del Lago Titicaca**, coordinado por la ALT, propuesto durante el II Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS (Puno en 2013) y aprobado unánimemente por las instituciones participantes.
- También en el ámbito del Observatorio Ambiental Binacional del Lago Titicaca, **centralizar en el Centro de Documentación de la ALT en La Paz la literatura técnico-científica** (informes, libros, y publicaciones en revistas nacionales e internacionales, en formato papel y pdf) producida históricamente hasta lo actual por cada institución y equipo de investigadores. Centralizar en una base de datos (a) la información básica de las instituciones, (b) de sus técnicos y investigadores, así como de manera referenciada geográficamente (c) los programas de colectas, campañas, monitoreos (realizados, en curso, y futuros), y (d) los datos multiparamétricos geo-referenciados generados. Facilitar esta información diferencialmente a los profesionales, los gestores, los políticos y al público en general mediante un **portal de Internet**. Para mayor divulgación y por seguridad, implementar espejos de este portal en otras instituciones, como la UMSA y el IRD en Bolivia, y la UNA y el IMARPE en Perú. Promover la publicación de los resultados científicos de proyectos y programas (e) de preferencia en artículos de revistas nacionales e internacionales para una mayor divulgación de calidad a la comunidad científica, y (f) en segundo lugar, a través de informes técnico-científicos evaluados por un comité binacional y/o internacional de especialistas, destinados principalmente a la toma de decisión.

- **Constituir una base de datos geo-referenciados del Lago Titicaca** podría servir para elaborar **un índice de estado trófico específico para los lagos tropicales de altura** (actualmente inexistente), así como un **mapa dinámico de evolución espacio-temporal del estado trófico**. De hecho, (a) los límites entre estados oligo-, meso-, y eutróficos no corresponden entre lagos templados y tropicales de baja altura; en el Lago Titicaca (b) el papel de la inhibición fotosintética es más importante que de la limitación por los nutrientes, (c) la transparencia es siempre mayor a la prevista por el estado trófico correspondiente (proveniente de índices elaborados a partir de ecosistemas de baja altura), y (d) por la intensa radiación solar debido a la altura y la ubicación tropical, las macrófitas sumergidas juegan un papel importante todo el año (competición con el fitoplancton para la luz y los nutrientes) en las zonas someras, pero su abundancia no se toma en cuenta en el cálculo del estado trófico.

Según el índice de estado trófico abierto de la OECD (1982) para lagos templados de baja altura, los rangos de valores para el estado oligotrófico vs. el estado mesotrófico son los siguientes: fósforo total (PT) 3,0-17,7  $\mu\text{g L}^{-1}$  vs. 10,9-95,6  $\mu\text{g L}^{-1}$ ; nitrógeno total (NT) 307-1.630  $\mu\text{g L}^{-1}$  vs. 361-1.387  $\mu\text{g L}^{-1}$ ; clorofila-*a* 0,3-4,5  $\mu\text{g L}^{-1}$  (con valor pico de 1,3-10,6  $\mu\text{g/L}$ ) vs. 3-11  $\mu\text{g L}^{-1}$ ; transparencia de Secchi 5,4-28,3 m vs. 1,5-8,1 m. Así, el Lago Menor tendría un estado mesotrófico por su concentración en clorofila-*a*, pero un estado oligotrófico por sus concentraciones en nutrientes y su transparencia de Secchi. Según esta misma clasificación, los rangos de transición entre el estado mesotrófico y eutrófico en un lago tropical vs. templado de baja altura son los siguientes: fósforo total 50-60  $\mu\text{g L}^{-1}$  vs. 30  $\mu\text{g L}^{-1}$ ; nitrógeno total 20-100  $\mu\text{g L}^{-1}$  vs. 50-100  $\mu\text{g L}^{-1}$ ; clorofila-*a* 10-15  $\mu\text{g L}^{-1}$  vs. 10-15  $\mu\text{g L}^{-1}$ ; media de producción primaria del fitoplancton 2-3  $\text{g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  vs. 1  $\text{g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ . Entonces, el Lago Menor se encontraría entre los estados meso- y eutróficos para la clorofila-*a*, con un nivel de producción primaria de lago templado mesotrófico. Claramente, se necesita una clasificación específica para lagos tropicales de gran altura, como el caso del Lago Titicaca. Adicionalmente, se necesitaría redefinir los rangos de parámetros adecuados a las diferentes clases de uso (por ej., agua propia al consumo humano, el consumo animal, la irrigación, las actividades de recreación, etc.)

- Programar las campañas de los barcos del PELT y del IMARPE, y también, por mayor eficiencia y seguridad, de otro barco adecuadamente equipado para **realizar cruceros científicos conjuntos**, combinando especialistas y equipos. Sería **fundamental procurar una financiación para construir o recuperar un barco científico de tipo oceanográfico**, bien equipado, seguro para las condiciones del Lago Mayor, de mayor porte (eslora > 15 m, con capacidad para 8-10 personas) y rápido para poder realizar en Perú y Bolivia trabajos más finos con mayor comodidad y seguridad. Para los estudios en el Lago Menor, se puede notar que la UMSA no

### *B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca*

dispone más de un barco propio en estado de funcionamiento.

- Desde el punto de vista práctico, se necesita **urgentemente controlar la polución, contaminación y eutrofización de varias zonas litorales** del Lago Titicaca impactadas por las actividades humanas, principalmente los ríos contaminados por las actividades mineras, como el río Suchez, y las Bahías de Puno (en proceso de recuperación), de Copacabana, y sobre todo la bahía de Cohana víctima de contaminación múltipla. Para restaurar la Bahía de Cohana y evitar una mayor contaminación del Lago Menor particularmente vulnerable por ser somero, se necesita limitar el crecimiento descontrolado de la ciudad de El Alto (1,2 millones de habitantes) hacia las orillas del Lago, controlar las fuentes contaminantes en la cuenca del río Katari que desemboca en la bahía de Cohana, ampliar la capacidad o duplicar la planta de tratamiento de aguas de Puchukollo (EPSAS) para retener más eficientemente los desechos sólidos, tóxicos, residuos industriales, patológicos (vertidos de hospitales) provenientes de El Alto, Viacha y Laja, y las colas de minas (Milluni), y/o implementar nuevas plantas de tratamiento de menor porte a lo largo del eje de contaminación Pallina-Katari-Cohana, en poblaciones como Viacha, Laja, Pucarani, Batallas y Puerto Pérez. Como complemento y para controlar mejor la eutrofización, se podría implementar unas plantas de tratamiento de tipo ecológico (por ej., humedales a base de macrófitas), de bajo costo, eficientes para procesar el exceso de materia orgánica y nutrientes, así como retener (bioacumular) contaminantes.

### **B3.9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

- Achá D., Point D. & Lazzaro X. 2013, Enfoque socio-ambiental de la eutrofización, los causantes y los potenciales de biorremediación en el continuo entre el Lago Titicaca y la Ciudad de El Alto, Programa IDH, Coord. D. Achá (LCA/UMSA).
- Agassiz A. 1876a. Hydrographic sketch of Lake Titicaca. Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, 11 (May, 1875 - May, 1876), 283-292.
- Agassiz A. 1876b. Explorations of Lake Titicaca. Bulletin of the Museum of Comparative Zoology (Cambridge), 3, 279–286.
- Agassiz A. & Garman S.W. 1876. Hydrographic sketch of Lake Titicaca. Cambridge, Mass. The Museum, 292 p.
- Aguilera X. & Coronel J. 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, 01-08.
- Aguilera X., Lazzaro X. & Coronel J.S. 2013. Tropical high-altitude Andean lakes located above



- the tree line attenuate UV-A radiation more strongly than typical temperate alpine lakes. Photochemical & Photobiological Sciences, DOI: 10.1039/c3pp25285j
- Aguirre B.C., Miranda C.L. & Verhasself Y. (eds.) 2001. Contribución Al conocimiento del Sistema del Lago Titicaca. KNOW ARSOM, ANCA, ICIB, BID, EMB.BELG. La Paz, Bolivia. 449 p.
- ALT, 2011. Resultados de la implementación de la cosecha mecánica de *Lemna* y aireación de las aguas de la bahía de Puno. ALT, Informe técnico, 13 p.
- ALT, IRD, UMSA, 2013. II Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS ...una responsabilidad compartida. Escuela de Post Grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, 7-9 de Marzo 2013, [www.simposiotiticaca.org](http://www.simposiotiticaca.org) y [www.bolivia.ird.fr/toda-la-actualidad/coloquios/ii-simposio-internacional-del-lago-titicaca-tdps](http://www.bolivia.ird.fr/toda-la-actualidad/coloquios/ii-simposio-internacional-del-lago-titicaca-tdps)
- Andrade M. 2008. Mitos y verdades acerca del cambio climático en Bolivia. Revista Boliviana de Física 14, 42–49.
- APHA (American Public Health Association) 1971. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 13th edition, American Public Health Association, 1015 Fifteenth Street N.W., Washington, D.C. 20005.
- Argollo J. & Mourguiart P. 2000. Late Quaternary climate history of the Bolivian Altiplano. Quaternary International, 72, 37-51.
- Baker P.A., Seltzer G.O., Fritz S.C., Dunbar R.B., Grove M.J., Tapia P.M., Cross S.L., Rowe H.D. & Broda J.P. 2001. The history of South American tropical precipitation for the past 25,000 years. Science, 291, 640-643.
- Banco Mundial, 2007. Vías para alcanzar el desarrollo sostenible del Lago Titicaca. Departamento de Desarrollo Sostenible del Banco Mundial, Unidad de Gerencia de País para Bolivia, Ecuador, Perú y Venezuela. Región de Latinoamérica y del Caribe.
- Beauchamp P. De, 1939. Rotifers and Turbellaries. En: Report Nº5 of the Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca, Gilson H. (Ed.). Trans Linn. Soc., London, Ser. 3, 51-79.
- Binford M.W., Kolata A.L., Brenner M., Janusek J.W., Seddon M.T., Abbott M. & Curtis J.H. 1997. Climate Variation and the Rise and Fall of an Andean Civilization. Quaternary Research 47, 235-248.
- Boulangé B. & Aquize E. 1981. Morphologie, hydrographie et climatologie du Lac Titicaca et de son bassin versant. Rev. Hydrobiol. Trop., 14(4), 269-287.
- Bracchini L., Cózar A., Dattilo A.M., Picchi M.P., Arena C., Mazzuoli S. & Loiséle S.A. 2005. Modelling the components of the vertical attenuation of ultraviolet radiation in a wetland lake ecosystem. Ecological Modelling, 186, 43–54.
- Brylinsky M. & Mann K.H. 1973. Analysis of factors governing productivity in lakes and reservoirs. Limnol. & Oceanogr., 18(1), 1-14.
- Bush M.B., Hanselman J.A. & Gosling W.D. Nonlinear climate change and Andean feedbacks: an imminent turning point? Global Change Biology 16, 3223–3232, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02203.x
- 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.
- Carney H.J. 1985. Productivity, population growth, and physiological responses to nutrient enrichments by phytoplankton of Lake Titicaca, Peru-Bolivia, Ver. int. Ver. Limnol., 22, 1253-1257.
- Chiqui F.R.F. 2001. Evaluación del río Pallina, en relación a su calidad de aguas en la zona urbana de Viacha. Tesis de Postgrado, UMSA-IE, 109 p.

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

- Contreras D.A. 2010. Landscape and Environment: Insights from the Prehispanic Central Andes. *J. Archaeol. Res.*, 18, 241–288.
- Dejoux C. & Iltis A. 1992. *Lake Titicaca – A Synthesis of Limnological Knowledge*. Kluwer Academic Publishers, 573 p.
- D'orbigny, A. 1837. *Voyages dans l'Amerique Méridionale en 1824-1833*. Pitois-Levrault et Cie., Paris, France. *Partie du Lac Titicaca et du Grand Plateau des Andes (Bolivie et Pérou)*. Publié dans *Royal Geogr. Soc.*, London, 1837.
- 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.
- Gilson H.C. 1939. Description of the expedition. Report N° 1. The Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937, *Trans. Linn. Soc. London, Ser. 3, 1 (1)*, 1-20.
- Gilson H.C. 1939-1940-1955. The Percy Sladen Expedition to Lake Titicaca, *Trans. Linn. Soc. London, 1*, 357 p.
- Haney J.F. & Trout M.A. 1985. Size selective grazing by zooplankton in Lake Titicaca. *Arch. Hydrobiol. Beith.*, 21, 147-160.
- Harding J.P. 1955a. Crustacea: Copepoda. Report N°15 of the Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937. *Trans. Linn. Soc. London, Ser. 3, 1(3)*, 219-247.
- Harding J.P. 1955b. Crustacea: Cladocera. Report N°19 of the Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937. *Trans. Linn. Soc. London, Ser. 3, 1(3)*, 329-354.
- 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.
- Helbling E.W., Villafañe V.E. & Barbieri E. 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.E., Buma, A.G.J., Andrade & M., Zaratti, F. 2001b. DNA damage and photosynthetic inhibition induced by solar ultraviolet radiation in tropical phytoplankton (Lake Titicaca, Bolivia), *Eur. J. Phycol.*, 36, 157-166.
- Helbling E.W., Zaratti F., Sala L.O., Palenque E.R., Menchi C.F. & Villafañe V.E. 2002. Mycosporine-like amino acids protect the copepod *Boeckella titicacae* (Harding) against high levels of solar UVR, *Journal of Plankton Research*, 24, 225-234.
- Herzog S.K., Martínez R., Jørgensen P.M. & Tiessen H. (eds.) 2011. *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 348 pp., ISBN: 978-85-99875-05-6
- Hutchinson G.E. & Löffler H. 1956. The thermal stratification of lakes. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 42, 84-86.
- Hylander S. & Hansson L.-A. 2010. Vertical migration mitigates UV effect on zooplankton community composition. *Journal of Plankton Research*, 32, 971-980.
- Iltis A. 1984. Algues du lac Titicaca et des lacs de la vallée d'Hichu Kkota (Bolivie). *Cryptogamie, Algologie*, 5 (2-3), 85-108.
- IMARPE-FONCHIP 2008. *Prospección exploratoria de zonas litorales del Lago Titicaca para estimación de su potencial de producción por cultivo truchicola - Diciembre 2008*, 30 p.
- Kittel T. & Richerson P.J. 1978. The heat budget of a large tropical lake, Lake Titicaca (Peru-

- Bolivia), Verh. internat. Verein. Limnol., 20, 1203-1209.
- 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.
- Laurion I., Lami A. & Sommaruga R. 2002. Distribution of mycosporine-like amino acids and photoprotective carotenoids among freshwater phytoplankton assemblages. *Aquat. Microb. Ecol.*, 26, 283–294.
- Lazzaro X. 1980. Etude du phytoplancton de la station de Chua (Lago Pequeño): physicochimie, production primaire, peuplements, ORSTOM, 50 p.
- Lazzaro X. 1981. Biomasses, peuplements phytoplanctoniques et production primaire du Lac Titicaca, *Revue d'Hydrobiologie tropicale*, 14, 349-380.
- Lazzaro X. 1985. Poblaciones, biomasa y producciones fitoplanctónicas del Lago Titicaca, *Ecología en Bolivia NP 7*, octubre 1985, 23-63.
- Lazzaro X. & Point D. 2011. Evolución del estado limnológico del Lago Titicaca comparando variables claves del Lago Menor en 1979 y 2011. En I<sup>o</sup> Simposio Internacional del Lago Titicaca: Desafíos para una gestión basada en el ecosistema, Organizado y auspiciado por el Ministerio de la Producción de Perú (PRODUCE) y la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), 19-21 de octubre 2011, Puno, Perú.
- Leblond R. 1982. Quelques aspects de l'alimentation et de la sélection des proles chez *Orestias ispi* Lauzanne (Pisces, Cyprinodontidae) du Lac Titicaca. ORSTOM, La Paz, 29 p. Mulitgr.
- Lewis W.M.J. 1978. Analysis of succession in a tropical phytoplankton community and a new measure of succession rate, *Am. Nat.*, 112, 401-414.
- Lieberman M. & Miranda C. 1986. Variación estacional del fitoplancton en el Lago Titicaca. En: Descripción del Lago Titicaca y su cuenca, 2<sup>a</sup> Publicación del Proyecto "Evaluación de los Recursos Pesqueros del Lago Titicaca", Convenio de Asistencia Técnica CAF/IMARPE/UMSA, OLDEPESCA, Lima, Perú.
- Lieberman M. & Miranda C. 1987. Contribución al conocimiento del fitoplancton del Lago Titicaca. En: Proyecto "Evaluación de los Recursos Pesqueros del Lago Titicaca", Convenio de Asistencia Técnica CAF/IMARPE/UMSA, OLDEPESCA, Lima, Perú, 82 p.
- Loubens G. 1989. Observations sur les poissons de la partie bolivienne du Lac Titicaca. 3. *Basilichthys bonariensis* (Valencienne, 1835) (Pisces, Atherinidae). *Rev. Hydrobiol. Trop.* 21(2), 153-177.
- MacFadyen E.J., Williamson C.E., Grad G., Lowery M., Jeffrey W.H. & Mitchel D.L. 2004. Molecular response to climate change: temperature dependence of UV-induced DNA damage and repair in the freshwater crustacean *Daphnia pulex*. *Global Change Biology*, 10, 408–416.
- Marinone Ma. C., Menu Marque S., Añón Suárez D., Diéguez Ma. C., Pérez P., De Los Ríos P., Soto D. & Zagarese H.E. 2006. UV Radiation as a Potential Driving Force for Zooplankton Community Structure in Patagonian Lakes. *Photochem. Photobiol.*, 82(4), 962-971.
- Melack J.M. 1979. Temporal variability of phytoplankton in tropical lakes. *Oecologia (Berl.)*, 44, 1-7.
- Mendoza M.C. 2004. Migración vertical de cladóceros (*Daphnia pulex*, *Ceriodaphnia* sp., *Bosmina huaronensis* y *Simocephalus vetulus*) en relación a factores físico-químicos en el Lago Menor, Lago Titicaca (Bolivia), p 81 p.
- Miller M.J., Capriles J.M. & Hastorf C.A. 2010. The fish of Lake Titicaca: implications for archaeology and changing ecology through stable isotope analysis. *Journal of Archaeological Science*, 37, 317–327.

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

- Moreno E.G. 1983. Estudio cuantitativo del zooplancton de la zona pelágica del Lago Titicaca (Lago Grande). Tesis de Grado, Univ. Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú, 87 p.
- Neveu-Lemaire M. 1903. Le Titicaca et le Poopó. Contribution à une étude des hauts boliviens, La Géographie, IX, 49.
- Neveu-Lemaire M. 1906. Les lacs des hauts plateaux de l'Amérique du Sud. Mission scientifique G. De Gréqui Monfort et E. Sénéchal de la Grange. Paris, Imprimerie Nationale. Librairie H. Le Soudier, 194 p.
- Northcote T.G. 1979. Investigation and recommendations on the hydrobiological resources of the Lake Titicaca system, Peru. Report to the Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO/PER/76/022, 156 p.
- Northcote T.G. 1981. Parte 2. Métodos y recomendaciones para el muestreo de peces y de datos limnológicos en la zona litoral del Lago Titicaca. PNUD/FAO/-PER/76/022, Informe Inst. Mar Perú No. 83, 30 p.
- Northcote T.G., Morales, P., Levy, D.A. & Greaven, M.S. 1991. Contaminación en el Lago Titicaca, Peru: Capacitación, investigación y manejo, Westwater Research Centre, University of British Columbia, Vancouver, Canada & Instituto de Aguas Alto Andinas, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, ISBN: 0-929146-38-4, 278 p.
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) 1982. Eutrophication of Waters, Monitoring, Assessment and Control. Final Report. OECD Cooperative Programme on Monitoring of Inland waters (Eutrophic Control). Environment Directorate, OECD, Paris, 154 p.
- Pacoricona F.V., Kistriz R.U. & Berolatti R. 1981. Capítulo 17 – Manejo de las aguas residuales en Puno: Problemas y soluciones alternativas. En: Northcote T.G. *et al.* 1991. Contaminación en el Lago Titicaca, Peru: Capacitación, investigación y manejo, University of British Columbia, Vancouver & Universidad Nacional del Altiplano, 278 p.
- Pawley A. 1982. Ecología del zooplancton en la Bahía de Puno Exterior, Univ. California Davis, UNTA/UBC/CIDA, Puno.
- Pawley A. & Richerson P.J. 1992. Variación temporal y espacial del zooplancton en el Lago Mayor. En: Dejoux C. & Iltis A. (eds.) 1992. Lake Titicaca – A Synthesis of Limnological Knowledge. Kluwer Academic Publishers, 285-292.
- PELT 2007. Monitoreo hidroquímico del Lago Titicaca (2003-2007), Instituto Nacional de Desarrollo - INADE, Ministerio de Agricultura, República de Perú, 329 p.
- Pinto J. 1992. Distribución del zooplancton en la parte boliviana del Lago. En: Dejoux C. & Iltis A. (eds.) 1992. Lake Titicaca – A Synthesis of Limnological Knowledge. Kluwer Academic Publishers, 277-283.
- Pinto J. 1993. Estudio cuantitativo de los copepodos en el Lago Titicaca (Lago Pequeño) en relación a su biología y ecología con especial atención en *Metacyclops leptopus* Kiefer, In Carrera de Biología, Facultad de Ciencias Puras y Naturales, UMSA, La Paz, 116 p.
- Point D., Lazzaro X. & Groleau A. 2013. Titicaca Sensors: A joint IRD-IPGP research initiative - *In situ* biogeochemical and ecological sensing of Lake Titicaca, IRD GET-BOREA, IPGP, February 2013, 17 p.
- PROINTEC/TYPSA 2004. Diagnóstico del nivel de contaminación de los recursos hídricos del Lago Titicaca, Bolivia, República de Bolivia, Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación, Vice-Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Clasificación de Tierras y Cuencas, 281 p.
- PROLAGO 2012. Diagnóstico de la contaminación ambiental industrial en la ciudad de El Alto y Estrategia para mejorar la calidad ambiental de la cuenca El Alto Bahía de Cohana,

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

- PROLAGO, USAID, CPT, 84 p.
- PSID s.r.l. (2004) Estudio ambiental de contaminación Bahía Cohana, Lago Titicaca. Primer informe. Prefectural del Departamento de La Paz, Dirección de Recursos Naturales y Medio Ambiente, PDLP/DRNMA/UL-E-070/03, versión actualizada al 1 de noviembre de 2004, 139 p.
- Quintanilla J., Calliconde M. & Crespo P. 1987. La química del Lago Titicaca y su relación con el plancton, OLDEPESCA, Documento de Pesca nº 004; proyecto "Evaluación de los Recursos Pesqueros del Lago Titicaca", ejecutado por el IMARPE y la UMSA, con el apoyo financiero de la Corporación Andina de Fomento (CAF), y los auspicios del Comité de Acción de Productos del Mar y de Agua del SELA y de la organización Latinoamericana de Desarrollo Pesquero (OLDEPESCA). Edición coordinada por la Dirección Ejecutiva de OLDEPESCA, con la colaboración del Dr. Christian Berger C., 321 pp.
- Quiroz C.A.P. 1992. El Lago Titicaca. Análisis Peruano-Boliviano de las relaciones entre el ambiente y el desarrollo social. SECAB. Conv. Andrés Bello-FKA, 206 p.
- Rautio M. & Korhola A. 2002. UV-Induced Pigmentation in Subarctic Daphnia. *Limnol. Oceanogr.*, 47(1), 295-299.
- Repelín R., Vargas M.L. & Pinto J. 1987. Distribución geográfica y estacional de la abundancia del zooplancton en el Lago Grande del Lago Titicaca y su cuenca. Parte II, OLDEPESCA, Documento de Pesca 005, Lima, Perú, 293-325.
- Repelín R., Pinto J. & Vargas M.L. 1988. Distribución y migraciones nictemerales del zooplancton en el sector boliviano del Lago Titicaca (Lago Pequeño). UMSA-ORSTOM, La Paz, Informe 11, 31 p. Multigr.
- Reynolds C.S. 1980. Phytoplankton assemblages and their periodicity in stratifying lake systems. - *Holarct. Ecol.*, 3, 141-159.
- Ribera A.M.O. 2005. Plan Estratégico de Conservación de la Biodiversidad del Sistema Hídrico Lago Titicaca-Río Desaguadero-Lago Poopó. Salar de Coipasa (TDPS). ALT/PNUD. La Paz, Bolivia. 98 p.
- Ribera A.M.O. 2008. La hiper-contaminación de la Bahía de Cohana. Observatorio ambiental de LIDEMA, 93 p.
- Richerson P.J., Widmer C. & Kittel T. 1977. The limnology of Lake Titicaca (Peru-Bolivia), a large, high altitude tropical lake, University of California, Institute of Ecology, Davis, USA, 43 p.
- Richerson P.J., Neale P.J., Wurtsbaugh W., Alfaro T.R. & Vincent W. 1986. Patterns of temporal variation in Lake Titicaca. A high altitude tropical lake. I. Background, physical and chemical processes, and primary production, *Hydrobiologia*, 138, 205-220
- Richter P., Helbling W., Streb C. & Häder D.-P. 2007. PAR and UV effects on vertical migration and photosynthesis in *Euglena gracilis*. *Photochemistry and Photobiology*, 83, 818-823.
- Ryding S.-O. & Rast W. 1989. The control of eutrophication of lakes and reservoirs. Vol. 1. Man and the biosphere series. UNESCO, Paris and Parthenon Publishing, Park Ridge, N.J., 314 p.
- Seltzer G.O., Rodbell D.T., Baker P.A., Fritz S.C., Tapia P.M., Rowe H.D. & Dunbar R.B. 2002. Early Warming of tropical South America at the last glacial-interglacial transition. *Science*, 296, 1685-1686.
- I Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS. 2011. "El Estado del Lago Titicaca: Desafíos para una Gestión basada en el Ecosistema". Auspiciado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo, Ministerio de la Producción de Perú, 19 al 21 de octubre del 2011, Puno, Perú: <http://simposiotiticaca.org/Memorias-del-I-Simposio-Internacional-del-Lago-Titicaca.pdf>
- II Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS. 2013. "... una responsabilidad compartida".

### B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

- Comité Editorial: Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT), Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), IMARPE. Escuela de Post-Grado, Universidad Nacional del Altiplano, 7-9 de marzo de 2013, Puno, Perú: [www.simposiotiticaca.org](http://www.simposiotiticaca.org)
- Sinha R.P. & Häder D-P. 2002. UV-induced DNA damage and repair: a review. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 1, 225–236.
- Sommaruga R. 2001. The role of solar UV radiation in the ecology of alpine lakes. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 62, 35–42.
- Sommaruga R. 2010. Preferential accumulation of carotenoids rather than of mycosporine-like amino acids in copepods from high altitude Himalayan lakes. *Hydrobiologia*, 648, 143–156.
- Talling J.F. 1966. Photosynthetic behaviour in stratified and unstratified lake populations of a planktonic diatom. *Journal of Ecology* 54(1): 99-&, DOI: 10.2307/2257661
- Tartarotti B., Baffico G., Temporetti P. & Zagarese H.E. 2004. Mycosporine-like amino acids in planktonic organisms living under different UV exposure conditions in Patagonian lakes. *Journal of Plankton Research*, 26 (7), 753-762.
- Tartarotti B. & Sommaruga R. 2006. Seasonal and ontogenetic changes of mycosporine-like amino acids in planktonic organisms from an alpine lake. *Limnol. Oceanogr.*, 51(3), 1530–1541.
- Tutin T. 1940. The Algae. Report Nº11 of the Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937. *Trans. Linn.Soc., London, Ser. 3, 1(2)*, 191-202.
- Uéno M. 1967. Zooplankton of Lake Titicaca on the Bolivian side, *Hydrobiologia*, 291, 547-568.
- Urrutia R.B. 2008. Assessment of the 21st Century change projections in tropical South America and the tropical Andes. Master Thesis University of Massachusetts Amherst, Graduate Program in Geography Climate Change, 158 p.
- Urrutia R.B. & Vuille M. 2009. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st Century. *Journal of Geophysical Research*, 114, D02108, doi:10.1029/2008JD011021
- Villafañe V.E., 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, 215-224.
- 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, 1260–1270.
- Villafañe V.E. & Helbling E. W. 2003. Radiación ultravioleta en el Lago Titicaca, Bolivia: efectos y adaptación de los organismos planctónicos. En: Zaratti, F., Forno, R. (eds.) 2003a. La Radiación Ultravioleta en Bolivia. Organización panamericana de la salud (OPS/OMS) Laboratorio de Física de la Atmósfera (IIF - UMSA), 37–54.
- Villafañe V.E., Helbling E.W. & Lazzaro X. 2013. Efectos de la radiación ultravioleta en el plancton del Lago Titicaca: Una base de datos necesaria para inferir el impacto del cambio global en lagos de altura, En II Simposio Internacional del Lago Titicaca - TDPS ... una responsabilidad compartida, Escuela de Post Grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Vincent W., Wurtsbaugh W., Vincent C.L. & Richerson P.J. 1984. Seasonal dynamics of nutrient limitation in a tropical high-altitude lake (Lake Titicaca, Peru-Bolivia): application of physiological bioassays, *Limnol. Oceanogr.*, 29, 540-552.
- Vincent W.F., Vincent C.L., Downes M.T. & Richerson P.J. 1985. Nitrate cycling in Lake Titicaca (Peru-Bolivia): the effects of high altitude and tropicality, *Freshwat. Biol.*, 15, 31-42.

- Wurtsbaugh W.A., Vincent W.F., Alfaro C.R., Vincent C.L. & Richerson P.J. 1985. Nutrient limitation of algal growth and nitrogen fixation in a tropical alpine lake, Lake Titicaca (Peru-Bolivia), *Freshwat. Biol.*, 15, 185-195.
- Zaratti F. 2003. La radiación ultravioleta solar. En: Zaratti F. & Forno R. (eds.): *La Radiación Ultravioleta en Bolivia*. Organización panamericana de la salud (OPS/OMS) Laboratorio de Física de la Atmósfera (IIF - UMSA), 37–54.
- Zengling M.A., L.I. Wei L.I. & Kunshan G.A.O. 2010. Horizontal migration of *Acartia pacifica* Steuer (copepoda) in response to UV-radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 101, 233–237.
- Zengling M.A., Wei L., Angly S. & Kunshan G. 2013. Behavioral responses of zooplankton to solar radiation changes: in situ evidence. *Hydrobiologia*, 711, 155–163.

## **Agradecimientos**

Agradecemos a Carmen Mendoza (IHH/UMSA) por la digitalización de las posiciones geográficas de las estaciones de muestreo en Google Earth©, a Stefany Rocha Lupa (LCA/UMSA) por la digitalización de los datos en las Tablas, y a Carlos Molina (UL/UMSA) por la realización en R de los gráficos de la Figura B3-8. Asimismo, estamos agradecidos con Stefany Rocha, Carlos Molina y Darío Achá por sus valiosas sugerencias en el manuscrito.

M. Pouilly, X. Lazzaro,  
D. Point & M. Aguirre

Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos e hidrobiológicos  
en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca

# Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos e hidrobiológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca

*Convenio UICN-IRD N°303117/00*

Coordinación  
Marc **POUILLY**  
Xavier **LAZZARO**  
David **POINT**  
Mario **AGUIRRE**





**Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos  
e hidrobiológicos en el sistema TDPS  
con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca**

La designación de entidades geográficas y la presentación del material en esta publicación no implican la expresión de ninguna opinión por parte de la UICN respecto a la condición jurídica de ningún país, territorio o área, o de sus autoridades, o referente a la delimitación de sus fronteras y límites.

Los puntos de vista que se expresan en esta publicación no reflejan necesariamente los de la UICN.

Publicado por: UICN, Quito, Ecuador e IRD Institut de Recherche pour le Développement.



Con el auspicio de:



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Agencia Suiza para el Desarrollo  
y la Cooperación COSUDE

Con la colaboración de:



UMSA – Universidad  
Mayor de San Andrés,  
La Paz, Bolivia



UMSS – Universidad  
Mayor de San Simón,  
Cochabamba, Bolivia

Derechos reservados: © 2014 Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales.

Se autoriza la reproducción de esta publicación con fines educativos y otros fines no comerciales sin permiso escrito previo de parte de quien detenta los derechos de autor con tal de que se mencione la fuente.

Se prohíbe reproducir esta publicación para venderla o para otros fines comerciales sin permiso escrito previo de quien detenta los derechos de autor.

Cita de obra completa: M. Pouilly; X. Lazzaro; D. Point; M. Aguirre (2014). Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca. IRD - UICN, Quito, Ecuador. 320 pp.

Revisión: Philippe Vauchel<sup>1</sup>, Bernard Francou<sup>1</sup>, Jorge Molina<sup>2</sup>, François Marie Gibon<sup>1</sup>; <sup>1</sup> IRD, <sup>2</sup> UMSA

Disponible en: <http://www.uicn.org/sur>

---

**EDITORES:** UICN – Mario Aguirre ; IRD – Marc Pouilly, Xavier Lazzaro & David Point

**IMPRESIÓN:** Talleres Gráficos PÉREZ Tel. +(591-2) 225 5911 [graficaleoperez@gmail.com](mailto:graficaleoperez@gmail.com)

**DEPÓSITO LEGAL** nº 4-1-196-14PO, La Paz, Bolivia

**ISBN nº 978-99974-41-84-3**

**IMPRESO EN BOLIVIA**