

INFORME DE PRÁCTICA

MISIÓN JÓVENES EXPERTOS - MJ'ECKO - 2018



Estudio pluridisciplinario del lago Titicaca (Bolivia – Perú):
Impactos de los cambios globales sobre la calidad del agua y las actividades productivas.
Situación actual, escenarios y modos de recuperación sustentable de las zonas más vulnerables.

Supervisor de práctica: Dr. Xavier LAZZARO, IRD/BOREA, 61 rue Buffon, 75231 Paris cedex 5, Francia / IRD, La Paz, Bolivia

Organismo anfitrión: Instituto de Investigación para el Desarrollo – Representación IRD en Bolivia
Avenida Hernando Siles n° 5290 esq. Calle 7, Obrajes, La Paz, Bolivia

Misión Jóvenes Expertos, representada por: Alice BOUHASSOUN, Elise CHAPTAL, Jacques FEVRIER, Roman FRANCOIS, Pauline HESLING, Claire MENAGE, Lucille PICARD, Marine PLESSIS, Romain POIRIER, David ZIPPER.

Tutor de práctica: Dr. Smail SLIMANI, ISTOM, 4 Rue Joseph Lakanal, 49000 Angers, Francia

Sumario

Resumen	8
Agradecimientos	12
Índice	13
Introducción	14
I- Grandes principios del funcionamiento ecológico de un lago, y particularmente del Titicaca.....	17
<i>A- Características físicas, químicas y biológicas lacustres</i>	<i>17</i>
1) Características físicas lacustres.....	17
a) Características físicas de un lago genérico	17
b) Características físicas del lago Titicaca.....	18
2) Características fisicoquímicas lacustres.....	21
a) Características fisicoquímicas de un lago	21
b) Características fisicoquímicas del lago Titicaca.....	23
3) Características biológicas lacustres.....	24
a) Características biológicas de un lago genérico	24
b) Relación de clorofila-fósforo total y nutrientes en un lago genérico.....	25
c) Relación clorofila-fósforo total y nutrientes en el lago Menor y la bahía de Puno.....	29
<i>B- Funcionamiento general de una red trófica</i>	<i>35</i>
1) Estructuras de las cascadas tróficas lacustres	35
a) Cascadas tróficas de un lago	35
b) Cascada trófica del lago Titicaca	37
2) Eutrofización.....	39
a) Las macrófitas	40
b) Técnicas de biorremediación lacustre	43
b.1- La fitorremediación.....	43
b.2- Biomanipulación.....	46
c) Causas naturales y antrópicas de la eutrofización	46
c.1- Causas naturales.....	46
c.2- El cambio climático y la eutrofización	48
c.3- Causas antrópicas aplicadas al lago Titicaca.....	50
II-Escenarios futuros	53
<i>A- Introducción</i>	<i>53</i>
<i>B- Nivel del agua.....</i>	<i>58</i>
<i>C- Eutrofización y calidad de agua.....</i>	<i>62</i>
1) La concentración en clorofila- <i>a</i> , estimada por la sonda FluoroProbe BBE.....	62
a) El Lago Menor.....	63
b) Bahía interior de Puno (BIP).....	63
2) Emisiones de nitrógeno y fósforo de origen animal y humano, según la evolución de la demografía de las ciudades de El Alto y Puno	64
a) Cantidades de nitrógeno y fósforo emitidas por las poblaciones de El Alto y de Puno.....	64
b) Cantidad de nitrógeno emitido por la ganadería de los municipios de El Alto y Puno.....	66
3) Crecimiento poblacional, expansión urbana y residuos sólidos.....	69
a) El Alto	69
b) Puno	72
c) La región peruano-boliviana del lago Titicaca.....	73
4) Saneamiento y tratamiento de aguas.....	74
a) El Alto	74
b) Puno	74
c) La región peruano-boliviana del lago Titicaca.....	75
5) La evolución del sector piscícola	79
6) La gestión de la agricultura.....	91

7) La cría, el sobrepastoreo y la destrucción de los bofedales y totorales.....	92
8) La aplicación y evolución o no de leyes y regulaciones sobre el medio ambiente, actividades humanas y planes de urbanización	115
a) Políticas ambientales.....	115
b) Ley de Medio Ambiente y Gestión de Recursos	115
c) Ley de actividades piscícolas.....	116
d) Proyecto Nacional para la Innovación de la Pesca y la Acuicultura (PNIPA).....	117
e) Ley de actividades mineras.....	117
f) Plan de Gestión Ambiental Integral de Residuos Sólidos (PIGAR)	117
9) Turismo	118
10) Actividades mineras.....	120
<i>D- Conservación de la biodiversidad y biorremediación</i>	<i>122</i>
1) Impactos en la biodiversidad y consecuencias.....	122
a) Intensificación del cambio climático y actividades humanas	122
b) La deforestación	122
c) La quema de totoras.....	122
d) Retroalimentación dentro de un sistema ecológico.....	123
2) Los metales pesados.....	124
3) Los contaminantes emergentes.....	124
a) Origen de los disruptores endocrinos como los medicamentos	125
b) Ejemplo de residuos encontrados en aguas residuales en los Estados Unidos.....	125
c) Ejemplo de residuos encontrados aguas residuales en Europa.....	126
d) Caso del lago Léman (o de Ginebra).....	127
4) Indicadores de captura de carbono en macrófitas (charas, totoras) y fitoplancton	127
a) El fitoplancton	127
b) Las macrófitas.....	129
5) Conclusión	130
<i>E- Conclusión de los tres escenarios y recomendaciones</i>	<i>131</i>
1) Conclusión	131
2) Recomendaciones y propuestas generales.....	133
III- Gestión binacional actual del Lago Titicaca	134
<i>A- Gestión del lago Titicaca.....</i>	<i>134</i>
<i>B- Ejemplo de gestión de lagos transfronterizos.....</i>	<i>136</i>
1) Gestión del lago Lemán (o de Ginebra).....	136
2) Gestión de los grandes lagos de Norte América	137
3) Gestión del lago Tchad	139
<i>C- Propuesta de gestión del Lago Titicaca</i>	<i>140</i>
Anexo 1: Enfoque de Penman (Ramiro Pillco Zolá, et al, 2018):.....	143
Anexo 2: Fotografías del material de campo	144
Bibliografía:.....	147

Como citar este informe:

Bouhassoun A., Chaptal E., Février J., François R., Hesling P., Ménage C., Picard L., Plessis M., Poirier R. & Zipper D. (2018) Estudio pluridisciplinario del lago Titicaca (Bolivia – Perú) – Impactos de los cambios globales sobre la calidad del agua y las actividades productivas – Situación actual, escenarios y modos de recuperación durable de las zonas más vulnerables. Informe de fin de Misión Jóvenes Expertos MJ'Ecko. Supervisor de práctica: Dr. Xavier Lazzaro (IRD/BOREA). Tutor de práctica: Dr. Smail Slimani (ISTOM). ISTOM, Angers & IRD, La Paz. Octubre 2018, 156 páginas.

Lista de figuras

Figura 1 : Mapa de la evolución de la superficie del agua entre el lago Tauca y el lago Titicaca (Lazzaro, 2016, modificado según Ricardo Céspedes, 2015, Museo de Historia Natural A. d'Orbigny, Cochabamba).....	14
Figura 2 : Mapa de las presiones antrópicas sobre el lago (Lazzaro X. 2018).	15
Figura 3 : Estratificación térmica de un lago en estación cálida (Anderson et al., 2007).....	17
Figura 4 : Diagrama ilustrando la respuesta de lagos poco profundos (agua clara/agua turbia) a los cambios en la concentración de nutrientes (medio oligotrófico/medio hipertónico) (E. Jeppesen, 1998).	18
Figura 5 : Batimetría del lago Titicaca con curvas isobáticas separadas por 5 m (parte superior). Bahía interior de Puno (abajo a la izquierda). Lago Menor y bahía de Cohana (abajo a la derecha). © Google Earth.	19
Figura 6 : Promedio de las precipitaciones mensuales sobre el lago Titicaca en 2015 y 2016.	20
Figura 7 : Mapa que presenta los diferentes afluentes del lago Titicaca (Mapa elaborado por MJ'Ecko, 2018).....	21
Figura 8 : Esquemática de las diferentes zonas presentes en un lago profundo, es decir, un lago cuya profundidad se extiende por debajo de la zona eufótica ($Z_{eu} = Z_{1\%}$ de la radiación sub-superficial) donde el fitoplancton realiza la fotosíntesis (Anderson et al., 2007).....	24
Figura 9 : Regresión lineal entre la concentración de clorofila-a y de fósforo total en lagos japoneses durante el verano (círculos; Sakamoto 1966) y otros lagos de América del Norte en la literatura (triángulos, Dillon & Rigler 1974). La línea de regresión es la de Sakamoto (1966). Según Dillon & Rigler (1974).	26
Figura 10 : Efecto hipotético de los piscívoros sobre la relación clorofila-TP en lagos con peces planctívoros (Drenner & Hambright, 2002).....	27
Figura 11 : Efecto teórico de los piscívoros sobre la relación de clorofila-fósforo total en los lagos (Drenner & Hambright, 2002).	27
Figura 12 : Evolución de la biomasa de peces planctófagos, de zooplancton herbívoro y de fitoplancton en función de la biomasa de piscívoros (Drenner & Hambright, 2002).	28
Figura 13 : Estructura de las cadenas tróficas en función del gradiente de nutrientes (Jeppesen et al., 2005).	28
Figura 14 : Mapa de las diferentes estaciones de muestreo de clorofila y nutrientes en el lago Menor. Expedición ECERP de agosto de 2016 (Lazzaro et al., 2017). (Mapa modificado por MJ'Ecko, 2018).....	30
Figura 15 : Mapa de las diferentes estaciones de muestreo en la bahía interna de Puno (desarrollado por la MJ'Ecko, 2018).....	31
Figura 16 : ACP entre el fitoplancton y la concentración total de clorofila, según los datos medianos del lago Menor de la expedición de agosto de 2016 (MJ'Ecko, 2018).	32
Figura 17 : ACP entre la concentración total de clorofila, conductividad, nitritos (NO_2), nitratos (NO_3), fósforo (fosfatos de PO_4), pH, turbidez y oxígeno disuelto (OD), a partir de datos de la mediana del lago Menor durante la expedición de agosto de 2016) (MJ'Ecko, 2018).	32
Figura 18 : ACP entre la concentración total de clorofila-a, fósforo (PO_4), nitritos y nitratos, a partir de los datos medianos de la bahía interior de Puno de la expedición de julio de 2016 (MJ'Ecko, 2018).....	33
Figura 19 : Evolución de la clorofila-a total entre 2014 y 2018 en la estación E2 de la bahía interior de Puno, a tres niveles de profundidad (superficie, intermedio y fondo) (MJ'Ecko, 2018).	33
Figura 20 : ACP de nitritos, nitratos, fósforo, pH, conductividad y oxígeno disuelto sobre datos de 2008 hasta 2015 a una profundidad de 20% en la estación a 50 m de la planta de tratamiento de aguas residuales de Espinar (según datos de ANA) (MJ'Ecko, 2018).	34
Figura 21 : Esquema teórico de una cascada trófica pelágica en presencia de piscívoros (Drenner & Hambright, 2002).....	35
Figura 22 : Diagrama que ilustra dos tipos de cascadas tróficas pelágicas (Drenner & Hambright, 2002).	36
Figura 23 : Diagrama que muestra los diferentes hábitats del lago y las especies de peces asociadas (Lauzanne, sd).	37
Figura 24 : Cascada trófica del lago Titicaca (MJ'Ecko, 2018).	37
Figura 25 : Diagrama simplificado del funcionamiento de un medio oligotrófico (MJ'Ecko, 2018).	39
Figura 26 : Diagrama simplificado del funcionamiento de un medio eutrófico (MJ'Ecko, 2018).	39
Figura 27 : ilustraciones de los tres tipos de posibles respuestas de un ecosistema a una perturbación externa (Scheffer & Carpenter, 2003).	40
Figura 28 : Diagrama de las dos hipótesis previstas después de una eutrofización. (Hootsmans et al., 1991).	41

Figura 29 : Principales interacciones de retroalimentación consideradas como responsables de la existencia de estados alternativos (agua turbia versus agua clara) en los ecosistemas de lagos poco profundos (Lazzaro, 2009, modificado por Scheffer et al., 1993).....	42
Figura 30 : Mapa de distribución de totoras alrededor del lago Menor (Bolivia), a partir de imágenes Landsat8 y calibración in situ de señales espectrales de reflectancia (espectroradiómetro de 300-1.000 nm) (Duarte, 2018).	44
Figura 31 : Mapa de distribución de totoras en el lago Menor (Bolivia) según estado de desarrollo: joven o en buen estado (en rosa) versus en senescencia o estado deficiente (en verde), a partir de imágenes Landsat8 y calibración in situ de las señales espectrales de la reflectancia. Sorprendentemente, las totoras están en mejores condiciones cerca de la fuente de contaminación en la desembocadura del río Katari en la bahía de Cohana (Duarte, 2018).	44
Figura 32 : Mapa de Distribución de totoras en la bahía interior de Puno (Perú), Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP), 2018.....	45
Figura 33 : Diagrama conceptual de las interacciones entre las problemáticas planetarias (Villeneuve, 2015).....	49
Figura 34 : Escalas geográficas de la calidad del aire desde las capas bajas hasta los fenómenos planetarios (Charpina, 2016).....	49
Figura 35 : Mapa de las actividades antrópicas alrededor del lago Titicaca (fuente: GeoVisor IIGEO / UMSA, datos ALT, modificado por MJ'Ecko, 2018).	52
Figura 36 : Evolución de las temperaturas promedio del aire durante un año observado en 2000 y simulado en 2050, según un escenario pesimista (Scorest 2050) y otro optimista (Sc Best 2050) (modelado con la fórmula de Penman, ver apéndice 1) (MJ'Ecko, 2018).....	54
Figura 37 : Cambio anual de lluvia en 2000 y simulado en 2050 (modelado mediante la formula Penman, ver Anexo 1) (MJ'Ecko, 2018).....	55
Figura 38 : Evolución anual de la evaporación del lago en 2000 y simulada en 2050 (modelada con la fórmula de Penman, ver Apéndice 1) (MJ'Ecko, 2018).	55
Figura 39 : Evolución mensual del nivel del lago Titicaca entre 1914-2010 (ALT, 2016).	58
Figura 40 : Disponibilidad de agua en Bolivia, A) base: 1961 - 1990 y B) proyección del escenario A2 para el período 2071 - 2100 (BID, 2014).	59
Figura 41 : Demanda de agua en Bolivia, A) Base 2008 y B) Proyección del escenario A2 para 2100 (BID, 2014).	60
Figura 42 : Diagrama del conflicto potencial creado por la disminución del nivel del agua y el aumento de la demanda en este recurso (MJ'Ecko, 2018).	61
Figura 43 : Estación de muestreo, Fosa de Chúa, la estación más profunda del Lago Menor (MJ'Ecko, 2018).....	63
Figura 44 : Estación de muestreo en la entrada de Bahía Cohana (Lazzaro, 2018).	63
Figura 45 : Evolución de las descargas anuales de nitrógeno (en azul) y fósforo (en rojo) por las aguas residuales de El Alto en el caso de un crecimiento poblacional anual (en verde) del 2% (MJ'Ecko, 2018).	66
Figura 46 : Evolución comparativa del crecimiento anual de la población de El Alto y La Paz entre 1950 y 2002 (Demoraes, 1998).	69
Figura 47 : Evolución de la población urbana boliviana entre 1960 y 2015 (Banco Mundial, 2018).	70
Figura 48 : Evolución de la población en la ciudad de Puno desde 2000 hasta 2015 (INEI, 2015).	72
Figura 49 : Imagen satelital de la Bahía Interior de Puno (PNUMA, 2011).	75
Figura 50 : Mapa del Lago Titicaca mostrando las principales ciudades, sus densidades de población, con la presencia (en verde) y la ausencia (en rojo) de un sistema de tratamiento de agua (ALT 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo).	76
Figura 51 : Mapa del Lago Titicaca mostrando las principales ciudades, sus densidades de población y el estado operativo de las plantas de tratamiento: deficiente (círculos azules), ausente (círculos rosados), fuera de servicio (círculos verdes), funcionamiento normal (amarillo), en buen estado (púrpura) (ALT 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo Circumlacustre).	76
Figura 52 : Mapa del lago Titicaca mostrando la proporción de la población conectada a las alcantarillas: con red de saneamiento (marrón) y sin red (beige) (ALT 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el Anillo Circumlacustre del Lago Titicaca, p. 10).	77
Figura 53 : Mapa del lago mostrando la proporción de la población con acceso a agua potable: con (verde) y sin (rojo) (ALT 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el Anillo Circumlacustre del Lago Titicaca, p. 10).	77
Figura 54 : Mapa de las ciudades que generan la mayor cantidad de aguas residuales (MJ'Ecko, 2018).	78
Figura 55 : Evolución de la producción de trucha en la región de Puno y Perú (1992 - 2017) (IMARPE, Coloquio de mayo de 2018 en La Paz).	79

Figura 56 : Papel de la piscicultura en el ecosistema costero. Diagrama adaptado de Folke (1988) (Petit, 1991).	80
Figura 57 : Cambios proyectados en nitrógeno y fósforo en función de la producción de truchas en jaulas flotantes en el Departamento de Puno (MJ'Ecko, 2018).....	81
Figura 58 : Evolución del consumo de fertilizantes en Bolivia entre 2004 y 2010 (JOAPE, 2015).	91
Figura 59 : Evolución del número de turistas en Puno entre 2009 y 2017 (MJ'Ecko, 2018).	118
Figura 60 : Ciclo de interacciones entre fitoplancton (micro-algas) y macrófitas acuáticas (plantas emergentes de Totorá, Lemna flotante y Chara sumergida) que refuerza la existencia de estados alternativos (agua clara vs. agua turbia) (modificado de Scheffer et al., 1998).....	123
Figura 61 : Principales vías de contaminación del medio acuático por medicamentos de uso humano (Levi, 2006).	125
Figura 62 : Diagrama de los diversos orígenes de los antibióticos y sus residuos en el agua (Kolpin et al., 2000)..	125
Figura 63 : Mediana ($\mu\text{g/L}$) de valores de residuos de antibióticos encontrados en aguas superficiales en los Estados Unidos (Kolpin et al., 2000).	126
Figura 64 : Frecuencia de cuantificación (%) de sustancias farmacéuticas en aguas residuales sin tratar y aguas tratadas (secundarias y terciarias) (Soulier et al., 2011).	126
Figura 65 : Bomba biológica para carbono (y nitrógeno) (UVED, 2008).	128
Figura 66 : Papel del proto-zooplancton en la transferencia de carbono entre los dos primeros niveles tróficos (Quéguinier, 2013).	128
Figura 67 : Retroalimentación entre las actividades humanas y el cambio climático (MJ'Ecko, 2018).	131
Figura 68 : SWOT** de un lago transfronterizo (MJ'Ecko, 2018).	135
Figura 69 : Organismos peruanos y bolivianos actores de la gestión del Lago Titicaca (MJ'Ecko, 2018).	136
Figura 70 : Organización de la CIPEL (CIPEL, 2014).....	137
Figura 71 : CEGL Gestión de los grandes lagos norteamericanos (MJ'ecko, 2018).	138
Figura 72 : Organigrama del Consejo de la Cuenca del Tchad (Comisión de la cuenca del Lago Tchad, 2016)..	140
Figura 73 : Esquema de propuesta de gestión para el Lago Titicaca (MJ'Ecko, 2018).	141

Lista de tablas

Tabla 1 : Oxígeno disuelto, temperatura y niveles de saturación de oxígeno del lago Mayor, lago Menor y bahía de Puno en 2015 (IMARPE et al., 2015) a 3.809 msnm.....	23
Tabla 2 : Concentraciones medias de nutrientes y clorofila-a en el lago Menor (Lazzaro et al., 2017, expedición binacional ECERP de agosto de 2016) y en bahía interior de Puno (campana IRD-ISTOM-IMARPE del 6 de julio de 2018, no publicada) en comparación a los estándares de agua potable bolivianos (IBNORCA, 2010) y peruanos (Ministerio de Salud, 2011) que son muy similares.	29
Tabla 3 : Tabla de trazas de metales en plantas híper-acumuladoras (Abdelly, 2007).....	43
Tabla 4 : Tabla de la concentración de metales pesados en partes de la totora en la estación seca (Manjón, 2006).	45
Tabla 5 : Tabla de concentraciones de metales pesados en partes de la totora en estación húmeda (Manjón, 2006).	46
Tabla 6 : Tabla de diferentes cuencas y sitios mineros en el territorio del lago Titicaca (Ocola Salazar & Laqui Vilca, 2017).....	51
Tabla 7 : Presentas los efectos de los gradientes optimistas y pesimistas de las actividades humanas (MJ'Ecko, 2018).	57
Tabla 8 : Emisiones estimadas de nitrógeno y fósforo para una población de 922,000 (MJ'Ecko, 2018).....	64
Tabla 9 : Emisiones estimadas de nitrógeno y fósforo para una población de 147,397 (MJ'Ecko, 2018).....	65
Tabla 10 : Emisiones estimadas de nitrógeno y fósforo por 155 106 bovinos (MJ'Ecko, 2018).	66
Tabla 11 : Emisiones estimadas de nitrógeno y fósforo para un rebaño de ganado de 547 bovinos y 3 111 ovejas (MJ'Ecko, 2018).	67
Tabla 12 : Estimación de las emisiones de residuos sólidos para una población de 922 000, en base a una emisión diaria de 0,6 kg/persona (MJ'Ecko, 2018).	70
Tabla 13 : Estimación de las emisiones de residuos sólidos para una población de 1 169 319 y una emisión diaria de residuos sólidos: (a) reducido a la mitad: 0,3 kg/pers./día; (b) sin cambios: 0,6 kg/ pers./día; (c) duplicado: 1.2 kg/pers./día.	71
Tabla 14 : Estimación de las emisiones de residuos sólidos para una población de 1,3 millones y una emisión diaria de residuos sólidos: (a) sin cambios: 0,6 kg/persona/día; (b) duplicada: 1,2 kg/persona/día (MJ'Ecko, 2018).	71
Tabla 15 : Estimación de las emisiones de residuos sólidos para una población de 147 397 habitantes con una emisión diaria de 0,6 kg/persona (MJ'Ecko, 2018).	73
Tabla 16 : Cantidad de harina de pescado y de soya presente en la dieta de truchas según su etapa de crecimiento (Patzí Saire, 2013).	80
Tabla 17 : Cantidades de proteínas, lípidos y fósforo contenidas en la harina de pescado (IFREMER, 2008).	80

Resumen

Entre la Cordillera Oriental y Occidental, se formó una vasta meseta a una altitud promedio de 4.000 metros: el Altiplano peruano-boliviano. La acumulación de agua de lluvia en esta depresión dio lugar a la formación de un hidro-sistema de lago de altitud. Luego hubo una alternancia entre glaciaciones y largos períodos de calentamiento, lo que resultó en cambios significativos en el área y la ubicación de los medios lacustres. El cuerpo de agua del lago se redujo gradualmente con el tiempo a una sucesión de lagos, y se restringió a la parte norte del Altiplano. El lago Titicaca, como lo conocemos hoy, tiene solo 9.000 años y un área de 8.560 km².

El lago Titicaca, nuestra área de estudio, se encuentra a 3.809 metros sobre el nivel del mar, en la frontera entre Bolivia y Perú. Junto con el río Desaguadero, el lago Poopó y el Salar de Coípasa forman el sistema hídrico endorreico (comprendido entre las dos cordilleras sin salida al océano) del Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coípasa, o TDPS. Durante nuestra misión nos interesamos particularmente en las áreas poco profundas. Una en Bolivia: la bahía de Cohana, ubicada al sureste del lago Menor, llamado Lago Huiñaimarca tiene un área de unos 60 km² y una profundidad promedio inferior a 1 m. El río Katari es el principal afluente que alimenta la bahía. Aguas arriba, sus afluentes (los ríos Seco, Seque y Pallina) cruzan la ciudad de El Alto (Bolivia) y reciben, entre otros, las aguas residuales de esta ciudad y los pueblos de la cuenca Katari. La otra en Perú: la bahía de Puno, dividida en dos zonas: una bahía interior y una bahía exterior. La bahía interior de Puno (BIP) se encuentra al noroeste del lago Mayor. Representa el 0,2% del lago Titicaca, con un área de aproximadamente 17 km². Su profundidad media es de 2,4 metros y su profundidad máxima es de 5 a 6 metros. Está conectada a la bahía exterior de Puno (BEP) y al lago Mayor por un canal. La BIP recibe las aguas residuales de la ciudad de Puno. Las aguas de la Bahía de Cohana y de la bahía interior de Puno están, por lo tanto, muy contaminadas.

Hoy en día, este sistema de zonas litorales y bahías poco profundas está amenazado por la contaminación de origen antrópico (minas, agricultura, piscicultura, industrias y turismo) y por el desarrollo acelerado y anárquico de las ciudades en sus costas. La instalación y el desarrollo de la población en las ciudades precede al establecimiento de servicios adaptados al respeto de la vida humana y del medio ambiente (tratamiento del agua, evacuación de aguas residuales, tratamiento de residuos, transporte, etc.).

La biodiversidad acuática sufre de sobrepesca, el uso antrópico de ciertas plantas (totoras) o zonas vegetales (bofedales) esenciales para el desarrollo de la fauna y la calidad del agua del lago contaminada en gran medida por las descargas de aguas residuales urbanas. Cuando los aportes de nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) son demasiado importantes, se habla del fenómeno de eutrofización. Los nutrientes conducen a la proliferación de micro-algas del fitoplancton (particularmente algas verdes en el lago Titicaca), que tendrá las siguientes consecuencias: disminución de la profundidad de la zona fótica (presencia suficiente de luz para efectuar la fotosíntesis), disminución de la cantidad de oxígeno en la columna de agua, aumento de las partículas sólidas suspendidas en el agua, aumento de la materia orgánica descomponible (fitoplancton muerto) y reducción de las bacterias del sulfato, entre otras. La fauna y la flora sufren de frente todas las consecuencias de esta desastrosa contaminación.

También los hombres, aunque responsables, sufren de los olores nauseabundos que emanan de ciertos lugares donde el agua se renueva poco. La salud pública está en peligro porque el agua está contaminada con metales pesados provenientes de minas abandonadas, cuya contaminación ha persistido durante décadas. Los peces, cada vez más raros, también están contaminados.

Los problemas de contaminación y eutrofización, junto con el aumento de la población, la expansión urbana y el cambio climático, hacen que el manejo binacional del lago Titicaca sea muy complejo y extremadamente preocupante.

El lago Titicaca es un sistema hídrico compartido entre las fronteras de Perú y Bolivia. Aunque la comunicación entre ambos países y el intercambio de datos científicos no siempre se realizan correctamente, los dos países saben que su lago y las poblaciones humanas, animales y vegetales que viven y disfrutan de este entorno están en peligro. Las causas y consecuencias de las contaminaciones, la extinción de especies y la proliferación de algas se han identificado en muchos informes anteriores al nuestro. La población que vive en las costas del lago (en Bolivia o Perú) y practica actividades socioeconómicas como la pesca o la piscicultura, informa a ambos gobiernos que el estado del lago es deplorable, que los desechos se acumulan, que abundan las algas, que los olores se vuelven molestos para la actividad turística y que los peces se vuelven cada vez más raros. Pero la tarea es difícil y los poderes políticos, desafortunadamente, no hacen del lago Titicaca una prioridad.

Diversos actores académicos que forman parte de organismos científicos (bolivianos, peruanos e internacionales), actores políticos y de la sociedad civil trabajan en temas y problemáticas relacionados con el lago Titicaca.

Entre 1955 y 1957 se celebró el primer acuerdo entre ambos países para estudiar las características hidrológicas del lago Titicaca. En 1992, los dos países crearon la ALT: Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico del lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó, y Salar de Coípasa (sistema TDPS).

El IRD, Instituto de Investigación para el Desarrollo, organización anfitriona de nuestra misión, es un instituto francés, actor del desarrollo internacional, cuyo modelo es la asociación científica con los países en desarrollo, principalmente los de las regiones intertropicales. El objetivo del IRD es realizar investigación científica y desarrollar capacitación académica con los socios locales para generar conocimiento sobre los socio-ecosistemas y diseñar soluciones adaptadas a los desafíos que enfrentan los seres humanos y el planeta. En Bolivia, el socio principal de IRD es la UMSA, Universidad Mayor de San Andrés, principal universidad pública del país. En Perú trabajamos con la UNAP, Universidad Nacional del Altiplano, la universidad de la ciudad de Puno. El instituto de investigación promovió la creación del OBLT (Observatorio Binacional del Lago Titicaca) en 2015. Esta entidad reúne la colaboración de instituciones científicas y técnicas bolivianas y peruanas con la cooperación francesa (Representación del IRD en Bolivia). El objetivo del OBLT es comprender los mecanismos de eutrofización, monitorear la calidad del agua, detectar el deterioro del lago mediante el uso de imágenes satelitales, realizar campañas binacionales de medidas *in situ*. El IRD es por lo tanto parte de una dinámica social y científica binacional, y su presencia, durante 50 años, en la región del lago Titicaca ha sido un éxito. Nuestro supervisor de práctica, el Dr. Xavier Lazzaro, investigador de hidrobiología del IRD, está integrado en los proyectos de la universidad y trabaja en colaboración con otros investigadores de la UMSA en Bolivia, del IMARPE (Instituto del Mar del Perú) en Perú y del ALT como socios principales.

El lago Titicaca moviliza a muchos actores, entre científicos, políticos y miembros de la sociedad civil. Hemos intentado comprender este sistema, tratando de aportar nuestros conocimientos y habilidades, y recibiendo al mismo tiempo un cálido apoyo de todas estas entidades. Durante nuestra misión pudimos conocer a varios de estos actores. Cada entidad (asociaciones, pescadores, investigadores y estudiantes) es consciente de los problemas sociales, económicos y medioambientales que afectan el futuro del lago Titicaca, de la región del Altiplano y de una gran cantidad de habitantes. Esta multitud de actores hace que la gestión y la comprensión del lago sean algo complejo, por lo que el intercambio de información y de conocimiento debe ser la clave para que todo funcione. Bolivia y Perú son interdependientes respecto a los recursos del lago Titicaca. Desafortunadamente, existe un desequilibrio en los objetivos del lago y el presupuesto asignado al Titicaca entre estos dos países. Su gestión es por lo tanto muy compleja y sensible. De hecho, Perú tiene más medios económicos y aguas más profundas, por lo que tiende a desarrollar piscicultura en jaulas flotantes de manera intensiva, mientras que Bolivia tiene pocas piscifactorías, pero sufre más de la contaminación. En efecto, sus aguas son menos profundas y, por lo tanto, se renuevan menos y poseen un stock de nutrientes para el fitoplancton con mayor acceso a la luz y al oxígeno. Sin embargo, ambos países tienen zonas de contaminación críticas (bahía de Cohana en Bolivia y bahía de Puno en Perú) provocadas a menudo por las mismas causas (desarrollo urbano

excesivo, actividades mineras, industrias contaminantes, falta de servicios públicos: tratamiento de aguas, recolección de residuos).

Nuestra Misión Jóvenes Expertos tenía la intención, inicialmente, de estudiar los 5 temas siguientes:

- 1: El conocimiento actual y el estado de la técnica.
- 2: Fitorremediación, capacidades de las plantas y especialmente de totoras para acumular contaminantes.
- 3: Mapeo del lago y de las actividades socioeconómicas existentes.
- 4: El manejo del lago entre las diferentes organizaciones, basado en el ejemplo del lago de Ginebra.
- 5: Escenarios futuros de evolución del sistema hídrico.

Una vez allí, como la tarea era densa, tomamos la decisión de reducir nuestra misión y, principalmente, mantener el tema 5 sobre los escenarios, siendo esta una de las principales preocupaciones y un tema aún poco discutido por la comunidad científica Perú-boliviana. Antes de ir a Bolivia, cubrimos el tema 1, de forma no exhaustiva. En nuestro informe para el IRD, incluimos información e investigaciones relacionadas con la fitorremediación (tema 2), los mapas (tema 3) y las recomendaciones de manejo (tema 4) manteniendo los escenarios y las predicciones del estado futuro del lago como elemento conductor de nuestra misión. El objetivo final de este estudio es desarrollar escenarios y pronósticos futuros mediante el estudio de los impactos de las actividades humanas y el calentamiento global, y luego proponer recomendaciones y formas de mejorar la gestión binacional. Este trabajo se centra en las áreas poco profundas (≤ 5 m) del lago, que reflejan la salud del lago, "cuando las aguas profundas estén en las mismas condiciones que las áreas poco profundas, será demasiado tarde para salvar el lago Titicaca "(X. Lazzaro).

Al llegar a Bolivia, pudimos comprender el alcance del trabajo y del área de estudio. Estos dos aspectos aceleraron nuestra decisión de simplificar nuestra misión y cambiar la metodología. Además, el contexto binacional del área de estudio no facilita los estudios científicos. El acceso a los datos no siempre es fácil. Las opiniones sobre la gestión del lago y la responsabilidad de ambos países por el destino del lago difieren. La organización de los organismos políticos y científicos es correcta, sin embargo, se ha podido observar una falta de coordinación entre todos los actores. ¿Se toma realmente en cuenta la opinión de los científicos? ¿La señal de alarma de algunos científicos y de la sociedad civil se escucha y considera en las decisiones políticas?

Pudimos trabajar durante 5 semanas en La Paz, durante las cuales pasamos tres días en el lago Titicaca. Estos días fueron primordiales para nosotros ya que nos permitieron tener más consciencia de lo que se estaba estudiando en las instalaciones de la universidad en La Paz, capital administrativa de Bolivia. Realizamos muestreos con nuestro tutor, el Dr. Xavier Lazzaro, así como observaciones visuales que correlacionamos con los datos de las muestras y luego propusimos conclusiones y recomendaciones. Después de estas primeras cinco semanas, viajamos al otro lado del lago, en Perú, a la ciudad de Puno, a orillas del lago Mayor. Efectuamos una salida para recolectar muestras e informar sobre el desastre que una ciudad (incluso promedio) en el lago, y luego otra salida con la plataforma Qotatiti al borde norte de la bahía de Puno para comprender mejor los diferentes problemas producidos en esta parte del lago.

Nuestra metodología y organización se basaron en los análisis de muestreo, análisis visuales y recursos bibliográficos que teníamos a disposición, así como los datos que nos fueron transmitidos por las diferentes instituciones. Usando estas herramientas, creamos los escenarios, los mapas que sirvieron como "imágenes" para los escenarios y luego hicimos recomendaciones sobre las actividades socioeconómicas, la preservación del medio ambiente y la calidad y gestión del agua del lago Titicaca.

Tuvimos la oportunidad de participar en varios eventos (simposios, conferencias, manifestaciones) que reflejaron el deseo compartido de preservar esta joya única y su biodiversidad, de implementar servicios públicos efectivos en Perú y Bolivia y de devolver la transparencia y la pureza a las aguas de la cuna de las civilizaciones precolombinas.

Nuestro trabajo presenta en primer lugar los principios fundamentales de operación de los lagos y del lago Titicaca. La revisión de estos conocimientos es esencial antes de comenzar a imaginar escenarios. Luego desarrollamos pronósticos de evolución sobre los temas de nivel de agua, eutrofización y biodiversidad, teniendo en cuenta para estos aspectos la evolución del clima y de las actividades socioeconómicas. El pronóstico de la eutrofización toma en cuenta diversos temas (clorofila, descarga de nitrógeno y fósforo, turismo, minería, agricultura, piscicultura, ganadería, gestión de residuos y aguas residuales, demografía, expansión de ciudades y legislación). Propuestas y recomendaciones acompañan estos pronósticos. Finalmente, proponemos una gestión inspirada en el lago de Ginebra, administrada por la CIPEL, Comisión Internacional para la Protección del lago de Ginebra.

Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Xavier Lazzaro (IRD / BOREA) por su apoyo, sus consejos, su dedicación, su sabiduría, su paciencia, y todo el conocimiento que nos comunicó a lo largo de este estudio.

También agradecemos a todos los profesionales con los que colaboramos para hacer nuestro informe:

MSc. Javier Nuñez Villalba (IIGEO/UMSA) y estudiantes
Dr. Darío Achá & Dr. Luis Pacheco (IE/UMSA) y estudiantes
Dr. Gonzalo Lora (GIRH PNUD/GEF)
Dr. Ramiro Pillco & Dr. Jorge Molina (IHH/UMSA)
Dr. Álvaro Garitano-Zavala (IE/UMSA)
Dra. Patricia Urquieta (CIDES/UMSA)
Dr. Vladimir Orzag (Agronomía UMSA)
Dr. Javier Claros (BioCultura)
MSc. Eric Loayza Torrico (IE/UMSA)
Lic. Carlos Ruiz Vásquez (UNAP)
Com. Mónica Medina (RTP)
Plataforma asociativa Qutamama de Bolivia
Plataforma asociativa Qotatiti de Perú
Dr. Smaïl Slimani (ISTOM)

Estamos agradecidos con MSc. Javier Núñez Villalba, Director del Instituto de Investigación en Geografía de la Universidad Mayor de San Andrés (IIGEO / UMSA) por habernos acogido y ofrecido una sala de estudios durante toda nuestra estadía en La Paz (Bolivia), y con Ing. Carlos Ruiz Vásquez, profesor-investigador del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional del Altiplano (VRI/UNAP) por habernos ofrecido las mismas condiciones en Puno (Perú).

También nos gustaría agradecer a todos nuestros donantes, sin los cuales nuestra misión no podría haberse llevado a cabo:

Sociedad AIFEC ; Patrick Poirier, Sociedad Actu-Environnement ; David Ascher, Super U Beaucozé ; Jean-Jacques y Christophe Blond, Alcaldía de Mesnil Amelot, Irene Aguiló, Françoise Plessis, Benjamin y Marie Plessis, Nicolas Perin, Léa Thibault, Baptiste Laurent, Patrick Nicoleau, Chloé Salen, Thierry Million, Angelo Deliessche, Sébastien Loulie-Touquet, Célia Legrand, Nicole y Jean-Louis Carsin, Sr. y Sra. Doussain ; el Instituto de Ecología y el Instituto de Geografía de la UMSA, el Hotel La Paz, el Hostal Ecuador, la Red Nacional RTP (Sistema de Comunicación Popular) en La Paz ; la UNAP, el programa de gestión integrada de los recursos hídricos GIRH PNUD/GEF, el Ministerio del Medio Ambiente MINAM, la Autoridad Administrativa del Agua del Titicaca – Autoridad Nacional del Agua AAA/ANA, el Instituto del Mar del Perú IMARPE, el programa especial del Lago Titicaca PELT, la Autoridad Binacional del Lago Titicaca ALT, y el Hostal Internacional en Puno.

Índice

ACP: Análisis de Componentes Principales.

AFD: Agencia Francesa para el Desarrollo.

ALT: Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca.

BID: Banco Internacional de Desarrollo.

CBLT: Comisión del Lago Chad.

CEGL: Comité Exclusivo de los Grandes Lagos.

CIPEL: Comisión Internacional para la Protección de las Aguas del Lago de Ginebra.

DICAPI: Dirección General de Capitanías y Guardacostas.

ECERP: Programa de Expedición Científica de Evaluación de los Recursos Pesqueros, de la ALT

EMALT: Empresa Municipal de Aseo El Alto.

IBCE: Instituto Belga de Cambio por Emergencia.

IMARPE: Instituto del Mar del Perú.

INE: Instituto Nacional Electoral.

IRD: Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo.

MS: Materia Seca.

MO: Materia Orgánica.

OBLT: Observatorio Binacional del Lago Titicaca.

OBT: Organización de Cuencas Transfronterizas.

PELT: Programa Especial del Lago Titicaca.

PNDA: Plan Nacional de Desarrollo Acuícola.

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

SIGAR: Sistema Integral de Gestión de Aguas Residuales.

SWOT: Strengths Weaknesses Opportunities Threats.

TDPS: Sistema Hídrico Titicaca - Desaguadero - Poopó - Salar de Coipasa.

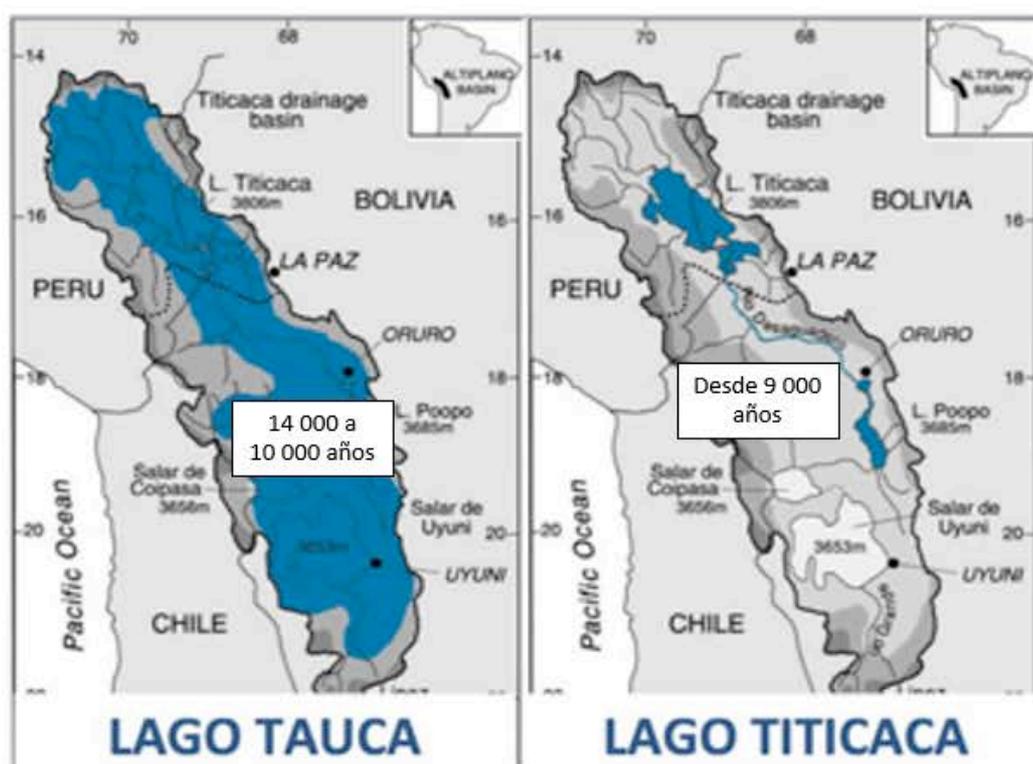
UMSA: Universidad Mayor de San Andrés.

UNAP: Universidad Nacional del Altiplano, Puno.

UOB: Unidad Operativa de Bolivia (equivalente del PELT en Perú).

Introducción

Entre las cordilleras oriental y occidental se formó una vasta meseta a una altitud promedio de 4.000 metros: el altiplano peruano-boliviano. La acumulación de agua de lluvia en esta región ha dado lugar a la formación de un sistema hídrico de lago de altitud, endorreico, es decir, sin comunicación con el océano. Esto fue seguido por glaciaciones y largos períodos de calentamiento que se alternaban, lo que resultó en cambios significativos en el área y la ubicación de los sistemas lacustres (Dejoux, 1994). El lago Titicaca resulta de una reducción gradual de los cuerpos de agua a través de una sucesión de lagos durante los tiempos geológicos, pasando por el lago Mataro (55.000 años AC), Cabana (50.000 años AC), lago Ballivian (40.000 años AC), lago Michin (30.000-20.000 años AC) y lago Tauca (14.000-10.000 años AC). Por lo tanto, en la actualidad solo existe el lago Titicaca en el norte (formado hace 9.000 años), con un área de 8.560 km², el lago Poopó en el centro y los salares en el sur (Figura 1) (Dejoux *et al.*, 1992). El lago Titicaca está dividido en dos cuencas: el lago Mayor, profundo, al norte (profundidad promedio 107 m, máximo de 285 m), y el lago Menor (lago Huiñaimarca), poco profundo, al sur (profundidad promedio 9 m, máximo 40 m; teniendo la mayor parte de las aguas bolivianas una profundidad inferior a 5m). Las dos cuencas están conectadas por el estrecho de Tiquina (40 m de profundidad).



2

Observatorio Binacional del Lago Titicaca

Figura 1 : Mapa de la evolución de la superficie del agua entre el lago Tauca y el lago Titicaca (Lazzaro, 2016, modificado según Ricardo Céspedes, 2015, Museo de Historia Natural A. d'Orbigny, Cochabamba).

El lago Titicaca se encuentra a 3.809 metros sobre el nivel del mar, en la frontera entre Bolivia y Perú. Su superficie es de 8.562 km² y forma con el río Desaguadero, el lago Poopó y el Salar de Coipasa, un sistema endorreico (TDPS). Debido a sus características bioclimáticas y al aislamiento de su cuenca (endorreica), el lago Titicaca es un “Hotspot” de biodiversidad y endemismo. Sin embargo, este ecosistema está hoy sujeto a muchas perturbaciones ecológicas y es víctima de las actividades humanas que lo rodean.

La eutrofización, de origen natural o antropogénica, ocurre cuando un medio se vuelve demasiado rico en nutrientes (fósforo, nitrógeno), lo que resulta en la proliferación significativa de fitoplancton. Es un estado ecológico observado en las zonas costeras y en las bahías del lago Titicaca. Puede llevar a un crecimiento excesivo, rápido y descontrolado de micro-algas, lo que se conoce como floración de fitoplancton o “Bloom”. En general, solo una o pocas especies dominan. Este evento extremo grave está hasta ahora muy mal documentado. Después de la temporada de lluvias intensa y prolongada en abril-mayo de 2015, la primera floración reportada ocurrió en el área norte y central del lago Menor (lado boliviano) causando una mortandad masiva de peces, ranas y aves acuáticas.

Esta eutrofización antropogénica está causada por el intenso crecimiento de la población alrededor del lago (descargas domésticas) y las actividades humanas (residuos de la agricultura, ganadería, industrias), y en particular por la ineficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales (colapso o ausencia) en las áreas que rodean el lago. La descarga de aguas residuales en el lago es la causa principal de la eutrofización (Lazzaro, 2016) (CNRS, sd). De hecho, la población humana total que vive alrededor del lago es de casi 3 millones de habitantes entre los dos países (Vargas, 2003). El Altiplano se está urbanizando muy rápidamente. En el lado boliviano, la urbanización comenzó a partir de 1952, después de la Revolución Nacional. Hoy en día, hay casi 2 millones de habitantes entre La Paz / El Alto, incluidos 1,2 millones a lo largo de un eje (~ 50 km) entre El Alto y la bahía de Cohana en el lago Menor. Del lado peruano, la urbanización particularmente desarrollada entre las ciudades de Puno y Juliaca (> 200.000 habitantes), se extiende a lo largo de las orillas de las bahías interior y exterior de Puno, en el lago Mayor.



Figura 2 : Mapa de las presiones antropogénicas sobre el lago (Lazzaro X. 2018).

El mapa de arriba muestra las presiones antropogénicas causadas por las ciudades peruanas y bolivianas, que rodean el lago. Las ciudades más importantes, como Juliaca y Puno en Perú, o El Alto en Bolivia, tienen un gran impacto en el estado ecológico del lago.

El IRD es un instituto francés de investigación en cooperación con los países del sur, cuyo modelo es la asociación científica justa con los países en desarrollo, principalmente los de las regiones intertropicales. El objetivo del IRD es realizar investigaciones científicas y desarrollar capacitación académica con socios locales para generar conocimiento sobre los socio-ecosistemas y diseñar soluciones adaptadas a los desafíos que enfrentan los seres humanos y el planeta. En Bolivia, desde hace 50 años, su principal

socio es la UMSA, universidad pública líder del país. Hoy, el IRD y sus socios bolivianos participan activamente en el estudio del lago Titicaca mediante el despliegue del OBLT (Observatorio Binacional del Lago Titicaca), basándose en la colaboración entre las instituciones científicas y técnicas de Bolivia y Perú. Este proyecto fue lanzado en 2015 por el Dr. Xavier Lazzaro, investigador en limnología del IRD, en la Unidad Mixta de Investigación BOREA (París). El IRD, a través del OBLT, tiene como objetivo comprender los mecanismos de eutrofización, el monitoreo de la calidad del agua gracias a la detección de su deterioro a través del uso de imágenes satelitales, así como campañas de medición *in situ*.

La misión propuesta por el IRD es llevar a cabo un estudio de las dos principales bahías eutróficas del lago: la bahía de Cohana (Bolivia) y la bahía de Puno (Perú). La bahía de Cohana, ubicada al sureste del lago Titicaca, en el lago Menor o Huiñaimarca, tiene un área de unos 60 km² y poca profundidad (promedio ≤ 1 m). El río Katari es el principal afluente que alimenta esta bahía. Los afluentes de este río, los ríos Seco y Seque, cruzan la ciudad de El Alto (Bolivia) y reciben sus aguas residuales. La bahía de Puno está ubicada al noroeste del lago Mayor y se divide en dos zonas: una bahía interior (BIP) y una bahía exterior (BEP). La bahía interior de Puno representa el 0,2% de la superficie del lago Titicaca, con un área de 17 km² y un volumen de aproximadamente 41 km³. Su profundidad promedio es de 2,4 metros y su profundidad máxima es de 5 a 6 metros. Está conectada por un canal a la bahía exterior de Puno que se abre en el lago Mayor. La bahía interior de Puno recibe el agua residual de la ciudad de Puno, ya que la planta de tratamiento de aguas residuales de Espinar dejó de funcionar en 2016, lo que explica la gran contaminación (ANA, 2017). Es interesante (a) estudiar estas dos bahías porque son áreas poco profundas ubicadas cerca de grandes ciudades, y (b) comparar el funcionamiento de la bahía de Cohana, invadida por macrófitas acuáticas emergentes (totora) distante de unos 30 km de la principal fuente de contaminación (El Alto), con la de la bahía interior de Puno, que no tiene cordón litoral de macrófitas acuáticas y recibe las aguas residuales de Puno directamente.

El objetivo final de este estudio es desarrollar escenarios futuros y pronósticos sobre el estado del lago mediante el estudio de los impactos de las actividades antropogénicas y el calentamiento global, y luego proponer recomendaciones y propuestas para mejorar la gestión binacional. Este trabajo se enfoca en áreas poco profundas del lago ya que son las que reflejan el estado de salud del lago, "cuando las aguas profundas se encuentran en el mismo estado que las áreas poco profundas, será demasiado tarde para salvar al lago Titicaca" (X. Lazzaro). Es esencial comprender, controlar y administrar mejor estas áreas sensibles.

I- Grandes principios del funcionamiento ecológico de un lago, y particularmente del Titicaca.

Un lago es un ecosistema complejo donde los organismos vivos interactúan entre sí y estrechamente con el entorno físico-químico que lo rodea. La dinámica de un lago se rige por muchas características físicas, químicas y biológicas.

Esta primera parte tiene por objetivo comprender el funcionamiento ecológico general de un lago. De hecho, los lagos responden a muchos principios ecológicos fundamentales, que serán explicados a continuación. El objetivo de esta parte es generalizar el funcionamiento de un ecosistema lacustre al lago Titicaca.

¿Cumple el lago Titicaca con los grandes principios ecológicos de los lagos?

A- Características físicas, químicas y biológicas lacustres

1) Características físicas lacustres

a) Características físicas de un lago genérico

En primer lugar, un lago se define por su morfometría. Luego, entran en juego otros parámetros físicos, específicos de cada lago: temperatura, luz y transparencia. Todos estos parámetros influyen y explican la dinámica de un lago.

- Morfometría

La morfometría toma en cuenta muchos parámetros, como la profundidad, el volumen de agua, el perímetro, la forma o el área de la masa de agua. Estos parámetros físicos influyen en gran medida en el funcionamiento del lago (tiempo de retención del agua, estratificación térmica). La morfometría hace posible anticipar el comportamiento de un lago con respecto a varias presiones: por ejemplo, los lagos más profundos, con un gran volumen de agua, soportan mejor la llegada de contaminantes que los lagos poco profundos (Anderson *et al.*, 2007).

- Temperatura

La estratificación térmica (formación de distintas capas de agua superpuestas debido a una diferencia de temperatura entre capas produciendo así una diferencia en la densidad del agua) ocurre solo en lagos profundos. La mezcla de agua en lagos poco profundos es mucho más importante, lo que lleva a una homogeneización de la biodisponibilidad de los nutrientes (fósforo en la zona bentónica) y oxígeno (Anderson *et al.*, 2007).



Figura 3 : Estratificación térmica de un lago en estación cálida (Anderson *et al.*, 2007).

- La luz y la transparencia

La luz (radiación solar incidente) es un factor abiótico esencial para la fotosíntesis (producción de oxígeno disuelto) por parte de los productores primarios, como las macrófitas acuáticas y el fitoplancton. La transparencia del agua es un parámetro físico clave para el desarrollo biológico acuático. La transparencia del agua disminuye al aumentar la cantidad de materia suspendida en ella (ejemplo: fitoplancton).

En un lago poco profundo la luz entra en la zona bentónica. La presencia de luz estimula la actividad y el desarrollo del fitoplancton y, por lo tanto, la producción de oxígeno en el agua (esencial para la actividad biológica). Por otro lado, la presencia importante de luz en un lago poco profundo conduce a una mayor representación de macrófitas, que también causan una producción significativa de oxígeno. Existe una competencia inter-específica entre macrófitas y fitoplancton que lleva a un equilibrio. Sin embargo, un desequilibrio del medio ambiente (por ejemplo, el suministro excesivo de nutrientes o la destrucción de las macrófitas) causará una sobreabundancia / desaparición de uno de los dos competidores.

La transparencia del agua es un parámetro muy importante a tener en cuenta en el funcionamiento del ecosistema: un medio demasiado concentrado en fitoplancton (por ejemplo, debido a una eutrofización) causará un aumento de la turbidez en el agua, provocando la muerte de diversas especies acuáticas (Jeppesen, 1998).

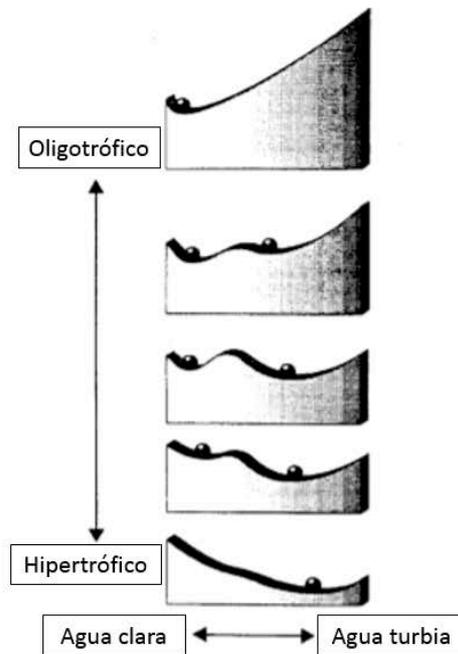


Figura 4 : Diagrama ilustrando la respuesta de lagos poco profundos (agua clara/agua turbia) a los cambios en la concentración de nutrientes (medio oligotrófico/medio hipertónico) (E. Jeppesen, 1998).

El disco Secchi es un aparato que se utiliza para medir la transparencia del agua y así determinar la profundidad de la zona fótica, donde solo llega el 1% de la radiación solar incidente en la superficie (Anderson *et al.*, 2007).

b) Características físicas del lago Titicaca

- Morfometría

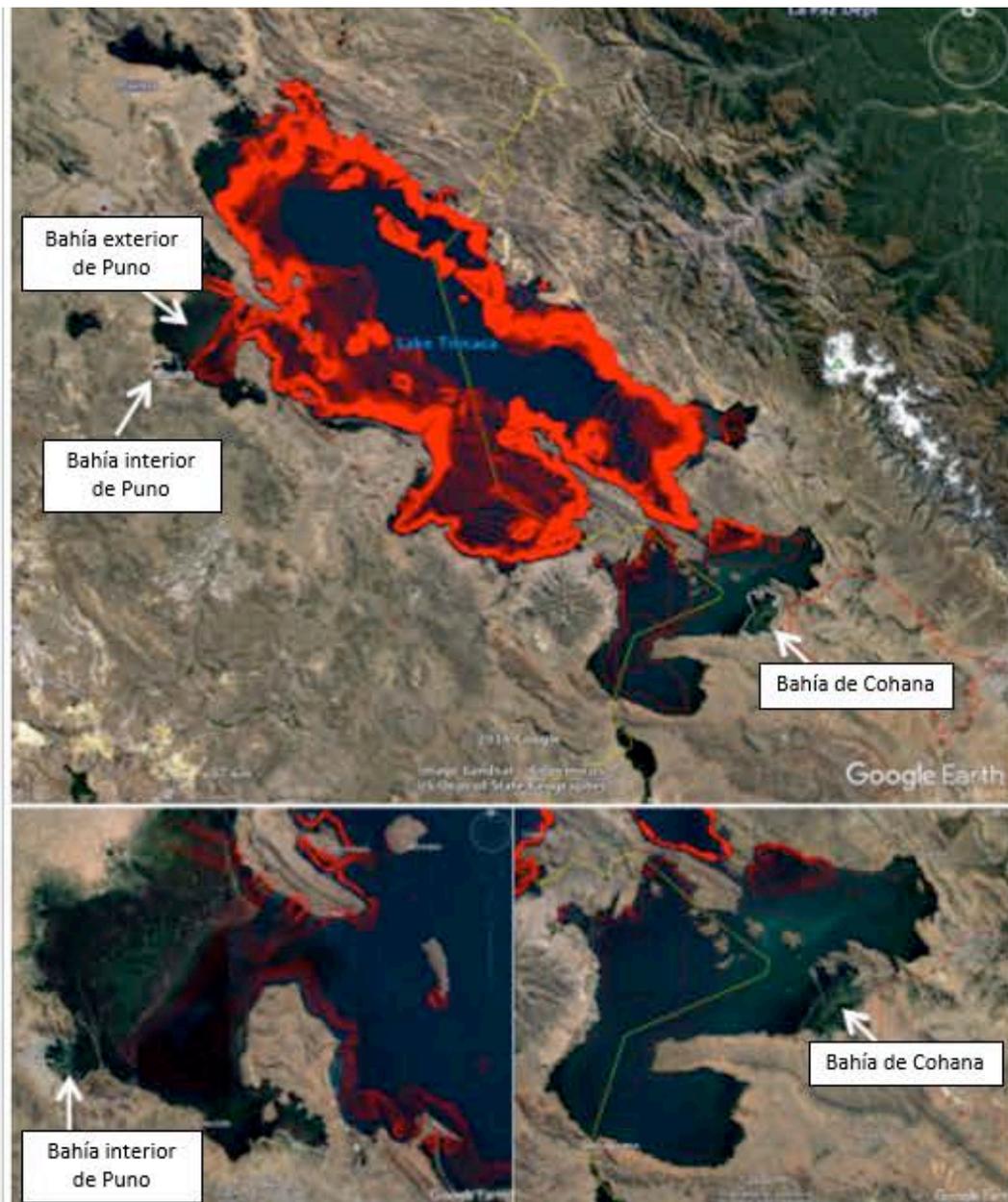


Figura 5 : Batimetría del lago Titicaca con curvas isobáticas separadas por 5 m (parte superior). Bahía interior de Puno (abajo a la izquierda). Lago Menor y bahía de Cohana (abajo a la derecha). © Google Earth.

La diferencia de batimetría entre el lago Mayor y el lago Menor es visible. La profundidad máxima del lago Mayor es de 281 metros, mientras que la del lago Menor es de 40 metros. Mucho menos profundo (promedio de 9 m debido a la existencia de la fosa de Chúa de 40 m, pero generalmente inferior a 5 m en la parte boliviana), el lago Menor es por lo tanto más sensible a las perturbaciones externas (menor resiliencia que el lago profundo), como la eutrofización.

El lago Titicaca es profundo únicamente en lago Mayor y la fosa de Chúa, sin embargo, la mayor parte del lago es poco profundo y, por lo tanto, funciona como un lago poco profundo (por ejemplo, la bahía de Puno, la bahía de Cohana).

- Temperatura

Debido a su ubicación tropical (latitud: $-15,77^\circ$ S), su altitud (3.809 m) y sus variaciones estacionales de temperatura (rango inferior a la amplitud día-noche) y lluvia, la cuenca del Titicaca corresponde a la categoría de climas de montañas tropicales semiáridas (según el método THORNWAITE). El lago tiene

características particulares, como una alta radiación solar UV (+ 30% en relación con el nivel del mar), una baja concentración de oxígeno disuelto (-30%) y una fuerte amplitud de temperatura del aire entre el día y la noche (> 20°C).

La temperatura promedio anual del aire en la cuenca, para las áreas de altitud inferior a 4.000 m, es de aproximadamente 7,9°C, variando de 6,5 °C en áreas alejadas al lago, a 9°C en las zonas más cercanas al lago (Moho). Teniendo en cuenta la altitud y la posición de la cuenca, observamos que esta temperatura promedio es relativamente alta: es el efecto termorregulador del lago.

A nivel del mar, en las latitudes entre los paralelos 15 y 17, las temperaturas se mantienen entre 20 y 25°C. Aplicando el factor de corrección permitido (-0,5°C para una elevación de 100 m), la temperatura promedio debería ser de 0°C a 3.800 m, sin embargo, es de 8,5°C en Puno (Perú) y 8°C en El Alto (Bolivia) (Boulangé *et al.*, 1981). Las temperaturas promedio del agua son 11,7°C para el lago Menor y 12,7°C para lago Mayor (IMARPE *et al.*, 2015).

- Precipitaciones

Boulangé & Aquize (1981) identificaron cuatro zonas según las precipitaciones:

- Lluvias intensas (> 800 mm): a nivel del lago (isla Soto, isla Taquile, Copacabana y en el extremo noroeste de la cuenca: col de la Raya);
- Precipitaciones moderadas entre 700 y 800 mm: situadas al noreste de la cuenca, por encima de los 4.000 m;
- Precipitaciones intermedias entre 500 y 700 mm: en el centro y sureste de la cuenca;
- Precipitaciones débiles (<500 mm): al pie de la cordillera Oriental (Escoma, El Belén).

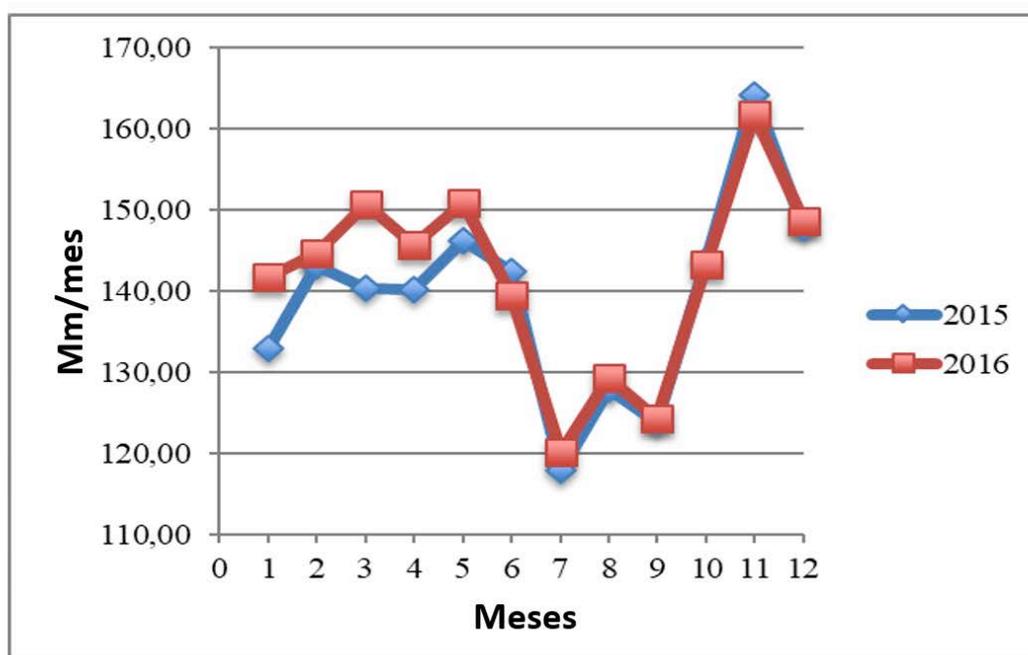


Figura 6 : Promedio de las precipitaciones mensuales sobre el lago Titicaca en 2015 y 2016.

- Balance hidrológico

➤ En entradas de agua (Gonzales *et al.*, 2007):

- Las entradas de los afluentes son de 201 m³/s.
- Las precipitaciones en el lago y otras fuentes de agua son de 270 m³/s.

➤ En pérdidas (Gonzales *et al.*, 2007):

- Hay un 92% de evaporación, que corresponde a $436 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Las salidas de agua en Desaguadero son de $35 \text{ m}^3/\text{s}$.
- El drenaje y otras pérdidas son despreciables.
- La evolución del nivel del lago se ha estudiado durante los últimos 30.000 años sobre la base de los sedimentos del lago.

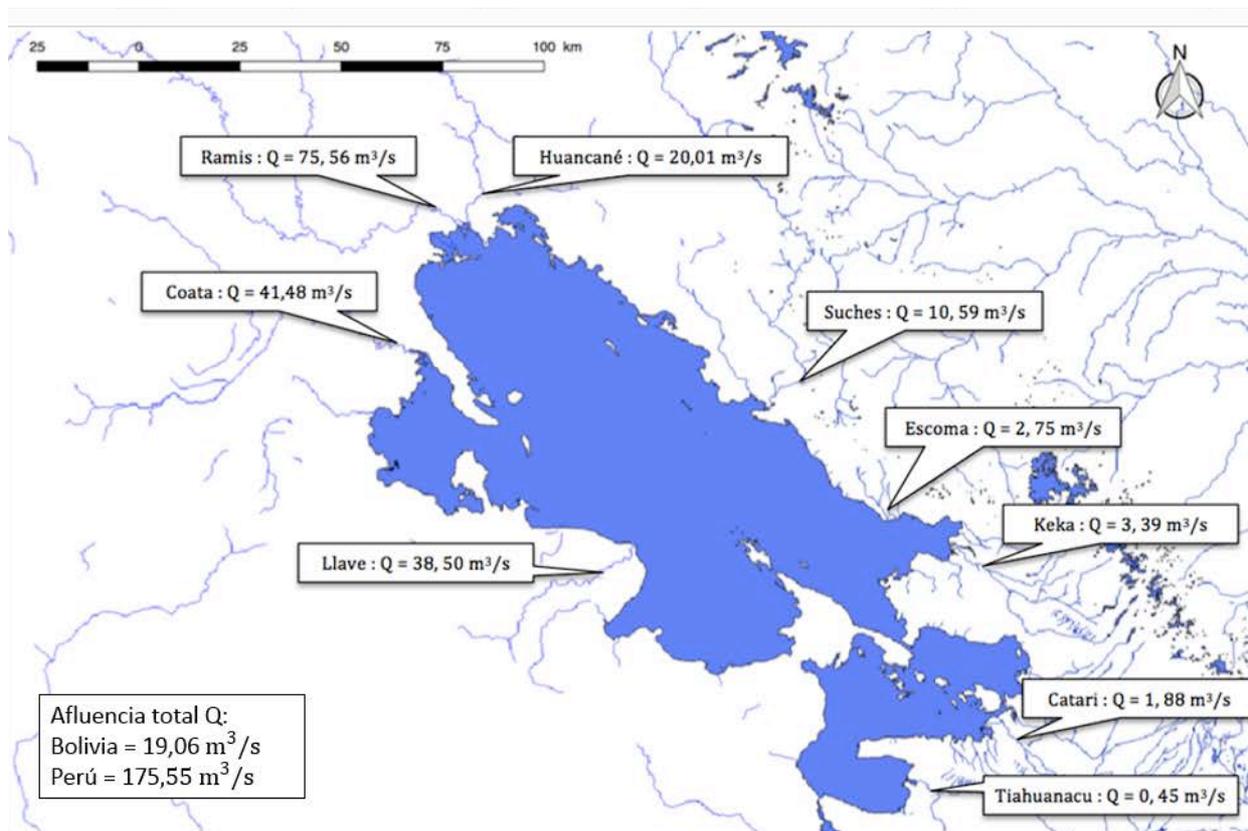


Figura 7 : Mapa que presenta los diferentes afluentes del lago Titicaca (Mapa elaborado por MJ'Ecko, 2018).

- Transparencia y luz

El lago Titicaca se describió como un lago oligotrófico (un ambiente pobre en nutrientes), lo que permite que la luz pase fácilmente (promedio entre 2.2 y 12 m). En el lago Mayor, la transparencia es superior a 20 m. En 1979 - 1980, la de la fosa de Chúa era de 22 m (Lazzaro, 1981). Tras el Bloom de 2015, las áreas poco profundas han visto aumentar la cantidad de sólidos en suspensión por la proliferación de fitoplancton (alta turbidez).

2) Características fisicoquímicas lacustres

a) Características fisicoquímicas de un lago

Es esencial conocer los parámetros fisicoquímicos de un lago para comprender su estado ecológico. Las variables fisicoquímicas esenciales incluyen nutrientes, oxígeno disuelto y pH, entre otras.

- Los nutrientes

Los nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, son sustancias químicas esenciales para el crecimiento de las plantas acuáticas y las algas (por ejemplo, el fitoplancton). Posteriormente, se explicará que las algas se encuentran en la base de la cadena alimenticia, por lo que se deduce que los nutrientes son esenciales para la vida acuática (Anderson *et al.*, 2007).

- Oxígeno disuelto

El oxígeno es necesario para la mayoría de los organismos acuáticos vivos. Su biodisponibilidad varía según la profundidad y la época del año. Como se vio anteriormente, durante los períodos de estratificación térmica (estaciones cálidas y frías), los estratos no se mezclan y la biodisponibilidad del oxígeno es heterogénea según las capas. En períodos de estratificación térmica, el epilimnio es rico en oxígeno y el hipolimnio es deficitario. Sin embargo, el déficit de oxígeno puede ser estimulado por otros factores, como la alta producción primaria (por ejemplo, durante un período de eutrofización) o por la profundidad del lago (Anderson *et al.*, 2007).

- Acidez del agua (pH)

El rango de pH requerido para mantener la vida acuática es entre 6,5 y 9. Fuera de estos umbrales, muchas funciones biológicas, como la respiración o la reproducción, se alteran (Anderson *et al.*, 2007).

b) Características fisicoquímicas del lago Titicaca

- Nutrientes

Las concentraciones de nitratos (NO₃⁻) en lago Mayor son en promedio de 0,034 mg/L y 0,015 mg/L para lago Menor. Las concentraciones de nitritos (NO₂⁻) son en promedio de 0,007 mg/L para el lago Mayor y 0,011 mg/L para el lago Menor. Las concentraciones de fosfatos (PO₄³⁻) promedian 0,061 mg/L para el lago Mayor y 0,117 mg/L para el lago Menor (IMARPE *et al.*, 2015).

- Oxígeno disuelto

Las concentraciones medias de oxígeno disuelto, las temperaturas y los niveles de saturación de tres regiones distintas del lago Titicaca se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1 : Oxígeno disuelto, temperatura y niveles de saturación de oxígeno del lago Mayor, lago Menor y bahía de Puno en 2015 (IMARPE et al., 2015) a 3.809 msnm.

Regiones del lago Titicaca	Lago Mayor	Lago Menor	Bahía de Puno
Oxígeno disuelto (mg/L)	6,93	6,02	7,29
Temperatura (°C)	11,70	12,70	12,50
Tasa de saturación	66,00% (1) 98,73 (2)	58,61% (1) 85,76 (2)	70,70% (1) 105,79 (2)

(1) respecto al nivel del mar, (2) respecto a la altitud de 3.809 m (consulte la fórmula de NCSU a continuación). Sin embargo, durante un día soleado, la tasa de saturación de oxígeno disuelto puede superar temporalmente el 100%, debido a la intensa fotosíntesis del fitoplancton.

Observaciones: El porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (% OD) en el agua disminuye a medida que aumenta la temperatura, aumenta la altitud, aumenta la conductividad y disminuye la presión atmosférica. Hay un calculador de 'DOTABLES' disponible en el sitio web de USGS (United States Geological Survey): <https://water.usgs.gov/software/DOTABLES/>

El calculador toma en cuenta la temperatura del agua (°C), la presión barométrica (mm Hg), la conductancia específica (µSi/cm) y la medición de OD (mg/L), para calcular la solubilidad del oxígeno (mg/L) y el porcentaje de saturación (%OD).

Una versión simplificada de este cálculo está disponible en el sitio web del curso ZO 419 Introduction to Limnology y ZO 519 Limnology, de North Carolina State University en los Estados Unidos: <https://projects.ncsu.edu/cals/course/zo419/oxygen.html>

El cálculo toma en cuenta únicamente una regresión polinomial en función de la temperatura (T):

$$100\% \text{ Sat. O}_2 \text{ Conc.} = 14,59 - 0,3955 T + 0,0072 T^2 - 0,0000619 T^3$$

Hay una corrección según la altitud:

<u>Altitud (m)</u>	<u>Reducción en valor</u>
0 - 600	1,3% cada 100m
600 – 1.500	1,0% cada 100m
1.500 – 3.050	0,8% cada 100m

Por lo tanto, de 0-600 m = - 7,8%; 600-1.500m = -9,0%; 1.500-3.809 m = -18,5% (considerando que la reducción es constante más allá de 3.050 m); una reducción total de 35,3% a 3.809 m en comparación con el nivel de saturación a nivel del mar.

El porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (% OD) es particularmente bajo a esta altitud. De hecho,

por debajo del 70% de saturación de oxígeno disuelto en el agua, el agua de un lago es poco adecuada para el buen desarrollo y mantenimiento de la vida acuática.

- Acidez del agua (pH)

Los valores de pH registrados en el lago Titicaca son relativamente estables. En la superficie del lago Mayor, hay una variación de pH entre 8,34 y 8,90. El pH del lago Menor varía entre 8,58 y 8,77. Sin embargo, en la bahía de Puno, el pH es ligeramente más alto (8,79 a 8,93) (IMARPE *et al.*, 2015).

3) Características biológicas lacustres

a) Características biológicas de un lago genérico

Un lago genérico es rico en biodiversidad (fauna, flora, bacterias), y esta diversidad es un indicador de la buena calidad del agua. Los organismos se distribuyen en el medio ambiente, de acuerdo a las características fisicoquímicas del entorno y también de acuerdo a sus necesidades metabólicas.

La limnología es la ciencia que estudia todos los fenómenos físicos, químicos y biológicos relacionados con los lagos. Es el equivalente de la oceanografía para los océanos. Tradicionalmente, la limnología estudiaba los lagos profundos que se estratifican térmicamente: la temperatura disminuye con la profundidad. Hoy, la limnología también estudia los lagos poco profundos, que tienen diferentes características físico-químicas y funcionamientos hidrológicos. Los lagos poco profundos no presentan estratificación térmica, hay movimientos significativos de agua que impiden la formación de estratos hídricos y promueven una homogeneidad de temperatura y nutrientes (ver arriba).



Figura 8 : Esquemática de las diferentes zonas presentes en un lago profundo, es decir, un lago cuya profundidad se extiende por debajo de la zona eufótica (Zeu = Z1% de la radiación sub-superficial) donde el fitoplancton realiza la fotosíntesis (Anderson *et al.*, 2007).

Así, esquemáticamente, en un lago profundo, se distinguen tres zonas ecológicas principales:

1. La zona litoral (donde la luz penetra hasta el fondo): las comunidades costeras están dominadas por plantas acuáticas y algas. Estos son hábitats de gran importancia para muchas especies, como peces pequeños, juveniles, insectos y zooplancton. Estas plantas, que producen oxígeno, también permiten el mantenimiento de la vida acuática.

El funcionamiento de un lago poco profundo puede compararse con el de la zona litoral de un lago profundo. La biomasa de peces es mucho mayor en un lago poco profundo que en un lago profundo. Por lo tanto, la depredación del zooplancton aumenta considerablemente, causando una intensa actividad de invertebrados en la zona bentónica. La presencia de macrófitas es más importante en la zona poco profunda que en la zona profunda (hábitat ecológico, producción de oxígeno, papel anti-erosión, etc.) (Jeppesen E, 1998).

2. La zona limnética: las comunidades limnéticas viven en aguas abiertas, en la zona fótica (presencia de luz). Están representadas por zooplancton (crustáceos pequeños), fitoplancton (algas microscópicas) y peces pelágicos.

3. La zona profunda: la luz no penetra hasta el fondo, hay un límite abstracto: el nivel de compensación de la luz. A diferencia de las dos zonas anteriores, esta zona afótica no es un lugar de producción de oxígeno, sino de uso de oxígeno y producción de dióxido de carbono (respiración). Los organismos vivos están representados principalmente por bacterias descomponedoras de materia orgánica y por organismos que no tienen un alto requerimiento de oxígeno (baja concentración de oxígeno disuelto) (Anderson *et al.*, 2007).

Para comprender el funcionamiento del lago Menor, de las bahías de Cohana y Puno y de las áreas litorales del lago Titicaca en general, es esencial referirse al funcionamiento de los lagos poco profundos que están colonizados por macrófitas acuáticas, sin estratificarse, sino por el contrario, cuya columna de agua se mezcla con frecuencia. En estos lagos poco profundos, con generalmente menos de 5 m de profundidad, la radiación solar visible (PAR 400-700 nm) penetra hasta el fondo, es decir, la profundidad de la zona eufótica (Z1%), está limitada por el fondo del lago. En muchas regiones, los lagos poco profundos son más abundantes que los profundos y concentran en sus litorales importantes metrópolis urbanas.

b) Relación de clorofila-fósforo total y nutrientes en un lago genérico

El fósforo total (TP) es una medida de todas las formas de fósforo, disuelto o particulado. El material particulado incluye plancton vivo y muerto. En los lagos, la fase disuelta incluye fósforo inorgánico y orgánico, en forma de fosfatos (PO₄), que son nutrientes. En los lagos templados del hemisferio norte, el nutriente limitante suele ser el fósforo, mientras que en los lagos tropicales es más bien el nitrógeno.

En los lagos, ahora está bien establecido que generalmente existe una relación empírica positiva entre la clorofila y el fósforo total (TP), que representa el proceso biológico fundamental de la productividad de los lagos. Esta relación significativa fue identificada por primera vez por Sakamoto (1966) en diversos lagos japoneses. El autor ha realizado una regresión entre la concentración promedio de clorofila en verano y la concentración total de fósforo durante la primavera:

$$\log_{10} [\text{Chl}] = 1,583 \log_{10} [\text{TP}] - 1,134 \quad (\text{ver figura 9})$$

En la mayoría de los lagos templados del hemisferio norte, como en los lagos de Canadá (Schindler *et al.*, 1971), el fósforo es el factor de control más importante de la eutrofización. La concentración de clorofila es un estimador muy bueno de la biomasa de fitoplancton. Así, Dillon & Rigler (1974) verificaron la generalidad de esta relación en los lagos de América del Norte y del norte de Europa. La pendiente es ligeramente más baja que la de Sakamoto, debido al método de clorofila-*a* que se utilizó, en lugar de un intermedio entre *a* y *a-b-c* utilizado por Sakamoto:

$$\log_{10} [\text{Chl } a] = 1,449 \log_{10} [\text{TP}] - 1,136$$

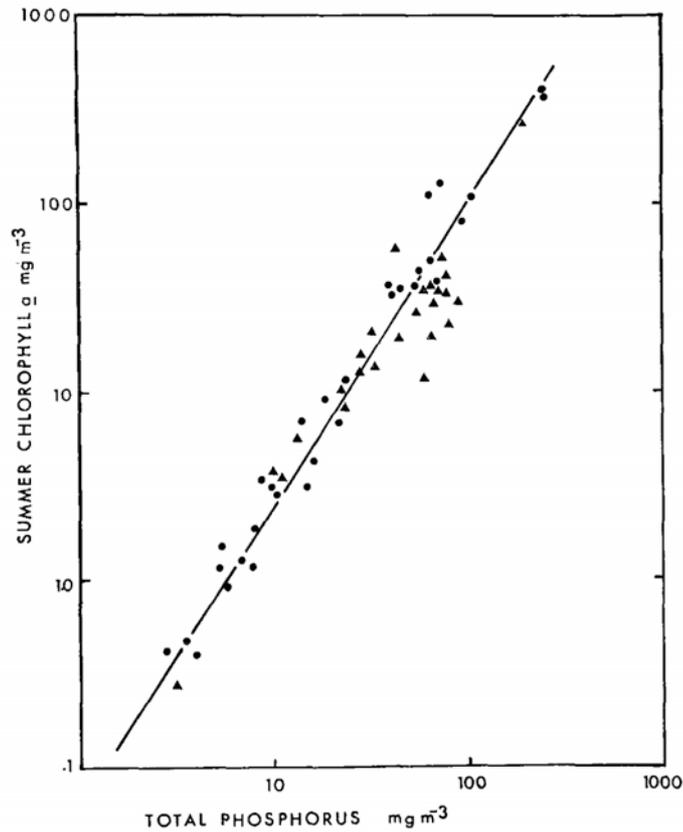


Figura 9 : Regresión lineal entre la concentración de clorofila-a y de fósforo total en lagos japoneses durante el verano (círculos; Sakamoto 1966) y otros lagos de América del Norte en la literatura (triángulos, Dillon & Rigler 1974). La línea de regresión es la de Sakamoto (1966). Según Dillon & Rigler (1974).

Los efectos de los recursos (nutrientes) y los depredadores se combinan para controlar la estructura y la biomasa de las comunidades acuáticas. Los nutrientes favorecen la biomasa de fitoplancton (a través de los efectos ascendentes de los recursos). Estos efectos se extienden hacia la parte superior de las cadenas alimenticias, hasta los peces. Al contrario, las cascadas tróficas (es decir, los efectos descendientes de la depredación de los peces hasta los productores primarios) alteran/reducen la respuesta del fitoplancton (Lazzaro, 2009).

El concepto de interacciones tróficas en cascada ahora se reconoce como un paradigma de la ecología, que los científicos utilizan como base para las estrategias de gestión de lagos. De acuerdo con el concepto de cascadas tróficas, un aumento en la biomasa de peces piscívoros provoca una disminución en la biomasa de peces planctívoros, un aumento en la biomasa de zooplancton herbívoro y, en consecuencia, una disminución en la biomasa de fitoplancton.

Por lo tanto, la hipótesis de las interacciones tróficas en cascada también predice que los lagos que contienen una biomasa significativa de piscívoros deben tener una biomasa menor de fitoplancton independientemente de la concentración de fósforo, en comparación con los lagos sin piscívoros (Drenner & Hambright, 2002).

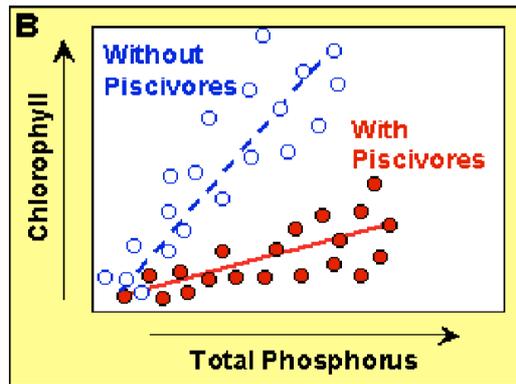


Figura 10 : Efecto hipotético de los piscívoros sobre la relación clorofila-TP en lagos con peces planctívoros (Drenner & Hambright, 2002).

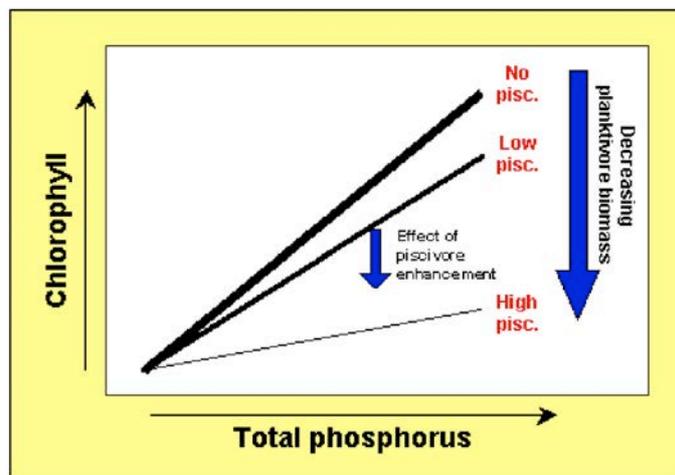


Figura 11 : Efecto teórico de los piscívoros sobre la relación de clorofila-fósforo total en los lagos (Drenner & Hambright, 2002).

La línea gruesa indica la relación predicha en lagos que contienen peces planctófagos pero no peces piscívoros, que funcionan como un sistema de tres niveles tróficos; la línea delgada indica la relación predicha en lagos con muchos peces piscívoros (sistema de 4 niveles tróficos); la línea intermedia indica la relación predicha en lagos con una baja biomasa de peces piscívoros (sistema de 3 niveles tróficos) (Drenner & Hambright, 2002).

Estos gráficos muestran que la presencia de piscívoros en la red alimenticia conduce a una reducción considerable en la concentración de clorofila por la cantidad de TP. Esta disminución se explica por las interacciones depredador-presa:

- Presencia de piscívoros: los peces piscívoros se alimentan de peces planctófagos (o planctívoros). Por lo tanto, hay una disminución en la biomasa de los planctófagos, lo que lleva a un aumento en la biomasa del zooplancton herbívoro. Como el zooplancton herbívoro se alimenta de fitoplancton, su biomasa disminuye, lo que resulta en una disminución considerable de la concentración de clorofila (figura 10).

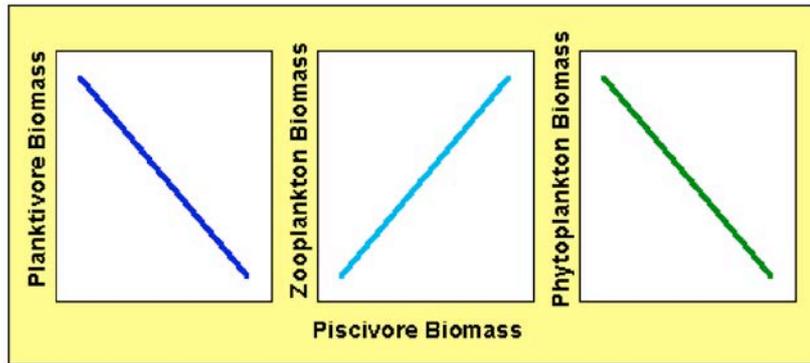


Figura 12 : Evolución de la biomasa de peces planctófagos, de zooplancton herbívoro y de fitoplancton en función de la biomasa de piscívoros (Drenner & Hambright, 2002).

- Ausencia de piscívoros: En ausencia de piscívoros, la biomasa de los peces planctívoros aumenta, lo que lleva a una disminución de la biomasa del zooplancton herbívoro. En ausencia de zooplancton que se alimente de fitoplancton, aumenta la biomasa de estos organismos fotosintéticos, así como la concentración de clorofila.

En respuesta, las interacciones entre organismos tienen un impacto en la cantidad de nutrientes (N, P) disponibles en el lago. Un cambio en la arquitectura topológica (es decir, la topología) de la cadena trófica puede producir un desequilibrio significativo en el ecosistema lacustre, alterando su resiliencia a las perturbaciones climáticas y antrópicas (Figura 11).

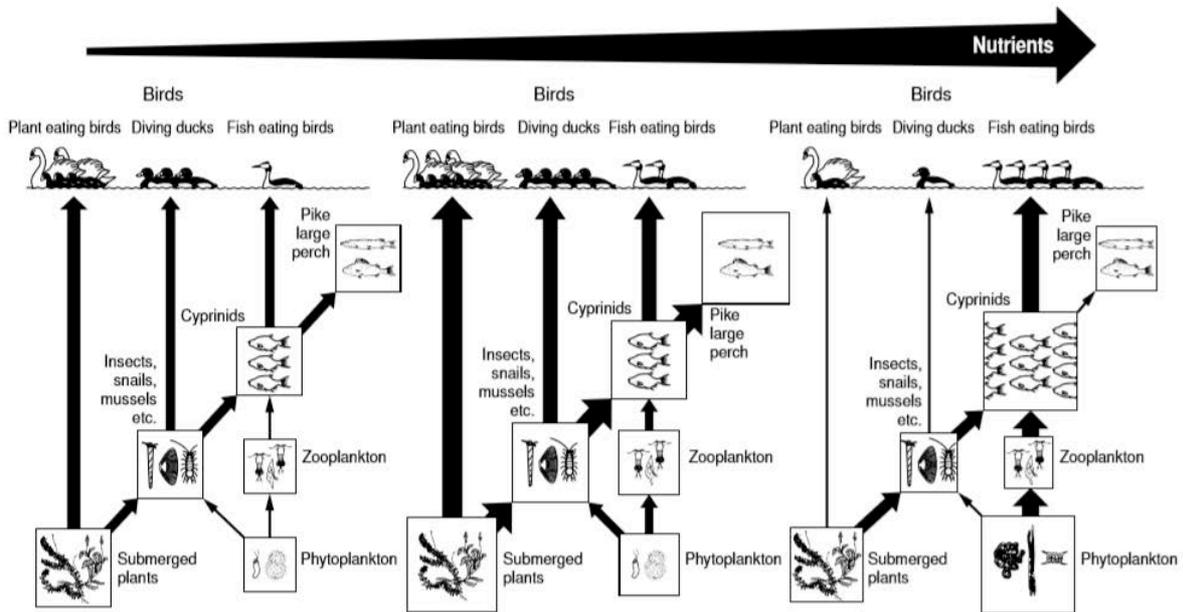


Figura 13 : Estructura de las cadenas tróficas en función del gradiente de nutrientes (Jeppesen et al., 2005).

c) Relación clorofila-fósforo total y nutrientes en el lago Menor y la bahía de Puno

En las áreas poco profundas del lago Titicaca, las concentraciones de clorofila y nutrientes varían según las condiciones climáticas, particularmente las precipitaciones y el viento, así como las contaminaciones antrópicas, que siguen siendo el elemento más influyente. En esta parte se desarrollarán las relaciones entre las concentraciones de clorofila, los nutrientes y los diferentes parámetros fisicoquímicos de las bahías de Cohana y Puno. Como algunos datos no están disponibles en la bahía de Cohana, las áreas poco profundas del lago Menor se comparan con la bahía de Puno.

La siguiente tabla relaciona las tasas de los diferentes parámetros fisicoquímicos del lago con los estándares de potabilidad en Bolivia y Perú.

Tabla 2 : Concentraciones medias de nutrientes y clorofila-a en el lago Menor (Lazzaro et al., 2017, expedición binacional ECERP de agosto de 2016) y en bahía interior de Puno (campaña IRD-ISTOM-IMARPE del 6 de julio de 2018, no publicada) en comparación a los estándares de agua potable bolivianos (IBNORCA, 2010) y peruanos (Ministerio de Salud, 2011) que son muy similares.

	Norma boliviana de potabilidad: valor máximo aceptable	Lago Menor (agosto 2016) valores medianos	Norma peruana de potabilidad: valor máximo aceptable	Bahía interior de Puno (julio 2017) valores medianos
pH	6,5 - 9	8,6	6,5 – 8,5	9,8
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$, a 25°)	1.500	1.869	1.500	1.083
Turbidez (NTU)	5	1,3	5	-
Nitritos (NO_2 , mg/L)	0,1	0,003	0,2	-
Nitratos (NO_3 , mg/L)	45,0	0,032	50,0	1,21
Fosfatos (PO_4 , mg/L)	-	0,096	-	-
Oxígeno disuelto (OD, mg/L)	-	7,3	-	12,59
Concentración total en clorofila-a ($\mu\text{g}/\text{L}$)	-	1,7	-	127,0

En condiciones normales, en el lago Menor no hay exceso de nitratos, nitritos ni fosfatos. Únicamente la conductividad es más alta que la norma boliviana, lo cual no es un problema, sólo indica un agua rica en minerales. En la bahía de Puno notamos que la concentración de fitoplancton es de 127 $\mu\text{g} / \text{L}$, por lo que está ocurriendo un fenómeno de floración. La bahía interior de Puno está por lo tanto sujeta a eutrofización. Vale la pena señalar que el pH está por encima de los estándares de potabilidad y demuestra una alcalinidad muy alta.

Para monitorear estos parámetros, se lleva a cabo un seguimiento en puntos específicos del lago, tanto en el lado boliviano como en el peruano, como se muestra en los siguientes mapas. Estas áreas de muestreo se eligen de acuerdo a características tales como profundidad, proximidad a áreas de actividad humana y/o áreas urbanizadas, contaminación del agua o biodiversidad.

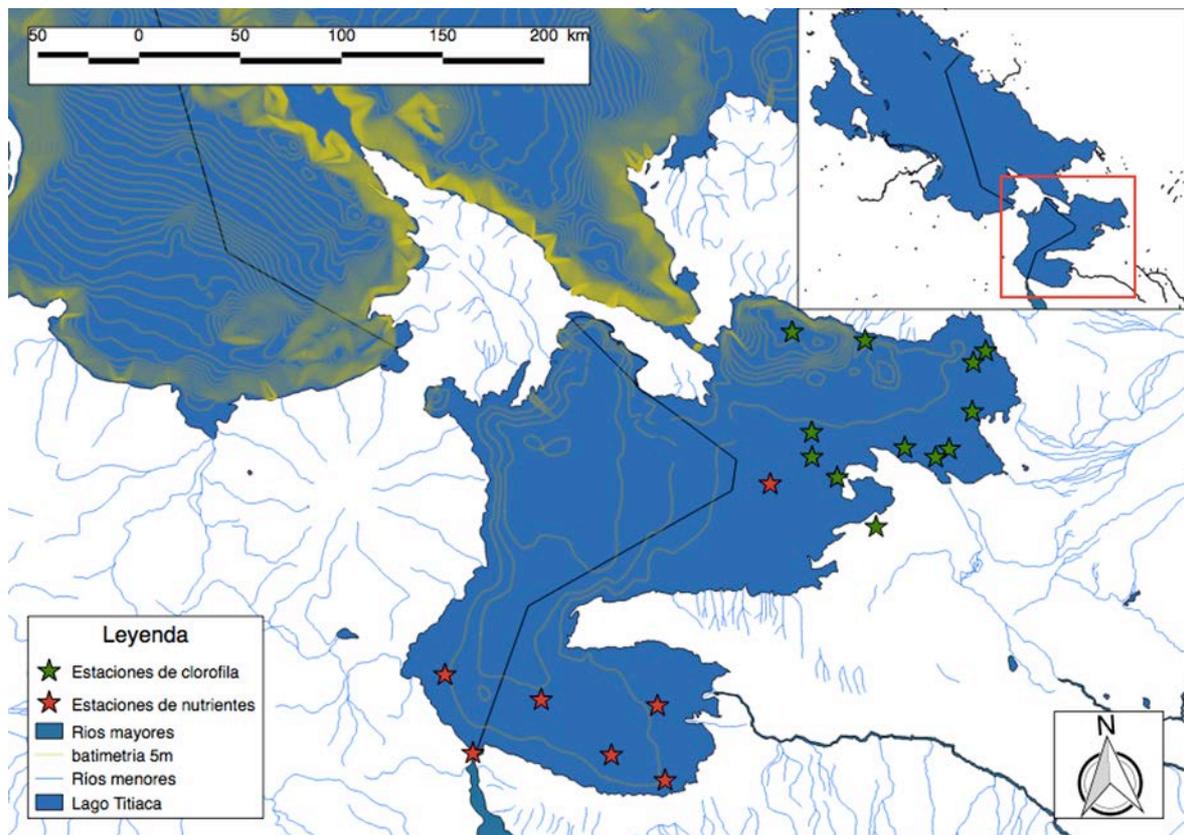


Figura 14 : Mapa de las diferentes estaciones de muestreo de clorofila y nutrientes en el lago Menor. Expedición ECERP de agosto de 2016 (Lazzaro *et al.*, 2017). (Mapa modificado por MJ'Ecko, 2018).

En el lado boliviano, la UMSA y el IRD realizan cada 16 días el monitoreo de la clorofila y ciertos parámetros fisicoquímicos (proyecto PIA-ACC “Monitoreo de los efectos del cambio climático en el lago Titicaca a partir de imágenes satelitales”; Javier Nuñez IIGEO / UMSA & Xavier Lazzaro BOREA / IRD) utilizando un espectroradiómetro de reflectancia portátil (300-1.000 nm), una sonda multiparamétrica Hydrolab y una sonda fluorimétrica BBE para mediciones de concentración de clorofila-*a* a lo largo de perfiles verticales de la columna de agua en diferentes puntos de muestreo del lago Menor (aproximadamente 5-10 estaciones por salida). Los análisis de nutrientes se realizan una vez al mes, así como una vez al año en 85 estaciones limnológicas que cubren todo el lago Menor, durante la expedición binacional de calidad del agua ECERP (Lazzaro *et al.*, 2017). La última campaña se realizó en agosto de 2016.

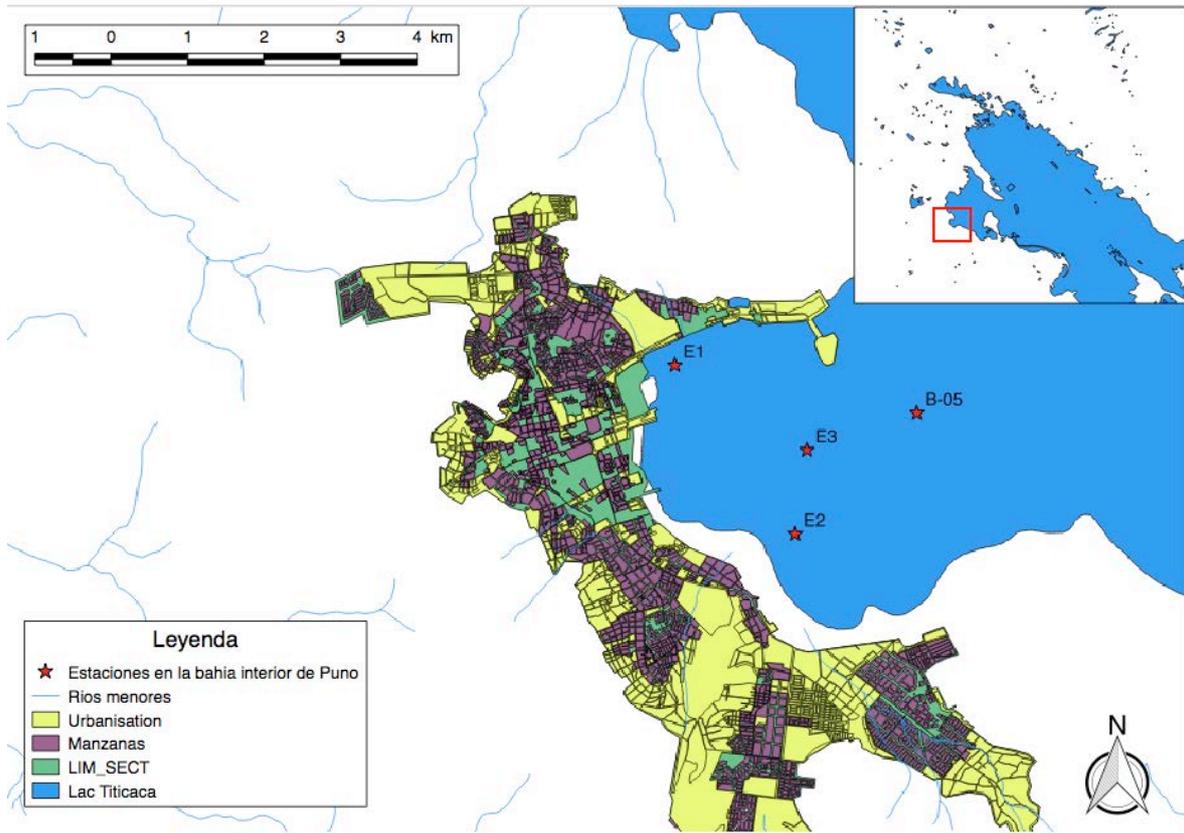


Figura 15 : Mapa de las diferentes estaciones de muestreo en la bahía interna de Puno (desarrollado por la MJ'Ecko, 2018).

En el lado peruano, la ANA (Agencia Nacional del Agua) también lleva a cabo el monitoreo de nutrientes, clorofila total y ciertos parámetros físicoquímicos en la bahía de Puno.

Para comprender mejor la relación entre los diferentes parámetros medidos, realizamos un análisis de componentes principales (ACP) a partir de los datos de la expedición binacional ECERP de agosto de 2016, que son los más completos para el lago Menor (Lazzaro *et al.*, 2017) y los de julio de 2018 para la bahía interior de Puno.

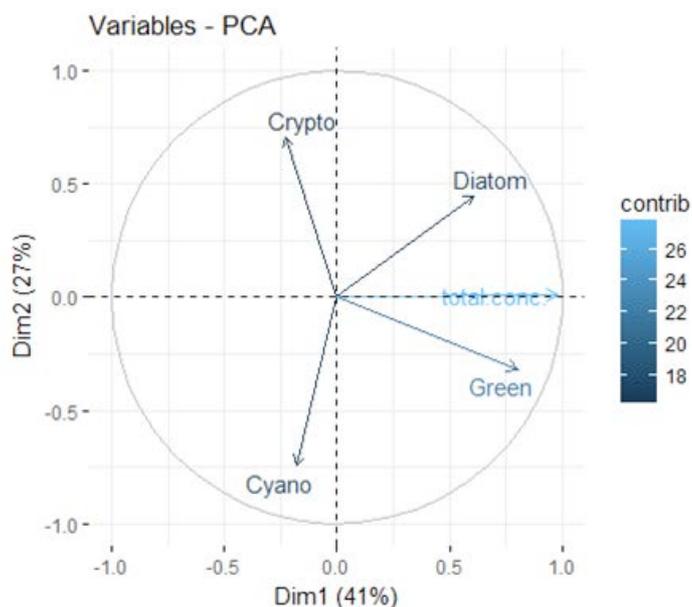


Figura 16 : ACP entre el fitoplancton y la concentración total de clorofila, según los datos medianos del lago Menor de la expedición de agosto de 2016 (MJ'Ecko, 2018).

En el lago Menor, el ACP sobre los valores medianos de la columna de agua de las 85 estaciones revela que la concentración total de clorofila-*a* está compuesta principalmente por diatomeas y algas verdes (Figura 14).

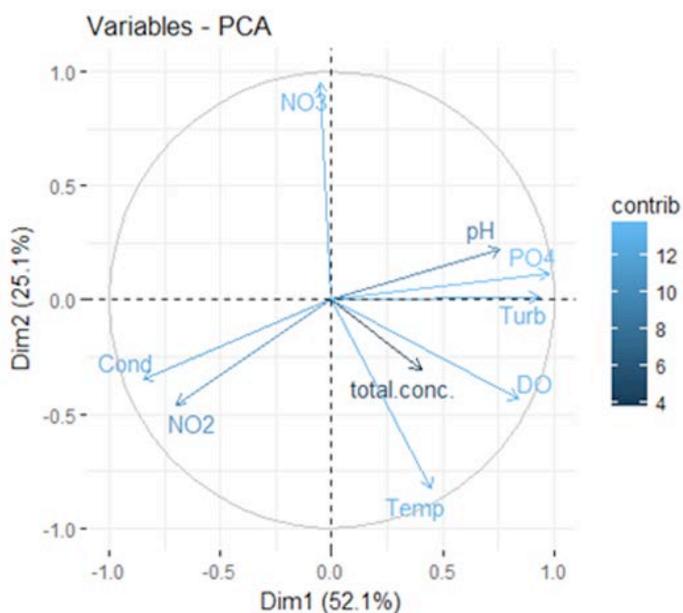


Figura 17 : ACP entre la concentración total de clorofila, conductividad, nitritos (NO_2), nitratos (NO_3), fósforo (fosfatos de PO_4), pH, turbidez y oxígeno disuelto (OD), a partir de datos de la mediana del lago Menor durante la expedición de agosto de 2016 (MJ'Ecko, 2018).

Para entender qué parámetros influyen en la concentración total de clorofila-*a* de la columna de agua, realizamos dos ACP: uno sobre los datos medianos del lago Menor en 2016 (Figura 16) y el otro sobre la bahía interior de Puno (Figura 17). El ACP del lago Menor muestra una correlación entre el fósforo y la clorofila-*a* total, mientras que los nitratos y los nitritos muestran una correlación negativa. El fósforo

parece ser un factor esencial que limita el crecimiento del fitoplancton y un aporte importante de este elemento podría contribuir significativamente en la aparición de floraciones. El ACP también muestra que la concentración de clorofila-*a* influye positivamente en la concentración de oxígeno disuelto (OD) y en la turbidez del agua.

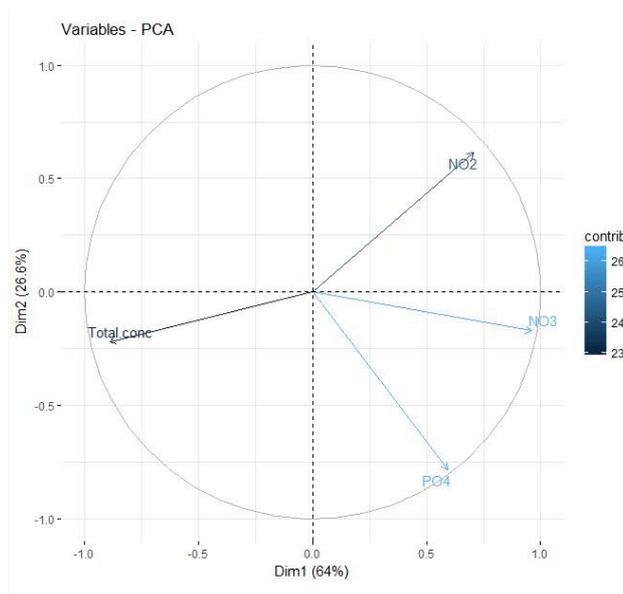


Figura 18 : ACP entre la concentración total de clorofila-*a*, fósforo (PO_4), nitritos y nitratos, a partir de los datos medianos de la bahía interior de Puno de la expedición de julio de 2016 (MJ'Ecko, 2018).

Respecto al ACP sobre los datos de la bahía interior de Puno, no se revela correlación entre el fósforo, los nitratos, los nitritos y la clorofila-*a*. Esto nos dice que en la bahía interior los nutrientes son suficientes para la proliferación de fitoplancton y ya no son factores limitantes.

La Figura 19 muestra la evolución de la clorofila-*a* total entre 2014 y 2018 en tres niveles de profundidad (superficie, intermedio y fondo). Se observa un aumento de la clorofila-*a* a lo largo de los años, independientemente del nivel. Esto indica un problema de eutrofización global en la bahía de Puno que ha sido cada vez más intenso desde 2016 con concentraciones muy altas, $> 60 \mu\text{g/L}$ hasta $> 120 \mu\text{g/L}$ en la superficie.

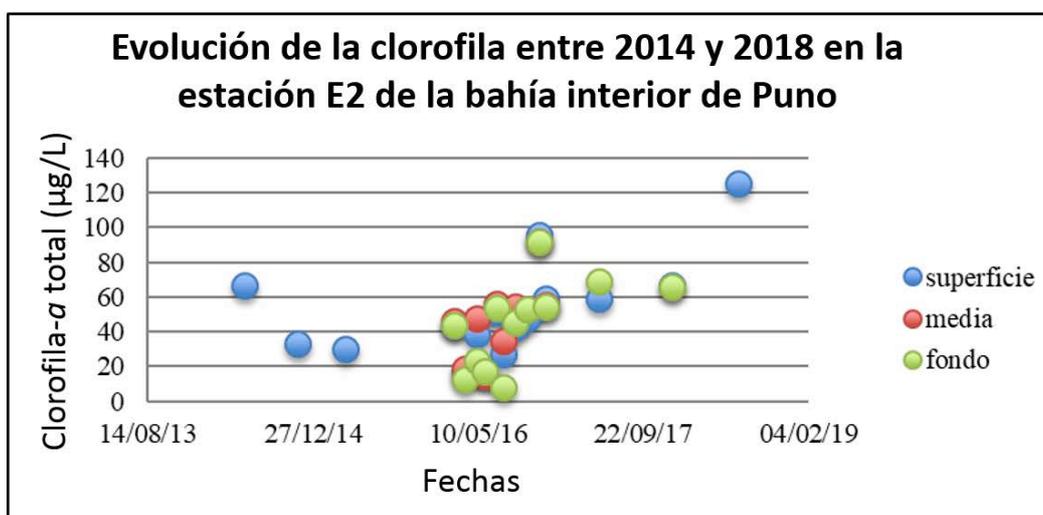


Figura 19 : Evolución de la clorofila-*a* total entre 2014 y 2018 en la estación E2 de la bahía interior de Puno, a tres niveles de profundidad (superficie, intermedio y fondo) (MJ'Ecko, 2018).

Con el fin de explicar la alta alcalinidad de la bahía interior de Puno (que se encuentra en la Tabla 2), se realizó un ACP sobre los datos de nitritos, nitratos, fósforo, pH, conductividad y oxígeno disuelto desde 2008 hasta 2015 a una profundidad del 20%. El ACP (Figura 20) muestra que en el lago Menor la alta alcalinidad está relacionada con la alta concentración de nitritos.

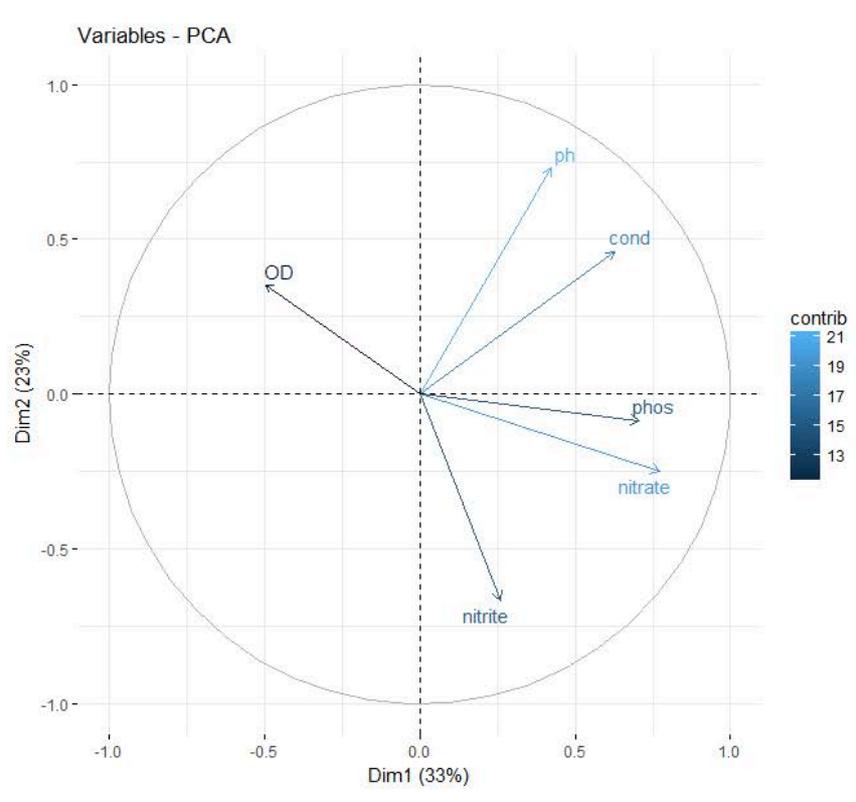


Figura 20 : ACP de nitritos, nitratos, fósforo, pH, conductividad y oxígeno disuelto sobre datos de 2008 hasta 2015 a una profundidad de 20% en la estación a 50 m de la planta de tratamiento de aguas residuales de Espinar (según datos de ANA) (MJ'Ecko, 2018).

B- Funcionamiento general de una red trófica

1) Estructuras de las cascadas tróficas lacustres

La red trófica de un lago incluye todas las cadenas alimenticias interconectadas a través de las cuales fluye la energía y la materia (flujos de nitrógeno y carbono). Esto permitirá comprender el funcionamiento general de las cascadas tróficas, así como el fenómeno de eutrofización y la bio-manipulación. Estos principios serán vinculados al lago Titicaca.

a) Cascadas tróficas de un lago

Las cascadas tróficas son interacciones depredador-presa dentro de un ecosistema. Se trata de efectos de consumo en las cadenas alimenticias que operan de acuerdo a los modelos de HSS¹ y EEH². En un ecosistema, hay varias cascadas tróficas y diferentes niveles tróficos (Figura 19).

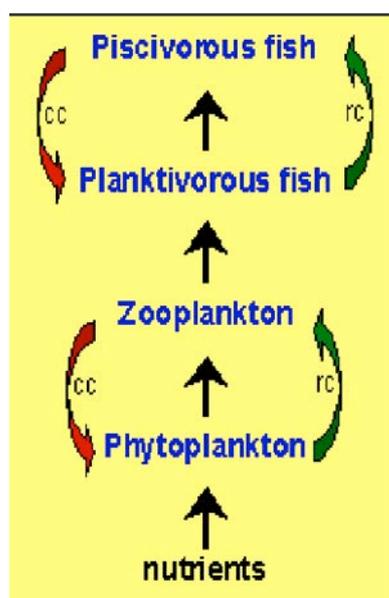


Figura 21 : Esquema teórico de una cascada trófica pelágica en presencia de piscívoros (Drenner & Hambright, 2002).

- Los **peces piscívoros** se alimentan generalmente de peces planctófagos más pequeños. La biomasa de peces piscívoros está influenciada por la presencia/ausencia de los niveles tróficos inferiores (Lazzaro, 2009).
- Existen 2 principales tipos de **peces planctófagos**:
 - Los depredadores visuales (cazadores de vista zooplanctófagos) que seleccionan e ingieren a sus presas. Se trata de zooplancton de tamaño grande y/o pigmentado de color oscuro (Lazzaro, 2009).
 - Los filtradores omnívoros consumen tanto fitoplancton como zooplancton por succión.
- El **zooplancton** es un conjunto de micro-crustáceos (especies de diferentes tamaños), principalmente herbívoros que se alimentan de fitoplancton. Por ejemplo, se pueden citar las

¹ Establecido por Hairston, Smith & Slobodkin, cascadas tróficas en tres niveles

² Modelo de Hipótesis de Ecosistema Explotable, cascadas tróficas en cinco niveles

Daphnia, un zooplancton grande e importante en el pastoreo del fitoplancton (herbívoros eficaces) (Lazzaro, 2009).

- El **fitoplancton** es la base de las cadenas alimenticias acuáticas. Agrupa el conjunto de microalgas en suspensión que viven en la columna de agua. El fitoplancton es esencial para toda la vida acuática, ya que produce oxígeno por fotosíntesis.
- La **comunidad bentónica** está compuesta por un gran cuerpo de organismos (herbívoros, carnívoros, detritívoros), incluidos los caracoles, que representan una gran parte de ellos. Viven en la parte baja de la columna de agua del lago. También juegan un papel vital en el reciclaje de nutrientes.

Las cadenas alimenticias pueden operar según tres niveles tróficos. El nivel trófico de los piscívoros constituye un cuarto nivel que no siempre existe (Lazzaro, 2009). Hay dos tipos de control de cascadas tróficas: control top-down ("control mediante los consumidores") y control bottom-up ("control mediante los recursos").

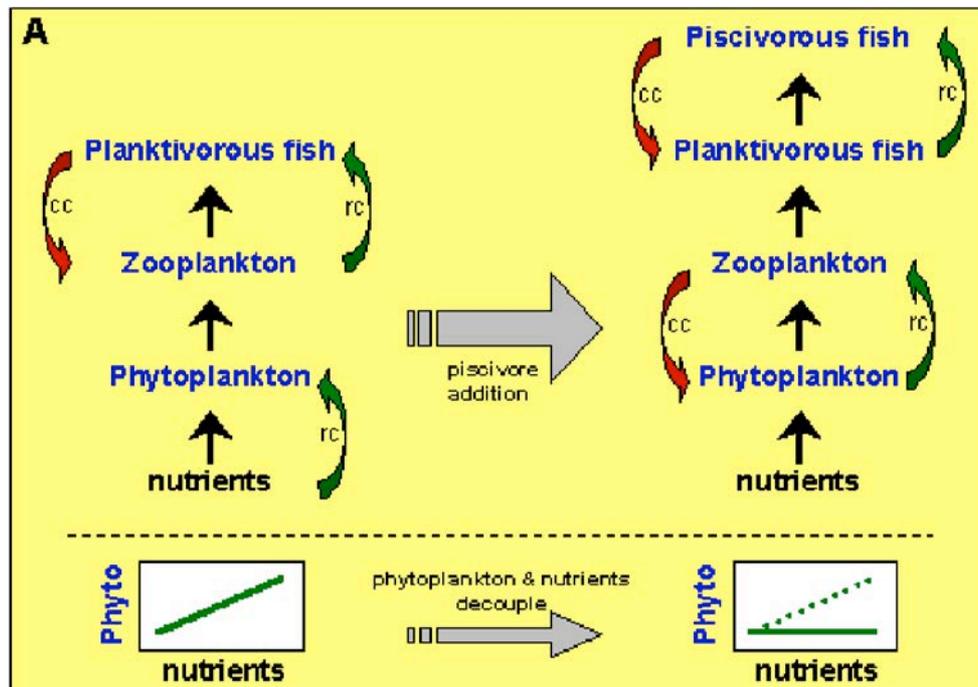


Figura 22 : Diagrama que ilustra dos tipos de cascadas tróficas pelágicas (Drenner & Hambright, 2002).

A la izquierda, se presenta un sistema con tres niveles tróficos; a la derecha, una cascada trófica con cuatro niveles (Drenner & Hambright, 2002).

b) Cascada trófica del lago Titicaca

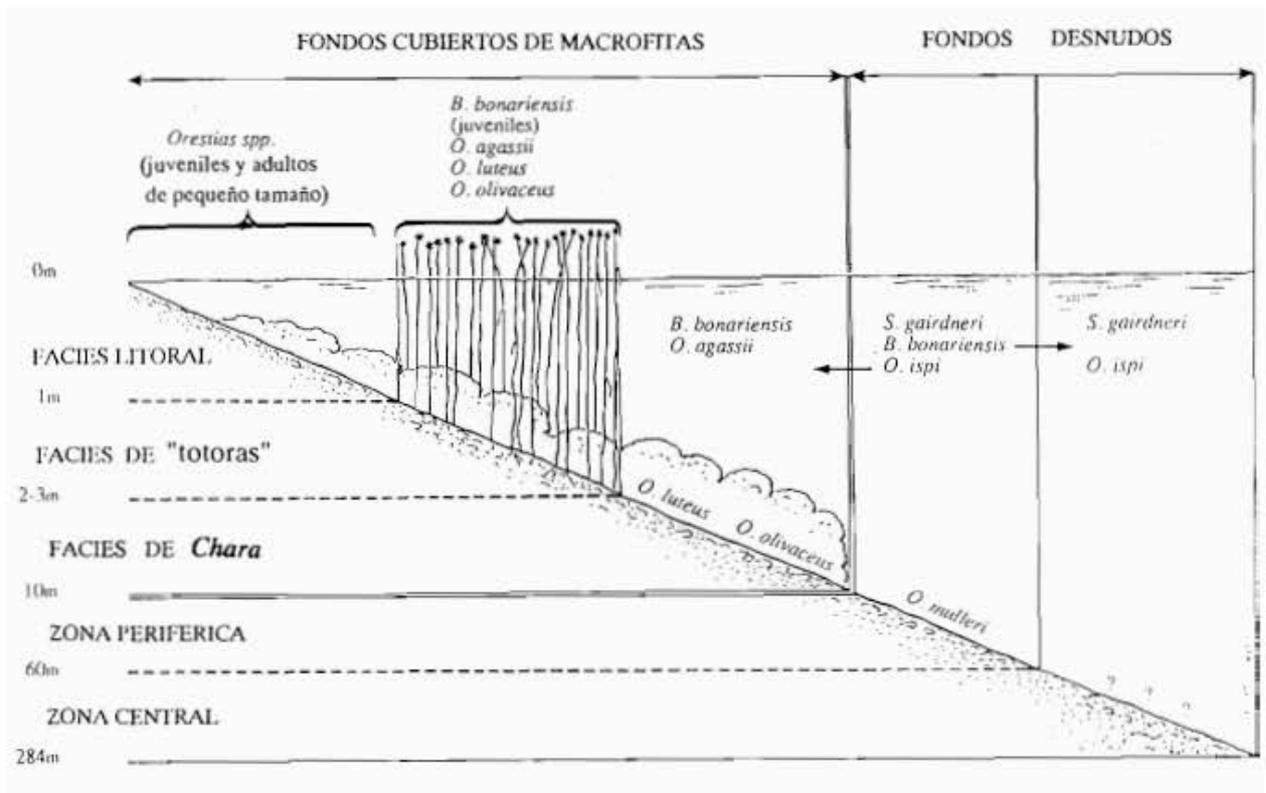


Figura 23 : Diagrama que muestra los diferentes hábitats del lago y las especies de peces asociadas (Lauzanne, sd).

Este diagrama muestra que las especies de peces del lago Titicaca se distribuyen de acuerdo a los hábitats (zonas litoral, pelágica y bentónica). Dependiendo del medio ambiente, los peces tendrán una dieta diferente. La cascada trófica se resume a continuación:

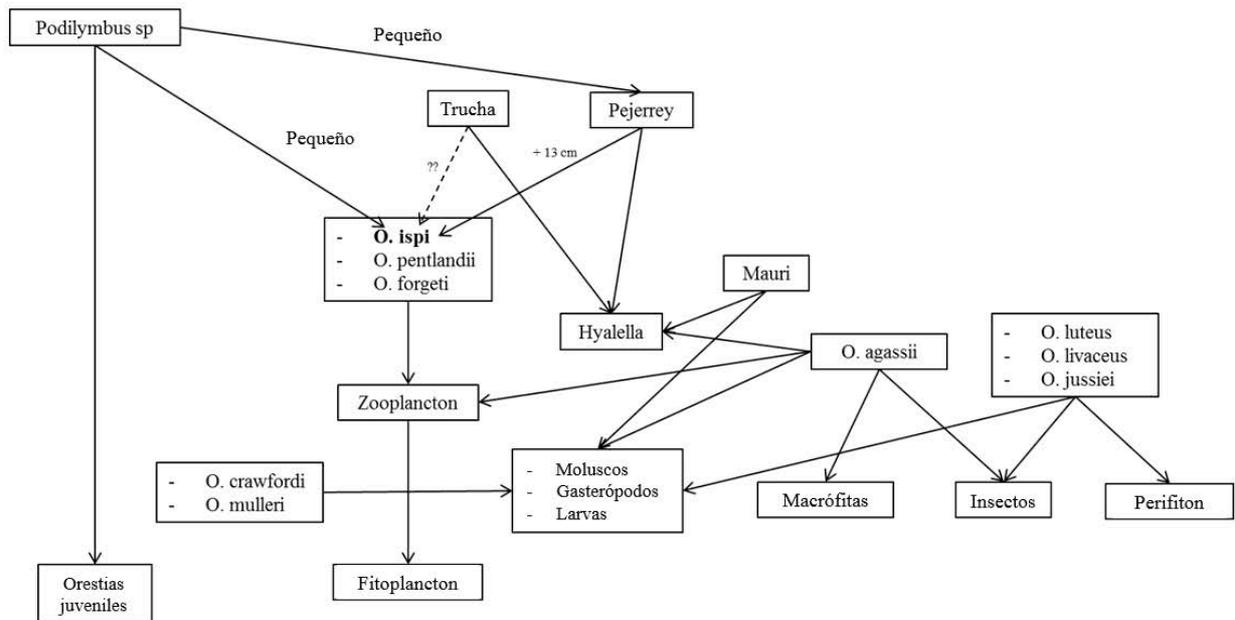


Figura 24 : Cascada trófica del lago Titicaca (MJ'Ecko, 2018).

Comentarios:

- El lago Mayor: Las especies de peces del género *Orestias* son nativas del lago Titicaca. Existe un gran número, pero solo las principales están representadas en la cascada trófica de arriba. Nos basamos en el trabajo de Monroy *et al.*, (2014) que es el más completo. Estos autores analizaron las interacciones tróficas entre quince especies de peces nativos (*Orestias spp.*) y dos especies exóticas introducidas para la piscicultura, el pejerrey (*Odontesthes bonariensis*) y la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*), capturadas al norte del lago Mayor del Titicaca. Para esto, combinaron el conocimiento ecológico tradicional con análisis de isótopos estables ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$). En todo el lago Mayor (excepto la bahía interior de Puno) y en el estrecho de Tiquina, hay una fuerte actividad de pesca industrial, principalmente la cría de truchas en jaulas flotantes. Se han identificado casos de escape de truchas en las aguas abiertas del lago Mayor que se reprodujeron y colonizaron el lago. Sin embargo, los individuos permanecen localizados alrededor de jaulas flotantes. Aunque hay muy pocos estudios sobre las aves del lago Titicaca (Martínez *et al.*, 2006) y no hay un estudio en profundidad del comportamiento del Atitlán Grebe *Podilymbus gigas*, se sabe que se alimenta de peces pequeños (juveniles, *O. ispi*).
- El lago Menor: Al igual que sus presas preferentes, los *ispi*, las truchas libres no se aventuran en el lago Menor, probablemente por falta de presas adecuadas. La cuenca es muy poco profunda (especialmente en el lado boliviano) y las aguas del litoral son poco transparentes para la piscicultura industrial de truchas. Por otro lado, existen algunas explotaciones familiares para el autoconsumo. Densidades muy bajas de peces (principalmente *Orestias*) se registran en el lago Menor (Lazzaro *et al.*, 2017) como resultado de la sobrepesca, la eutrofización, la reducción/desaparición de la franja costera de macrófitas acuáticas (en particular de totoras) causando la pérdida de hábitats de reproducción, alimentación y refugio.

2) Eutrofización

Dentro del fitoplancton, las microalgas y las cianobacterias utilizan la luz y asimilan los nutrientes para su metabolismo. Una vez muertos, estos organismos caen por debajo de la termoclina (en lagos profundos) y directamente en el fondo (en lagos poco profundos) y generan materia orgánica descomponible, utilizada por bacterias y ciliados para su crecimiento y desarrollo, en el proceso de mineralización de nutrientes que beneficiará luego a los productores primarios.

La eutrofización es una forma de contaminación orgánica, natural o provocada por el hombre y/o inducida por el clima, que se produce en los ecosistemas que reciben demasiados nutrientes asimilables por las algas haciendo que estas proliferen. Los principales nutrientes que causan el fenómeno de la eutrofización son el fósforo (contenido en los fosfatos) y el nitrógeno (contenido en el amonio, los nitritos y los nitratos). En un ecosistema sano, la composición elemental promedio del fitoplancton en C:N:P (carbono, nitrógeno, fósforo) se encuentra en un nivel de equilibrio de 106:16:1, llamado relación de Redfield, inicialmente definido para los océanos (Redfield 1934, 1958). Sin embargo, el plancton, los macro-invertebrados, los peces y los microorganismos que viven en los lagos, para mantener constante su composición corporal interna (es decir, la homeostasis), alteran su entorno químico externo, lo que refleja su propia composición en biomasa elemental. Este es el principio de la estequiometría ecológica (Sterner & Elser, 2002). Durante la eutrofización, este equilibrio estequiométrico se altera (por ejemplo, exceso de fósforo). La eutrofización ocurre principalmente en ecosistemas cuyas aguas se renuevan lentamente (tiempo de residencia prolongado).

En el caso de un exceso de nutrientes en el ecosistema, el fitoplancton (especialmente las cianobacterias, pero a menudo la *Chlorophyceae* o las algas verdes) se multiplicará en exceso, lo que puede llevar a un Bloom, también llamado floración de fitoplancton o simplemente "floración".

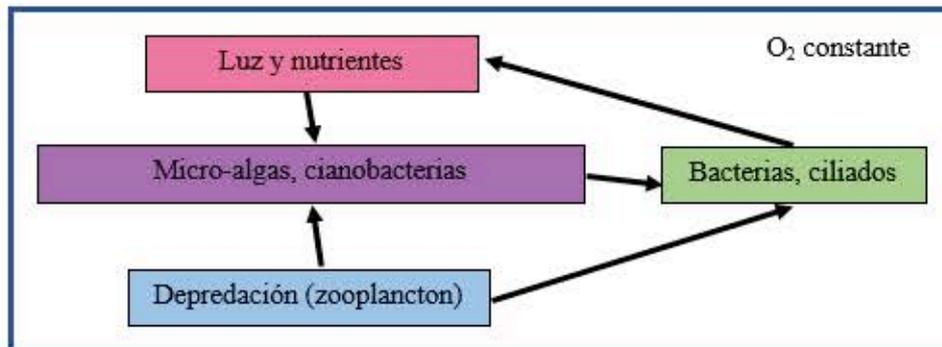


Figura 25 : Diagrama simplificado del funcionamiento de un medio oligotrófico (MJ'Ecko, 2018).

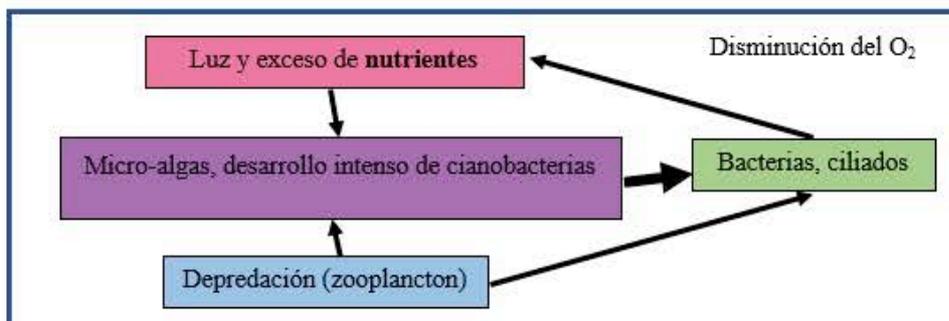


Figura 26 : Diagrama simplificado del funcionamiento de un medio eutrófico (MJ'Ecko, 2018).

Un Bloom es un evento grave, puntual e impredecible. Durante la floración del fitoplancton, la turbidez del agua aumenta considerablemente. Esta alta turbidez del agua opaca el agua bajo la floración, causando la muerte de muchas especies de productores primarios (microalgas y macrófitas acuáticas) que necesitan luz para su fotosíntesis. Además, la cantidad de nutrientes disponibles se vuelve insuficiente para satisfacer la fuerte demanda del fitoplancton (alta concentración): hay acumulación y muerte de

fitoplancton. La descomposición del fitoplancton por las bacterias consume una gran cantidad de oxígeno. Este agotamiento del oxígeno, que puede alcanzar la anoxia, provoca la asfixia del ecosistema acuático (Gulati & Van Donk, 2002). Según los numerosos trabajos de Marten Scheffer (Scheffer *et al.*, 1993, 2001; Scheffer & Jeppesen, 1997; Scheffer, 2010) sobre la teoría de los estados alternativos, un ecosistema acuático puede responder de tres formas diferentes a un evento externo. La existencia de equilibrios estables ha sido demostrada como caracterizando a menudo los ecosistemas naturales, pero también los sistemas naturales y sociales en interacción (Walker & Meyers, 2004; Liu *et al.*, 2007; Scheffer, 2009; Carter *et al.*, 2014; Kramer *et al.*, 2017).

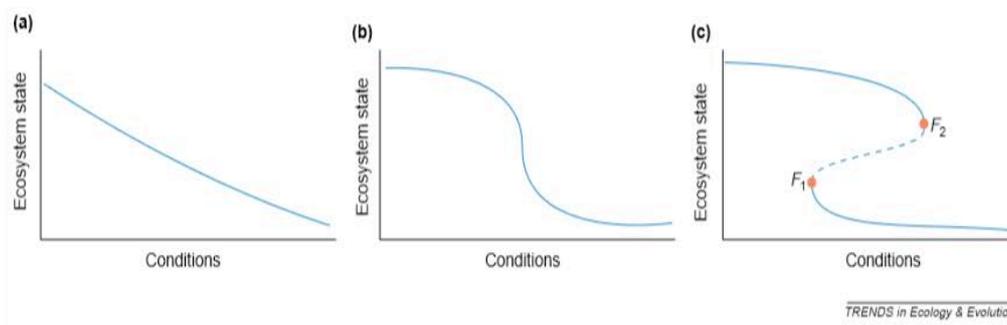


Figura 27 : ilustraciones de los tres tipos de posibles respuestas de un ecosistema a una perturbación externa (Scheffer & Carpenter, 2003).

- (a) Dinámica del ecosistema ligeramente modificada
- (b) Cambio profundo del equilibrio al acercarse a un punto crítico y luego restauración del equilibrio.
- (c) Dinámica completamente transformada, aparición de un nuevo punto de equilibrio.

Basado en esta teoría, un ecosistema tendrá tres respuestas posibles a una floración. Entonces es posible que después de la eutrofización y la floración, un lago no pueda recuperar su equilibrio inicial y que el ecosistema se incline hacia un equilibrio nuevo, totalmente diferente, pero impredecible. Para evitar este tipo de escenario catastrófico, es importante hacer todo lo posible (en particular, los aportes excesivos de nutrientes) para impedir la eutrofización y, por lo tanto, la aparición de blooms.

a) Las macrófitas

Desde la década de 1980, muchos lagos de agua dulce poco profundos han sido víctimas de la eutrofización (Hootsmans *et al.*, 1991). Los estudios muestran que la eutrofización a menudo se acompaña por una reducción significativa en la biomasa y diversidad de macrófitas (plantas acuáticas) en el ecosistema. Las macrófitas tienen roles extremadamente importantes en el funcionamiento de la red trófica de lagos poco profundos (producción de oxígeno, hábitats de otras especies, rol anti-erosivo, ciclo de nutrientes, ...).

La desaparición de macrófitas conduce indudablemente a la de muchas otras especies, y altera la red alimenticia al igual que los ciclos de nutrientes y de carbono. Luego de estos cambios consecuentes, el fitoplancton se encuentra dominado por las cianobacterias durante largos períodos del año (Hootsmans *et al.*, 1991). Dos modelos conceptuales se establecen para explicar la desaparición de las macrófitas:

- 1^{er} modelo³: La disponibilidad de nutrientes aumenta (eutrofización) estimulando el crecimiento significativo de la biomasa de fitoplancton. Como se explicó anteriormente, el aumento en la biomasa de fitoplancton da como resultado una turbidez importante en el agua. Como resultado de esto, la biomasa de macrófitas (sumergidas y emergentes) disminuye, lo que lleva a una disminución en el stock de peces piscívoros (cazadores de vista) que viven entre las macrófitas: las biomasa de peces planctívoros y bentívoros aumentan considerablemente después de la reducción de la presión depredadora y el aumento de los recursos alimenticios (detritos, plancton). Estas especies limitan la densidad del zooplancton, favoreciendo así el aumento de la biomasa del fitoplancton y, por tanto, la turbidez del agua. En este modelo, el fitoplancton domina la cadena trófica (Hootsmans *et al.*, 1991).

³ Establecido por Hrbáček *et al.* (1961), Andersson *et al.* (1978), Andersson (1984) y por Jupp & Spence (1977)

- 2^{do} modelo⁴ : Algunas macrófitas secretan sustancias alelopáticas que limitan el crecimiento del fitoplancton (competición interespecífica) y/u de otras macrófitas. La segunda hipótesis afirma que el desarrollo de perifitón (es decir, complejo de algas y bacterias formando colonias que se adhieren a los sustratos) acentúa la desaparición de macrófitas del sistema. La disminución de macrófitas conduce a un aumento en la biomasa de fitoplancton (reducción de sustancias alelopáticas). A medida que aumenta la turbidez del agua, la opacidad del agua tiene un impacto negativo en otras especies acuáticas (Hootsmans *et al.*, 1991).

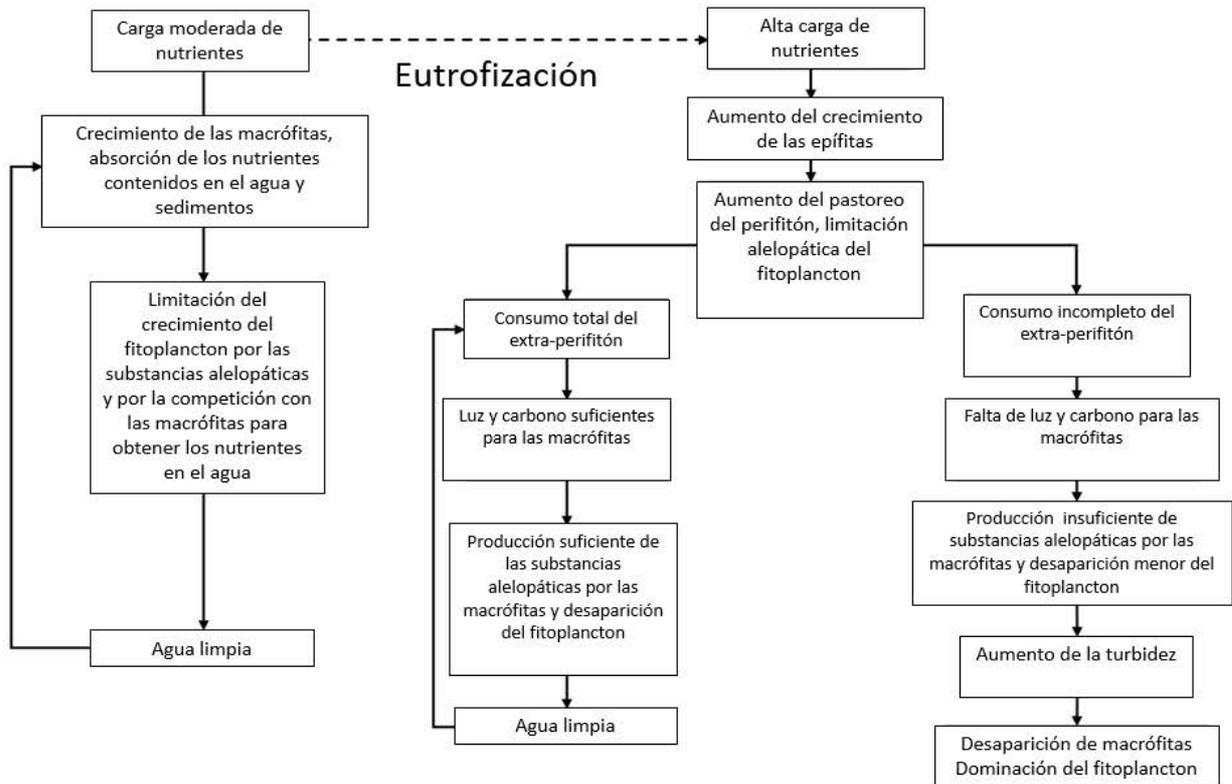


Figura 28 : Diagrama de las dos hipótesis previstas después de una eutrofización. (Hootsmans *et al.*,1991).

A medida que se desarrollan las macrófitas, el agua se vuelve más transparente, lo que estimula aún más el desarrollo de las macrófitas. Sin embargo, la luz es el principal factor limitante de las plantas acuáticas sumergidas en lagos eutróficos: sin luz, las macrófitas no pueden desarrollarse. Por lo tanto, existe un mecanismo de retroalimentación positivo de la vegetación-turbidez en el desarrollo de las plantas acuáticas (figura 26).

⁴ Establecido por Phillips *et al.* (1978)

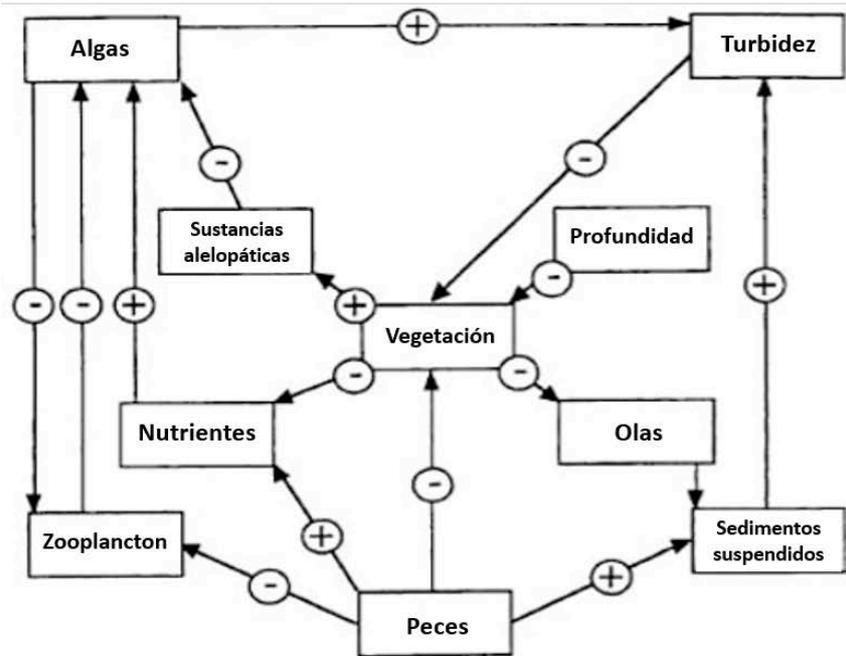


Figura 29 : Principales interacciones de retroalimentación consideradas como responsables de la existencia de estados alternativos (agua turbia versus agua clara) en los ecosistemas de lagos poco profundos (Lazzaro, 2009, modificado por Scheffer et al., 1993).

Muchos lagos templados poco profundos pueden pasar de un estado dominado por macrófitas con agua clara a un estado turbio con altas concentraciones de fitoplancton y pocas macrófitas: este es el principio de los estados de equilibrio alternativo explicados anteriormente. Este es el principio que se utiliza para la gestión ecológica y la restauración mediante biomanipulación en lagos templados poco profundos (síntesis de X. Lazzaro, 2009).

b) Técnicas de biorremediación lacustre

b.1- La fitorremediación

La fitorremediación se basa en la capacidad de ciertas plantas para crecer en ambientes contaminados y extraer, acumular, estabilizar, volatilizar, transformar o degradar un contaminante dado, orgánico o inorgánico, a través de sus interacciones con los microorganismos presentes (Dabouineau *et al.*, 2015).

Existen diferentes tipos de fitorremediación según el tipo de contaminación:

- La *fitoextracción* es un método de descontaminación de metales pesados (cobre, plata, oro, mercurio, zinc, cadmio, hierro, plomo) a través de las plantas. Se basa en la capacidad de algunas plantas para tolerar y acumular estos metales. Estas plantas son capaces de extraer y acumular metales en su parte cosechable. Se debe elegir la planta según el contaminante. Una vez que la planta está madura, se cosecha, se incinera y las cenizas se almacenan en un lugar seguro. Una parte de estos metales podrá luego ser reprocesada y reutilizada. El cultivo de la planta puede continuar o renovarse hasta que se alcancen niveles aceptables de metales (Dabouineau *et al.*, 2015). Actualmente se identifican 400 especies de plantas de las llamadas hiper-acumuladoras de metales pesados.

Tabla 3 : Tabla de trazas de metales en plantas hiper-acumuladoras (Abdelly, 2007).

Metal	Criterios (% MS de las hojas)	Número de especies
Cadmio	>0,01	1
Cobalto	>0,1	28
Cobre	>0,1	37
Plomo	>0,1	14
Manganeso	>1	9
Níquel	>0,1	317
Zinc	>1	11

Las partes acumuladoras de las plantas difieren según la especie y el metal. Las partes acumuladoras pueden ser raíces, tallos, hojas, savia, semillas o incluso brotes. Por lo tanto, es importante definir la zona de acumulación de los metales de la planta para definir el órgano a cosechar (Dabouineau *et al.*, 2015).

- La *fito-degradación* es un método de descontaminación de contaminantes orgánicos como hidrocarburos y pesticidas. La fito-degradación se basa en la capacidad de las plantas cultivadas de degradar los contaminantes.
- La *fito-volatilización* es un método de transformación y degradación por parte de las plantas de ciertos tipos de contaminantes como los compuestos orgánicos y algunos metales (selenio, mercurio) en elementos volátiles menos tóxicos (pueden ser peligrosos dependiendo de la concentración de contaminante liberado), que luego son liberados a la atmósfera por transpiración de la planta (Larec *et al.*, 2016).
- La *fito-estabilización* es la absorción e inmovilización de contaminantes en las raíces (rizosfera) de las plantas para reducir los fenómenos de lixiviación y su dispersión por el viento (Larec *et al.*, 2016).

En el lago Titicaca, hay una gran diversidad de macrófitas (entre flotantes, emergentes y sumergidas), como las totoras (*Shoenoplectus californus*). Las totoras son macrófitas emergentes muy presentes en el lago y que ocupan importantes funciones ecológicas.

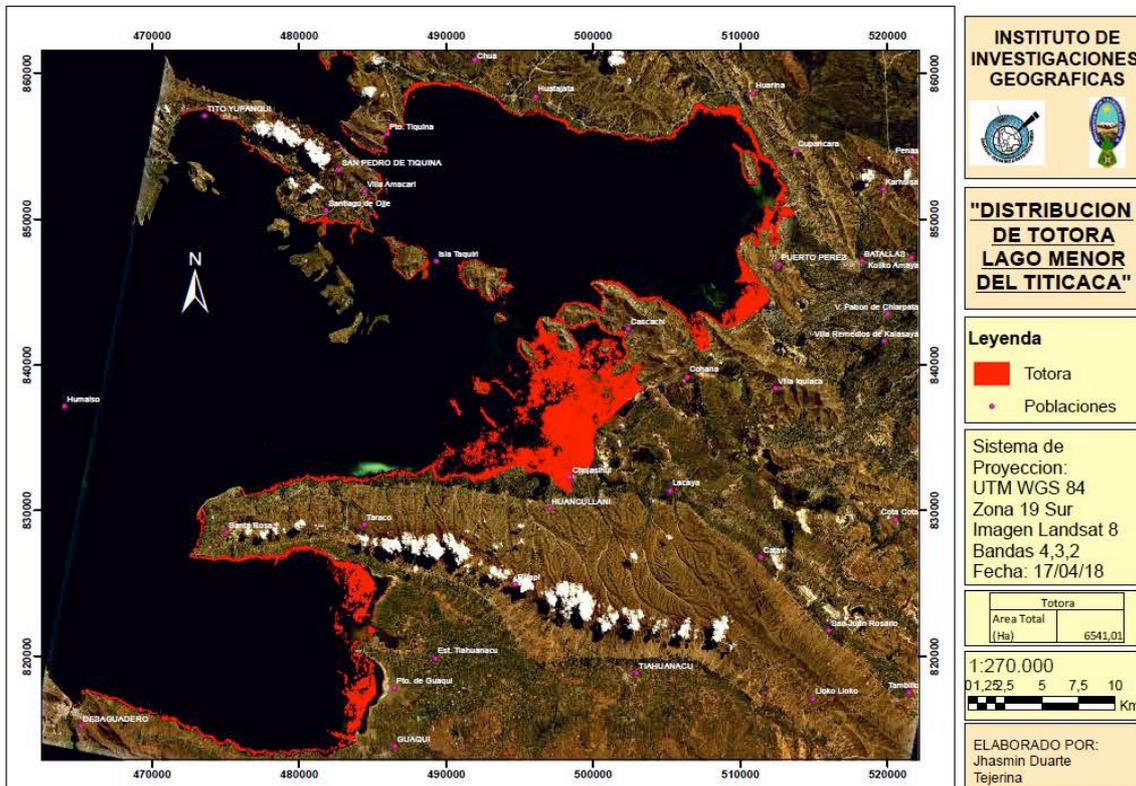


Figura 30 : Mapa de distribución de totoras alrededor del lago Menor (Bolivia), a partir de imágenes Landsat8 y calibración in situ de señales espectrales de reflectancia (espectroradiómetro de 300-1.000 nm) (Duarte, 2018).

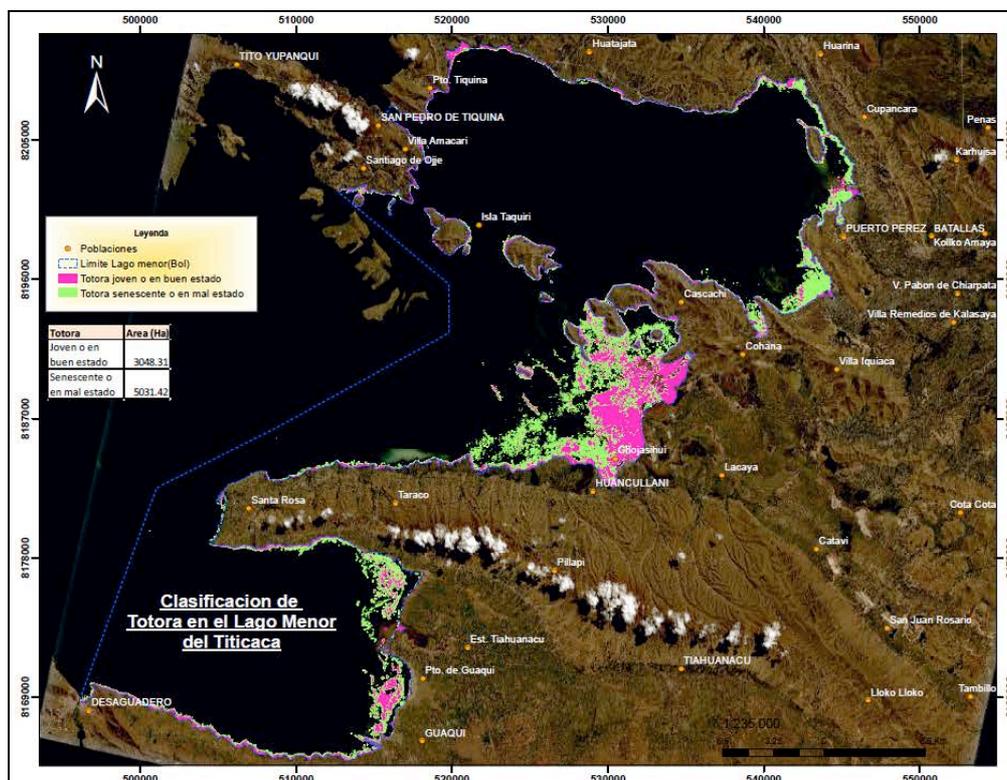


Figura 31 : Mapa de distribución de totoras en el lago Menor (Bolivia) según estado de desarrollo: joven o en buen estado (en rosa) versus en senescencia o estado deficiente (en verde), a partir de imágenes Landsat8 y calibración in situ de las señales espectrales de la reflectancia. Sorprendentemente, las totoras están en mejores condiciones cerca de la fuente de contaminación en la desembocadura del río Katari en la bahía de Cohana (Duarte, 2018).

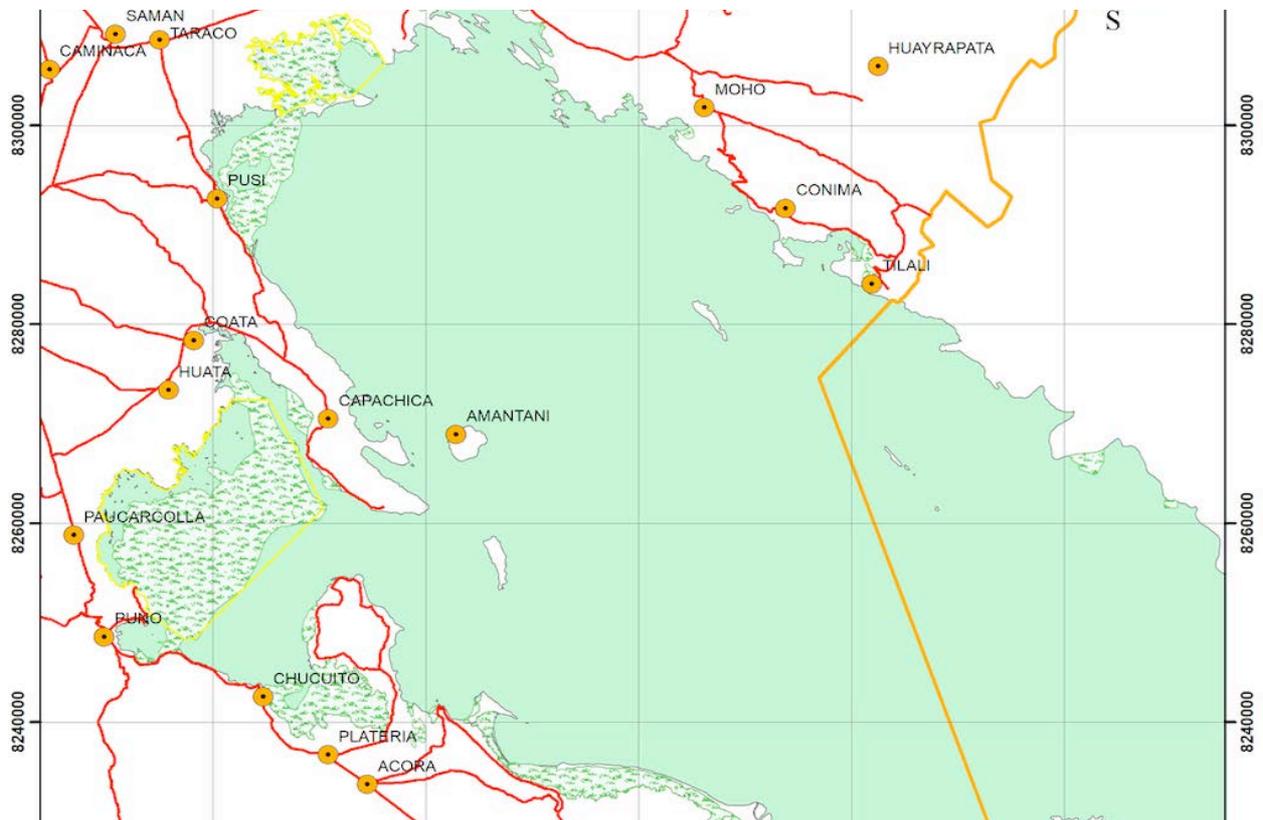


Figura 32 : Mapa de Distribución de totoras en la bahía interior de Puno (Perú), Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP), 2018.

Diferentes estudios han demostrado que las totoras tienen una buena capacidad para acumular metales pesados. Como se explica en el informe "Evaluación para la fitorremediación de aguas contaminadas" (Achá *et al.*, 2015), proyectos de descontaminación por totoras ya se están considerando en el lago Titicaca.

Tabla 4 : Tabla de la concentración de metales pesados en partes de la totora en la estación seca (Manjón, 2006).

Parte de la planta	Localización	Arsénico (mg/kg de MS)	Fierro (mg/kg de MS)	Plomo (mg/kg de MS)	Zinc (mg/kg de MS)	Cadmio (mg/kg de MS)
Raíces	Río Poopó	221	21 053	601	6 305	185
Parte baja del tallo	Río Poopó	<LD	4 040	48	4 949	146
Parte alta del tallo	Río Poopó	<LD	2 005	<LD	5 480	6
*LD		**	0,03	0,08	0,01	0,02

*LD = Limite de determinación

** Limite del aparato para el arsénico no definido.

Tabla 5 : Tabla de concentraciones de metales pesados en partes de la totora en estación húmeda (Manjón, 2006).

Parte de la planta	Localización	Arsénico (mg/kg de MS)	Fierro (mg/kg de MS)	Plomo (mg/kg de MS)	Zinc (mg/kg de MS)	Cadmio (mg/kg de MS)
Raíces	Río Poopó	248	16 951	220	7 319	331
Parte baja del tallo	Río Poopó	63	936	<LD	909	29
Parte alta del tallo	Río Poopó	72	1 038	<LD	838	6
*LD		**	0,03	0,08	0,01	0,02

*LD = Limite de determinación

** Limite del aparato para el arsénico no definido.

b.2- Biomanipulación

La biomanipulación es un concepto que reúne un conjunto de técnicas de restauración de lagos que aprovechan los mecanismos ecológicos naturales. Permiten orientar un ecosistema hacia un estado estable deseable modificando las relaciones de interacción entre las comunidades biológicas que lo constituyen, como reducir/aumentar las presiones de depredación, el pastoreo de ciertos compartimentos y/o el reciclaje de nutrientes, para controlar su productividad y estado trófico.

Estas técnicas de ingeniería ecológica se aplicaron por primera vez a los lagos templados (Carpenter *et al.*, 1992, Hansson *et al.*, 1998, Drenner *et al.*, 1999, y Jeppesen *et al.*, 2012) y luego fueron adaptadas a lagos tropicales poco profundos (Lazzaro, 1997, Jeppesen *et al.*, 2005, Lazzaro *et al.*, 2005, Lazzaro *et al.*, 2010). Los resultados muestran que estos métodos son más efectivos en cuerpos de agua pequeños (<25 ha) poco profundos (profundidad media <2,5 m) (Drenner *et al.*, 1999, Meijer *et al.*, 1999, Olin *et al.*, 2006). Sin embargo, por numerosas razones, las técnicas de biomanipulación de los lagos templados no son directamente extrapolables a los lagos (sub)tropicales. De hecho, en comparación con los lagos templados, las condiciones climáticas en los lagos (sub)tropicales son más estables, presentando un crecimiento de plantas y reproducción de peces durante todo el año.

Su funcionamiento ecológico es generalmente mucho más complejo debido a la presencia de omnívoros (consumo en varios niveles tróficos), la preponderancia de los peces filtradores omnívoros (detritívoros y fitófagos) y la escasez de peces estrictamente piscívoros.

Por consecuente, las cascadas tróficas pelágicas convencionales: piscívoros → planctófagos → plancton son de intensidad leve y con frecuencia no se aplican a los lagos tropicales poco profundos. Se debe utilizar otro modelo (Lazzaro, 1997; Lazzaro *et al.*, 2003; Lazzaro, 2009), donde predominan los peces omnívoros, con cambios en composiciones relativas en especies, o proporciones de grupos funcionales. En una región (sub)tropical, la variabilidad interanual es mucho mayor que la variabilidad estacional, lo que hace que las predicciones sean muy inciertas (Lazzaro, 2009). Las manipulaciones "top-down", es decir, la reestructuración de las cadenas tróficas mediante la reducción de peces piscívoros, tienen por lo tanto pocas posibilidades de funcionar para restaurar la calidad del agua. Es necesario reducir la biomasa de peces omnívoros filtradores para reducir el reciclaje interno en nutrientes y, por tanto, el fitoplancton y controlar los blooms (Lazzaro, 1997; Pinel-Alloul *et al.*, 1998; Lazzaro *et al.*, 2003). Esta técnica se ha utilizado con éxito en el lago Paranoá, lago eutrófico urbano de Brasilia, capital de Brasil, lo que ha permitido reducir significativamente la biomasa de fitoplancton y eliminar de forma sostenible las recurrentes floraciones de cianobacterias (*Cylindrospermopsis reciborskii*) desde el año 2000 (Starling *et al.*, 2002, Lazzaro & Starling, 2005).

c) Causas naturales y antrópicas de la eutrofización

c.1- Causas naturales

Un lago recibe de forma natural y continua materias nutritivas de los torrentes y la escorrentía. Esta contribución estimula el crecimiento y la multiplicación excesiva de ciertas microalgas del fitoplancton, especialmente en las capas superficiales de agua porque los productores primarios necesitan luz para desarrollarse. Cuando esta cantidad excesiva de algas se descompone, hay un aumento de la carga natural del ecosistema en materia orgánica biodegradable.

En las profundidades del lago, donde se depositan las algas muertas, las bacterias aeróbicas que se alimentan de ellas proliferan, consumiendo cada vez más oxígeno. Sin embargo, en ausencia de un flujo suficiente de agua, como suele ser el caso en un lago profundo (estratificación térmica), el fondo del lago está poco oxigenado y las bacterias finalmente agotan las capas de oxígeno del agua profunda. Ya no pueden degradar toda la materia orgánica muerta, la que se acumula en los sedimentos. Tal situación, cuando ocurre, empeora con el calor porque la solubilidad del oxígeno en el agua disminuye a medida que aumenta la temperatura.

Este proceso natural es muy lento, puede tardar siglos, milenios y más. Esta eutrofización "natural" corresponde al envejecimiento de los lagos, que a menudo se asocia con el término "enriquecimiento", que refleja la captura de nutrientes que la cuenca trae naturalmente, pero también la atmósfera. Pero la eutrofización puede acelerarse en gran medida por la contribución de los efluentes domésticos, industriales y/o agrícolas y llevar a la muerte de todo el ecosistema acuático en unas pocas décadas e incluso en algunos años. Esta eutrofización se denomina "artificial" o "antropogénica" (llamada "cultural eutrophication" en inglés) y aparece como consecuencia de las actividades humanas. Cuando los aportes externos de nutrientes alcanzan un nivel extremo, se habla de hiper-eutrofización o de distrofización.

c.2- El cambio climático y la eutrofización

La eutrofización a nivel mundial está relacionada con los problemas de contaminación, sobreexplotación de los recursos naturales, especies invasoras, calentamiento global y, por lo tanto, con el aumento del dióxido de carbono en los océanos, lo que lleva a verdaderas modificaciones de la biodiversidad, del funcionamiento y de la estructura trófica de los ecosistemas acuáticos (Beaugrand G. *et al.*, 2010).

El calentamiento global es una consecuencia de la sobreacumulación de gases de efecto invernadero (GEI). Estos gases provienen principalmente de actividades antrópicas (ganadería, industrias). Estos gases residuales de las actividades humanas se encuentran en la atmósfera, interactúan con la radiación infrarroja proveniente de la tierra y retardan la difusión de este calor hacia el espacio. Sin los GEI, la temperatura terrestre promedio sería de -18°C (Villeneuve, 2015).

Esta acumulación de GEI (metano, óxido nitroso) provoca un aumento de la temperatura en la atmósfera. Además, la superficie de la tierra se transforma, lo que reduce el albedo y, por lo tanto, provoca un aumento en la cantidad de rayos infrarrojos re-emitidos (Villeneuve C. 2015).

La eutrofización no provoca el calentamiento global, sino que actúa en paralelo con este cambio climático como un factor nefasto para el medio ambiente. La eutrofización de un sistema lacustre, como la del lago Menor del Titicaca, puede transformarlo de un pozo de carbono a una fuente de carbono para la atmósfera (A. Groleau, IPGP). Estos factores son responsables de los principales desafíos del siglo XXI:

- Desaparición de los glaciares de montaña.
- Pérdida de biodiversidad marina y terrestre.
- Intensificación de eventos climáticos violentos.
- Problemas de salud pública, de agricultura, de silvicultura y de producción de energía.
- Evaporación acelerada.
- Aceleración del ciclo del agua.
- Modificación de ciclos de carbono y nitrógeno.
- Condiciones favorables para la extensión de parásitos y plagas de los cultivos.

(Villeneuve C. 2015.)

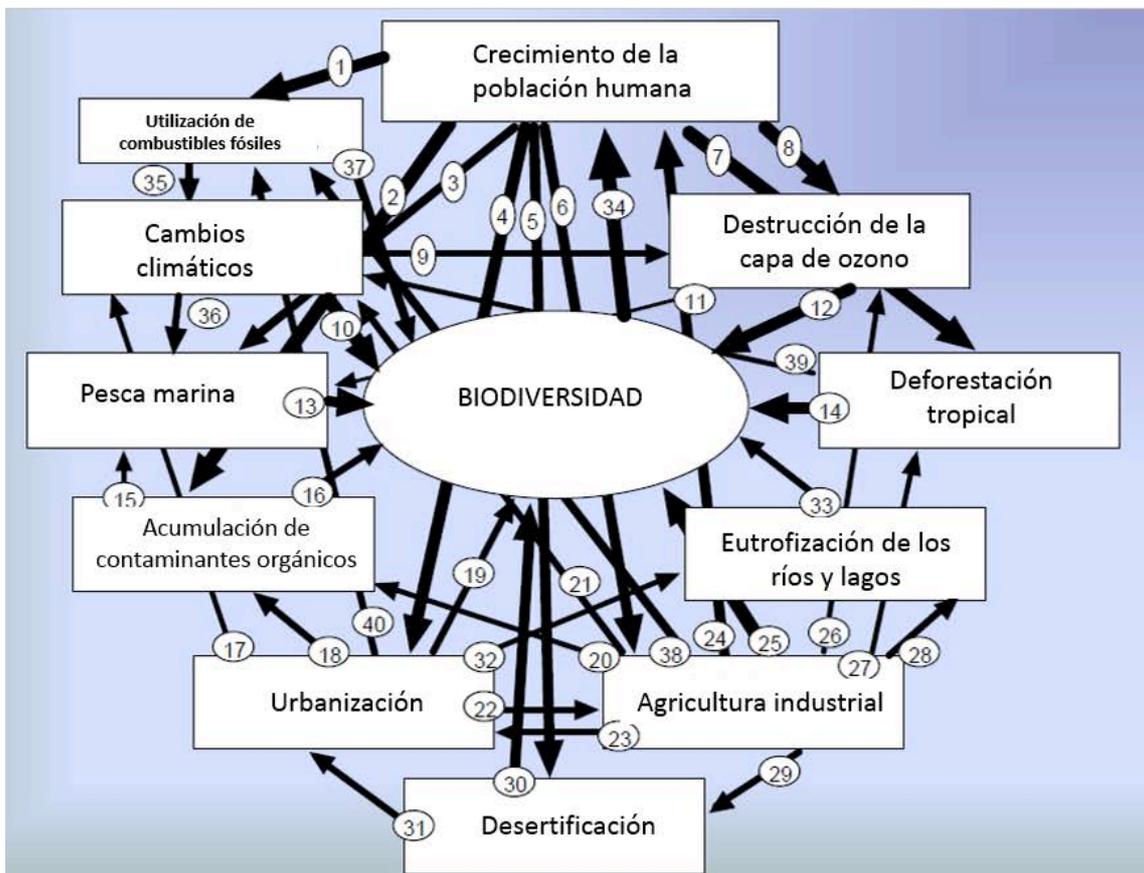


Figura 33 : Diagrama conceptual de las interacciones entre las problemáticas planetarias (Villeneuve, 2015).



Figura 34 : Escalas geográficas de la calidad del aire desde las capas bajas hasta los fenómenos planetarios (Charpina, 2016).

c.3- Causas antrópicas aplicadas al lago Titicaca

- Actividades de pesca

En 2003, las principales especies de peces capturados y producidos (básicamente en piscicultura) son los Karachi, los Ispi (especies nativas), el pejerrey y la trucha (dos especies introducidas). En la pesca tradicional, son los peces de los géneros *Orestias* y *Basilichthys* los que más se pescan.

En la década de 1940, la trucha (Salmónido; presenta tres especies: la trucha arco iris *Oncorhynchus mykiss* - también llamada *Salmo gairdneri*, la trucha marrón *Salmo trutta* y la trucha de lago *Salvelinus namaycush*) y el pejerrey (*Basilichthys bonariensis*) fueron introducidos en el lago, convirtiéndose así en los nuevos y únicos depredadores de especies nativas en la cima de la cadena alimenticia. Sin embargo, las truchas de lago no se establecen como poblaciones libres en el lago por razones que aún están mal explicadas, relacionadas con factores ambientales (Brenner, 1994). Las truchas se reproducen en jaulas flotantes familiares aisladas (principalmente en Bolivia) o en piscifactorías industriales (especialmente a lo largo de la costa oeste del lago Mayor, en el Departamento de Puno, Perú) (Revollo *et al.*, 2006). En 2017, había 13 434 ha de producción de trucha en jaulas en las zonas acuáticas activas para el desarrollo de la piscicultura en el lago Mayor, incluidas 750 ha dedicadas a la cría de trucha arco iris (5,6% del área total). Además, hay alrededor de 8.000 ha en tramitación con la DICAPI (Dirección General de Capitanías y Guardacostas) para obtener sus autorizaciones. Estas zonas están ubicadas en su mayoría en la parte peruana. La piscicultura está reglamentada hasta 2021 por el Plan Nacional para el Desarrollo de la Acuicultura (PNDA) (Chura *et al.*, 2009).

El pejerrey fue introducido desde Argentina en el lago Poopó, Bolivia, en 1946 (Terrazas, 1966). En 1955 emigró al lago Titicaca, tomando el río Desaguadero (Everett, 1973). Desde entonces, ha poblado la mayoría de los afluentes, como los ríos Ilave, Coata, Ramis y Huanacáné (Bustamante y Treviño, 1977).

Las especies nativas no contribuyen significativamente a la producción pesquera total del lago Titicaca. La producción artesanal tradicional de pesca ha disminuido considerablemente, especialmente en el lago Menor, sobre todo en la parte boliviana donde la cantidad de peces es muy baja (eutrofización, sobrepesca, contaminación).

Las pesquerías artesanales del lago Titicaca incluyen a 10 700 pescadores, incluyendo 5 400 en Perú y unos 5 300 en Bolivia. La captura total es de 6290 toneladas en Perú y 200 toneladas en Bolivia (Revollo *et al.*, 2006).

- Actividades agrícolas

En Perú, durante los últimos 12 años, se estima que el área dedicada a la agricultura era de 242 000 ha, de las cuales 117 000 ha correspondieron a cultivos anuales (107 000 ha sin riego y 10 000 ha con riego). El ganado principal son los bovinos, ovinos, alpacas, llamas, cerdos y pollos (Revollo *et al.*, 2003).

En el sistema TDPS, el cultivo principal es la papa, que representa el 58% del ingreso bruto. Dentro de los cultivos menores, se encuentran la cebada, la avena (en cultivos forrajeros) y alfalfa, que representan el 22,1% de la producción total. También se cultivan otros productos, como la quínoa (5,9%), la cebada en granos (5,7%) y la oca (tubérculo) (3,4%) en cultivos alimenticios (Revollo *et al.*, 2006). En Bolivia, el ganado (principalmente bovino) se establece cerca de las principales ciudades (La Paz, El Alto y Oruro).

En el Altiplano y alrededor del lago, las precipitaciones, el clima y el suelo rico en materia orgánica hacen de esta zona una de las más fértiles de toda la región. Es esencialmente una agricultura de subsistencia (agricultura familiar). Sin embargo, las tierras agrícolas están muy fragmentadas y los agricultores están viendo cómo sus tierras agrícolas se reducen drásticamente. Por lo tanto, la producción agrícola ya no es suficiente para satisfacer las necesidades de los agricultores/ganaderos que deben realizar otras actividades (conductores, ventas en las carreteras de productos procesados, ...) (Orzag V. com. pers., 2018). Además, debido al cambio climático, las lluvias y las sequías están cambiando y los rendimientos de los cultivos están disminuyendo (Gómez *et al.*, 2009).

- Actividades mineras

La minería es la actividad más contaminante. La actividad minera (estaño, zinc, oro, plata e incluso arsénico) dispersa metales pesados y altamente tóxicos en el medio ambiente (por ejemplo, el uso de mercurio para la separación de oro). La actividad minera (artesanal, informal, cooperativa) es la segunda industria extractiva más grande de Bolivia, después de los sectores de petróleo y gas. Esta actividad representa aproximadamente el 14% del PIB nacional y, con los hidrocarburos, el 75% de las exportaciones (Ocola Salazar & Laqui Vilca, 2017). En 2016, la industria minera representó el 26,71% de las exportaciones totales (IBCE, 2017). Para hacer frente a estos problemas de contaminación, el IRD y sus socios han establecido un programa de investigación llamado ToxBol para estudiar las fuentes de contaminación, los diferentes tipos de propagación y los diferentes impactos causados por la actividad minera sobre el medio ambiente y sus habitantes, así como para desarrollar bioindicadores (e.g., Molina *et al.*, 2008, Tomanova *et al.*, 2008, Moya *et al.*, 2009, Barbieri *et al.*, 2011, Moya *et al.*, 2011; Fontúrbel *et al.*, 2011; Molina *et al.*, 2012; Ruiz-Castell *et al.*, 2013).

Los sitios mineros alrededor del lago Titicaca están divididos en seis cuencas. Hay en total casi 562 sitios, pero solo 112 siguen activos. Los otros sitios han sido dejados al abandono cuando no se han cerrado correctamente (Ocola Salazar & Laqui Vilca, 2017).

Tabla 6 : Tabla de diferentes cuencas y sitios mineros en el territorio del lago Titicaca (Ocola Salazar & Laqui Vilca, 2017).

Cuenca	Número de sitios mineros (activos y pasivos)	Ríos principales	Importancia de los contaminantes
Crucero - Azangaro Noreste del Titicaca	132 sitios	Río Cecilia Río Azangaro Río Grande	Muy fuerte
Ayaniri-Pucara Norte del Titicaca	27 sitios	Río Pucana Río Viltamarca Río Suches	Débil
Coata Noroeste del Titicaca	247 sitios	Río Chacalaya Río Cotana Río Paratia Río Lemon Verde	Muy fuerte
Ilpa	70 sitios	Río Vilque Río Cayra	Insignificante
Ilava	30 sitios	Río Causillune Río Soracucho	Insignificante
Huancané	56 sitios	Río Ticana Río Choquena	Insignificante

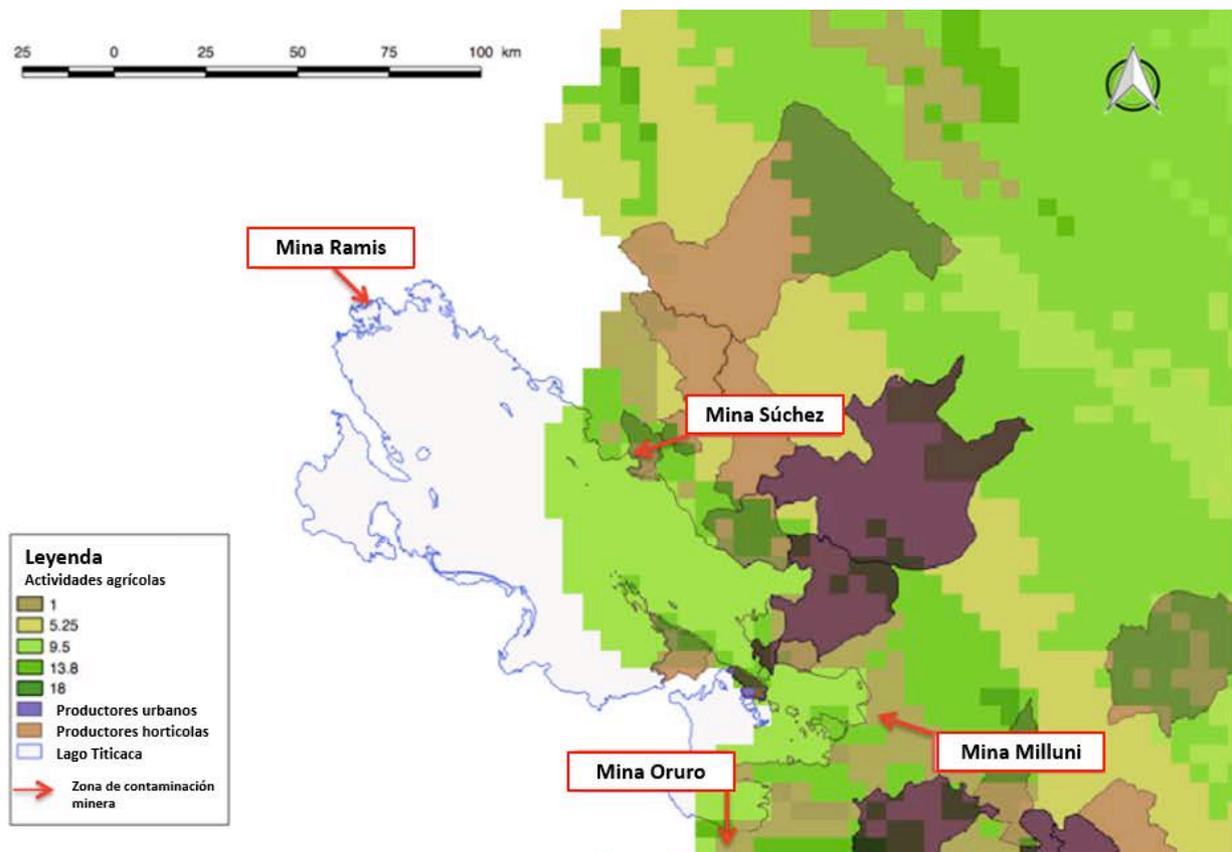


Figura 35 : Mapa de las actividades antrópicas alrededor del lago Titicaca (fuente: GeoVisor IIGEO / UMSA, datos ALT, modificado por MJ'Ecko, 2018).

II-Escenarios futuros

A- Introducción

Los escenarios son descripciones de posibles situaciones futuras. Son particularmente útiles en contextos de incertidumbre. Esquematizan situaciones probables, resultantes de interacciones predecibles entre los factores determinantes de un sistema. Según Firmenich-Bianchi (2015), los escenarios son declaraciones hipotéticas que deben mostrar una gama de opciones y situaciones probables. Se supone que no deben determinar la fecha exacta de los eventos, sino más bien las sucesiones probables entre ellos. Un escenario nunca ocurrirá como se anticipó, pero sugiere una secuencia probable, con el objetivo de aumentar la conciencia de quienes toman las decisiones. Por lo tanto, es una descripción de los eventos y tendencias que podrían ocurrir con alta probabilidad (Hoffmann & Requena, 2012).

Para la realización de nuestros escenarios, para la región del Altiplano, consideramos un aumento de la temperatura del aire entre 7 y 10 °C, del año 1850 (tiempo preindustrial) a 2100 (Hoffmann y Requena., 2012). La temperatura en el Altiplano ya ha aumentado en 1,5 °C desde la era industrial (Hoffmann y Requena, 2012). De hecho, según el trabajo de Bradley et al. (2004), revisado por Hoffmann & Weggenmann (2011) y Anthelme et al. (2014), se espera que el impacto del calentamiento global sea más intenso en las regiones de alta montaña tropical, como es el caso del Lago Titicaca (16 °S, 3.809 m snm) con un aumento de alrededor de 4,0 - 4,5 °C entre 2000 y 2080, lo que representa el doble del calentamiento promedio esperado para el planeta.

Tal aumento aumentaría la temperatura del agua del Lago Titicaca, unas variaciones de estacionalidad y unas condiciones áridas perjudiciales para el medio ambiente del lago. Para 2030, los cambios deberían ser de unos pocos grados e inducir variaciones cuantitativas de algunos parámetros, el nivel del agua del lago, por ejemplo. Después de 2060, la mayoría de los cambios serán cualitativos, transformando radicalmente el ecosistema. Por lo tanto, el Altiplano Nord, que ahora es una ecorregión semi-húmeda, podría transformarse en un ecosistema semiárido).

Los tres escenarios de eutrofización, el nivel del agua y la biodiversidad se eligieron con el objetivo de representar de manera más probable la evolución futura del sistema de agua TDPS (Titicaca, Desaguadero, Poopó y Salar de Coípassa) y el Lago Titicaca según nuestras dos áreas de estudio: el Lago Pequeño (o Huiñaimarca, es decir, pueblo eterno en Aymara) y la Bahía de Puno, principalmente la Bahía Interior.

El uso del software Worldclim (Miroc 5) - gracias al soporte técnico del ingeniero Carlos Ruiz Vásquez, físico del Vicerrectorado de Investigación de la UNAP, Puno - permitió simular cambios de temperatura y precipitación en 2050, tomando como referencia el año 2000. La simulación propone dos escenarios:

- Escenario GMC-26: Este es un escenario optimista que simula un aumento de temperatura promedio de 1,5 °C entre 2000 y 2050.
- Escenario GMC-85: este es un escenario pesimista que simula un aumento de temperatura promedio de 2,4 °C entre 2000 y 2050

Los resultados obtenidos por la simulación se presentan gráficamente a continuación:

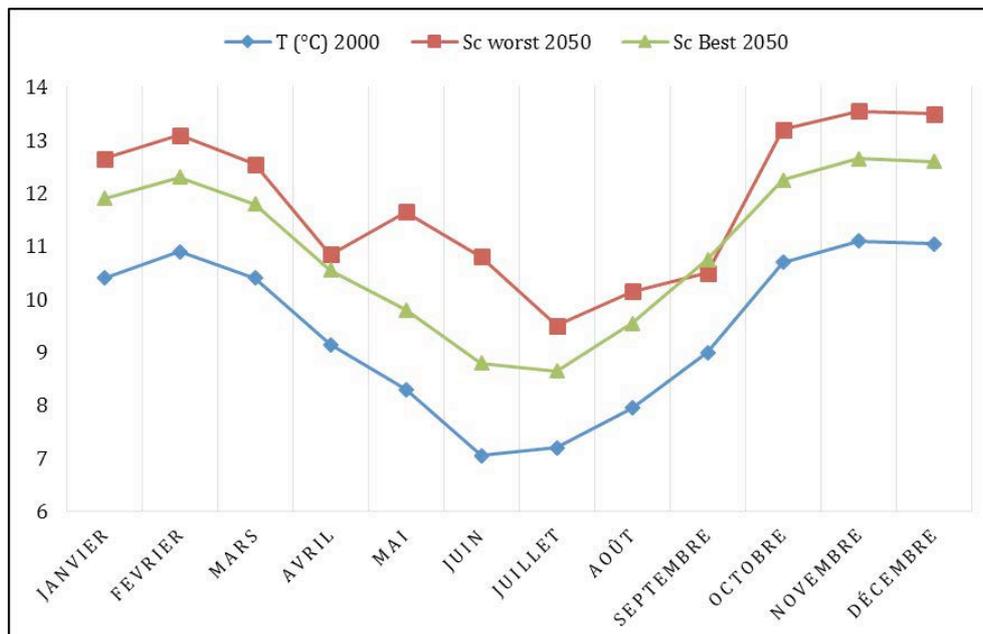


Figura 36 : Evolución de las temperaturas promedio del aire durante un año observado en 2000 y simulado en 2050, según un escenario pesimista (Scorest 2050) y otro optimista (Sc Best 2050) (modelado con la fórmula de Penman, ver apéndice 1) (MJ'Ecko, 2018).

Curva azul: Representa la evolución de las temperaturas promedio del aire durante el año 2000 (año de referencia). La temperatura máxima es de 11,1 °C en noviembre. La temperatura más baja en junio es de 7.05 °C. Se distinguen las dos estaciones tropicales: la estación seca (invierno) de abril a octubre, y la estación húmeda de octubre a marzo.

Curva verde: Representa la evolución de la temperatura simulada en 2050 para el escenario GMC-26 (Mejor). Se observa que la tendencia de la curva sigue la del año 2000 pero con un incremento promedio de la temperatura de 1,5 °C. La temperatura máxima se espera a unos 12,65 °C en noviembre y diciembre de 2050. Las dos estaciones se extienden a los mismos períodos que en 2000.

Curva roja: Representa la evolución de la temperatura simulada durante el año 2050 en el caso de un escenario GMC-85 (el peor). La temperatura máxima alcanza 13,55 °C en noviembre. La temperatura mínima llega a 9,5 °C en julio de 2050. Las dos estaciones son mucho menos marcadas (irregularidad estacional). En mayo (invierno), se observa un nuevo pico de temperatura.

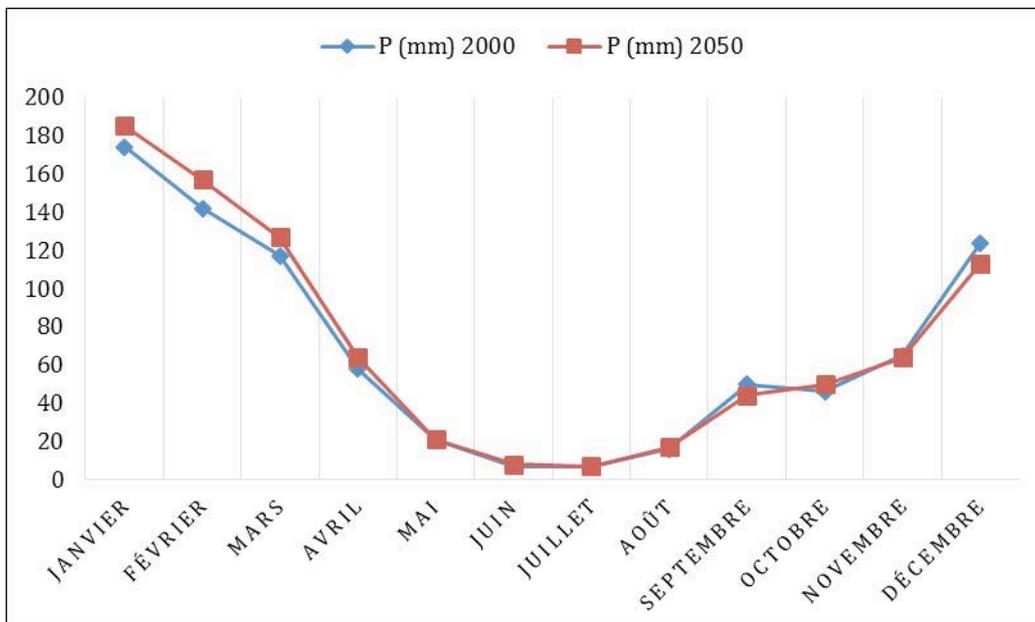


Figura 37 : Cambio anual de lluvia en 2000 y simulado en 2050 (modelado mediante la formula Penman, ver Anexo 1) (MJ'Ecko, 2018).

La curva azul representa la evolución de la precipitación en 2000 y la curva roja muestra la precipitación simulada en 2050. Se observa que las dos curvas se superponen a lo largo del año. Parecería, por lo tanto, que el ciclo de precipitación anual no se ve afectado por el cambio climático. Como en el caso de los pronósticos de temperatura, también se observa una estación seca de abril a octubre y una estación húmeda de octubre a marzo.

Hemos estimado la evolución de la evaporación del lago a partir de la evolución obtenida con Worldclim y la aplicación de la fórmula matemática de Penman (Pillco Zola R. et al., 2016) (ver Figura 39).

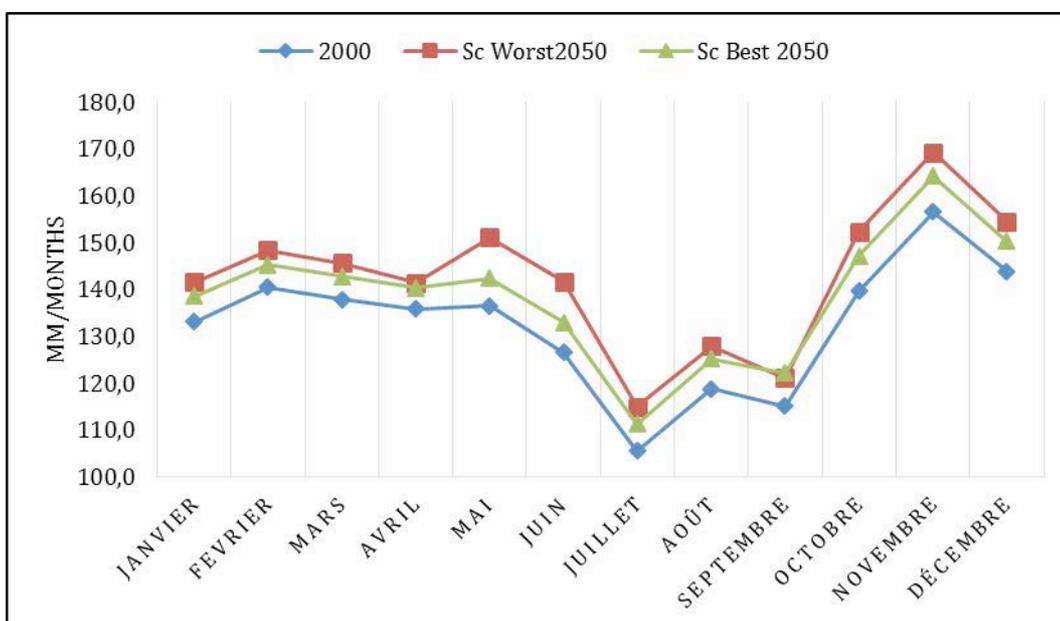


Figura 38 : Evolución anual de la evaporación del lago en 2000 y simulada en 2050 (modelada con la fórmula de Penman, ver Apéndice 1) (MJ'Ecko, 2018).

Curva azul: En 2000, la evaporación cambia entre un máximo de 156,5 mm en noviembre (inicio de la estación húmeda) y un mínimo de 105,6 mm en julio (estación seca). Sin embargo, esta evolución no permite definir claramente las dos estaciones.

Curva verde: Representa la evaporación simulada en 2050, según el escenario GMC-26. El patrón de evolución es similar al de 2000, pero con un aumento de evaporación promedio de 6 mm/mes.

Curva roja: Representa la evolución anual de la evaporación simulada en 2050, según el escenario GMC-85. El patrón de la curva es similar al de las dos curvas anteriores, pero con un aumento promedio de 10 mm en comparación con

2000. Sin embargo, la tasa de evaporación es más irregular que antes, con más oscilaciones en abril, mayo y septiembre.

Según estos resultados, el cambio climático provocaría en 2050:

- Un aumento de la temperatura y la evaporación del agua del lago, independientemente del escenario previsto.
- Una irregularidad estacional de la temperatura y evaporación para el escenario más pesimista (GMC-85).
- La precipitación seguiría siendo equivalente hasta el 2050.

Estos resultados solo dan una visibilidad a corto plazo sobre la evolución del clima futuro (2050). Un cambio climático más significativo podría ocurrir más tarde.

Se han identificado impactos antropogénicos y climáticos para seleccionar los parámetros más relevantes que influyen en el ecosistema del lago Titicaca. Los impactos antropogénicos nos permitieron presentar dos gradientes de acuerdo con el desarrollo humano y las decisiones y orientaciones políticas. **El gradiente -1 representa una visión pesimista:** no habría cambios en relación con la situación actual (política, ecológica, económica y social), mientras que **el gradiente +1 representa una visión optimista** del desarrollo de actividades que influyen en la El lago Titicaca, una dinámica sostenible y amigable con el medio ambiente para actividades socioeconómicas, una mejor gestión integrada del lago y de las políticas, normas y regulaciones.

Tabla 7 : Presentas los efectos de los gradientes optimistas y pesimistas de las actividades humanas (MJ'Ecko, 2018).

Gradiente -1	Gradiente +1
No hay plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).	Construcción de las 13 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en la Cuenca Katari, planificadas a tiempo (12 a 18 meses).
Crecimiento poblacional > 2%. Expansión incontrolada de la ciudad hacia al lago.	Crecimiento poblacional < 2%. Expansión controlada por la Alcaldía de El Alto.
No hay nuevos sistemas de saneamiento.	Desarrollo de la red de saneamiento de El Alto, conexión a las plantas de tratamiento incluyendo la extensión de la planta de Puchukollo.
Malas prácticas mineras, no hay reciclaje de residuos.	Control y recuperación de los residuos mineros.
Sobrepesca, no respeto por los periodos de reproducción, pesca de juveniles. Duplicación de la producción actual de truchas (40 000 t/año), alimentadas con harina de <i>Orestias</i> .	Pesca controlada, respeto de los periodos de reproducción, cupos (cantidad), malla (tamaño). Aplicación de las leyes y reglamentos. No hay aumento en la piscicultura, mejor nutrición.
No hay concientización social sobre la conservación del ecosistema.	Sensibilización general (colegios, alcaldías, empresas ...).
Agricultura intensiva, sobreexplotación de tierras cultivables y riego no controlado.	Disminución del uso de químicos, agricultura orgánica, valorización de especies locales, cooperativas, riego controlado.
Ganadería sin manejo de residuos orgánicos, pastoreo excesivo.	Valorización de residuos orgánicos y especies locales y manejo del pastoreo .
A corto plazo: turismo de masas. A largo plazo: Desaparición del turismo.	Ecoturismo (eco lodges), turismo comunitario, cumplimiento de cuotas.
Ninguna o poca aplicación de las leyes y reglamentos. No hay cambios en las regulaciones, acciones políticas y planes de seguimiento. Ninguna anticipación de riesgos (sistemas de alerta temprana), ni plan de acción en caso de eventos extremos.	Aplicación y evolución de las leyes y regulaciones sobre el medio ambiente, actividades humanas, planes urbanos. Transparencia en el uso del dinero público.
Dstrucción de los bofedales y totorales.	Protección de bofedales y totorales. Creación de depósitos de recuperación de agua de deshielo. Creación de un parque natural para la protección de la biodiversidad y los paisajes en la región litoral del Lago Menor.
Intensificación del éxodo rural. Disminución de los rendimientos agrícolas y ganaderos. Pérdida de conocimiento sobre sistemas agropastorales.	Creación de una dinámica económica sostenible alrededor del lago y descentralización de los servicios públicos.
CONCLUSIÓN <ul style="list-style-type: none"> → Intensificación de los aportes de nutrientes de nitrógeno y fósforo: eutrofización (riesgo de recurrencia de floraciones). → Urbanización anárquica. → Mayor contaminación. → Baja biodiversidad (fauna y flora). → Disminución del atractivo económico (turismo, piscicultura, agricultura) y desaparición de ciertas profesiones. → Proliferación de elementos patógenos. 	CONCLUSIÓN <ul style="list-style-type: none"> → Estabilidad ecológica (resiliencia) del lago. → Urbanización controlada y limitada. → Mejor gestión de las actividades humanas. → Desarrollo económico sostenible (turismo, pesca, agricultura, piscicultura). → Calidad de vida mejorada.

B- Nivel del agua

El nivel de agua del lago Titicaca está influenciado naturalmente por el balance hídrico, que es la diferencia entre las entradas (precipitación en el lago y la cuenca, afluentes y deshielo de glaciares) y las pérdidas (evaporación, salida a nivel del río Desaguadero, infiltración). Las pérdidas por Desaguadero (<10%) se consideran despreciables. De hecho, los afluentes corresponden al 44,37% de los aportes de agua (con 210 m³/s) y las aguas subterráneas a solo 0,13%. Las mayores pérdidas se deben a la evaporación, estimada en un promedio de 436 m³/s, o 93,93%, y la escorrentía del río Desaguadero, donde se pierde un promedio de 35 m³/s, o 4,83% (PNUMA, 2011).

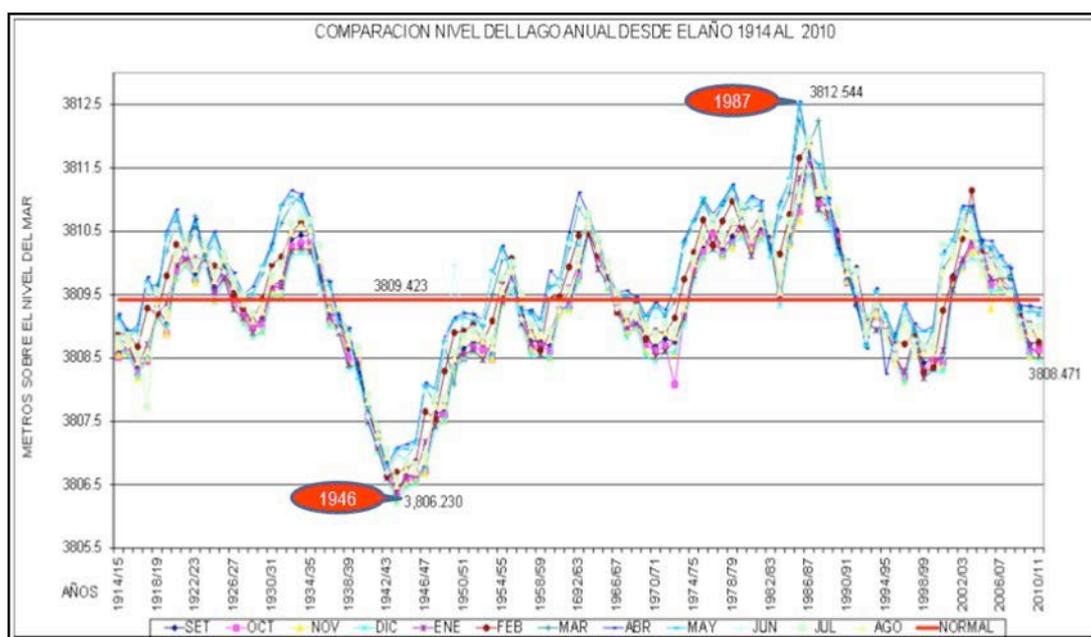


Figura 39 : Evolución mensual del nivel del lago Titicaca entre 1914-2010 (ALT, 2016).

Gracias a las curvas de evolución del nivel del agua entendemos que el lago sigue un ciclo, una dinámica que se repite. Pero debido al cambio climático y al aumento de temperatura esperado entre 7 y 10 °C para 2100 (Hoffmann & Requena, 2012), se espera que la evaporación y el riesgo de sequía sean cada vez más fuertes. (Ver Figura 39: Evolución de la evaporación anual del lago en 2000 y simulada en 2050) y la precipitación cada vez menos, lo que podría interrumpir este ciclo.

Además, en los Andes centrales, el derretimiento de los glaciares es una consecuencia directa del aumento de las temperaturas. El aumento de las temperaturas provoca más lluvia (en lugar de nieve) en los glaciares, lo que aumenta la absorción de energía solar a medida que disminuye el albedo, lo que lleva a una aceleración del derretimiento del hielo (Herzog et al. al., 2011). En *Cambio Climático: Evidencia y Escenarios Futuros para la Región Andina*, Herzog y sus colegas determinaron una breve historia del estado de los glaciares bolivianos:

- Entre 1991 y 2002, el glaciar Zongo perdió el 9,4% de su área cubierta de nieve.
- Entre 1940 y 2003, el glaciar Charquini perdió el 47,4% de su área cubierta de nieve.
- Entre 1963 y 2006: un análisis aéreo de 21 glaciares de la Cordillera Real mostró que en promedio los glaciares han perdido el 43% de su volumen y el 48% de su área (especialmente entre 1975 y 2006).

Más recientemente, Rabatel et al. (2013) han demostrado que durante las últimas 3 décadas, el retroceso de los glaciares en los Andes tropicales no ha tenido ningún equivalente desde la extensión máxima de la Pequeña Edad de Hielo, desde mediados del siglo XVII hasta principios del siglo XVIII. La regresión de los glaciares en los Andes tropicales es mucho más pronunciada en los pequeños glaciares de baja altitud que pueden desaparecer en pocos años. La variabilidad de la temperatura superficial del océano Pacífico sería el factor principal que controla la variabilidad del balance de masa del glaciar en la escala de 10 años. Vuille et al. (2018) revelan que el retroceso de los glaciares en los Andes tropicales provoca un aumento temporal en el suministro de agua río abajo durante la estación seca, pero una reducción en los flujos a largo plazo.

El agua de los glaciares representa el 5% de los aportes hídricos al lago Titicaca. Su desaparición tendría graves consecuencias en el suministro de agua provisto por los bofedales (turberas de gran altitud de los Andes tropicales), especialmente durante la estación seca (Hoffmann y Requena, 2012). De hecho, el papel de los bofedales es esencial porque durante la estación seca mitigan las pérdidas de agua debido a la evaporación. Juegan un papel importante en el control del flujo de los afluentes que fluyen hacia el lago. Se alimentan principalmente de glaciares que se derriten. Si la afluencia de agua del glaciar desaparece, el ciclo del agua y el equilibrio natural del lago pueden alterarse. Por lo tanto, la regresión de los glaciares causaría un corto período de intensificación de los flujos tributarios debido al derretimiento del hielo, seguido de una gran sequía (Hoffmann y Requena, 2012, Rabatel et al., 2013). Además, los bofedales son áreas de pastoreo y, por lo tanto, están sujetos a fuertes presiones durante todo el año. Si se encuentran demasiado dañados o incluso destruidos por el pastoreo excesivo, se modificará el flujo de agua que fluye hacia el lago (Quenta et al., 2017).

Además, las actividades antropogénicas, como el riego para la agricultura y la destrucción de bofedales por el ganado, podrían llevar a una disminución acelerada en el nivel del Lago y alterar la disponibilidad de agua para el consumo humano y agrícola.

En 2014, el BID (Banco Interamericano de Desarrollo) produjo 2 escenarios (basados en escenarios del IPCC), A2 y B2, en los cuales nos basaremos para explicar un posible cambio en la disponibilidad y demanda de agua para 2100. Para obtener estas proyecciones futuras, los modelos climáticos están sujetos a diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero y a diferentes grados de desarrollo social y económico compatibles con estas emisiones.

A2: Crecimientos demográfico y regional apoyados (es decir, idénticos al actual o incluso mayor) con una concentración de CO₂ de 850 ppm (partes por millón) para 2100.

B2: Menor crecimiento de la población, desarrollo económico moderado y una concentración de CO₂ de 600 ppm.

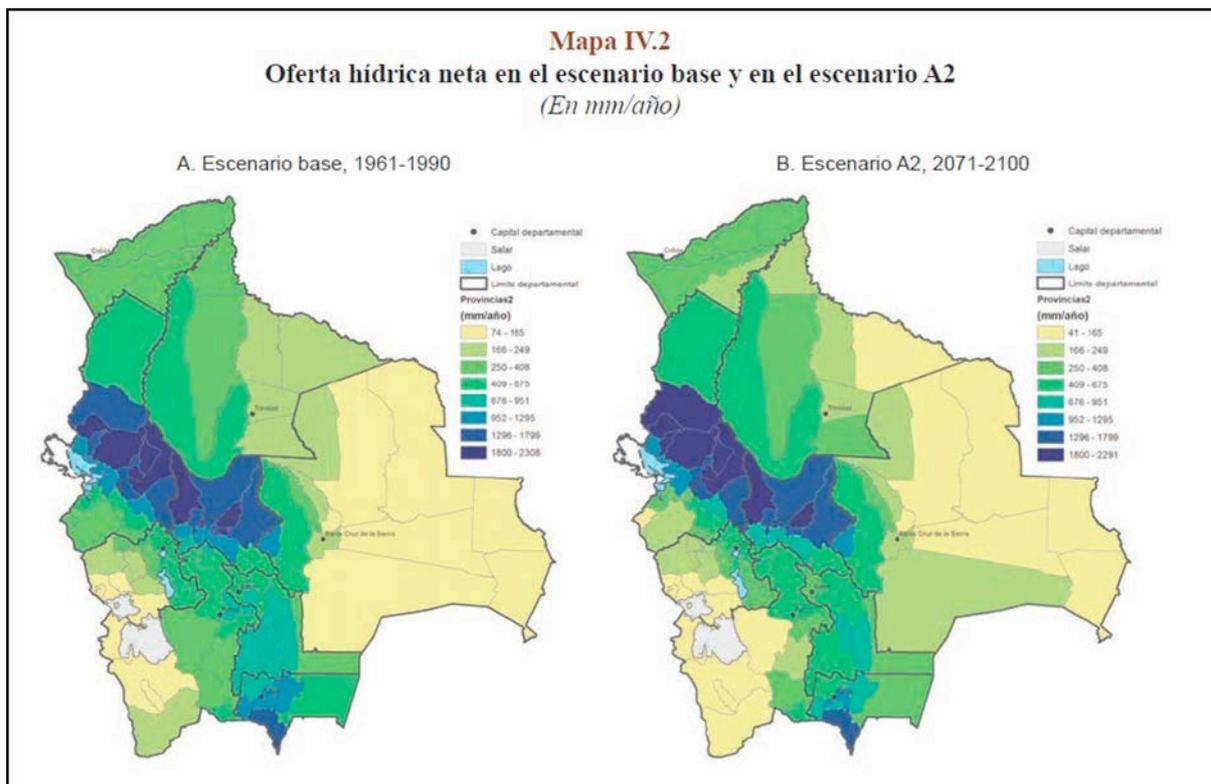


Figura 40 : Disponibilidad de agua en Bolivia, A) base: 1961 - 1990 y B) proyección del escenario A2 para el período 2071 - 2100 (BID, 2014).

De estos mapas se puede concluir que la disponibilidad futura de agua en la región del Altiplano boliviano puede ser relativamente idéntica a la del período 1961-1990, es decir, entre 676 y 1295 mm por año.

de la vegetación, debido a la aridez, y la fuerte evapotranspiración impidan que la población aproveche los cortos períodos de lluvia. El efecto beneficioso del poder humidificador del Lago Titicaca disminuiría considerablemente, ya que se habría dividido en dos cuerpos de agua más pequeños y menos profundos (Hoffmann y Requena, 2012). El clima árido que se impondría rápidamente en la región solo permitiría que los pequeños organismos acuáticos con tiempos de generación cortos (fitoplancton, zooplancton, invertebrados) se adapten al nuevo entorno (BID, 2014).

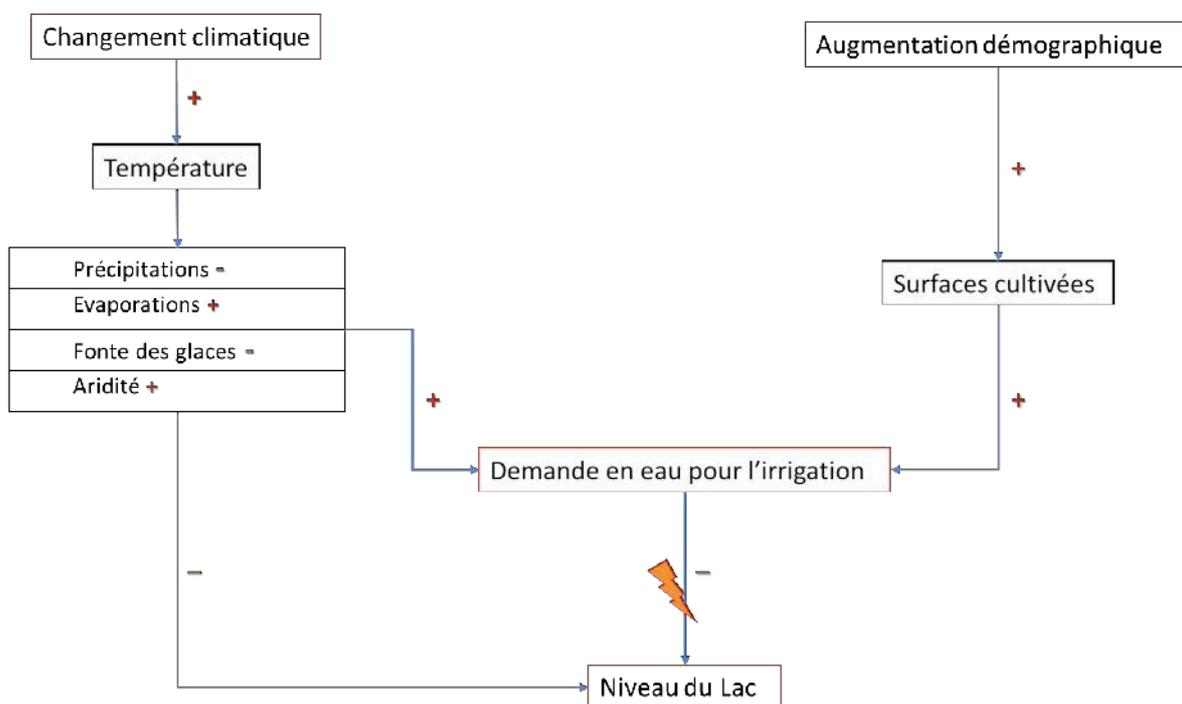


Figura 42 : Diagrama del conflicto potencial creado por la disminución del nivel del agua y el aumento de la demanda en este recurso (MJ'Ecko, 2018).

Las variaciones naturales en el nivel del agua nos permiten formular la hipótesis de disminución en el nivel del agua del lago. La evaluación de la evolución del nivel no es confiable y requiere más estudios. Sin embargo, es probable que aumente la demanda hídrica. Estas dos hipótesis resaltan un conflicto potencial entre un recurso que será cada vez más raro y, al mismo tiempo, cada vez más necesario y solicitado.

Recomendaciones:

- Prevenir las pérdidas debidas a la variabilidad de la lluvia: implementar sistemas de riego eficientes frente a la lluvia extrema y la sequía (por ejemplo, el sistema de goteo); controlar la deforestación para no intensificar los problemas de inundación en las tierras bajas.
- Establecer una organización territorial y la gestión de la migración interna para limitar el número de personas que viven en áreas vulnerables frente a los fenómenos climáticos y posibles conflictos por recursos vitales (como el agua y los suelos fértiles).
- Reducir la contaminación de los recursos hídricos y recuperar las aguas residuales de las plantas de tratamiento para el riego.

C- Eutrofización y calidad de agua

La eutrofización es un fenómeno inducido por causas naturales, climáticas o antropogénicas. El aumento de la temperatura, el suministro excesivo de nutrientes, la radiación solar y una mezcla débil de la columna de agua son factores favorables para la aparición del fenómeno de la eutrofización, lo que genera a través de la fotosíntesis una proliferación excesiva de algas. Todas las condiciones inducidas por la eutrofización contribuyen al agotamiento del medio de oxígeno y la liberación de gases malolientes (sulfuro de hidrógeno, amoníaco, metano) que causan la muerte de muchas especies. Durante la senescencia del fitoplancton, las algas muertas que sedimentan en el fondo generan materia orgánica adicional, amplificando así el fenómeno (INRA et al, 2017).

En el caso del Lago Menor del Titicaca, los mecanismos de eutrofización se explican claramente en una animación 3D realizada por Darío Achá y Cecilia Pabón (Problemática del Lago Menor del Titicaca, https://www.youtube.com/watch?v=poH_l6T5jX4). Durante este proceso, las bacterias reductoras de sulfato producen sulfuro de hidrógeno (H₂S), un potente neurotóxico, además de agotar la columna de agua en oxígeno disuelto (ya agotado en un 30% en relación al nivel del mar, por la baja concentración debido a la altitud), liderada en abril-mayo de 2015, durante la proliferación (floración) de una especie de fitoplancton de algas verdes (*Carteria* sp.), una mortalidad masiva de peces, ranas gigantes y aves acuáticas.

Hablamos de "eutrofización cultural" cuando los humanos aceleran el proceso de eutrofización al permitir que cantidades excesivas de nutrientes en forma de aguas residuales, detergentes y fertilizantes entren en un sistema de agua (mar, lago, estanque) (Lenntech, 2018). En el lago Titicaca, este es el caso de zonas litorales poco profundas, como la Bahía de Cohana en Bolivia y la Bahía de Puno en el Perú.

La eutrofización de un ecosistema está influenciada principalmente por la biomasa del fitoplancton y la concentración de nutrientes (fósforo y nitrógeno). Estas variables son los principales factores tomados en cuenta para la construcción de este escenario. Finalmente, se seleccionaron algunos parámetros de los gradientes -1 y +1 de los impactos antropogénicos fueron conservados de acuerdo con su influencia en la calidad del agua.

1) La concentración en clorofila-a, estimada por la sonda FluoroProbe BBE

La clorofila-a es el principal pigmento fotosintético de las algas. Se considera como un proxy para la biomasa de fitoplancton presente en la columna de agua. Con las partículas minerales en suspensión, contribuye a la turbidez del agua. Cuantos más aportes de nutrientes (nitrógeno y fósforo) son importantes, más el ecosistema se vuelve propicio para el desarrollo del fitoplancton (INRA et al., 2017). La biomasa de fitoplancton no está necesariamente correlacionada con las concentraciones de nutrientes. De hecho, en sistemas ecológicamente eficaces, el fitoplancton utiliza todos los nutrientes disponibles. El fitoplancton se desarrolla hasta limitarse por la atenuación de la penetración de la radiación solar que causa su importante biomasa en la superficie. Demasiada biomasa de fitoplancton representa un riesgo de eutrofización del medio ambiente acuático y puede, en los casos más extremos, provocar una floración y mortalidad de organismos.

La concentración de clorofila-a se puede medir después de la filtración en un filtro de fibra de vidrio Whatman GF/F (porosidad 0,7 µm) mediante extracción con varios disolventes, incluidos acetona, etanol, metanol, cloroformo, metanol, entre otros, luego lectura mediante un espectrofotómetro a 665 nm, o por el método de HPLC (cromatografía líquida con alta resolución). También se puede estimar (en µg/L) *in situ* mediante fluorescencia *in vivo* usando un fluorímetro de campo sumergible, como la sonda BBE FluoroProbe (Moldaenke, Alemania) capaz de identificar la fluorescencia de 4 clases de fitoplancton: Clorofíceas, Diatomeas-Dinoflagelados, Criptofíceas y Cianobacterias.

La cantidad de clorofila-a es un factor que puede prevenir y anticipar una posible floración, debido al exceso de nutrientes y fitoplancton en el lago, cuyas causas pueden ser dramáticas para el equilibrio del sistema acuático y la calidad. agua.

El cambio climático y las actividades antropogénicas influyen en este parámetro.

a) El Lago Menor

Generalmente en el lago Menor, hay muy poco fitoplancton en el primer metro de la columna de agua. De hecho, a medida que la radiación solar ultravioleta penetra profundamente (alrededor de 1 m para UV-B y 3 m para UV-A), el fitoplancton, que se hunde para protegerse, es escaso en el primer metro de la columna de agua. En general, las algas verdes predominan en áreas poco profundas y diatomeas más bien cerca del fondo. El entorno de la estación de muestreo influye en la presencia y cantidad de fitoplancton.

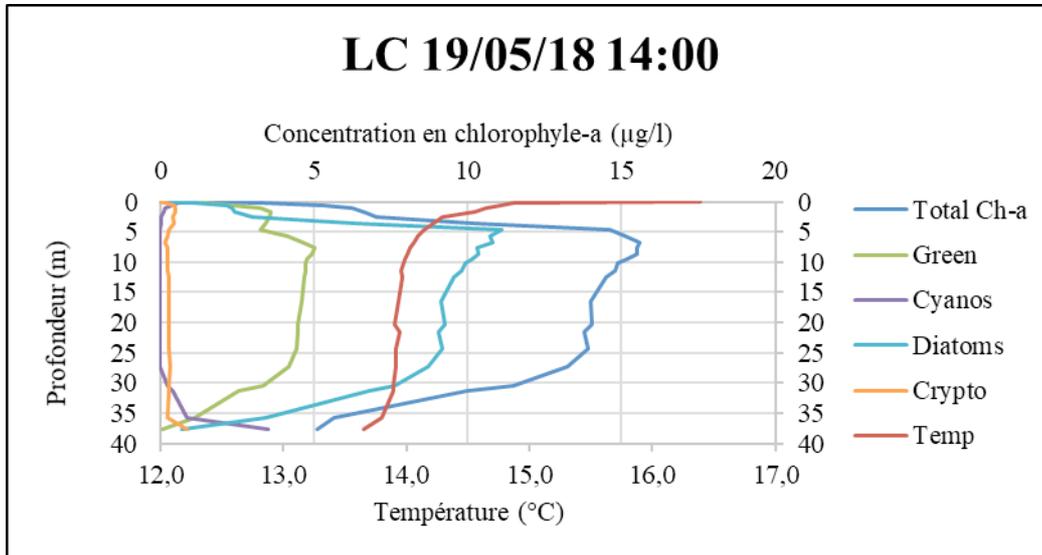


Figura 43 : Estación de muestreo, Fosa de Chúa, la estación más profunda del Lago Menor (MJ'Ecko, 2018).

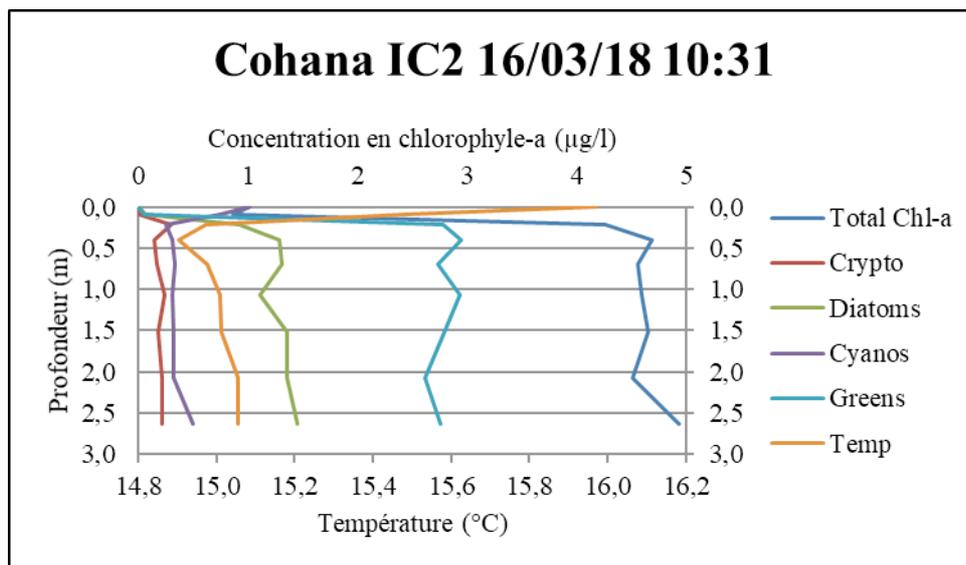


Figura 44 : Estación de muestreo en la entrada de Bahía Cohana (Lazzaro, 2018).

b) Bahía interior de Puno (BIP)

Puno es una ciudad que cerca el Lago Mayor del Titicaca en el lado peruano oeste. Existe la bahía exterior de Puno (BEP) y la bahía interior de Puno (BIP). Están separados por una importante pradera de totoras (= totoral) cuyas capacidades de bio-remediación son esenciales. La Bahía Interior de Puno es poco profunda y está contaminada por las descargas de la única planta de tratamiento de aguas residuales (Espinar) en la ciudad que se colapso hace unos años. Las macrófitas acuáticas (totora, chara) están ausentes a lo largo de la litoral de Puno y la concentración de clorofila-a es muy alta ($> 100 \text{ eq. } \mu\text{g/L}$, en julio de 2018 en frente de Espinar). O sea, casi constantemente al borde de desencadenar una floración. Es una bahía casi cerrada y la renovación del agua es muy débil. Puno representa un peligro real para el lago. Es una de las únicas ciudades principales que bordean una zona poco profunda del lago sin la protección de un humedal acorde con macrófitas acuáticas. Entonces, las consecuencias sobre el ecosistema son graves. Por lo tanto, es esencial que una ciudad como El Alto nunca llegue al borde del Lago Menor.

2) Emisiones de nitrógeno y fósforo de origen animal y humano, según la evolución de la demografía de las ciudades de El Alto y Puno

a) Cantidades de nitrógeno y fósforo emitidas por las poblaciones de El Alto y de Puno

a.1- El Alto

En 2018, se estima la población de El Alto en 922,000 habitantes (INE, 2018).

Para una población de 922,000 habitantes, los equivalentes de población (o Eq./Hab.) de IFREMER (2018) permiten estimar las siguientes descargas de nitrógeno y fósforo:

Tabla 8 : Emisiones estimadas de nitrógeno y fósforo para una población de 922,000 (MJ'Ecko, 2018).

Emisión por persona/día	Emisión por persona/año	Emisión anula de la población
15 g N/pers./día	5,475 kg N/pers./año	5 048 t N/año
4 g P/pers./día	1,460 kg P/pers./año	1 346 t P/año

Las emisiones anuales de nitrógeno y fósforo de la población de El Alto serían, por lo tanto, de 5.048 t N/año y 1.326 t P/año, respectivamente.

Sin embargo, una pequeña fracción de estas aguas residuales (proveniente del distrito del Aeropuerto Internacional de El Alto) es tratada por la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Puchukollo (capacidad para 500,000 habitantes) que se construyó en 1998 cuando El Alto aún no existía y era solo un suburbio de La Paz alrededor del aeropuerto. La mayoría se libera sin tratar directamente al Lago Menor por varios afluentes. El ing. Alfredo Mamani Salinas, ex-presidente de la ALT (Autoridad Binacional del Lago Titicaca), informó en 2015 que el 80% de las aguas residuales del municipio de El Alto terminaban directamente en el Lago Menor.

Así, las emisiones humanas de nitrógeno y fósforo que llegan al lago se evalúan en:

$80\% \times 5\,048 \text{ t N/año} = 4\,038$ toneladas de nitrógeno por año.

$80\% \times 1\,346 \text{ t P/año} = 1\,076$ toneladas de fósforo por año.

Sin embargo, el aumento en la población se estima entre 2 y 3% por año (INE, 2018). Esta cifra tiene consecuencias que podrían ser dramáticas si no se controla la expansión de la ciudad, lo que puede hacer que el Lago Menor pase de estado oligo-mesotrófico a eutrófico. La población aumentaría respectivamente hasta 1 291 860 – 1 524 914 habitantes en 2035 y 2 119 433 – 3 192 831 habitantes en 2060. En 2035, se observaría un aumento del 40% en las descargas de nitrógeno y fósforo de la población del Municipio de El Alto (en comparación con 2018), alcanzando más de 7 073 – 8 349 toneladas de descarga de nitrógeno/año y más de 1 886 – 2 226 toneladas de liberación de fósforo/año. Para el año 2060, la población se duplicaría o triplicaría, con liberaciones que alcanzarían 11 604 – 17 481 toneladas de descarga de nitrógeno/año y 3 094 – 4 662 toneladas de descarga de fósforo/año. Las consecuencias serían dramáticas e irreversibles, haciendo que el lago sea totalmente eutrófico.

Sin embargo, esta situación desastrosa no debe alcanzarse, ya que actualmente existe un programa de financiamiento significativo del BID – Banco Interamericano de Desarrollo, la UE – Unión Europea y la AFD – Agencia Francesa de Desarrollo (que en total asciende a aproximadamente US\$ 200 millones) para la extensión de la capacidad de la planta de tratamiento de aguas residuales de Puchukollo con su conexión a la red de saneamiento de El Alto, así como la construcción de 13 plantas de tratamiento adicionales a lo largo de la cuenca Katari. Estas PTAR (Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales) podrían entrar en servicio en los próximos 2 años. Pero, probablemente tardarían más de 5 años en producir efectos beneficiosos significativos, dado el tiempo de degradación-mineralización de la considerable cantidad de materia orgánica, nutrientes y contaminantes acumulados en la cuenca y bahía Cohana, durante varias

décadas. Paralelamente, el programa binacional GIRH TDPS del PNUD/GEF⁵ ha lanzando 11 proyectos piloto (6 en el Perú y 5 en Bolivia) durante los próximos tres años (2019-2021). En Bolivia, el proyecto 07-B-02 ‘Fitorremediación basada en totoras’ testará el poder depurador de las totoras en islas flotantes en el litoral de Huatajata y en humedales en la Cuenca Katari; mientras que el proyecto 05-B-05 ‘Observatorio permanente’ implementará un monitoreo de calidad del agua del Lago Menor (regiones norte, central y Bahía Cohana) con un componente de alta frecuencia (boya hidro-meteorológica) y una calibración de la concentración en clorofila-*a* estimada por los satélites Landsat y Sentinel mediante una medición de la fluorescencia *in vivo* de la clorofila-*a* con una sonda FluoroProbe BBE y de firmas espectrales con un espectro-radiómetro Handheld2 (IIGEO/UMSA).

a.2- Puno

INEI (2018) estima la población en 147 397 habitantes.

Tabla 9 : Emisiones estimadas de nitrógeno y fósforo para una población de 147,397 (MJ'Ecko, 2018).

Emisión por persona/día	Emisión por persona/año	Emisión anual de la población
15 g N/pers./día	5,475 kg N/pers./año	807 t N/año
4 g P/pers./día	1,460 kg P/pers./año	215 t P/año

Las emisiones anuales de nitrógeno y fósforo de la población de Puno serían, por lo tanto, de 688 t N/año y 183 t P/año, respectivamente.

Por lo tanto, las descargas de nitrógeno y fósforo a las aguas del lago (80% de las descargas) se estiman en:

$$80\% \times 807 \text{ t N/año} = 646 \text{ toneladas de nitrógeno por año}$$

$$80\% \times 215 \text{ t P/año} = 172 \text{ toneladas de fósforo por año}$$

Por lo tanto, es urgente conectar todas las habitaciones en la región del Lago Titicaca (pueblos y aldeas) a un sistema efectivo de tratamiento de agua. Esto mitigaría los efectos adversos del ingreso excesivo de nutrientes (nitrógeno y fósforo) al lago.

Si se estima que la tasa de crecimiento anual de la población de El Alto se mantiene alrededor del 2% (INE, 2018), podríamos ver las emisiones de nitrógeno y fósforo de la población duplicarse desde hacia 2053 (en 35 años). Mientras tanto, es esencial que se tomen medidas para limitar la llegada de las emisiones orgánicas humanas al lago.

⁵ Programa binacional de Gestión Integral de Recursos Hídricos del sistema hídrico del Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coípasa, financiado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF, por su sigla en inglés) mediante el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP, por sus siglas en inglés).

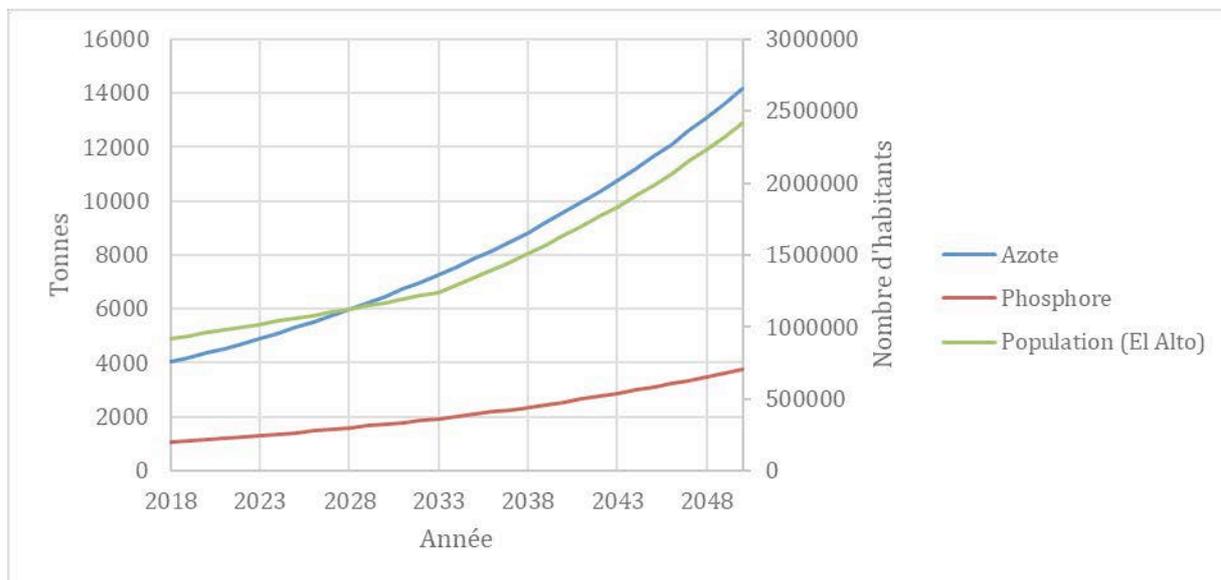


Figura 45 : Evolución de las descargas anuales de nitrógeno (en azul) y fósforo (en rojo) por las aguas residuales de El Alto en el caso de un crecimiento poblacional anual (en verde) del 2% (MJ'Ecko, 2018).

b) Cantidad de nitrógeno emitido por la ganadería de los municipios de El Alto y Puno

b.1- El Alto

El rebaño de ganado del municipio de El Alto se estima en 155 106 cabezas (INE, 2014), de las cuales 9 609 cabezas en la Bahía de Cohana en un área de 8 372 km² (INE, 2018). La liberación de nitrógeno por el ganado se estima en 100 kg de nitrógeno/año (Peyraud et al., 1995) y de fósforo en 18,4 kg de fósforo/año (Bachand, 1999).

Tabla 10 : Emisiones estimadas de nitrógeno y fósforo por 155 106 bovinos (MJ'Ecko, 2018).

Emisión por bovino/año	Emisión anual del rebaño de ganado
100 kg N/año	15 511 t N/año
18,4 kg P/año	2 854 t P/año

Sin embargo, estas descargas no se encuentran directamente en el lago. Algunas son utilizadas y valoradas como fertilizante para la agricultura familiar.

Sin embargo, el aumento en la población, estimado en 2% anual (INE, 2018), llevaría a un aumento en los rebaños de ganado para satisfacer la demanda de toda la población del municipio de El Alto. Por lo tanto, esto llevaría a un aumento en los nutrientes de nitrógeno y fósforo liberados por el ganado en el lago en proporción del aumento de la población humana.

Por lo tanto, ahora es necesario valorizar los residuos orgánicos emitidos por el ganado para la agricultura en particular.

b.2- Puno

El rebaño de ganado del Municipio de Puno se estima en 547 bovinos y 3 111 ovinos (INEI, 1994). La liberación de nitrógeno y fósforo por bovino se estima en 100 kg de nitrógeno/año (Peyraud et al., 1995) y 18,4 kg de fósforo/año (Bachand, 1999). La descarga de nitrógeno y fósforo por oveja se estima en 13,4 kg de nitrógeno/año y 6 kg de fósforo/año (CRAAQ, 2003).

Tabla 11 : Emisiones estimadas de nitrógeno y fósforo para un rebaño de ganado de 547 bovinos y 3 111 ovejas (MJ'Ecko, 2018).

Emisión por bovino/año	Emisión par ovino/año	Emisión anual del rebaño
100 kg N/bovino/año	13,4 kg N/ovino/año	96 t N/año
18,4 kg P/bovino/año	6 kg P/ovino/año	29 t P/año

Como: el peso molar de N = 14 g y el peso molar de P = 31 g

Por lo tanto, la relación molar de los aportes es = $96/14 : 29/31 = 6,9 : 0,9 = 7,7 : 1$

Pero la razón de Redfield o estequiometría de Redfield para la relación N: P del fitoplancton al equilibrio en los océanos profundos es = 16 : 1. Así, la razón 7,7: 1 siendo inferior a la razón 16 : 1, sugiere que los aportes de nutrientes del rebaño serían bastante limitados en nitrógeno en relación al fósforo. Esto podría favorecer el predominio de las cianobacterias (de las cuales algunas especies son capaces de capturar el nitrógeno atmosférico) en ambientes eutróficos.

Las consecuencias indeseables de los aportes de nitrógeno y fósforo en el medio ambiente y las soluciones que existen:

Consecuencias:

- Proliferación del fitoplancton, especialmente Cloroficea (algas verdes) y/o Dinoflagelados (por ejemplo, *Ceratium*), luego Cianobacterias cuando las biomásas son más altas. Últimamente, con posibles floraciones.
- Aceleración de la eutrofización: Aumento de las concentraciones de clorofila-*a* del fitoplancton > 10 µg/L y atenuación de la penetración vertical de la radiación solar visible (PAR) incidente en la columna de agua, lo que resulta en la degradación de las macrófitas acuáticas sumergidas (*Chara*). Reducción de la concentración de oxígeno disuelto, hasta la anoxia (ausencia de oxígeno) en las zonas más profundas). Aumento del pH > 8, lo que produce una fuga de las comunidades de peces. Desarrollo del perifitón cubriendo las macrófitas, especialmente en los tallos de *Totora*, atenuando su fotosíntesis y acelerando su degradación.
- Pérdida de hábitats, en particular las praderas de macrófitas acuáticas emergentes (*Totora*) y sumergidas (*Chara*) en las zonas litorales poco profundas (relacionadas con la artificialización del litoral por los residentes que ganan terreno en el lago) indispensables para la alimentación, la reproducción y como refugios de los peces contra los depredadores. Pero también, para las aves acuáticas que anidan y se alimentan en estas áreas.
- Modificación de la diversidad biológica, en particular por amenazas a varias especies endémicas en peligro de extinción, entre los peces como los karachi (*Orestias juteus*), mauri (*Trichomycterus dispar*) y suche (*T. rivulatus*), las aves acuáticas como el zampullin o keñola (*Rollandia microptera*) y los anfibios como la famosa rana gigante (*Telmatobius culeus*).
- Aumento de los riesgos para la salud humana: proliferación de coliformes fecales y otros vectores de enfermedades.
- Alteración de las cualidades estéticas: El lago cambia de color de azul profundo a verde (Cloroficeas), marrón (Dinoflagelados). Las macrófitas filamentosas proliferan y cubren las Charas del fondo. Los tallos de las Totoras se vuelven negros, son frágiles y curvos. La macrófita flotante, *Lemna*, puede cubrir la superficie. Podría aparecer espuma. La transparencia del agua se reduce.
- Contaminación de fuentes de suministro de agua.
- Intensificación de la erosión, aumentando así la suspensión de contaminantes, y también materia orgánica, nutrientes y aumento de la turbidez.

Soluciones, recomendaciones:

- Operación adecuada de las fosas sépticas y las plantas de tratamiento (con nuevas estaciones en servicio a lo largo de la Cuenca Katari).

- Plantas de tratamiento completas con humedales de macrófitas acuáticas para mejorar la retención de nutrientes y algunos contaminantes.
- Mejor uso (parsimonioso) de fertilizantes y pesticidas para la agricultura.
- Preservar las macrófitas acuáticas litorales (Totorá, Chara) por su papel como filtro biológico natural de los nutrientes y contaminantes, los árboles y toda la vegetación, incluidas las plantas ribereñas nativas con la capacidad de controlar la erosión del suelo.
- Mantener el estado natural de los bancos, evitar la artificialización de los bancos, minimizando el uso de fertilizantes y pesticidas, y limitando las actividades antropogénicas que son demasiado contaminantes.
- Preservar y reforzar la franja costera de macrófitas acuáticas (Totorá).
- Retener las aguas de lluvia (pluviales) y evitar su ingreso al lago, la cual lleva nutrientes, fertilizantes, productos agrotóxicos y pesticidas.
- Evitar a toda costa la expansión de la ciudad de El Alto hacia las orillas del Lago Menor.

3) Crecimiento poblacional, expansión urbana y residuos sólidos

a) El Alto

A lo largo de la historia, las altas tasas de crecimiento migratorio han resultado en una saturación de La Paz, aislada por su ubicación en valles estrechos. Entonces, las poblaciones se asentaron más arriba en el área plana del Altiplano en la Serra y alrededor del Aeropuerto Internacional (Demoraes, 1998). Es por este fenómeno que nació la ciudad de El Alto, originalmente un suburbio de La Paz, una de las ciudades más altas del mundo (4 150 m). La ciudad ha permitido, en el pasado, amortizar las diferentes olas de migración. Ahora en plena expansión, es una de las mayores amenazas para el ecosistema endorreico del Lago Titicaca y su cuenca. La ciudad está habitada por casi 922 000 habitantes (INE, 2018), principalmente de la cultura Aymara. Los Aymaras eran animistas, y esto implicaba la necesidad de vivir en armonía con el medio ambiente. Pero después de la colonización y la revolución agraria de 1953, las tradiciones se debilitaron (Hoffmann y Requena, 2012). El crecimiento de la población urbana se hizo significativo en 1950 y se aceleró considerablemente en la década de 1980, luego de la gran crisis económica mundial, llamada década perdida en América Latina. En Bolivia, esta crisis ha tenido graves consecuencias, con la privatización de las principales minas del país, el cierre de muchas minas en quiebra o de otro tipo no rentables (Baby, 1998). Las familias afectadas por esta crisis migraron a las ciudades, especialmente en el eje urbano central, uniendo La Paz-El Alto y el Altiplano. La ciudad de El Alto tenía 95 450 habitantes en 1976 y 405 500 en 1992 (INE, 2018): un aumento del 325% en 16 años. Durante este mismo período, se registró una tasa de crecimiento anual de la población de alrededor del 9,23% (INE, 2018), una tasa casi récord a nivel nacional y particularmente alta en el contexto sudamericano. Hoy en día, el crecimiento de la población de la ciudad de El Alto se está estabilizando en unos 2% anual (INE 2015, 2018). Con 1,2 millones de habitantes para la "mancha urbana" (es decir, la extensión de la población de El Alto a los municipios vecinos de Viacha, Laja, Pucarani) en 2018 y un crecimiento anual de la población constante previsto del 2%, la proyección para 2060 superaría los 2,7 millones de habitantes.

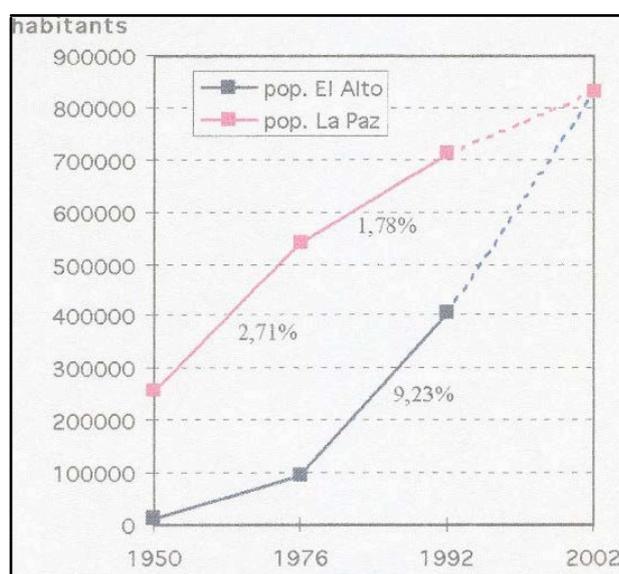


Figura 46 : Evolución comparativa del crecimiento anual de la población de El Alto y La Paz entre 1950 y 2002 (Demoraes, 1998).

El Alto, una ciudad tentacular cuya expansión es horizontalmente diferente a la ciudad de La Paz, ve casi todo su flujo de aguas residuales domésticas sin tratamiento verterse en la Cuenca Katari en la región noreste de Lago Menor al nivel de Bahía Cohana. Así, aumentan los riesgos de eutrofización en esta área vulnerable por ser tan poco profunda (≤ 3 m). La población, en constante aumento, se asienta de manera anárquica alrededor de la carretera principal que conduce al Lago Titicaca. Este asentamiento no está acompañado por planes de organizaciones o gestión territorial que garanticen el acceso a servicios básicos para la población (tratamiento de residuos domésticos e industriales, agua, electricidad, plantas de tratamiento, transporte, etc.). Hay una falta real de infraestructura urbana. Esto causa serios problemas de salud, bienestar, transporte y contaminación, entre otros.

Las actividades de la ciudad de El Alto representan una importante fuente de residuos que es una de las causas de la contaminación del lago. Esto incluye el embalaje de residuos sólidos (plásticos, vidrio, cartón, baterías de plomo, latas de aluminio), residuos de construcción, contaminantes de las curtumbres de cuero e industrias (muchas de las cuales son ilegales), contaminantes orgánicos contenidos en el agua residual de la ciudad (por ejemplo, de desechos hospitalarios, como los antibióticos; Archundia et al., 2017) y, finalmente, en todos los mataderos de desechos orgánicos y tóxicos. De hecho, hoy El Alto tiene 300 mataderos de los cuales solo 11 son legales (*sensu* Urquieta P., socióloga de CIDES/UMSA, Urquieta, 2014). Además, muchas empresas industriales no dudan en derramar sus residuos en el lago o en la naturaleza. La ciudad de El Alto está atravesada por tres de los ríos más grandes de la Cuenca Katari: Seco, Seke y Negro, que desembocan en la Bahía de Cohana. Como resultado, todos los residuos y contaminantes de la ciudad se encuentran en el Lago Menor.

Si la ciudad de El Alto continúa su desarrollo hacia el lago sin seguir una planificación de su expansión urbana y no hace cumplir ninguna regulación, norma o ley concerniente a la gestión de los residuos y la calidad de las aguas que vierten en el lago, las consecuencias deteriorarán la salud y el bienestar de los habitantes y serán irreversibles para el ecosistema.

En todo el territorio boliviano, existe una tendencia a migrar hacia grandes centros urbanos, lo que ha llevado a la creación de barrios pobres. Este desarrollo también está causando la desaparición de actividades económicas en áreas rurales y el envejecimiento de la población rural (Urquieta P., com. pers.). Por lo tanto, el atractivo económico del campo está disminuyendo y los grandes centros urbanos son cada vez más fuentes de contaminación.

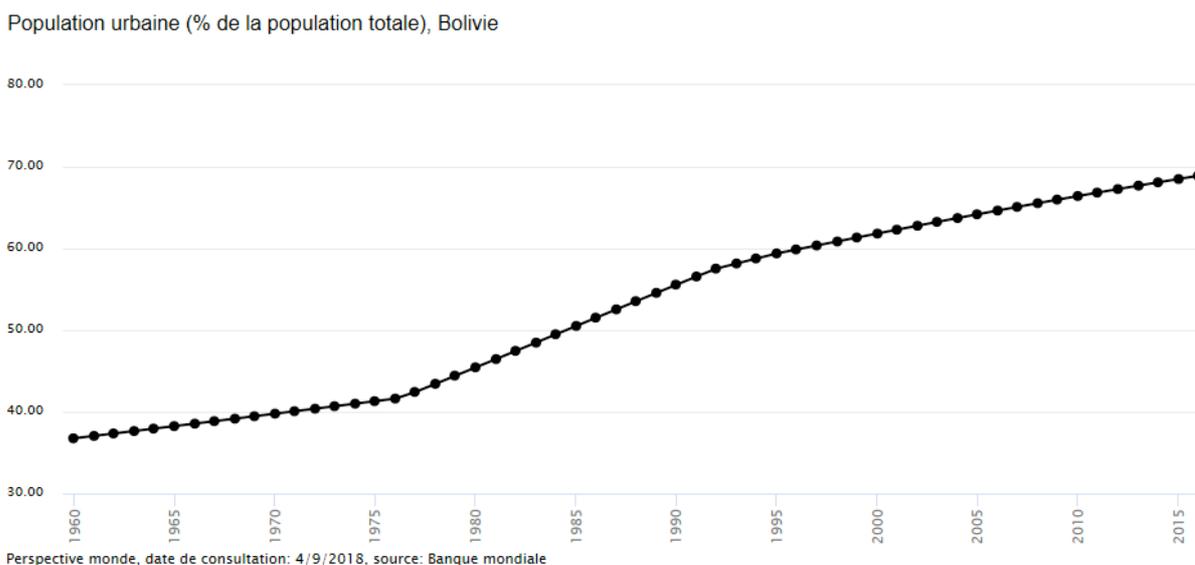


Figura 47 : Evolución de la población urbana boliviana entre 1960 y 2015 (Banco Mundial, 2018).

Cálculo estimado de los residuos sólidos emitidos por los habitantes de El Alto:

➤ **Actualmente :**

En la ciudad de El Alto, se estima la emisión de residuos sólidos en alrededor de 0,6 kg/habitante/día.

Tabla 12 : Estimación de las emisiones de residuos sólidos para una población de 922 000, en base a una emisión diaria de 0,6 kg/persona (MJ'Ecko, 2018).

Cantidad de desechos sólidos emitidos por persona/día	Cantidad de desechos sólidos emitidos por persona/año	Población de El Alto	Cantidad de desechos sólidos emitidos anualmente por toda la población
0,60 kg	219 kg	922 000 habitantes	200 996 toneladas

La mayoría de estos residuos ni se recolectan, ni se clasifican, ni se reciclan adecuadamente. La creciente aceleración y el desorden de los centros urbanos y la indiferencia general hacia los problemas ambientales han contribuido al aumento del daño ambiental y la contaminación del lago. Las principales áreas urbanas no han implementado el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos (PIGARS). Por el momento, por lo tanto, no han podido responder con eficacia a la necesidad de eliminar los residuos sólidos urbanos, una fuente de contaminación. La mayoría de los centros urbanos acumulan sus residuos sólidos en vertederos abiertos, donde se seleccionan artesanalmente para su reutilización. Entretanto, la mayoría de los residuos se queman. El humo, las cenizas y la acumulación de desechos dañan el aire, el agua, el suelo y el medio ambiente al formar gas, líquido, polvo y humo. Estos vertederos abiertos son la cuna y el hábitat de muchas especies portadoras de enfermedades que representan un peligro para la salud y la seguridad de las poblaciones (perros, cerdos, bacterias, ...) (PENUMA, 2011).

➤ **Gradiente +1 (crecimiento demográfico de 2%/año) :**

En este escenario optimista, donde la población aumentaría en torno al 2% anual y se adoptaría una conciencia colectiva, podríamos observar una reducción en las emisiones de residuos sólidos, de los vertederos abiertos y, sobre todo, un aumento en la clasificación, el reciclaje y una mejor recolección de residuos sólidos en todas las regiones limítrofes del Lago Titicaca.

➔ **En 2030, para 1 169 319 habitantes en la ciudad de El Alto (922 000 habitantes en 2018, un crecimiento del 2% / año) y una cantidad de desechos emitidos divididos por dos (0,3 kg/día):**

Tabla 13:

Tabla 13 : Estimación de las emisiones de residuos sólidos para una población de 1 169 319 y una emisión diaria de residuos sólidos: (a) reducido a la mitad: 0,3 kg/pers./día; (b) sin cambios: 0,6 kg/ pers./día; (c) duplicado: 1.2 kg/pers./día.

Cantidad de desechos solidos emitida por persona/día	Cantidad de desechos solidos emitida por persona/año	Población en numero de habitantes	Cantidad de desechos solidos emitida por toda la población/año
0,30 kg	110 kg	1 169 319	128 625 toneladas
0,60 kg	218 kg	1 169 319	254 911 toneladas
1,20 kg	438 kg	1 169 219	512 162 toneladas

➤ **Gradiente -1 (crecimiento demográfico de 3%) :**

En este escenario pesimista, donde la población aumentaría de manera anárquica (3% / año), sin un plan de urbanización, y donde el consumo, en correlación con la población, continuaría creciendo, se observaría un aumento de los residuos sólidos. La indiferencia general con respecto a la emisión de estos residuos y la ausencia de clasificación aumentaría la cantidad de residuos en los afluentes y el Lago Menor, degradándolo día tras día, haciéndolo cada vez más pobre en recursos pesqueros, y menos atractivo para los turistas.

➔ **En 2030, para 1 314 551 habitantes en la ciudad de El Alto (3% / año) y una cantidad de residuos sólidos emitidos sin cambios (0,6 kg/día):**

Tabla 14 : Estimación de las emisiones de residuos sólidos para una población de 1,3 millones y una emisión diaria de residuos sólidos: (a) sin cambios: 0,6 kg/persona/día; (b) duplicada: 1,2 kg/persona/día (MJ'Ecko, 2018).

Cantidad de desechos solidos emitida por persona/día	Cantidad de desechos solidos emitida por persona/año	Población en numero de habitantes	Cantidad de desechos solidos emitida por toda la población/año
0,6 kg	218 kg	1 314 551	286 572 toneladas
1,2 kg	438 kg	1 314 551	575 773 toneladas

b) Puno

Puno se encuentra al noroeste del Lago Mayor del Titicaca, en la orilla de la Bahía Interior de Puno (BIP), poco profunda (<5 m). El INEI (2018) estima la población de Puno en 147 397 habitantes. La BIP se comunica con la bahía exterior de Puno (BEP), a través de un canal que se excavó entre las totoras para el paso de la flota de botes de vapor comerciales. Por lo tanto, el agua de la BIP está poco renovada en este sistema casi cerrado. La BEP se abre en la región más profunda del Lago Mayor. Las totoras, que son muy densas en la BEP, desempeñan un papel vital en el mantenimiento de la calidad del agua. De hecho, la BIP está particularmente contaminada por las descargas de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la isla Espinar, la única de Puno. Las totoras evitan que una gran parte de los contaminantes (residuos sólidos, metales, nutrientes) se muevan hacia la BEP. El cultivo de truchas en jaulas flotantes desarrollado en la BEP, junto al turismo en las islas flotantes de los Uros, pero sobre todo con la contaminación proveniente de la ciudad de Juliaca a través del río Coata, contribuye a la eutrofización de la BEP.

Al igual que en Bolivia, el Perú estuvo marcado por un importante éxodo rural a partir de la década de 1940. Las fuertes reformas agrarias obligaron a los agricultores a emigrar a las ciudades para encontrar trabajo. La población vive principalmente del turismo. De hecho, Puno es el segundo sitio turístico más visitado en el sur de Perú, después de Cuzco (Vargas M. et al., 2003). La urbanización está más desarrollada alrededor del lago que en el lado boliviano.

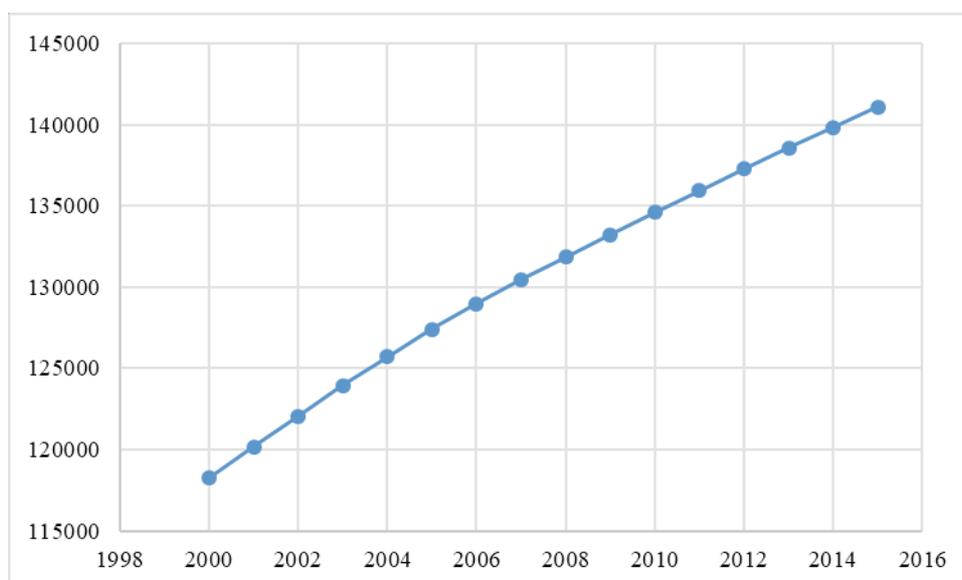


Figura 48 : Evolución de la población en la ciudad de Puno desde 2000 hasta 2015 (INEI, 2015).

Se observa una tasa de crecimiento anual decreciente 2,62% entre 1981 y 1993, luego 1,53% entre 2012 y 2015, aunque se manteniendo positiva. La ciudad de Puno sigue un plan de desarrollo urbano, un instrumento técnico cuyos objetivos son impulsar y guiar el crecimiento y desarrollo de la ciudad (Ascencio Costa et al., 2010).

A una hora en coche de Puno se encuentra Juliaca. El INEI (2018) estima la población en 225 146 habitantes. Es el centro de las actividades industriales del departamento de Puno. La actividad principal es el textil: existe un gran mercado textil en Alpaca (exportaciones). Al igual que Puno, Juliaca también se beneficia del turismo, es una ciudad de tránsito para turistas (Vargas, 2003). La cantidad anual de residuos sólidos emitidos por la ciudad de Juliaca se estima en 40 082 toneladas.

Los efluentes industriales de la ciudad de Puno son considerados casi nulos, en comparación con los efluentes de origen doméstico (ANA, 1996).

Tabla 15 : Estimación de las emisiones de residuos sólidos para una población de 147 397 habitantes con una emisión diaria de 0,6 kg/persona (MJ'Ecko, 2018).

Cantidad de desechos sólidos emitidos por persona/día	Cantidad de desechos sólidos emitidos por persona/año	Población en numero de habitantes	Cantidad de desechos sólidos emitidos por toda la población/año
0,6 kg	218 kg	147 397	32 280 toneladas

Si la ciudad de Puno continúa con su desarrollo y no hace cumplir ninguna regulación, norma o ley concerniente a la gestión de los desechos y la calidad del agua que se descarga en el lago, las consecuencias agravarán la salud y el bienestar de los habitantes, lo que aumentará el riesgo, siendo irreversible para el ecosistema, especialmente para la Bahía Interior de Puno.

c) La región peruano-boliviana del lago Titicaca

La insuficiencia de disposiciones para la evacuación de los residuos, en todos los grandes centros urbanos de la cuenca, es la causa principal de la contaminación orgánica y la eutrofización. Las zonas más contaminadas afectadas notablemente por el vertido de aguas residuales, son la bahía de Puno (donde hay un proceso de eutrofización) y el Bajo Coata (debido a los desechos provenientes de la ciudad de Juliaca) en el Perú, así como la Bahía de Cohana y la bahía de Copacabana (en el Lago Mayor, que no se trata aquí) en Bolivia. Las ciudades de El Alto y Puno descargan sus aguas sin tratamiento directamente en el Lago Titicaca. La contaminación por los residuos industriales, orgánicos, sólidos, mineros, tóxicos, o aguas residuales agravan el estado del lago, cada día un poco más. El desarrollo de las ciudades y la falta de infraestructura adecuada acabaran con la pureza y la salud de ciertas áreas del Lago Titicaca, en Perú y Bolivia.

Si el crecimiento demográfico de la población continúa y, en particular, si alcanza tasas superiores al 3% / año, es urgente desarrollar en toda la región del Titicaca (pueblos y aldeas) un sistema adecuado de recolección, clasificación y reciclaje de residuos sólidos.

A fin de evitar estas consecuencias en los habitantes y el lago, para los líderes de las ciudades de El Alto, Puno, y toda la región del Altiplano es importante:

- Poner en marcha un seguimiento de la buena aplicación de las leyes, normas y reglamentos relativos a la gestión de los residuos procedentes de ciudades e industrias.
- Sensibilizar e informar a los habitantes de El Alto sobre las consecuencias de la eliminación de residuos y sus actividades en el lago, considerado sagrado, y las soluciones que existen.
- Desarrollar la ciudad de El Alto con todos los servicios necesarios para el bienestar de los habitantes y el mantenimiento de la calidad del agua del lago: plantas de tratamiento de aguas residuales, redes y sistemas de saneamiento, gestión de residuos, entre otros.
- Mejorar la capacidad gerencial, administrativa y financiera de la recolección de residuos sólidos (ALT, 2009).

4) Saneamiento y tratamiento de aguas

a) El Alto

Como se mencionó anteriormente, la conurbación de La Paz y El Alto es uno de los entornos urbanos más espectaculares del mundo, particularmente debido a su alta densidad de población y escala. Hay graves consecuencias ecológicas y sociales, como la contaminación de las aguas subterráneas (destinadas al consumo humano y el riego) y la contaminación directa de los ríos que atraviesan la ciudad y desembocan en el lago.

Las desigualdades en el acceso a los servicios de distribución de agua y saneamiento son un buen indicador de las desigualdades sociales: el 99 % de las necesidades en términos de servicios de agua y saneamiento no están satisfechas en las zonas rurales de El Alto. Mientras que se valoran al 50,55 % en zonas urbanas.

La recogida de residuos es realizada por EMALT (Empresa Municipal de Aseo El Alto) y trata solo al 80% de los residuos producidos. El 20% restante queda en las calles, acumulándose en los lotes baldíos y en el cauce de las vías fluviales del municipio. La falta de eficiencia en la recolección de residuos de la ciudad conduce a la contaminación de las aguas subterráneas y, por lo tanto, a un riesgo para la salud de la población.

Finalmente, el sistema de recolección de aguas residuales también es problemático. Mucho menos que el servicio de agua potable, el acceso a la recolección de aguas residuales por el sistema de alcantarillado EPSAS es solo el 46% de los hogares. Los tanques sépticos y los pozos perdidos son el segundo tipo de infraestructura utilizado y cubren al 17.5% de la población. Finalmente, el 36.5% de los hogares encuestados no tienen infraestructura de recolección de aguas residuales y el 54% de la población de El Alto descarga sus aguas residuales diariamente en el suelo, lo que aumenta la contaminación del suelo y las aguas subterráneas. Este riesgo se ve incrementado por actividades industriales y productivas, de las cuales el 33% no tiene acceso al sistema de saneamiento.

En El Alto, el sistema de saneamiento no está desarrollado en ningún caso. De hecho, las infraestructuras de recolección de agua de lluvia son inadecuadas y, durante la temporada de lluvias, las inundaciones causadas por esta deficiencia causan daños a la red de suministro de agua potable de la ciudad y conducen a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas (Cochet, 2009).

b) Puno

La Bahía Interior de Puno representa apenas el 0,2% de la superficie del Lago Titicaca. Hasta la década de 1970, todas las aguas residuales de la ciudad de Puno fueron vertidas sin ningún tratamiento en la Bahía Interior de Puno. En 1972, se construyó la PTAR de "El Espinar" que consta de dos lagunas de oxidación con un área total de 21 hectáreas. Este sistema de tratamiento primario funciona como un proceso abierto, en el cual el agua residual pasa a través de un estanque para ser tratada a través de procesos naturales que involucran bacterias y algas. Desde los últimos diez años, este sistema de tratamiento está obsoleto porque los flujos de agua residual son demasiado importantes.

Las aguas residuales de la ciudad de Puno, por lo tanto, se encuentran directamente en la Bahía Interior de Puno, sin ningún tratamiento de residuos orgánicos, tóxicos, inorgánicos, etc. El flujo se estima en 177 L/s o alrededor de 5,6 Hm³/año. Más del 90% proviene directamente de "El Espinar" y el resto proviene de otras áreas de la ciudad de Puno (ANA, 2017).

La ciudad de Juliaca está atravesada por arroyos hasta el Lago Titicaca, incluido notablemente el río Coata, uno de los principales afluentes del Lago Titicaca, que desemboca en la bahía exterior de Puno. Pero esta ciudad en crecimiento no cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales funcional.

Todas las aguas residuales, residuos sólidos y otras sustancias de industrias o minas se encuentran directamente en el río Coata. Este río era anteriormente un recurso esencial para todas las aldeas que separaban a Juliaca de

las orillas del Lago Titicaca. Ahora, el río Coata parece una planta de tratamiento al aire libre y cientos de desechos sólidos se alinean en sus orillas.

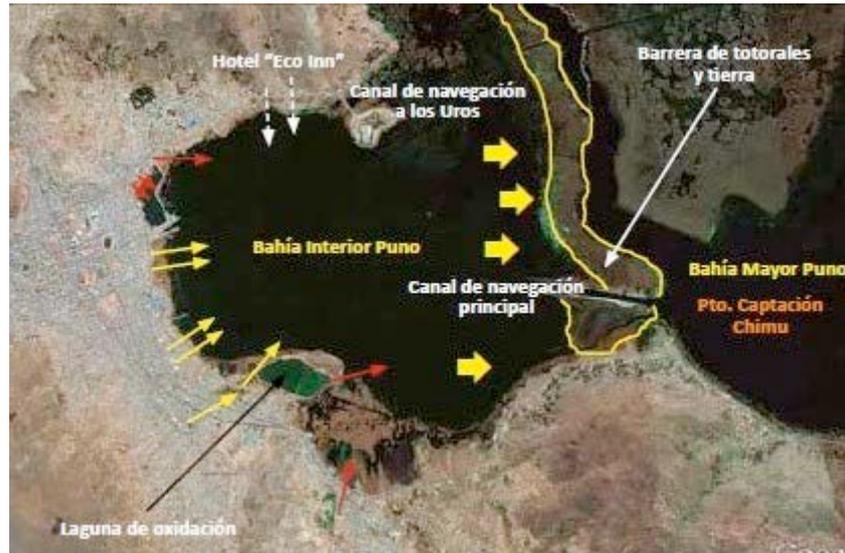


Figura 49 : Imagen satelital de la Bahía Interior de Puno (PNUMA, 2011).

Tenga en cuenta la laguna de oxidación, cuyos efectos *a priori* no son muy significativos, y todas las entradas de aguas residuales (rojo = municipal; amarillo = zona de drenaje de aguas pluviales; blanco = lixiviación) y contaminantes. La barrera natural de totoras limita la exportación de contaminantes a la Bahía Exterior de Puno. La ciudad de Puno, incluso considerada como una ciudad mediana en el borde del lago, causa una verdadera contaminación en el lago. Una ciudad cercana al lago representa un peligro real, y debe, en este caso, contar con plantas de tratamiento eficientes para tratar todos los contaminantes (aguas residuales, residuos industriales, residuos mineros ...).

c) La región peruano-boliviana del lago Titicaca

En 2014, ALT llevó a cabo el proyecto SIGAR (Sistema Integral de Gestión de Aguas Residuales), que consistió en un diagnóstico de los sistemas de tratamiento de aguas residuales alrededor del Lago Titicaca (Perú / Bolivia). Durante esta campaña de recolección de información se visitaron 46 sitios (28 peruanos y 18 bolivianos).

Lo que se destacó es que solo 30 sitios tienen un sistema de tratamiento de agua, los otros 16 usan letrinas y tanques sépticos para la evacuación de sus aguas residuales.

Además, de los 30 sitios con sistema de tratamiento, 20 son estanques de estabilización (incluyendo 3 estanques que están fuera de servicio) y 9 son plantas de tratamiento de aguas residuales reales. Con respecto a la conservación y el funcionamiento, 12 están en buenas condiciones, 6 están en condiciones relativamente buenas, 9 están en malas condiciones y 3 están fuera de servicio. Para las descargas, 10 las hacen directamente en el lago, 4 por infiltración en las orillas, 15 en los ríos principales (efluentes del lago). En 2014, solo la PTAR de Batallas utiliza los efluentes para el riego en la agricultura.

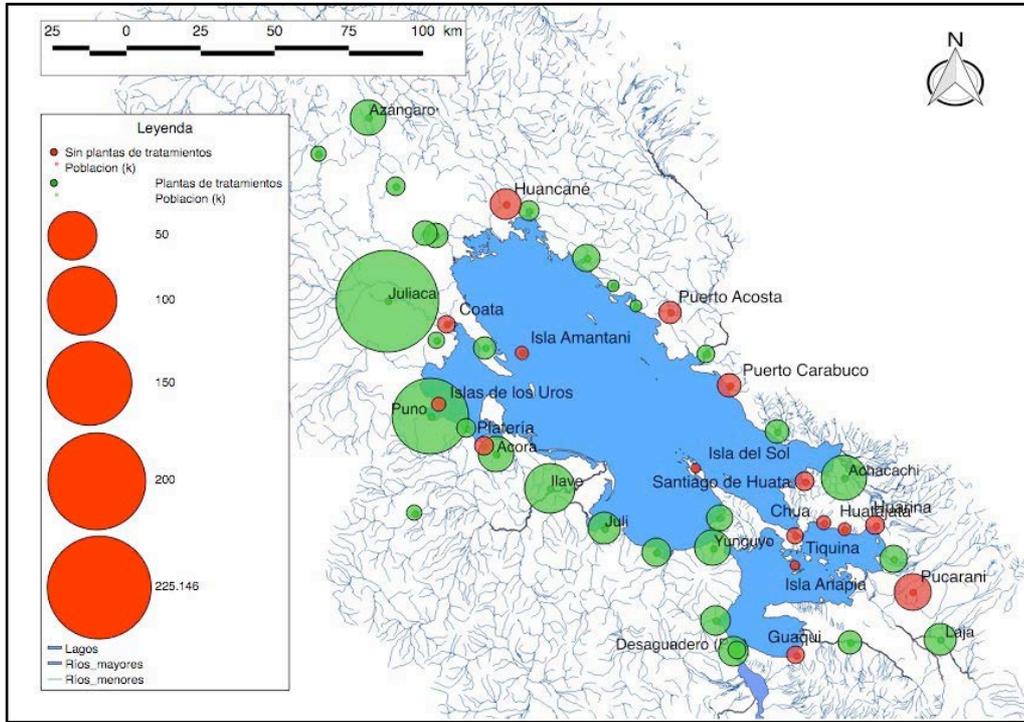


Figura 50 : Mapa del Lago Titicaca mostrando las principales ciudades, sus densidades de población, con la presencia (en verde) y la ausencia (en rojo) de un sistema de tratamiento de agua (ALT 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo).

La presencia de estaciones de tratamiento de aguas residuales no significa que sean funcionales.

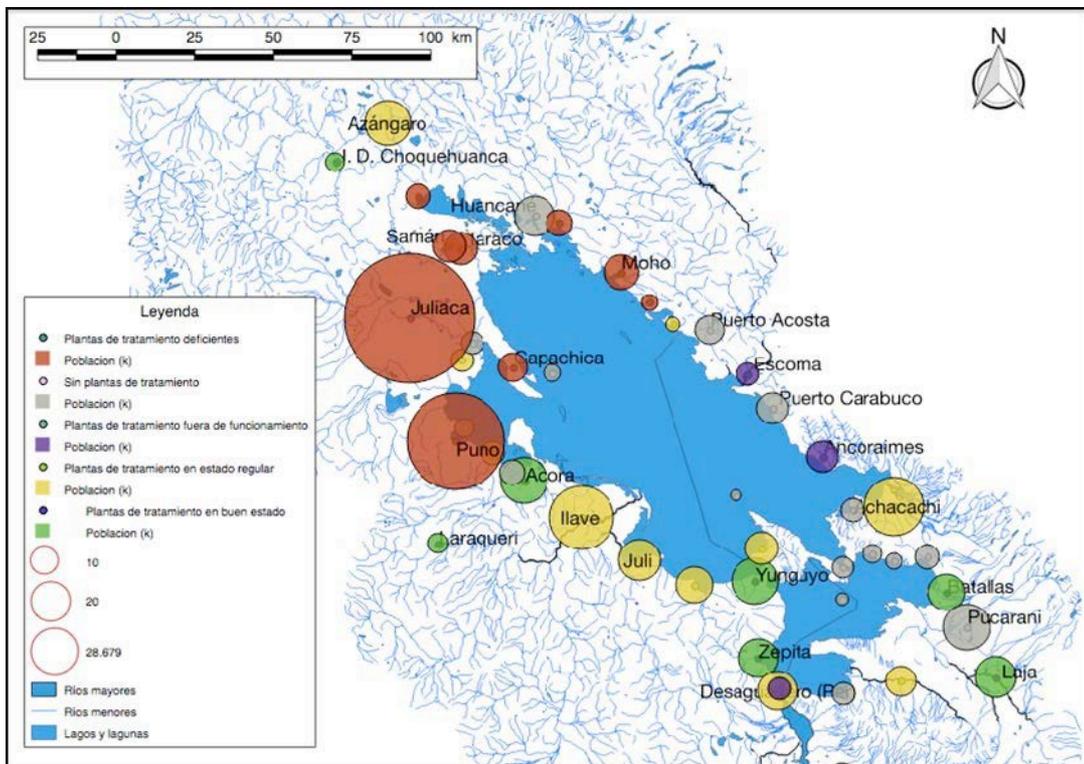


Figura 51 : Mapa del Lago Titicaca mostrando las principales ciudades, sus densidades de población y el estado operativo de las plantas de tratamiento: deficiente (círculos azules), ausente (círculos rosados), fuera de servicio (círculos verdes), funcionamiento normal (amarillo), en buen estado (púrpura) (ALT 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo Circumlacustre).

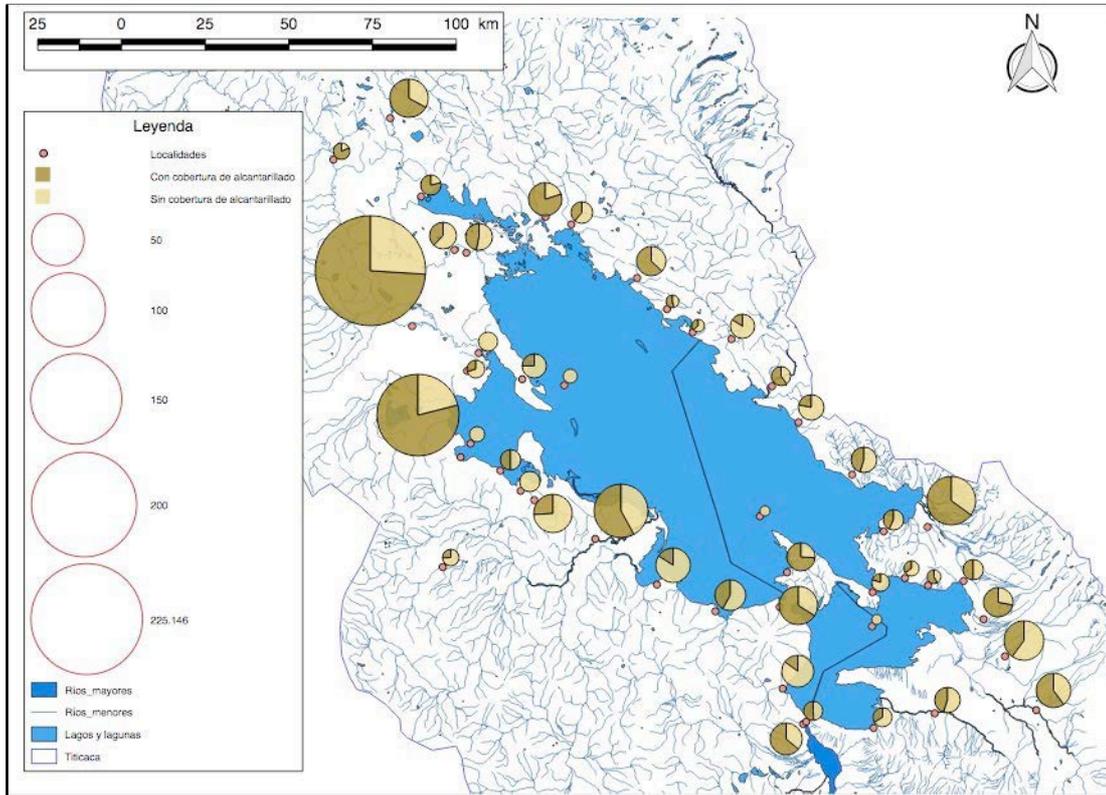


Figura 52 : Mapa del lago Titicaca mostrando la proporción de la población conectada a las alcantarillas: con red de saneamiento (marrón) y sin red (beige) (ALT 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el Anillo Circumlacustre del Lago Titicaca, p. 10).

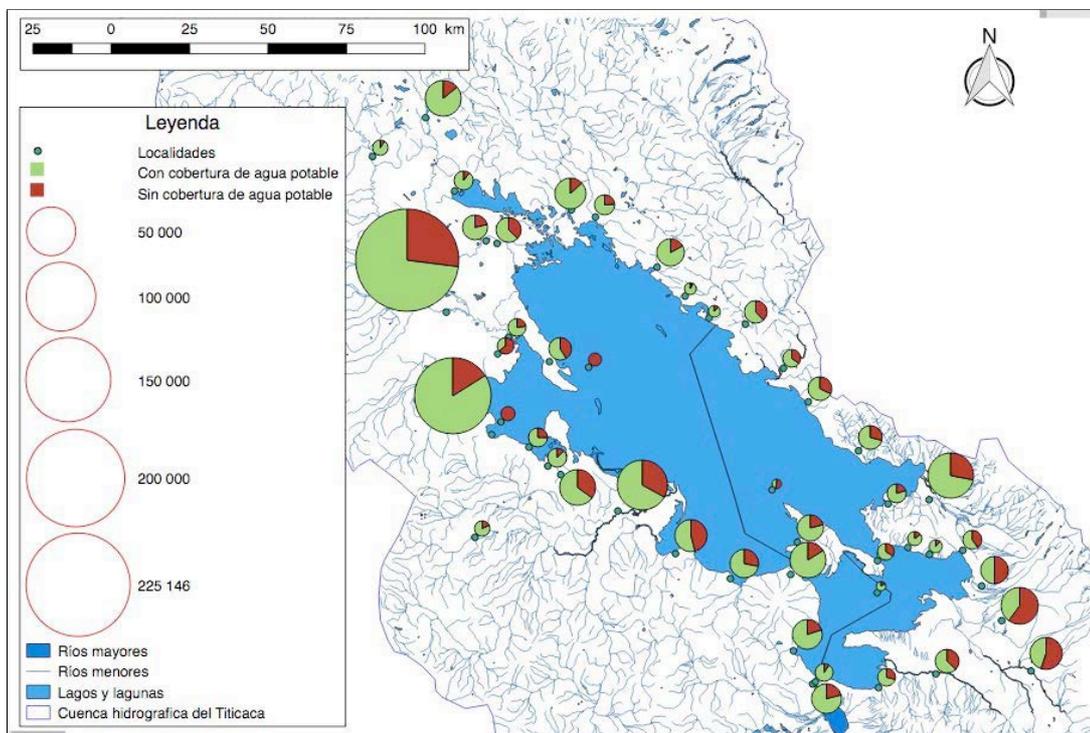


Figura 53 : Mapa del lago mostrando la proporción de la población con acceso a agua potable: con (verde) y sin (rojo) (ALT 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el Anillo Circumlacustre del Lago Titicaca, p. 10).

Las localidades que generan los mayores volúmenes de aguas residuales domésticas se encuentran en el Perú: Juliaca, Puno, Ilave, Achacachi, Acora, Juli, Huancane y Desaguadero, y en Bolivia: Desaguadero,

Pucarani, Copacabana, El Alto y Laja. Ninguna de ellas tiene un buen sistema de tratamiento de aguas residuales. El caso más crítico es el del lado boliviano de Desaguadero, cuyos efluentes se vierten directamente sin ningún tratamiento.



Figura 54 : Mapa de las ciudades que generan la mayor cantidad de aguas residuales (MJ'Ecko, 2018).

Para concluir, los principales problemas que surgen son: falta de limpieza, mantenimiento, infraestructura deficiente y, finalmente, falta de apoyo por parte de los municipios (ALT, 2014).

En 2014, **las recomendaciones de ALT** fueron:

- Fortalecer o establecer unidades ambientales y de saneamiento a través de las cuales los municipios generan y garantizan la sostenibilidad de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.
- Preparar un programa de recuperación y mantenimiento para los sistemas de tratamiento implementados, principalmente para limpiar y operar las lagunas de estabilización.
- Diseñar y desarrollar un programa de capacitación y preparación para el personal, proporcionándoles el equipo necesario.
- Establecer una red de monitoreo de la calidad del agua (en laboratorios) para proponer mejoras para garantizar que los efluentes de estos sistemas cumplan con las regulaciones ambientales respectivas.
- Promover la investigación y el desarrollo de tecnologías y sistemas de tratamiento de aguas residuales adaptados a las condiciones geográficas y climáticas de la región del Altiplano.
- Involucrar a la población para que desempeñe un papel destacado en la prevención de la contaminación del lago Titicaca a través de programas de educación y sensibilización sobre temas ambientales.

La pregunta es: ¿Y unos 5 años después? ¿Se han implementado estas recomendaciones? Un proyecto planea expandir la estación de Puchukollo río abajo de la ciudad de El Alto. Otro proyecto peruano contempla la instalación de 6 plantas de tratamiento. La Unión Europea, el BID y la AFD prestan \$ 200 millones a Bolivia para el establecimiento de plantas de tratamiento a lo largo de la Cuenca Katari. Los proyectos avanzan pero, una vez instaladas estas estaciones, el mejoramiento no será inmediato y las estaciones no representan una solución "milagrosa". Es necesario que la población y el gobierno establezcan una nueva dinámica para consumir, clasificar, reciclar y producir. Es un conjunto de acciones que podrán restaurar el lago a su antiguo esplendor.

5) La evolución del sector piscícola

Introducida desde 1940, la producción en jaulas flotantes de truchas arco iris y doradas (respectivamente *Oncorhynchus mykiss* y *Salmo aguabonita*) alcanza las 40 000 toneladas por año, principalmente en el Perú. La tasa de crecimiento de la piscicultura entre 2010 y 2017 en el Perú fue del 430% (IMARPE, 2018). Las ganancias peruanas suman más de 300 millones de soles por año (\$ 100 millones). Esta actividad económica en el Perú no se encuentra en la Bahía Interior de Puno. Por lo tanto, es la bahía exterior de Puno la que se preocupa principalmente por los impactos de la piscicultura. Las piscifactorías son principalmente grandes grupos peruanos y chilenos, y los pequeños piscicultores tienden a desaparecer.

El espacio utilizado para el cultivo de trucha arco iris en jaulas flotantes en todo el Lago Titicaca se estima en más de 20.000 ha (IMARPE, 2015). Y hay alrededor de 8.000 hectáreas cuyas autorizaciones se están procesando con la DICAPI (Dirección General de Capitanías y Guardacostas). Estas áreas principales están ubicadas en la parte peruana. La piscicultura está supervisada hasta 2021 por el Plan Nacional para el Desarrollo de la Acuicultura (PNDA) (Chura, 2009).

IMARPE planea alcanzar una producción anual de 60,000 toneladas de trucha para el año 2021 en todo el lago Titicaca.

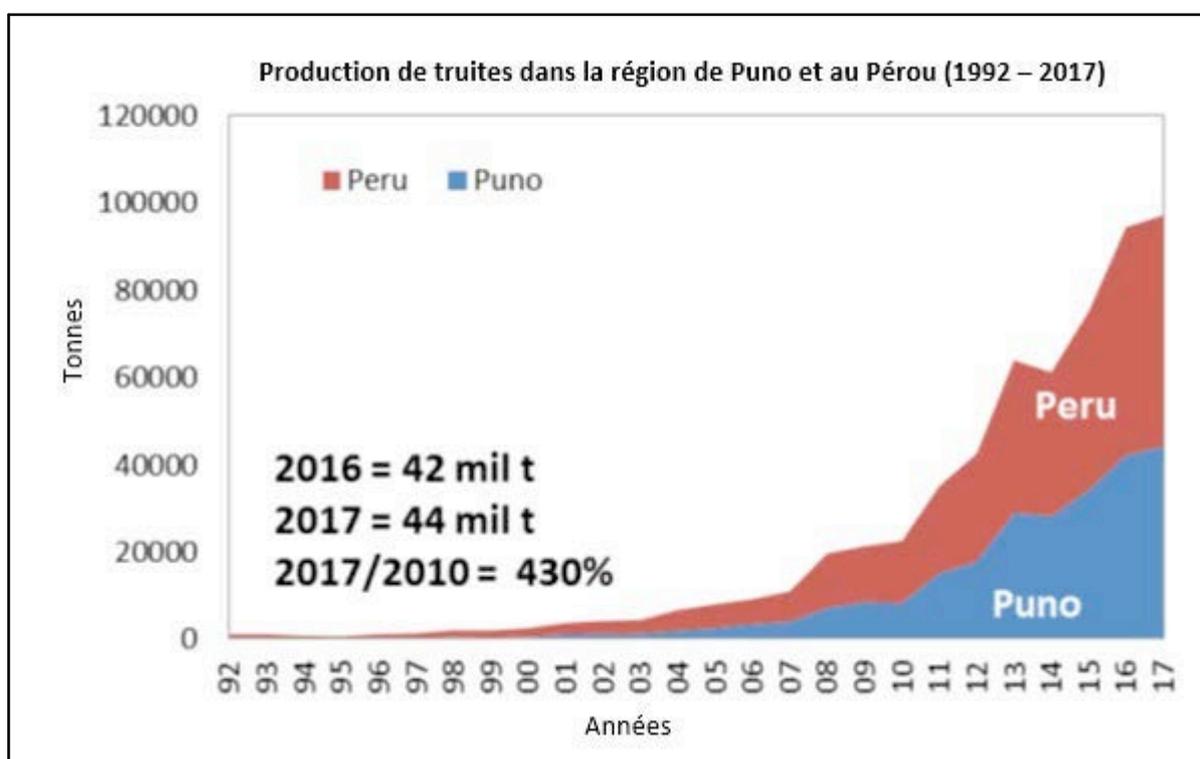


Figura 55 : Evolución de la producción de trucha en la región de Puno y Perú (1992 - 2017) (IMARPE, Coloquio de mayo de 2018 en La Paz).

La capacidad de producción anual de truchas arco iris en jaulas flotantes artesanales es de 800 kg y la densidad es de 30 kg/m². En jaulas semi-artesanales flotantes, la capacidad de producción anual por jaula es de 2 toneladas y la densidad es de 50 kg/m². En jaulas industriales, la capacidad de producción anual puede alcanzar las 6 toneladas con una densidad de 60 kg/m² (Cruz et al., 2009).

Estas especies introducidas criadas principalmente en jaulas flotantes tuvieron un efecto considerable en la biomasa del lago. Las truchas, carnívoras, a menudo se alimentan con gránulos, hechos de harina de pescado de *Orestias ispii*, pequeños peces pelágicos nativos endémicos del Lago Titicaca. Solo se requieren aproximadamente 5 kg de ispi para obtener 1 kg de harina de pescado (Patzí Saire, 2013). Este índice de conversión, que es el volumen de alimento requerido para producir un kilogramo de trucha, es más bajo que lo que era unos años atrás. Sin embargo, a pesar de estos avances, la cría de peces carnívoros todavía depende en

gran medida de las capturas silvestres (Patzi Saire, 2013). La biomasa de ispi (*O. ispii*) en el Lago Titicaca se correlaciona negativamente con la de la trucha (IMARPE, 2015). Además de la pesca excesiva, con consecuencias desastrosas sobre la biomasa de peces endémicos del Lago Titicaca, la piscicultura también contribuye al agotamiento de las especies nativas del lago. La drástica reducción de los recursos pesqueros ha tenido impactos socioeconómicos significativos, además de los impactos ecológicos debidos a la minería y la contaminación de las aguas residuales.

Tabla 16 : Cantidad de harina de pescado y de soja presente en la dieta de truchas según su etapa de crecimiento (Patzi Saire, 2013).

	Alevinos	Juveniles	Engorda	Adulto
Harina de pescado	52 %	47 %	30 %	30 %
Harina de soja	30 %	30 %	40 %	40 %

Tabla 17 : Cantidades de proteínas, lípidos y fósforo contenidas en la harina de pescado (IFREMER, 2008).

	Cantidad de proteínas	Cantidad de lípidos	Cantidad de fósforo
Harina de pescado	70%	15%	15%

Ahora, 1 g de proteína contiene, por convención, 0,156 g de nitrógeno. Entonces, la harina de pescado contiene un 11% de nitrógeno (70% x 15.6%).

Idealmente, los peces pequeños utilizados actualmente para la producción de harina y aceite de pescado (por ejemplo, la especie ispi) deberían ser destinados al consumo humano o a la alimentación de especies de peces cuyo FIFO ('fish in fish out') es lo más bajo en el futuro para minimizar el impacto de la actividad pesquera en el medio ambiente. El FIFO es una relación de conversión de la alimentación piscícola en la etapa adulta de los peces cultivados.

El cultivo de truchas es una fuente de contaminación en el Lago Titicaca. Las formas de contaminación de la piscicultura son variadas. Pueden ser orgánicas, químicas, bacteriológicas, genéticas, etc. La comida y los desechos de nitrógeno y fósforo generados por esta actividad caen al fondo del lago (como alimentos no consumidos). Esto contribuye al enriquecimiento de nutrientes del lago y, por lo tanto, promueve el riesgo de eutrofización. Dado que los flujos de contaminantes están esencialmente correlacionados con los alimentos, que a su vez se correlacionan con las poblaciones de peces, la contaminación aumentará con la razón entre el estoque y la descarga (Petit, 1991).

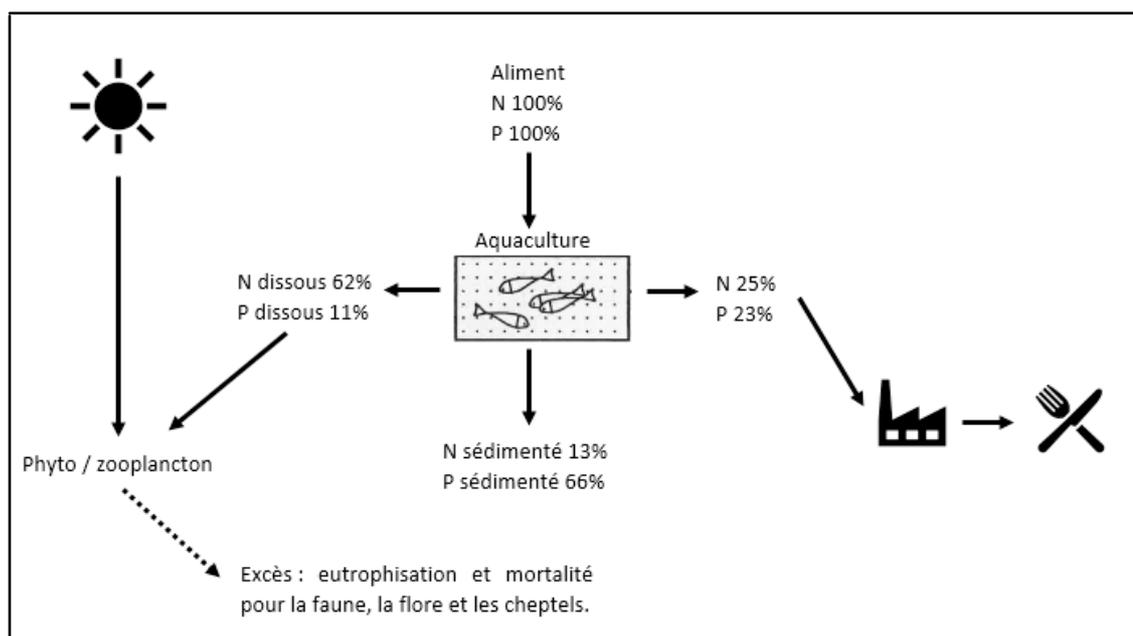


Figura 56 : Papel de la piscicultura en el ecosistema costero. Diagrama adaptado de Folke (1988) (Petit, 1991).

Este diagrama informa sobre el impacto causado por la piscicultura en los riesgos de eutrofización de un ecosistema. De los alimentos ingeridos, más del 60% del fósforo y el 10% del nitrógeno sedimentan y, por lo tanto, permanecen disponibles para el fitoplancton si se resuspenden. Esto representa un recurso considerable en nutrientes. Estos nutrientes pueden ser la causa de la eutrofización a largo plazo. Los nutrientes disueltos alimentan directamente las algas fitoplanctónicas, lo que aumenta el riesgo de eutrofización. Por lo tanto, mientras más rebaños de ganado haya, mayor será el riesgo de eutrofización en el ecosistema.

Se pueden calcular las descargas de nitrógeno y fósforo de las piscifactorías (cuya producción llega en 40 000 t/año en el departamento de Puno), donde las truchas son alimentadas con 5 kg de pellets por kilogramo de peso. Se fija en 40% la harina de pescado en los pellets.

- Fósforo disuelto: $40\ 000 \times (5 \times 40\%) \times 15\% \times 66\% = 1\ 320$ toneladas/año
- Nitrógeno disuelto: $40\ 000 \times (5 \times 40\%) \times 11\% \times 62\% = 5\ 456$ toneladas/año
- Fósforo sedimentado: $40\ 000 \times (5\% \times 40\%) \times 11\% = 7\ 920$ toneladas/año
- Nitrógeno sedimentado: $40\ 000 \times (5\% \times 40\%) \times 13\% = 1\ 144$ toneladas/año
- Fósforo total (disuelto + sedimentado): $1\ 320 + 7\ 920 = 9\ 240$ toneladas/año
- Nitrógeno total (disuelto + sedimentado): $5\ 456 + 1\ 144 = 6\ 600$ toneladas/año

Estas cantidades son mucho más altas que las de las descargas de nitrógeno y fósforo de la ciudad de El Alto (4 043 toneladas de nitrógeno/año y 1 078 toneladas de fósforo/año).

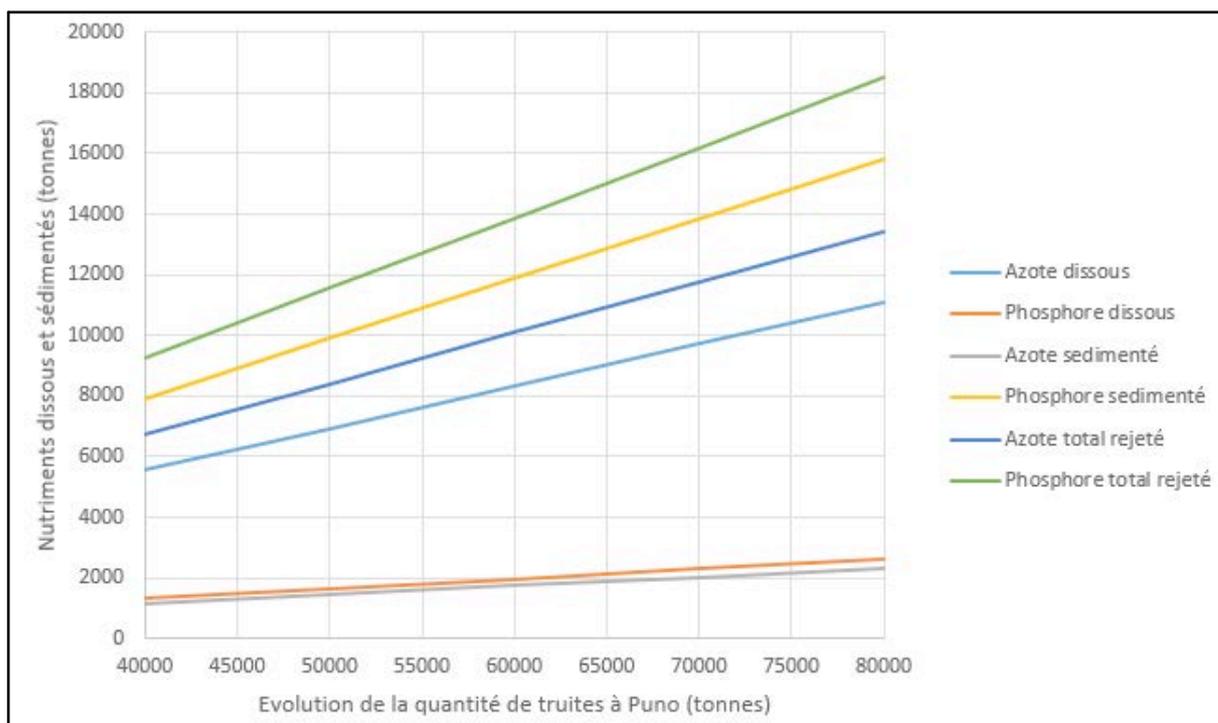


Figura 57 : Cambios proyectados en nitrógeno y fósforo en función de la producción de truchas en jaulas flotantes en el Departamento de Puno (MJ'Ecko, 2018).

Esta proyección ilustra la magnitud del aumento de las descargas de nutrientes en el lago.

Los peces son poiquiloterms (o sea, su temperatura corporal varía con la del medio), por lo que cualquier cambio en la temperatura exterior afectará su metabolismo general, su tasa de crecimiento, su ciclo reproductivo y, por lo tanto, el rendimiento final. La virulencia de algunos patógenos, la susceptibilidad de los peces a los patógenos y algunas sustancias tóxicas también pueden aumentar con la temperatura (Lazard, 2017). Como muestran los escenarios, existe un riesgo de un aumento de temperatura entre 7 y 10 ° C para 2100 (Hoffmann y Requena., 2012), lo que tendrá un impacto inequívoco en las actividades de la piscicultura en el Altiplano,

aunque el aumento de la temperatura del agua sea menor que la del aire. El aumento de la temperatura es favorable para el desarrollo de las proliferaciones de las microalgas del fitoplancton, en el origen de la eutrofización.

El calentamiento global puede reforzar la desoxigenación del agua en profundidad, dada la reducción de la solubilidad del O₂ en el agua, lo que provoca la expansión de las zonas hipóxicas (Seibel, 2011). Es probable que las perturbaciones atmosféricas (por ejemplo, vientos fríos) causen una inversión de las aguas más profundas hacia la superficie, desoxigenadas y ricas en gases tóxicos (H₂S), causando la muerte de los peces retenidos en las jaulas flotantes (Lazard, 2017).

Por lo tanto, es necesario anticipar los riesgos y las consecuencias de producir 70 000 toneladas de truchas por año y tender hacia una producción sostenible que respete el medio ambiente. El aumento en la producción de truchas aumentará el espesor de los sedimentos orgánicos en el fondo del lago. Esto aumentará el riesgo de eutrofización, disminuirá las especies endémicas en la región del Lago Titicaca y aumentará la propagación de patógenos de especies exóticas (Petit, 1991).

Con el fin de **reducir el impacto de la piscicultura en el lago y evitar el aumento del riesgo de eutrofización**, se debe tener cuidado de:

- La cantidad y calidad de los insumos, una fuente de alimento para la trucha, por ejemplo, al limitar el uso de ispi para alimentar las poblaciones de peces cultivados. Además, usar solo gránulos extruidos flotantes distribuidos en un círculo de plástico en la superficie, para controlar el consumo de la ración y limitar las pérdidas de alimentos no consumidos hacia el fondo.
- Asegurar una gestión sostenible (respetuosa con el medio ambiente, con recursos y en desarrollo de la economía local) de la acuicultura que concilie los requisitos ambientales con los intereses de la industria y los consumidores (Kuypers, 2009).
- Mejorar la eficacia de las políticas e instrumentos de gestión de la acuicultura (Kuypers, 2009); revisar las normas de densidad por jaula flotante y de alimentación.
- Promover el desarrollo de la acuicultura sostenible desde el punto de vista del ecosistema (IMARPE, 2015).
- Delinear áreas costeras para el desarrollo de las actividades de pesca y acuicultura (IMARPE, 2018). En particular, favorecer las áreas de profundidad suficiente (> 15 m) con buena circulación de agua para garantizar la oxigenación y la dilución.
- Seguir un plan binacional para el desarrollo de esta actividad económica (IMARPE, 2018).
- Apoyar el programa de Recuperación de Especies Nativas (REINA) de la ALT que interviene en las islas de Anapia (Perú) y Suana (República Dominicana) donde se construyeron e instalaron laboratorios de eclosión y cría de especies nativas, así como en el Centro PELT en Chucuito (Centro de Investigación Científica y Transferencia Tecnológica - CICTRAT), 17 kilómetros al sur de Puno. También se planea la instalación de bancos de germoplasma (Ocola Salazar et al., 2017).
- Realizar una zonificación precisa de los sitios de acuicultura para minimizar los riesgos (Lazard, 2017), de acuerdo con una zonificación ecológica de los usos del Lago.
- Establecer un monitoreo local de los parámetros ambientales, ya que la acuicultura es extremadamente sensible a las variaciones repentinas y a largo plazo en las condiciones climáticas (Lazard, 2017).
- Llevar a cabo programas de investigación sobre el uso de micro-algas, zooplancton y macro-invertebrados como ingredientes de alimentos compuestos para la piscicultura.
- Innovar y crear jaulas flotantes más tecnológicas que producirían más (para enfrentar el crecimiento de la población) con menos impacto en el medio ambiente (ver Beveridge 1996, Chen et al., 1999, Perez et al., 2002). Estos deberían implementarse de manera óptima, es decir, donde el área acuática tenga el máximo nivel de circulación y renovación de agua a expensas de la proximidad de los bancos, más conveniente desde el punto de vista logístico.

6) La gestión de la agricultura

La agricultura es el sector económico más importante en los Andes, aunque se basa principalmente en la familia (Gómez et al., 2009). Según la Dra. Patricia Urquieta, socióloga del CIDES-UMSA (Post-Grado en Ciencias del Desarrollo), existe una interfaz urbano-rural, es decir, la mayoría de los agricultores viven tanto en el campo como en la ciudad de El Alto. Es una forma de estrategia para evitar perder sus tierras.

El lago influye en la agricultura a través del riego. En contra parte, la agricultura puede afectar la calidad del riego. De hecho, el uso creciente de químicos (fertilizantes y agro-tóxicos), nitrógeno y fósforo, impactan considerablemente en el lago y aumentan el riesgo de eutrofización. Como se vio anteriormente, el nitrógeno y el fósforo son los dos elementos principales detrás de la eutrofización.

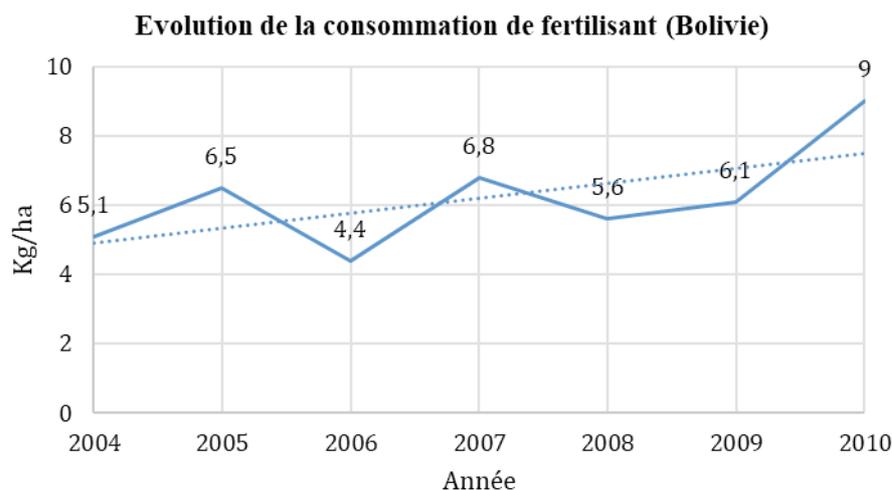


Figura 58 : Evolución del consumo de fertilizantes en Bolivia entre 2004 y 2010 (JOAPE, 2015).

Entre 2004 y 2010, hubo un aumento del 43% en el consumo de fertilizantes químicos en todo el territorio Boliviano. Este aumento, debido a la llegada de productos químicos a Bolivia, permitió a los productores aumentar sus rendimientos para satisfacer las necesidades de la población y, en teoría, mejorar su ingreso promedio.

Sin embargo, esta agricultura predominante familiar y de subsistencia, cuyas parcelas promedian en 1,5 hectáreas por familia, sufre los caprichos del clima (variaciones de temperatura, temporadas retrasadas, lluvias irregulares, aumento de la sequía). Los ciclos cambian y hay una reducción en la productividad de los cultivos. Por lo tanto, a los agricultores les resulta cada vez más difícil superar estos problemas climáticos (Gomez et al, 2009; Hoffmann & Requena, 2012).

Según el PNUD (Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo), el área alrededor del lago está cambiando de una economía agrícola a una economía ganadera. En los últimos 30 años, el área ocupada para el cultivo de papas se redujo del 35% al 26%, y la de los forrajes aumento del 39% al 59%. Podemos imaginar que en el futuro las producciones tenderán hacia el monocultivo de forraje.

Por lo tanto, podemos asumir que tendrá un uso creciente de fertilizantes o una desaparición de áreas dedicadas a los cultivos alimentarios. La agricultura causa agotamiento a largo plazo, salinización y drenaje del suelo. Además, la mala gestión de los cultivos conduce a la degradación del suelo (erosión por el agua y el viento). Por ejemplo, después de cosechar cultivos anuales, el suelo se deja desprotegido y degradado. La degradación de la cobertura vegetal por parte de los humanos debido al ganado (pastoreo) y la extracción de madera (como la thola y la yareta) son otras causas de preocupación con respecto a la degradación del suelo.

En el Perú, el área nacional dedicada a la agricultura en 2016/2017 se estimó en 2 077 000 hectáreas; o sea, un aumento de 0,4% con respecto al año anterior. Los bovinos, ovejas, alpacas, llamas, cerdos y pollos son los principales animales de la ganadería. Pero también, incluye cuyes (conejos nativos) y otros lepóridos. Estos se alimentan en parte de plantas acuáticas (Ministerio de Agricultura y Riego, 2017).

El área agrícola en la región de Puno se estima en 211 000 hectáreas. Puno participa en más del 50% del mercado de carne y fibra de alpaca (66% y 56%, respectivamente). Los cultivos más importantes de la región son: papas (35%), avena forrajera (25%), alfalfa (13%), cebada (7%), quínoa (3%) y café (3%). Si bien los Andes presentan la tierra más fértil del país, no es la región que produce la mayor cantidad de recursos tecnológicos y financieros.

Bolivia y Perú son países ricos en diversidad genética agronómica (tubérculos y cereales andinos). Por lo tanto, es esencial preservar esta agro-biodiversidad, las prácticas culturales y los conocimientos ancestrales relacionados con el sector agrícola andino. En este caso, la valorización de la profesión agrícola y la dinamización de las áreas rurales podrían ser interesantes. Además, debería ser necesario establecer servicios de capacitación agrícola para el uso de pesticidas y fertilizantes, y conciencia del peligro de exceso de estos productos para suelos, aguas subterráneas y aguas de lagos. El cambio climático puede afectar esta actividad socioeconómica de una manera más o menos intensa, pero nunca podrá ser controlado. La desecación y el desplazamiento de las estaciones podrá obligar a los agricultores a adaptarse y cambiar su comportamiento y sus hábitos agrícolas (riego, semillas más resistentes a la aridez, entre otros).

7) La cría, el sobrepastoreo y la destrucción de los bofedales y totorales

Los bofedales y los totorales son espacios de plantas que ahora están amenazados por el sobrepastoreo, la contaminación animal orgánica y el cambio climático. De hecho, el ganado apila el suelo, tiende a comer las totoras, destruyendo así los ecosistemas creados por estas plantas y contaminando el agua en nitrato y fósforo por sus descargas orgánicas. Además, el cambio climático es responsable del derretimiento de los glaciares, por lo que los bofedales se convertirán en el único reservorio de agua para el lago a lo largo del tiempo. Con el desarreglo estacional inducido por el clima, los bofedales también están amenazados por la sequía, que a largo plazo podría tener graves consecuencias para los flujos de agua del lago, las áreas de ganadería y de pastoreo.

Las totoras y, en general, las macrófitas acuáticas permiten limitar la erosión y, por lo tanto, la resuspensión de muchos sedimentos y retener los contaminantes evitando su dispersión. Por lo tanto, controlan la turbidez y la contaminación del medio ambiente acuático en el que se desarrollan. Además, representan un lugar de alimentación y un refugio para la vida silvestre (especialmente los peces, pero también las aves acuáticas), un nodo crucial para toda la vida acuática. Los bofedales son espacios únicos para evitar que el agua derrita los glaciares y las precipitaciones y luego, lentamente (con un efecto tampón), la devuelve al lago según las estaciones. Son esenciales para la cría, en particular de las llamas, y para la calidad y cantidad de agua del lago.

En 2009, el Departamento de La Paz (donde se incluye El Alto) produjo 12 443 toneladas de carne proveniente de la ganadería. En el Perú, la ganadería es una actividad económica importante, principalmente basada en los ovinos, alpacas, bovinos y la avicultura. Estas producciones aumentan constantemente para satisfacer la creciente población y la creciente demanda de proteínas animales. Las aldeas rurales cerca de los ríos Ramis y Suches están sujetas a contaminación minera y su número de animales se está reduciendo debido a la contaminación (Ocola Salazar et al., 2017).

En Puno, la disponibilidad de pastos naturales ha permitido el desarrollo de la ganadería extensiva, a pesar de todo, responsable de una presión significativa en los suelos, favoreciendo así su erosión, y las plantas acuáticas, incluidas las totoras utilizadas como forraje para el ganado.

Además, según FAO-INRENA (2005), 309 557 hectáreas fueron deforestadas en el Altiplano peruano. Aunque en descenso, la deforestación es una amenaza para el lago. Son las poblaciones rurales quienes deforestan, de manera desproporcionada, los árboles y arbustos y especialmente las totoras para cocinar, construir o calentar sus hogares, alimentar ganado, reconstruir las islas de los Uros, entre otros.

Las macrófitas acuáticas (o sea, los humedales) y bofedales son, por lo tanto, espacios para ser protegidos y mantenidos con el fin de preservar mejor los ecosistemas del Lago Menor y la calidad de sus aguas. Esto requiere el monitoreo y manejo de las áreas de pastoreo del ganado para controlar las entradas de nitrógeno y fósforo y para evitar la presión del sobrepastoreo en las áreas donde se cultiva totora. Las especies locales criadas (como las llamas) deben ser valoradas. De hecho, su cría, menos común en el Altiplano, es una fuente de menos contaminación, menos consumo de forraje y agua. Los llamas apisonan menos la tierra que el ganado y causan menos daño en sus áreas de pastoreo. La combinación de las dos crías (ganado para carne y leche, y llamas para lana y carne) sería favorable a la protección de bofedales, totorales y el lago.

8) La aplicación y evolución o no de leyes y regulaciones sobre el medio ambiente, actividades humanas y planes de urbanización

En el ámbito del sistema TDPS, existen normas legales generales que regulan la gestión binacional, nacional y territorial del medio ambiente y las actividades socioeconómicas.

a) Políticas ambientales

En el Perú, una de las principales preocupaciones de las autoridades es la formulación de la política ambiental nacional (Decreto Supremo 012-2009-MINAM, publicado el 23 de mayo de 2009). El objetivo general de esta política es mejorar la calidad de vida de la población y el desarrollo sostenible del país. Esto está formulado en el Plan Nacional de Acciones Ambientales (PLANAA). La gestión ambiental ha establecido **cuatro temas clave**:

- 1) La conservación y el uso sostenible de los recursos naturales y el mantenimiento de la diversidad biológica,
- 2) La gestión de la calidad ambiental,
- 3) La gobernanza ambiental,
- 4) Los compromisos y oportunidades ambientales internacionales.

Además, un programa ha sido establecido por los municipios. Se trata de una propuesta voluntaria que destaca **tres objetivos fundamentales** de las responsabilidades asignadas a ellos:

- 1) El tratamiento y la reutilización de aguas residuales domésticas,
- 2) El reciclaje y la disposición final de residuos sólidos municipales.
- 3) El ordenamiento territorial para el desarrollo sostenible.

En Bolivia, el Plan Nacional de Desarrollo se basa en políticas ambientales. Estas están orientadas a la adaptación y mitigación del cambio climático, el desarrollo a través del valor agregado de los recursos naturales, la sostenibilidad ambiental y la armonía con la naturaleza. Esto implica relaciones entre los seres humanos, y entre la sociedad y el estado con la naturaleza, promoviendo así un desarrollo integral y diverso.

Es muy importante que ambos países implementen sus respectivos instrumentos para la gestión de los recursos hídricos. Varias leyes importantes han sido aprobadas en los últimos años, en las cuales se han desarrollado instrumentos marco, como el Plan Nacional de Saneamiento Básico, una acción de 10 años del Ministerio de Vivienda y Servicios Básicos, la constitución de SENASBA y de EMAGUA. El SENASBA (Servicio Nacional para la Sostenibilidad de los Servicios Básicos de Saneamiento) desarrolla y refuerza las capacidades participativas, inclusivas, equitativas y transparentes de los operadores para la sostenibilidad de los servicios básicos de agua potable y saneamiento, contribuyendo al bienestar de la población boliviana. EMAGUA (Entidad de Aplicación de Medio Ambiente y Agua) gestiona y ejecuta de manera efectiva programas y proyectos de inversión pública en agua, saneamiento y medio ambiente para el "bienestar" de la población boliviana (PNUMA, 2011).

b) Ley de Medio Ambiente y Gestión de Recursos

En el Perú, el gobierno de Ollanta Humala (2011-2016) tuvo como característica el voto de los "paquetazos normativos", una legislación especial que tiene como objetivo promover la inversión. Estos "paquetazos" tratan una amplia variedad de temas, incluido el medio ambiente, debilitan una serie de derechos territoriales y debilitan el monitoreo de la institución ambiental. Las principales amenazas son: el abandono y la falta de protección del medio ambiente y los territorios de los pueblos indígenas y el permiso para el acaparamiento de tierras. Su característica más peligrosa es que simplifica los pasos del

procedimiento para obtener una concesión minera. Otra norma (Ley N° 30.327) aprueba la concesión de la servidumbre de tierras en barbecho y la entrega temporal de dichas tierras para proyectos de gran escala. Por lo tanto, el gobierno continúa imponiendo una lógica de "simplificación administrativa" que favorece la inversión, mientras ignora derechos como el de la consulta previa y viola los derechos de propiedad, posesión y la autonomía comunal en cuanto al uso de la tierra. También criminaliza el uso del territorio de los pueblos indígenas al invocar el concepto de usurpación agravada cuando ocurre en los "derechos de paso o ubicación de un área otorgada para proyectos de inversión" (Agurto & Hurtado Mariño). Todas estas nuevas leyes, bajo el pretexto de promover la inversión privada, y de este modo impulsar la actividad económica, debilitan considerablemente los poderes del MINAM (Ministerio de Medio Ambiente de Perú).

En Bolivia, la Ley de Medio Ambiente es fundamental para cuestiones ambientales como la silvicultura, el agua, la biodiversidad y la explotación de los recursos hidrobiológicos. Esta ley penaliza ciertos delitos contra el medio ambiente relacionados con la pesca y las actividades pesqueras. Más específicamente, cuando una persona envenena, contamina o altera las aguas destinadas al consumo público, agrícola, industrial o piscícola, más allá de los límites permisibles, puede ser procesado. Además, de acuerdo con el artículo 110 de esta Ley, todos aquellos que, con o sin autorización, cazan, pescan o capturan, utilizan medios prohibidos como explosivos, sustancias tóxicas o sustancias que causan daños al medio ambiente o amenazando la extinción de especies, será castigado con privación de libertad por uno a tres años y una multa equivalente al 100% del valor de la especie capturada. Si la caza, la pesca o la captura se llevan a cabo en áreas protegidas o áreas de reserva, la pena puede incrementarse (Ley No. 1333, 1992).

c) Ley de actividades piscícolas

En el Perú, la autorización para practicar acuicultura se obtiene después de la verificación de los requisitos indicados en el TUPA (Texto Único de Procedimientos Administrativos): un documento de gestión que contiene los procedimientos administrativos que, por obligación legal, deben ser iniciados por las entidades para satisfacer o ejercer sus intereses o derechos (Ordenanza Regional No. 009-2009-GR-PUNO).

Para el 2021, se establecerá un plan nacional para el desarrollo de la acuicultura en el Perú. La misión principal de este plan será promover la generación de recursos materiales, financieros y tecnológicos relevantes, así como los servicios técnicos y las condiciones institucionales apropiadas para facilitar la inversión privada en la producción y comercialización de productos pesqueros de la acuicultura en los mercados nacionales e internacionales. La principal herramienta de la legislación pesquera actual es la regulación de la pesca y la piscicultura anexada al Decreto Supremo N° 22.581 del 14 de agosto de 1990. Esto entró en vigor formalmente, pero su efectividad real está muy limitada al tiempo presente. De hecho, la principal razón para el bloqueo de la implementación de este reglamento radica en la disolución del CDP (Centro de Desarrollo Pesquero) que formó su brazo operativo y ejecutivo en aplicación de la Ley de Descentralización Administrativa de 1995.

Además, el gobierno ha dado al desarrollo de la piscicultura solo una prioridad muy limitada. El financiamiento para programas y proyectos es incierto, especialmente con la descentralización administrativa, un proceso de transferencia de poderes del estado a las autoridades locales, que luego se benefician de una cierta autonomía de decisiones y su propio presupuesto.

En Bolivia, el tema piscícola fue ampliamente cuestionado hace unos años. El consumo nacional de pescado sigue siendo demasiado bajo, según el gobierno. Las autoridades ahora reconocen y valoran la importancia del pescado para la economía regional y la seguridad alimentaria de la población. Al inicio del proyecto, en 2011, las comunicaciones y las relaciones públicas entre la pesca y las organizaciones de piscicultura eran muy raras. En adelante, gracias al apoyo del proyecto PPV ("Peces Para la Vida"), un mayor número de líderes locales saben cómo influir en las políticas públicas y comenzar a defender activamente el sector. El estado aprobó recientemente la legislación relacionada y estableció la IPD PACU (Institución Pública Descentralizada de Pesca y Acuicultura) como la nueva autoridad nacional responsable del sector. El fortalecimiento organizativo y las actividades de gobernanza en el sector de la acuicultura de peces han reunido a todas las partes involucradas en las cadenas de valor del pescado y han contribuido a la aprobación de herramientas que informarán el desarrollo de nuevas políticas públicas. Las lecciones de las experiencias locales y nacionales forman una base sólida, que ahora permite a los pescadores y piscicultores influir en el desarrollo de políticas. En el corto y mediano plazo, este proceso determinará la contribución

de la producción pesquera a la seguridad alimentaria y la soberanía alimentaria de la población boliviana (Salas & Macnaughton año).

d) Proyecto Nacional para la Innovación de la Pesca y la Acuicultura (PNIPA)

En el Perú, el PNIPA es un proyecto que se lanzó en 2015 por el Ministerio de Producción (PRODUCE). El principio fundamental del PNIPA es promover la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación en el sector de la piscicultura. Este proyecto tiene como objetivo:

- Lograr una mejor articulación entre los diferentes agentes económicos para generar y acelerar la dinámica de innovación de la pesca y la acuicultura de manera sostenible.
- Desarrollar la capacidad de los principales actores nacionales en materia de innovación, así como identificar, generar, validar y promover la adopción de productos y procesos innovadores en la pesca y la acuicultura.
- Desarrollar y mejorar la disponibilidad del mercado de servicios para innovar en los productos y procesos de producción, procesamiento, comercialización y consumo de la acuicultura doméstica.
- Construir un marco institucional sistemático y coherente, garantizar la gestión política y administrativa activa del proceso de renovación del sector de la pesca y la acuicultura, así como la promoción de la inversión privada.

Podría ser interesante hacer este proyecto binacional con Bolivia, particularmente en la región del Altiplano.

e) Ley de actividades mineras

En el Perú, la ley de minería incluye todo lo relacionado con el uso de sustancias minerales en el suelo y subsuelo del territorio nacional, así como en el dominio marítimo. Todos los recursos minerales pertenecen al Estado, cuya propiedad es inalienable e imprescriptible. En julio de 2004, el Congreso peruano reglamentó el tratamiento de residuos mineros. Sin embargo, la nueva ley tenía algunas deficiencias. De hecho, ofrece a las empresas mineras la posibilidad de rescindir sus concesiones y renunciar a sus derechos mineros, transfiriendo así al gobierno la obligación y la enorme carga de restauración de los sitios. Y hoy el estado de varias minas cerradas demuestra la falla de esta ley. Estos sitios cerrados continúan contaminando por décadas. El Ministerio de Energía y Minas del Perú propuso una modificación de la ley en el Congreso y, el 25 de mayo de 2005, estableció que el Estado asumiría la rehabilitación de los sitios dañados por la minería solo cuando las partes responsables no pueden ser identificados. Actualmente, la ley especifica que los propietarios de las minas siguen siendo responsables de la restauración de los sitios, incluso en caso de pérdida o terminación de sus concesiones (Realidad minera, 2012) (SEMANA económica, 2017). El 22 de julio de 2017, se estableció un decreto supremo (N° 010-2016-MINAM). Prohíbe el uso, la comercialización, la distribución y el almacenamiento de mercurio con el propósito de extraer oro. Además, también existe una ley que prohíbe las minas informales.

Bolivia ha promulgado una nueva ley minera que le dará al estado mayor control sobre el sector y le otorgará un monopolio sobre minerales clave como el litio. Las regulaciones promulgadas por el gobierno indican que solo COMIBOL, la comisión minera boliviana, puede celebrar acuerdos con capital privado para explotar los depósitos del país (Gestión, 2014) (Somos Sur, 2014). La legislación se describe como relativamente laxa y no existe una prohibición específica de la actividad informal.

f) Plan de Gestión Ambiental Integral de Residuos Sólidos (PIGAR)

Este plan propone herramientas de gestión de residuos sólidos en la región de Desaguadero, cuya implementación contribuirá a la mejora del servicio público de limpieza y ayudará a contrarrestar los impactos negativos de los residuos sólidos que existen actualmente, proteger la salud de la población y mantener un ambiente agradable y saludable. Este plan de manejo está dirigido por el Comité Binacional de Manejo de Residuos Sólidos de Desaguadero (CBGRSD) (Perú - Bolivia). Su función es garantizar la

implementación, operación y sostenibilidad del proyecto a través de la participación ciudadana, los mecanismos de consenso, la educación y la conciencia ambiental, y mediante una propuesta tecnológica viable. Lo que contribuirá a la gestión integral de los residuos sólidos. La comunicación social, la educación y la conciencia ambiental son claves para crear condiciones favorables para el desarrollo de PIGARS. Las acciones en esta área deben desarrollarse en paralelo con la mejora del servicio público de limpieza para reforzar los impactos positivos en la ciudad.

El proceso actual de gestión de residuos sólidos en ambos países es inadecuado y, sobre todo, la eliminación final de los residuos sólidos está mal hecha. En este contexto, es necesario llevar a cabo acciones complementarias a corto y largo plazo, lo que contribuirá a la efectividad de la implementación del proyecto.

Existen leyes, pero no son suficientes para evitar la sobreexplotación de los recursos naturales. Por lo tanto, es urgente revisar las leyes esenciales relacionadas con el respeto por el medio ambiente y la contaminación del ecosistema, y establecer organismos de supervisión y sanciones que se apliquen en caso de que no se respeten la ley (normas).

9) Turismo

En Bolivia, el sector del turismo aportó más de \$ 692 millones en 2015, un aumento del 5,3% respecto al año anterior, según datos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2018). Este flujo representa \$ 37,2 millones más que en 2014, dijo el INE. En promedio, 750 000 visitantes al año descubren los secretos de los paisajes andinos, compartidos por Perú y Bolivia, y la verdad sobre el estado actual del Lago Titicaca. Bolivia tiene más de 1 millón de visitantes cada año (1,2 millones en 2015), mientras que Perú tiene más de 3 millones de visitantes cada año (en aumento cada año). Estos aumentos en el número de visitantes a ambos países tienen un impacto real y positivo en la economía, aunque los ingresos de esta actividad a menudo son beneficiosos para una pequeña parte de la población, pero negativos para el medio ambiente y la cultura de la población de los dos países.

Además, la ciudad de Puno y sus alrededores han dejado de ser un mero punto de tránsito entre Cuzco y La Paz, convirtiéndose en un destino en sí mismo. De hecho, ha habido un aumento del 59% en los visitantes a la región de Puno desde 2009. Mientras que en Bolivia, Copacabana y las islas del Sol y de la Luna han sido el principal destino turístico del país durante más de un medio siglo. Por lo tanto, el lago Titicaca se ve particularmente afectado por esta nueva forma de industria y podría volverse cada vez menos atractivo para esta actividad económica si la contaminación urbana e industrial continúa.

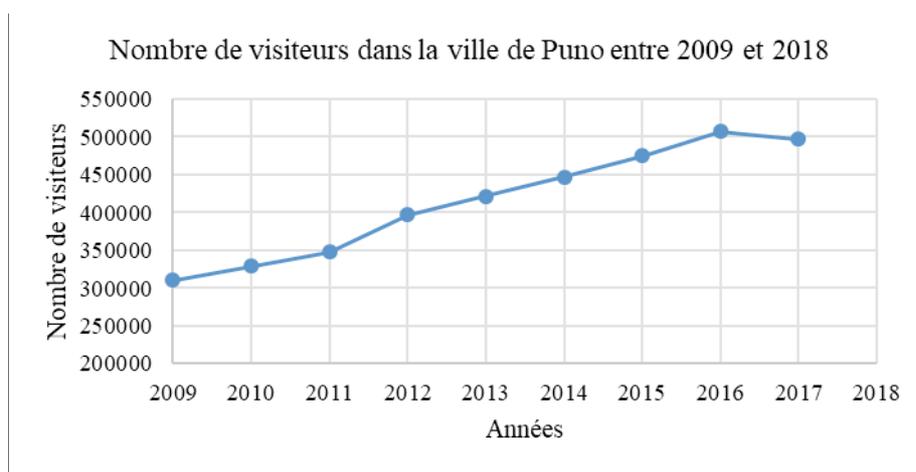


Figura 59 : Evolución del número de turistas en Puno entre 2009 y 2017 (MJ'Ecko, 2018).

El turismo ciertamente genera ingresos para la población local, pero también es una fuente importante de contaminación. El crecimiento de este sector ha disparado el número de infraestructuras hoteleras (20% en 5 años, de 2005 a 2010). El desplazamiento de turistas (autobuses, vehículos, botes, transbordadores), viviendas y alimentos pone presión sobre los recursos y la salud del Lago Titicaca. Las aguas residuales de los hoteles, los residuos (plásticos, metales) en las playas o los lugares de los pasajes alcanzan visualmente y ecológicamente este ecosistema. A la contaminación de las aguas residuales de la población y al turismo, se adiciona una contaminación por los hidrocarburos, debido a que el turismo ha incrementado el uso del

transporte contaminante (Terrazas et al., 2017). El turismo intensivo en el área es en parte responsable de la desaparición de algunas especies endémicas andinas (PNUMA, 2011).

En el Perú, la ciudad de Juliaca recibe cientos de miles de visitantes que pasan cada año. En esta ciudad, 200 toneladas de desechos diarios se descargan en gran medida en el río Coata, que desemboca, mediante la bahía exterior de Puno, en el lago Titicaca, que se convierte en un receptáculo de desechos, aunque es la reserva de agua dulce más grande en Sudamérica.

El archipiélago de las islas de los Uros es otra herejía turística, que daña y degrada diariamente el lago, su biodiversidad y la cultura andina. Estas islas se llaman así debido a los primeros habitantes ahora desaparecidos. Originalmente estas islas fueron creadas por los Uros en el siglo XIII para escapar de los Incas, la tribu rival. Hoy en día, están habitados por los Aymaras. Estos ocupan estas islas flotantes con fines turísticos, perpetuando las tradiciones de los Uros. El área de las islas flotantes es la más turística de Puno. Hay aproximadamente 37 814 visitantes extranjeros y nacionales en 2017. En 2017, la isla de Taquile recibió 105 753 visitantes. En las islas de los Uros, cada año, se agrega una capa de totoras a estas islas superficiales para mantenerlas en condiciones. Puede encontrar tiendas, habitaciones, cajeros automáticos, pero hasta ahora no se ha establecido ningún sistema de purificación eficiente.

Todos los desechos (sólidos, aguas residuales, ...) se encuentran directamente en la Bahía Interior de Puno. Además, están ubicados en un área protegida, donde encontramos la mayor densidad de totoras de la región de Puno, macrófitas acuáticas esenciales para la preservación de la calidad del agua del Lago Titicaca. Existe un conflicto de intereses entre la autoridad a cargo de la protección del Lago y, en particular de esta área, y los habitantes de las islas, apoyados por el gobierno peruano.

Por lo tanto, es esencial (i) garantizar el desarrollo de una actividad turística respetuosa del medio ambiente con una dinámica sostenible de acuerdo con los intereses de todos, (ii) practicar un turismo que valore la cultura local y tradicional y el lago, (iii) desplegar plantas de tratamiento y técnicas innovadoras (baños secos) y accesibles (hotel ecológico, comida tradicional), para limitar los impactos ambientales generados por esta actividad y evitar el deterioro del entorno. Se encuentra un compromiso entre la conservación del Lago Titicaca, su fauna y flora endémicas, y el desarrollo económico.

10) Actividades mineras

Las producciones de metales en el sistema TDPS se enfocan principalmente en estaño, zinc, plata y oro (a menudo ilegalmente) en las cuencas del río Ramis en el Perú y Suches en Bolivia. Esta economía es extremadamente contaminante, tanto para el medio ambiente como para la salud humana, y es a menudo una fuente de ilegalidad e informalidad. La minería, aunque artesanal, a menudo informal y cooperativa, es la segunda industria extractiva más grande de Bolivia, después de los sectores de petróleo y gas. Esta actividad representa aproximadamente el 14% del PIB nacional de Bolivia y representa con hidrocarburos el 75% de las exportaciones (Ocola Salazar et al., 2017). Esta actividad es parte de alrededor el 10% del PIB nacional peruano.

Los sitios mineros en la zona Titicaca se dividen en 6 cuencas. Hay en total cerca de 862 sitios pasivos. De acuerdo con la Ley No. 28721, se consideran los sitios pasivos, instalaciones, efluentes, emisiones, residuos o depósitos de residuos producidos por las operaciones mineras de los sitios actualmente abandonados o inactivos. Estos sitios pueden, de hecho, perpetuar una forma de contaminación difusa en el medio ambiente y particularmente en las aguas de los ríos. Los sitios pasivos, como los sitios activos, son por lo tanto un riesgo permanente y potencial para la salud de la población. Las actividades de los mineros privados son a menudo informales y mal controladas. Estos últimos aún mantienen la actividad de algunas minas previamente cerradas (Ocola Salazar et al., 2017).

En un estudio reciente (Monroy, 2017), Mario Monroy, doctor en ecotoxicología de la Universidad de Barcelona, mencionó los niveles de mercurio, cadmio (subproducto de la minería o residuos industriales), zinc y cobre. muy por encima de los estándares autorizados (5 a 100 veces más altos) en cuatro tipos de peces que forman parte de la dieta de la población local, un indicador confiable del mal estado ecológico del lago en áreas poco profundas (Bahía de Cohana y Bahía Interior de Puno) y en las desembocaduras de los ríos Ramis y Coata en el norte del Lago Mayor. La concentración de mercurio en el pescado de la especie carachi amarillo es de 2,51 microgramos por gramo de pescado seco, una diferencia cuatro veces mayor que el límite permitido por las autoridades sanitarias y de alimentos. Las consecuencias entonces inevitablemente se refieren al hombre que consume estos peces y depende directa o indirectamente de las aguas del Lago Titicaca. Por los fenómenos de bioacumulación y biomagnificación, hay un aumento en la concentración de contaminantes a lo largo de la cadena alimentaria.

En el sector peruano, los desechos sólidos y las aguas residuales de las ciudades de Juliaca y Puno se agregan a los metales pesados devueltos por las minas de las cuencas de los ríos Suches y Ramis. Puno es una importante zona productora artesanal de oro. La cuenca del río Ramis es también un lugar donde se desarrolla esta producción. Ahí, se encuentran cantidades muy grandes de mercurio. En Bolivia, se estima que se emiten 130 toneladas de mercurio por año (Mongabay, 2016). El río Ramis es el afluente del Lago Titicaca más contaminado, principalmente desechos tóxicos y metales pesados provenientes directamente de las minas y, por lo tanto, la primera fuente de contaminación minera del Titicaca. En la región de Puno hay alrededor de 10 000 minas de oro informales. Estas organizaciones tienen un impacto significativo en el sistema de agua. Es esta área la más contaminada con mercurio.

Sin embargo, estos metales pesados, para los seres vivos tienen una toxicidad que puede afectar el metabolismo de los peces, invertebrados, aves y seres humanos. Por ejemplo, altas concentraciones de cobre afectan a las branquias, por lo que los organismos acuáticos pueden morir de hipoxia (una reducción en la cantidad de oxígeno suministrado a los órganos a través de la sangre) (Terrazas et al., 2017). El trastorno de la cascada trófica puede aumentar el riesgo de eutrofización.

Las minas también pueden causar el drenaje de la lluvia ácida cuyo flujo depende de la temporada de lluvias y cuyo material se transporta a las aguas circundantes. Generan sulfato de hierro (FeSO_4) y ácido sulfúrico (H_2SO_4), que una vez en el agua se convierten en iones de sulfato (SO_4^{2-}), en los iones de hidrógeno H^+ que tiene el efecto de acidificar el agua del lago, los iones férricos (Fe^{3+}) y los iones ferrosos (Fe^{2+}). Actúan como lixiviados, produciendo finalmente la disolución de los metales sulfatados.

Esta reacción, que genera iones de hidrógeno, da como resultado la acidificación del medio y la movilización de los iones metálicos. El efecto inmediato de este fenómeno es hacer que los efluentes mineros ácidos sean

más corrosivos. El efecto consecuente es aumentar, en estas soluciones ácidas, la movilización de alto nivel de varios metales pesados, como hierro, zinc, plomo, cadmio, manganeso, etc. Por lo tanto, aumenta su solubilidad y el agua se vuelve más tóxica; que de otra manera estarían en aguas superficiales en cantidades insignificantes. La presencia simultánea de varios metales puede causar una toxicidad mayor que la de cada metal separado. Por ejemplo, el zinc, el cadmio y el cobre son tóxicos a un pH bajo y actúan de forma sinérgica para inhibir el crecimiento de algas y afectar a los peces. La acidificación sola es directamente responsable de la mortalidad significativa de las poblaciones de peces y crustáceos, las perturbaciones en su tasa de crecimiento y reproducción. Los efectos indirectos de la acidificación son la degradación del hábitat de los peces y los cambios en las relaciones depredador-presa (interrupción de la cadena alimentaria). El efecto consecuente, además de acidificar el agua de la superficie, es aumentar la salinidad de estas aguas y potencialmente su toxicidad.

El drenaje ácido es una forma de contaminación difusa que puede tener consecuencias devastadoras para el medio ambiente y la salud de la población. La exposición al agua contaminada por el drenaje ácido de la mina conduce a cánceres, problemas dermatológicos y alteraciones cognitivas. La presencia de metales pesados compromete el desarrollo del sistema nervioso de los fetos. La actividad de los agricultores y criadores que están río abajo de la contaminación está en peligro. Desafortunadamente, este fenómeno puede continuar durante cientos de años después del cierre de la mina y se considera irreversible a escala humana (Keita, 2013).

Las autoridades competentes deben absolutamente (cf. ANA, 2017):

- Hacer cumplir la normativa vigente para las actividades de extracción de minerales legales.
- Identificar y erradicar las actividades mineras ilegales.
- Detener el transporte de combustibles a las minas, especialmente a las minas informales e ilegales. De hecho, sin combustible, la actividad se detendrá.
- Después de identificar y erradicar la actividad informal de extracción de minerales, será necesario garantizar el desarrollo de actividades socioeconómicas más sostenibles y amigables con el medio ambiente que permitan a las familias de los ex mineros satisfacer sus necesidades.

D- Conservación de la biodiversidad y biorremediación

1) Impactos en la biodiversidad y consecuencias

a) Intensificación del cambio climático y actividades humanas

Dos factores principales impactarán la biodiversidad: (a) la intensificación del cambio climático correspondiente al aumento de las temperaturas, la alteración de la estacionalidad, los cambios en la calidad del agua (eutrofización) y el nivel del agua (batimetría), y (b) actividades humanas relacionadas con la aceleración de la urbanización. Todos estos parámetros alterarán las cadenas tróficas, las condiciones físico-químicas (reciclaje de nutrientes y estequiometría, atenuación vertical de la radiación solar, etc.) y biogeoquímica (reducción de la concentración de oxígeno disuelto, actividades de bacterias reductoras de sulfato, producción de sulfuro de hidrógeno (H₂S), metilación y demetilación, ...).

La combinación de estos factores podría llevar a la desaparición de ciertas especies (como ciertas especies de *Orestias*, la rana gigante (*Telmatobuis culeus*), aves acuáticas como el zambullidor de Titicaca (*Rollandia microptera*) que no tendrá el tiempo o la capacidad de adaptarse a las nuevas condiciones ambientales. La disminución de la profundidad del agua aumentará la salinidad (la concentración será mayor) y muchas especies de animales y plantas no podrán adaptarse. Otras especies, como los patos y las gaviotas, podrían beneficiarse de este cambio en la calidad del agua.

La boga (*Orestias pentlandii*) y el suche (*Trichomycterus rivulatus*), peces nativos de la cuenca del Titicaca, están ahora en peligro de extinción debido a la depredación por el pejerrey (*Basilichthys bonariensis*), pero también por la explotación irracional de los pescadores artesanales binacionales. La caza tradicional con fines alimenticios, medicinales o culturales también tiene graves consecuencias para ciertas especies que ya están en peligro de extinción, como las especies de pato (*Anas ferruginea*, *Anas puna* y *Anas georgica*), el cormorán (*Phalacrocorax brasilianus*) y las gallinas acuáticas (*Gallinula chloropus* y *Fulica ardesiaca*) (PNUMA, 2011).

b) La deforestación

La deforestación también podría tener graves consecuencias para el medio ambiente. De hecho, el grado de deforestación en el TDPS es alto. La deforestación es una de las principales causas de la erosión del suelo. Reduce la producción agrícola y la capacidad de retención de agua en el suelo, provocando inundaciones durante la temporada de lluvias y disminuyendo la disponibilidad de agua para uso humano, animal y de riego. En la parte peruana del TDPS, la demanda de leña por persona en las áreas rurales se estima en 5 m³ por año. En la cuenca del Titicaca, el número y la densidad de algunos árboles endémicos se reducen: mullu mullu (*Ribes brachybotrys*) y kiswara (*Chuquiraga jussieui*) (PNUMA, 2011).

c) La quema de totoras

La quema de totoras en la Reserva Nacional del Titicaca, un área protegida cerca de Puno y en otras áreas del Lago también es un problema recurrente. En 2009, se registraron un total de 1 476 ha de totoras quemadas. Hoy en día, la quema de totoras supera todas las expectativas que ponen en peligro la diversidad de especies que viven en el área de reserva (aves, peces, anfibios, invertebrados ...). La destrucción de estos nichos ecológicos es un desastre para el mantenimiento de la biodiversidad. Pero las totoras no solo están en peligro por la mano del hombre. El cambio climático, a través de la disminución del nivel del lago y el aumento de la temperatura, tiene un efecto devastador sobre las macrófitas en áreas poco profundas (PNUMA, 2011).

d) Retroalimentación dentro de un sistema ecológico

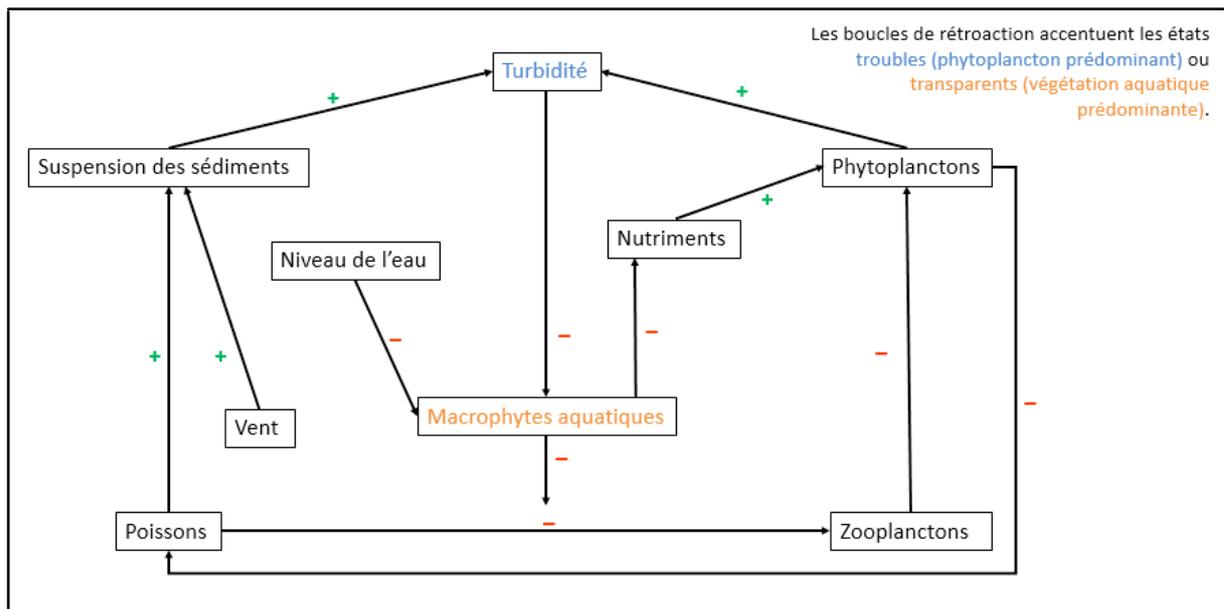


Figura 60 : Ciclo de interacciones entre fitoplancton (micro-algas) y macrófitas acuáticas (plantas emergentes de Totorá, Lemna flotante y Chara sumergida) que refuerza la existencia de estados alternativos (agua clara vs. agua turbia) (modificado de Scheffer et al., 1998).

Basados en los trabajos de Marten Scheffer, hemos podido desarrollar un nuevo modelo de retroalimentación que nos permite sugerir que las actividades antropogénicas y el calentamiento global conducirán a un aumento en la cantidad de nutrientes en el lago, una disminución en el nivel del lago, e intemperies cada vez más violentos y frecuentes.

De este modo, la intensificación del viento favorecerá la resuspensión de los sedimentos y, al mismo tiempo, el aumento de los nutrientes conducirá a un desarrollo del fitoplancton. Estos dos factores causarán un aumento de la turbidez, lo que afectará la densidad de las macrófitas acuáticas. La relación pez-zooplancton se verá afectada por la reducción de las macrófitas. De hecho, proporcionan un hábitat adecuado para el zooplancton protegiéndolos de los peces. En consecuencia, una disminución en las macrófitas conducirá a una disminución en el zooplancton y por lo tanto en el desarrollo del fitoplancton. A partir de esta observación, se puede predecir que la cantidad de oxígeno disponible en el lago se agotará, lo que llevará a una reducción en la población de especies aeróbicas (peces, macro-invertebrados). Si observamos una disminución en los macro-invertebrados, también podemos observar un aumento en el perifitón (micro-algas y bacterias que se desarrollan encima de las macrófitas) y, por lo tanto, una rápida senescencia de las macrófitas acuáticas. Además, la disminución en el nivel del agua podría resultar en la disminución de las plantas sumergidas (por ejemplo, charas) y en el aumento de la densidad de las plantas emergentes (por ejemplo, totoras).

Por lo tanto, dentro de cien años, existe el riesgo de una disminución en la diversidad de las especies nativas y, probablemente, un aumento de las especies exóticas para las cuales el ambiente podría volverse más y más favorable; por ejemplo, la *Hyaella* (Crustacea Amphipoda), que genera la llegada de los flamencos.

2) Los metales pesados

Los metales pesados también pueden tener terribles consecuencias para las especies animales y vegetales y para los humanos. Los niveles altos de cobre afectan a las branquias y los organismos acuáticos pueden morir a causa de la hipoxia (una reducción en la cantidad de oxígeno suministrado a los órganos a través de la sangre). El principal efecto del zinc en la salud es afectar las defensas antioxidantes a nivel transcripcional y enzimático. El plomo puede producir efectos agudos en el sistema nervioso central, dolor y debilidad muscular, convulsiones hemolíticas, anemia grave y hemoglobinuria (Terrazas et al., 2017). El metil mercurio puede ser rápidamente absorbido por el fitoplancton y, por lo tanto, pasar a organismos superiores en la cadena alimentaria, se considera un catión extremadamente peligroso (Monroy et al., 2014; Guédron et al., 2017; Lanza et al., 2017). Los animales se acumulan más rápido de lo que pueden excretar, por lo que hay un aumento en las concentraciones en la cadena alimentaria (bioacumulación o biomagnificación) convirtiendo el metil mercurio en una amenaza para la salud humana. Este fenómeno se aplica a todos los contaminantes (Fonturbel, 2008).

Además, según los otros dos escenarios: nivel de agua y eutrofización, notamos que el nivel del lago probablemente disminuirá, lo que impactará la biodiversidad animal y vegetal de este ecosistema, porque la cantidad, correlacionada con el nivel de agua también disminuirá. Estas macrófitas son nichos ecológicos para varias especies acuáticas. La erosión y la contaminación probablemente aumentarán, debido a la disminución del nivel de agua y la disminución de las totoras. La eutrofización podría implicar una disminución consecuente de la biodiversidad, de hecho, si genera la creación de zonas anóxicas, las especies animales se encontrarían en una zona sin oxígeno.

3) Los contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes, o micro-contaminantes, incluyen una gran cantidad de sustancias químicas utilizadas diariamente por la población. Estos contaminantes incluyen los disruptores endocrinos, medicamentos, cosméticos y productos fitosanitarios. Estos micro-contaminantes son motivo de preocupación porque muchos productos farmacéuticos y de uso doméstico, así como productos químicos industriales, se utilizan y liberan de forma continua en el medio ambiente. Incluso en cantidades muy pequeñas, algunos pueden inducir toxicidad crónica, alterar el sistema endocrino de los humanos, la fauna acuática y promover el desarrollo de patógenos bacterianos resistentes. Estudios en Europa y las Américas han demostrado que los disruptores endocrinos están cada vez más presentes en el medio ambiente (residuos de hormonas de píldoras anticonceptivas, medicamentos, productos pecuarios ...), por su presencia en las aguas residuales domésticas e industriales vertidas al medio ambiente. Los disruptores endocrinos pueden causar cánceres (senos, testículos, ovarios y próstata), problemas reproductivos o diabetes (Samia). Estos micro-contaminantes se encuentran en los ecosistemas porque las plantas de tratamiento no pueden eliminarlos. Se están realizando numerosos estudios científicos para comprender mejor los impactos causados por estos contaminantes y encontrar soluciones de purificación (UNESCO, 2014).

a) Origen de los disruptores endocrinos como los medicamentos

Después de sus usos terapéuticos o diagnósticos, los disruptores endocrinos, como los medicamentos, no siempre se metabolizan completamente, por lo que terminan en aguas residuales, como se puede ver en la Figura 78 (Fenet et al., 2016).

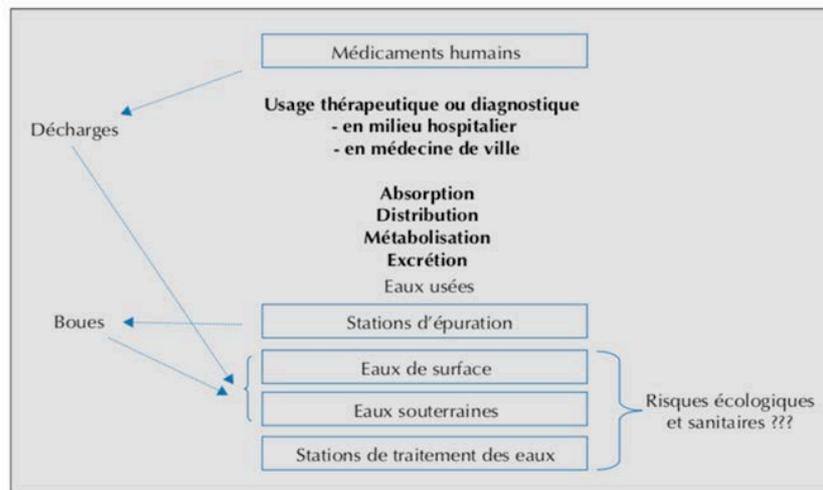


Figura 61 : Principales vías de contaminación del medio acuático por medicamentos de uso humano (Levi, 2006).

Los antibióticos, los agentes hipolipemiantes, los antiinflamatorios no esteroideos, los anticonvulsivos, los agentes de contraste yodados, los bloqueadores β y los anticonceptivos se encuentran con frecuencia en las plantas de tratamiento de aguas residuales. El destino de estas moléculas es muy variable en las plantas de tratamiento, donde se aplican diferentes fenómenos, como la sorción y la biodegradación. Por lo tanto, si las plantas de tratamiento no logran eliminar todos los residuos de medicamentos, se encuentran en las descargas de la estación (STEP) y en los diferentes niveles de agua. (Fenet et al., 2016) Los rastros de medicamentos no solo provienen del uso humano sino también de las actividades industriales farmacéuticas, establecimientos de cuidado y de la ganadería (figura 78) (Levi, 2006).

Las concentraciones de medicamentos que se encuentran en las aguas residuales están entre nanogramos y microgramos por litro (Levi, 2006).

b) Ejemplo de residuos encontrados en aguas residuales en los Estados Unidos

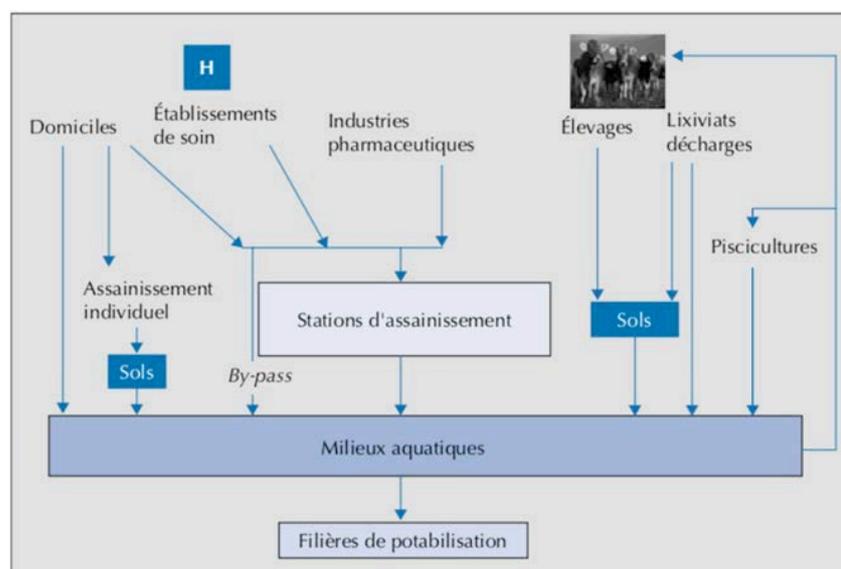


Figura 62 : Diagrama de los diversos orígenes de los antibióticos y sus residuos en el agua (Kolpin et al., 2000).

Según este estudio, el 50% de los 139 sitios en los Estados Unidos contenían rastros de antibióticos. Los ejemplos de moléculas de antibióticos y su concentración se muestran en la siguiente tabla (Kolpin et al., 2000).

Antibiotique	Médiane ($\mu\text{g/L}$)
Chlortétracycline	0,42
Ciprofloxacine	0,02
Érythromycine	0,1
Lincomycine	0,06
Norfloxacine	0,12
Oxytétracycline	0,34
Roxithromycine	0,05
Sulfadiméthoxine	0,06
Sulfaméthazine	0,22
Sulfaméthizole	0,13
Sulfaméthoxazole	0,15
Tétracycline	0,11
Triméthoprime	0,15

Figura 63 : Mediana ($\mu\text{g/L}$) de valores de residuos de antibióticos encontrados en aguas superficiales en los Estados Unidos (Kolpin et al., 2000).

c) Ejemplo de residuos encontrados aguas residuales en Europa

Se llevaron a cabo estudios sobre aguas residuales sin tratar (aguas de entrada de STEP), aguas tratadas secundarias (aguas de tratamiento secundario) y aguas tratadas terciarias (aguas de tratamiento terciario) de 21 plantas de tratamiento para cuantificar las sustancias farmacéuticas presentes (Soulier et al., 2011)

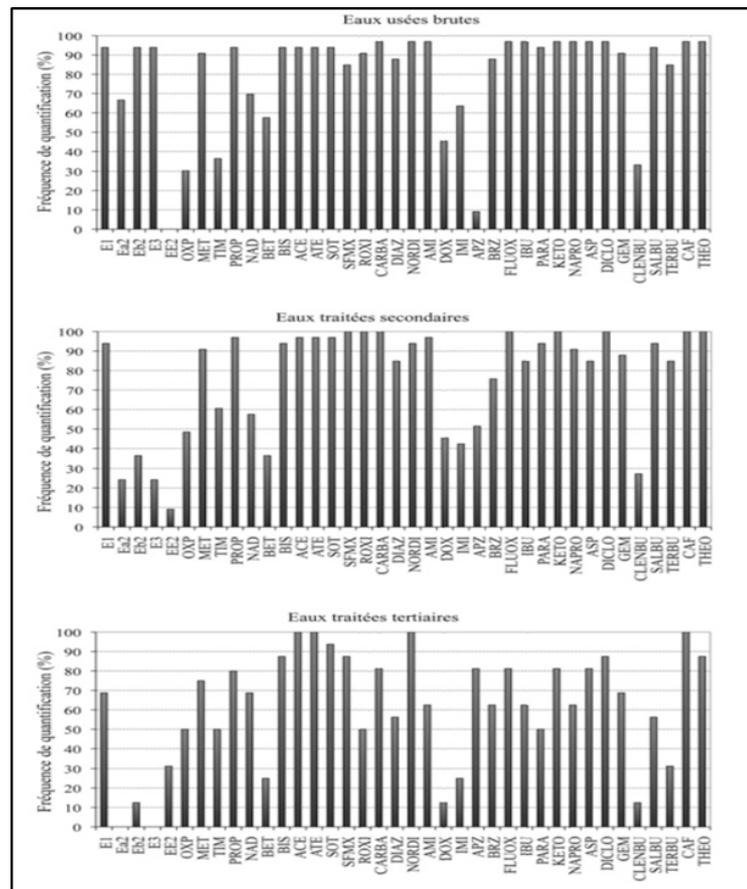


Figura 64 : Frecuencia de cuantificación (%) de sustancias farmacéuticas en aguas residuales sin tratar y aguas tratadas (secundarias y terciarias) (Soulier et al., 2011).

Según esta figura, las sustancias se encuentran en más del 80% de las aguas tratadas en las PTAR. Sin embargo, sus concentraciones siguen siendo bajas (excepto para Ibuprofeno, Teofilina, Aspirina y Paracetamol), más bajas que $\mu\text{g/L}$, excepto para Aspirina, Paracetamol, Ibuprofeno, Cafeína, Teofilina. y Ketoprofeno cuyas concentraciones están entre diez y cien $\mu\text{g/L}$ en aguas residuales sin tratar.

Así, se observa gracias a estas eficiencias de eliminación, una eficiencia creciente de los procesos primarios, secundarios y terciarios:

- Los procesos primarios solo tienen bajos rendimientos, menos del 30%. Los tratamientos biológicos secundarios (como los lodos activados con aireación prolongada) tienen rendimientos de más del 70% para la mitad de las sustancias estudiadas.
- Los procesos terciarios (ósmosis inversa, ozonización, filtración con carbón activado) son más eficientes. Estos métodos podrían mejorar la eliminación de Estrona, Etinilestradiol, Aspirina, Cafeína y Oxprenolol, ya que las plantas de tratamiento no están diseñadas para eliminar los micro-contaminantes orgánicos presentes en las aguas residuales. Estos procesos terciarios, que son costosos y todavía poco utilizados en el campo del saneamiento, son más a considerar (Soulier et al., 2011).

d) Caso del lago Léman (o de Ginebra)

Cada año, la CIPEL (Comisión Internacional para la Protección de las aguas del Lago Léman, transfronterizo entre Francia y Suiza) lleva a cabo un programa de análisis para la búsqueda de micro-contaminantes en el lago. Este programa no se limita a los productos fitosanitarios, sino también a las sustancias producidas por las actividades farmacéuticas, así como a los disruptores endocrinos. Los contenidos de metales pesados son relativamente bajos y cumplen con los requisitos de la legislación sobre agua potable. Las concentraciones totales de pesticidas varían de 0,1 a 0,2 $\mu\text{g/L}$ y se han estabilizado desde 2008. Algunos medicamentos, como Metformina, Gabapentina, Carbamazepina, Carisoprodol y agentes de contraste se han detectado en concentraciones significativas en el lago y en los ríos (Ortelli et al., 2010).

Unos estudios han demostrado que los micro-contaminantes presentes en las descargas de aguas residuales causan hermafroditismo en peces machos expuestos, una masculinización de algunas especies de peces hembras expuestas a descargas industriales. También hay un aumento en la tasa de aborto y esterilidad de los animales de granja que beben agua del lago y una feminización de los congéneres masculinos en las gaviotas presentes en el área. En el caso del agua potabilizable, estos micro-contaminantes pueden tener impactos negativos significativos en la salud humana, como el retraso del crecimiento fetal y el aumento de la prevalencia de tumores de próstata, testículos y mama (Ramseier Gentile et al., 2013).

Muchos estudios muestran que los micro-contaminantes, o "contaminantes emergentes", tienen consecuencias perjudiciales para la salud humana y para la biodiversidad. Estos contaminantes están cada vez más presentes en las aguas residuales domésticas e industriales. Desafortunadamente, las plantas de tratamiento no están diseñadas para eliminar estas micro-partículas, que luego se encuentran en aguas naturales (lagos, ríos, aguas subterráneas ...) que causan desastres ecológicos. Actualmente, ningún estudio ha establecido una correlación entre la presencia de estos contaminantes y el fenómeno de la eutrofización.

4) Indicadores de captura de carbono en macrófitas (charas, totoras) y fitoplancton

a) El fitoplancton

La biota marina desempeña un papel importante en la regulación de los ciclos biogeoquímicos y en la fijación del CO_2 atmosférico que tiene un impacto en el control climático global. La química del agua utiliza carbono orgánico disuelto (COD) en el agua para monitorear la evolución de la contaminación orgánica en ambientes acuáticos.

Hay indicadores de captura de carbono en el medio ambiente acuático como las totoras o charas y el fitoplancton. El fitoplancton define todos los microorganismos fotosintéticos, pasivos, libres y suspendidos en la columna de agua. Son células, filamentos, colonias que pueden ser móviles y cuyos movimientos están

restringidos a los movimientos del medio ambiente acuático (Groga, 2012). Sin embargo, si el ambiente está muy agitado, se vuelve turbio, el fitoplancton no puede desarrollarse debido a la falta de luz, porque su principal fuente de energía proviene de la fotosíntesis (CNRS, 2018).

Mediante la fotosíntesis, el fitoplancton absorbe el carbono mineral disuelto en el agua para producir materia orgánica. El dióxido de carbono se almacena en sus tejidos como un compuesto orgánico como los carbohidratos (UVED, 2008). Representa un paso importante en la bomba de carbono oceánica biológica. Este mecanismo se explica por la transferencia vertical de carbono de la superficie a las zonas profundas, en contraste con el gradiente de concentración. A la muerte de estos organismos, los cadáveres y los detritos caen en profundidad transportando el carbono que contiene. Además, la transferencia vertical de carbono y su almacenamiento, temporal o permanente, se fomenta mediante otros mecanismos como la agregación, el buceo del fitoplancton y los productos resultantes de depredadores directos o indirectos del fitoplancton.

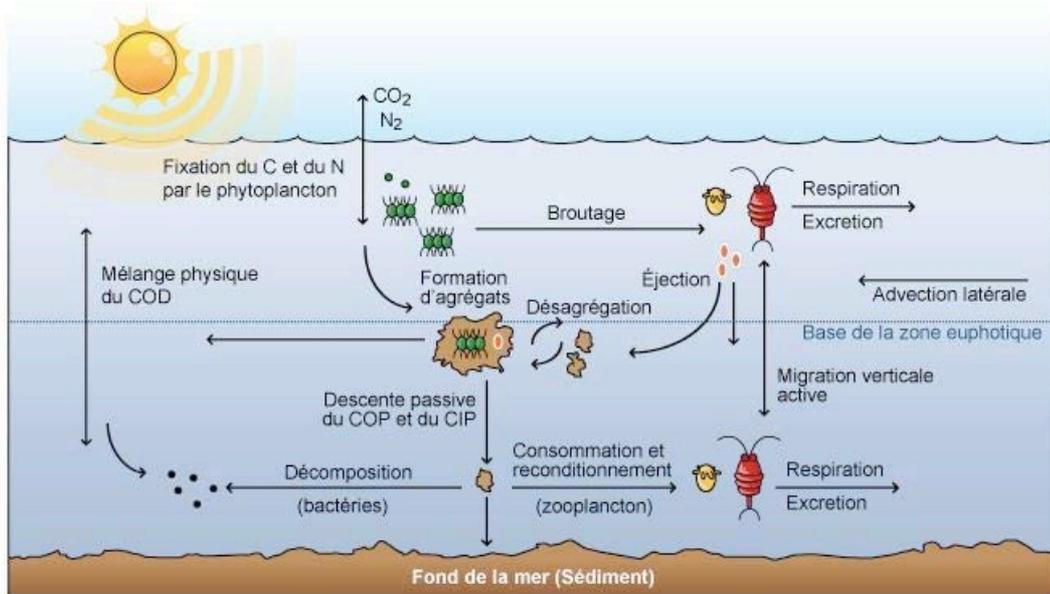


Figura 65 : Bomba biológica para carbono (y nitrógeno) (UVED, 2008).

El potencial para la exportación vertical de carbono puede verse afectado por otros procesos biológicos, como la migración vertical del zooplancton o del necton, exudación y secreción de materia orgánica disuelta, respiración, actividad exo-enzimática asociada, solubilización de partículas, y procesos hidrodinámicos. La transferencia vertical de carbono orgánico está asociada con organismos vivos. Esto corresponde a la bomba de tejidos blandos. La transferencia vertical de carbono inorgánico (calcita y aragonita) solo se asocia con organismos calcáreos que constituyen la bomba de tejido duro o la bomba de carbonato (UVED, 2008). Estos organismos calcáreos se encuentran en profundidad y forman depósitos sedimentarios de carbonato (Quéguiner, 2013).

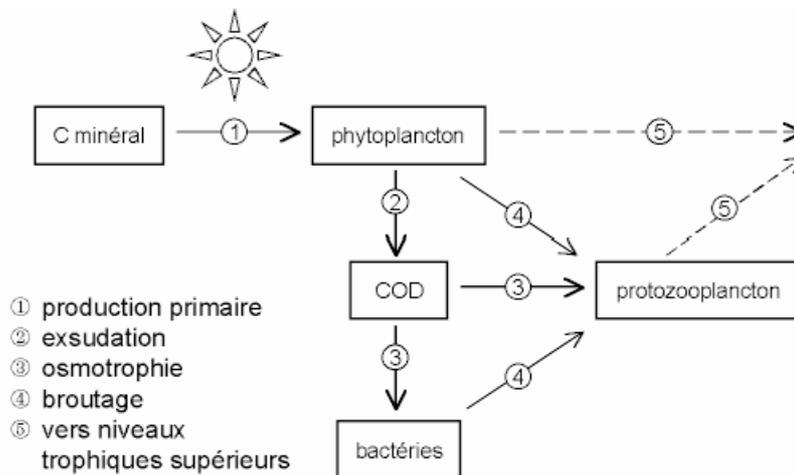


Figura 66 : Papel del proto-zooplancton en la transferencia de carbono entre los dos primeros niveles tróficos (Quéguiner, 2013).

El papel del proto-zooplankton es a menudo proporcional a la biomasa bacteriana. Además, se considera esencial para la cadena de reutilización del carbono orgánico disuelto a partir de la exudación fitoplanctónica trófica (Quéguinier, 2013).

El fitoplancton puede formar eflorescencias debido a varios factores, como concentraciones altas en nutrientes, estabilidad hidrodinámica, temperatura y luz. El fitoplancton puede ubicarse en la zona eufótica donde la luz es más importante, o en las capas más bajas donde las concentraciones de nutrientes son más altas. Algunos son capaces de superar parcialmente la necesidad de nutrientes a través de su capacidad para almacenar y transformar el nitrógeno atmosférico. La tasa de crecimiento y la dependencia de nutrientes del fitoplancton también son variables. Para hacer frente a las variaciones ambientales, las especies de fitoplancton han desarrollado estrategias adaptativas, como mecanismos que promueven su movilidad o migración hacia áreas ricas en nutrientes y luz, competencia inter-específica y, finalmente, mecanismos de defensa contra la depredación (alelopatía) (Groga, 2012).

La eficiencia de la asimilación de nutrientes en condiciones oligotróficas parece mejorar con la turbulencia. Esto permite a los organismos mantenerse a pesar de las condiciones de vida desfavorables (Cadier, 2016).

Además, la temperatura controla muchas de las propiedades funcionales fundamentales del fitoplancton y es un regulador de la producción primaria en la mayoría de los lagos. La baja temperatura puede reducir la actividad de las enzimas, la absorción de nutrientes y el crecimiento de algas (Groga, 2012).

La síntesis de materia orgánica por el fitoplancton requiere macro-nutrientes como el fósforo, nitrógeno, hierro y sílice (en el caso de diatomeas y silico-flagelados) y una multitud de micro-nutrientes como el zinc, cobre, manganeso etc. Las características de crecimiento esenciales para su uso se utilizan en el manejo de los dos tipos principales de modelos de crecimiento que se utilizan para describir la dependencia del crecimiento en la concentración de nutrientes. Los modelos de tipo Monod (1942, 1949) se usan generalmente y para los cuales la absorción de nutrientes está directamente relacionada con la concentración en el ambiente (Cadier, 2016).

El valor de la relación N/P que informa sobre la deficiencia de nutrientes, se utiliza para explicar la dinámica estacional de las comunidades de plancton. Se puede usar para determinar si alguno o ambos nutrientes se han agotado para limitar el crecimiento. Por lo tanto, la relación estequiometría N/P es un indicador de la evolución de las comunidades de algas (Groga, 2012).

Además, existen varias formas de calcular la incorporación de carbono por el fitoplancton: por ejemplo, una técnica utilizada por IRD (Lazzaro, 1981), incubando poblaciones naturales de fitoplancton en viales de plástico transparente colocados a la profundidad de muestreo con una adición de carbono mineral radiactivo (^{14}C). Después de unas horas, es posible contar la radioactividad del fitoplancton incubado en un contador de centelleo (IRD, 2008).

b) Las macrófitas

Las plantas acuáticas liberan más oxígeno durante la fotosíntesis de la que consumen cuando respiran por la noche. Durante la fotosíntesis, la planta absorbe dióxido de carbono, produce glucosa y libera oxígeno. Durante la fase de respiración, la glucosa es una fuente de energía para la planta, para absorber oxígeno y liberar dióxido de carbono. Las raíces de las plantas absorben sustancias minerales y las convierten en oxígeno durante la fotosíntesis. Los microorganismos presentes en el agua, transforman las impurezas en minerales. La presencia de macrófitas revela el estado trófico del agua, es decir, la cantidad de nutrientes presentes en el agua y especialmente en los sedimentos (Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 2016). Su presencia es importante porque ayudan a mantener el equilibrio del ecosistema.

Las macrófitas consisten principalmente en agua (80 a 90% de su biomasa), realizan el mecanismo de transpiración. Es durante este período que el agua sube por las raíces gracias al fenómeno de la ósmosis, atraviesa la planta y es evacuada por las hojas para traer los elementos nutritivos. Este líquido, llamado "savia cruda", está compuesto solo de agua y minerales. Además, las macrófitas desempeñan un papel importante en la filtración del agua, así como en la absorción de contaminantes y el exceso de nutrientes. De

hecho, absorben los nitratos y utilizan el fósforo para crecer, lo que limita la proliferación de algas. Es por esto que tienen un papel de purificación biológica (Testard, 2013).

Además, las macrófitas son bioacumuladores transitorios. Su capacidad de almacenamiento de elementos inorgánicos y su función de redistribución de estos elementos hace posible garantizar su acción en los ciclos geoquímicos. Se puede observar una pérdida neta de P y N sedimentario durante la fase vegetativa. Estos nutrientes se pueden reciclar *in situ* durante la fase de senescencia y degradación de la materia orgánica. En consecuencia, las macrófitas activan o reactivan la circulación de nutrientes sedimentarios, pero ralentizan la de los elementos disueltos en el agua, normalmente asimilados y reciclados rápidamente en agua abierta por la asociación de fitoplancton y bacterias.

Las macrófitas tienen una afinidad por ciertos metales como el zinc, el cobre y el boro. Las macrófitas sumergidas son efectivos poli-concentradores eficientes. Estas plantas pueden acumular exceso de nitrógeno y fósforo, más allá de sus cuotas de subsistencia, las cuales son 0,13% para el fósforo y 1,3% para el nitrógeno, respectivamente (Denny, 1980). Su capacidad mínima de extracción e inmovilización de nitrógeno y fósforo es, por lo tanto, de 13 y 1,3 kg por tonelada producida (como materia seca, MS) por hectárea, respectivamente.

Las macrófitas representan un depósito considerable de materia orgánica disuelta, en forma de hidrocarburos, proteínas solubles en agua y aminoácidos, liberados completamente en el medio después de la muerte del tejido. La muerte de las macrófitas tiende a provocar la relevancia sucesiva de las producciones de bacterias y algas (Testard, 2013).

5) Conclusión

Una de las principales claves para mejorar el estado del lago y preservar su biodiversidad es la instalación de varias plantas de tratamiento eficientes, un medio que podría restaurar la belleza y la pureza de las aguas de la cuna de las civilizaciones pre-colombianas.

Por lo tanto, el objetivo para los próximos años será, proteger y mantener la biodiversidad a pesar de los impactos del cambio climático. Para evitar este desastre ecológico, sería necesario:

- Aplicar medidas de biorremediación (fitorremediación y biomanipulación), es decir, una restauración mediante manipulaciones ecológicas de comunidades acuáticas con consecuencias favorables para el funcionamiento ecológico y biogeoquímico del ecosistema.
- Aplicar y hacer cumplir las leyes, normas y regulaciones sobre la protección del medio ambiente, de ciertas especies y sobre la gestión de las actividades socioeconómicas.
- Crear una dinámica sostenible y respetuosa con el medio ambiente en torno a las actividades humanas, en particular las relacionadas con los recursos del Lago Titicaca.

E- Conclusión de los tres escenarios y recomendaciones

1) Conclusión

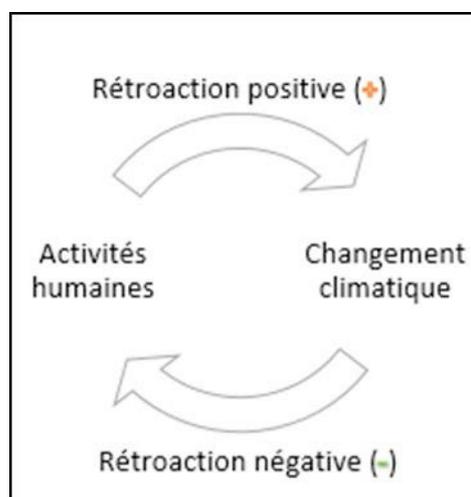


Figura 67 : Retroalimentación entre las actividades humanas y el cambio climático (MJ'Ecko, 2018).

Este diagrama ilustra el estrecho vínculo entre las actividades humanas y el cambio climático. Todos los parámetros descritos anteriormente de lo que está involucrado en el nivel del agua, la biodiversidad y la eutrofización tendrán sus consecuencias si las actividades humanas no evolucionan hacia una dinámica más sostenible. Si las medidas de adaptación se toman rápidamente y se aplica una visión económica ecológica, los efectos del desastre ecológico podrían amortizarse. Las acciones humanas son decisivas para las consecuencias del cambio climático (Hoffmann y Requena, 2012)

➤ Escenario pesimista:

Primero, observamos en el diagrama, que las actividades, principalmente económicas, ejercidas por el Hombre tienen una acción positiva sobre el clima, es decir, que acentúan los impactos causados por la perturbación climática. Todas las consecuencias de este cambio se ampliarán si las acciones humanas no se vuelven más amigables con el medio ambiente, sabiendo que el impacto del calentamiento global ya es mayor en las regiones de alta montaña tropical (dos veces más en promedio: Bradley et al., 2004, Hoffmann & Requena, 2012). Las consecuencias incluyen el aumento en la frecuencia de los eventos de El Niño y La Niña, el aumento de las precipitaciones, el aumento de la aridez y la sequía, el aumento de los desastres extremos, la disminución del nivel del lago, la extinción de muchas especies, un mayor aporte de nutrientes que conduce a un mayor riesgo de eutrofización, destrucción de bofedales, etc.

Segundo, el cambio climático tiene un impacto negativo en las actividades humanas. De hecho, más se ampliarán las acciones climáticas y menos los hombres podrán realizar sus actividades adecuadamente. Por lo tanto, es probable que observe una dependencia alimentaria a otras regiones y países, un aumento de los problemas de desnutrición, una dificultad para que la población satisfaga sus necesidades básicas (agua potable, electricidad, ...), una proliferación de patógenos, y el surgimiento de nuevas enfermedades, un éxodo cada vez más masivo a grandes centros urbanos que causan la creación de barrios marginales, el abandono de tierras rurales explotadas anteriormente, una disminución de las actividades económicas en torno al lago y del atractivo turístico, etc.

➤ Escenario optimista:

Ciertas medidas tomadas de acuerdo entre políticos, científicos y sociedades civiles podrían permitir reducir el impacto generado por las actividades humanas y el cambio climático. Sin embargo, probablemente no podrán cambiar la tendencia.

Las consecuencias del cambio climático correlacionadas con las de las actividades humanas transformarán radicalmente los ecosistemas. Por lo tanto, es importante para el estado y la sociedad civil implementar medidas de adaptación que puedan amortiguar los efectos del futuro desastre ecológico con un nuevo aprendizaje social, que es esencial para adaptarse a las nuevas condiciones. Las leyes, regulaciones e impuestos ambientales podrían ser implementados o mejorados.

Una buena gestión hídrica (tanto para la agricultura, la ganadería, el uso humano) como una buena gestión de residuos y aguas residuales (plantas de tratamiento de agua) es esencial y podría hacer frente al estrés y la actual contaminación generalizada del agua. Será esencial utilizar tecnologías adaptadas a las condiciones del Altiplano.

La agricultura sostenible y la ganadería, basadas en cultivos adaptados a la sequía, el uso limitado de insumos y camélidos, permitirían enfocar una posible escasez de recursos alimentarios y hídricos.

El desarrollo de actividades sostenibles y amigables con el medio ambiente ayudaría a mantener las condiciones económicas estables en el Altiplano, potenciar el área y mantener los recursos naturales para las generaciones futuras. La migración interna a grandes centros urbanos sería entonces limitada. Las energías renovables se podrían valorar y reemplazarían las energías (fósiles) insostenibles.

Finalmente, la sensibilización y la gobernanza adecuada ayudarán a crear una conciencia colectiva sobre el reciclaje, el ahorro de agua potable, la buena gestión de los recursos naturales, la energía, los alimentos y el respeto por el medio ambiente y particularmente para el Lago Titicaca

Todas estas condiciones, por lo tanto, reducirían el impacto de las actividades antropogénicas y, por lo tanto, reducirían la retroalimentación positiva que tiene sobre el cambio climático. Los mecanismos efectivos de la gobernanza nacional y binacional, de acuerdo con las circunstancias, permitirían mitigar los efectos del cambio climático a niveles tolerables, la urbanización controlada, una mejor gestión de las actividades humanas, una mejor calidad de vida y el desarrollo económico de toda la región del Altiplano (Hoffmann & Weggenmann, 2011).

2) Recomendaciones y propuestas generales

Estas recomendaciones se proponen luego de los estudios de campo y la bibliografía sobre el tema de la conservación del Lago Titicaca, de los humanos que viven allí y de las especies animales y vegetales. Se deben tener en cuenta con las otras recomendaciones mencionadas anteriormente en cada parte específica:

- Sensibilizar a la población, especialmente a los jóvenes (que representan a las generaciones futuras) y a los políticos (que son dueños del destino según las decisiones que están en sus manos).
- Hacer que los temas y las cuestiones ambientales sean esenciales en las políticas binacionales; armonizar las normas y procedimientos entre los dos países.
- Aplicar y hacer evolucionar las leyes sobre la preservación del medio ambiente, las actividades antrópicas y los planes de urbanización; evitar que las áreas urbanas bordeen directamente el lago (caso de Puno) y que desaparezca el cordón de macrófitas acuáticas costeras.
- Diversificar las actividades económicas y crear una dinámica económica sostenible; crear oportunidades de mercado laboral en áreas rurales para aliviar la 'mancha urbana de El Alto': por ejemplo, la cría de camélidos en lugar de la cría de ganado, el desarrollo del turismo respetuoso con el medio ambiente (comunitario) y los servicios del sector terciario, como el teletrabajo dependiente de buenas conexiones a Internet.
- Descentralizar los servicios públicos y mejorar las políticas de planificación territorial para evitar la migración a grandes centros urbanos; pasar de una ciudad 'espontánea' a una ciudad 'pensada' y planeada.
- Crear y mejorar el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para todas las ciudades y pueblos del Perú y de Bolivia; acoplar la ingeniería sanitaria convencional con la fitorremediación (ingeniería ecológica), con la creación de humedales artificiales con *Totora*, *Lemna*, *Chara*, a la salida de las PTAR, como se hace para por ej. en Europa con jardines de rosas; a lo largo del litoral del Lago Menor crear sistemas de recolección, retención y tratamiento de las aguas pluviales escurriendo en la cuenca, para evitar el aporte excesivo de nutrientes, materia orgánica y contaminantes al Lago Menor. Implementar humedales artificiales en municipios litorales (que no pueden albergar verdaderas PTAR); reforzar el cordón litoral de macrófitas acuáticas que sirve como filtro biológico natural, refugios contra la depredación, hábitats de alimentación y reproducción para peces y aves acuáticas.
- Mejorar el sistema de recolección de los residuos y limitar el uso de plásticos; implementar la clasificación selectiva de la basura y transportar los residuos clasificados a las plataformas de reciclaje en las ciudades mayores.
- Innovar en los sistemas que limitarían la contaminación antropogénica (acuicultura, agricultura, ganadería) y detendrían la contaminación minera.
- Aumentar la contribución de las energías renovables como la eólica y la solar, su uso también en los medios de transporte terrestre y acuático.
- Transparencia del dinero público. Desarrollar la práctica de experimentos piloto (pruebas) antes de la implementación de las obras de tamaño real, con el fin de validar los conceptos eficientes y evitar el desperdicio hacia soluciones inadecuadas y no confiables (por ejemplo, para el diseño de PTAR adaptadas a las condiciones climáticas del Altiplano y los microorganismos presentes); optimizar el rendimiento de las PTAR existentes en función de su proximidad a fuentes contaminantes; compartir infraestructuras entre los dos países, por ej. la PTAR de Yunguyo nuevo pero sin uso, cerca de Copacabana; rehabilitar las PTAR (entre las 50 existentes en la cuenca binacional) cuando sea técnica y económicamente viable.

III- Gestión binacional actual del Lago Titicaca

A- Gestión del lago Titicaca

Actualmente, a nivel transfronterizo (= supranacional) el lago el Titicaca es principalmente administrado por una institución de coordinación transfronteriza:

- ALT (Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca, Autoridad Autónoma Binacional del Lago Titicaca, <http://www.alt-perubolivia.org/>), bajo la responsabilidad de las cancillerías de ambos países (= Ministerios de las Relaciones Exteriores), que asegura la gobernanza binacional, como la gestión de la calidad de las aguas y de los recursos hídricos e hidrobiológicos.

El OBLT (Observatorio Binacional del Lago el Titicaca) es un instrumento científico de vigilancia, análisis y reflexión (<https://borea.mnhn.fr/fr/OBLT>) sostenido desde el 2015 por el IRD y la UMR BOREA (Unidad Mixta de Investigación 'Biología de los Organismos y Ecosistemas Acuáticos'). Este permite almacenar y administrar los datos y los conocimientos que conciernen al lago el Titicaca, producidos por las instituciones técnicas, científicas y académicas concernidas por ambos países. El OBLT es actualmente un observatorio científico del medio ambiente que progresivamente tomará en consideración los aspectos sociales. Su infraestructura de datos espaciales, que es el GeoVisor IIGEO/UMSA, permite no sólo almacenar bases de datos (almacenamiento) validados y actualizados (y enseñadas por metadatos), sino que contrastar capas de datos interdisciplinarios, desarrollar la cartografía dinámica, contratar imágenes satelitales y verdades terreno, y -acoplado a la modelización- elaborar escenarios futuros útil para apoyar la toma de decisiones.

EL OBLT estableció su plan de acción, para separar las diferentes reflexiones sobre la manera de alcanzar sus objetivos (Lazzaro X. 2016):

- Restaurar o mantener la calidad del agua para favorecer la conservación, la restauración y resiliencia del ecosistema. Identificamos entonces los factores principales de contaminantes, métodos de biorremediación, etc.
- La segunda se asegura de la sostenibilidad del uso del agua para la población sobre a largo plazo. Esto implica verificar los vertidos de las ciudades y sus dosis, y el impacto de la población sobre el lago.
- Mantener o restaurar una actividad económica sobre el lago como la presencia de recursos pesqueros teniendo cuidado de su equilibrio ecosistémico: el recurso piscícola e infraestructuras náuticas respetuosas del medio ambiente etc.
- Anticipar los efectos del cambio climático y de las presiones antropológicas de la urbanización del Altiplano.

El ALT y el OBLT son independientes pero complementarios, que trabajan en colaboración con otros organismos peruanos y bolivianos (ministerios, institutos de investigación, universidades). También existe un apoyo internacional (científico y financiero) en la gestión del lago.

Points Forts

GOUVERNANCE:

- Les OBТ* fonctionnent dans le cadre d'un accord multi-états
- Il y a une meilleure collaboration politique et technique entre les états riverains transfrontaliers.

GESTION ET CAPACITES

- Les OBТ détiennent une plate forme binationale qui regroupe les données des eaux des lacs.

Faiblesses des OBТ

GOUVERNANCE:

- Il n'y a pas de mandat légal pour gérer la totalité des eaux.
- Les problématiques de pollution et de gestion ne sont pas priorisées par les dirigeants des pays
- Les lacs font l'objet d'une ressource économique où les objectifs d'utilisation des états sont différents (dépollution, tourisme, pêche).

GESTION ET CAPACITES

- Les protocoles de partage de données sont souvent inexistantes. Les scientifiques ne partagent pas leurs données publiquement.
- Il y a des pénuries de financement et donc de matériels d'hydrologies et de scientifiques.

Opportunités des OBТ

GOUVERNANCE

- Les OBТ sont bien placées pour cibler et identifier les impacts importants sur les eaux souterraines transfrontalières : sur l'écoulement des cours d'eau, la qualité de l'eau et la dégradation des nappes.

GESTION ET CAPACITES

- Les OBТ peuvent soutenir les projets régionaux qui dépendent des lacs.
- Elles ont la capacité de créer une large base de données et de la partager aux autres OBТ afin de servir d'exemple.
- Elles ont la possibilité d'accueillir et de former des jeunes scientifiques dans le domaine de la gestion des eaux

Menaces des OBТ

GOUVERNANCE

- Manque de moyens financiers
- Manque de stratégies dans la gestion du lac. Quelles sont les objectifs généraux ? Préserver le lac et les activités anthropiques qui en découlent ?
- L'intérêt du lac n'est pas souvent commun entre les deux pays
- La compréhension du fonctionnement des lacs peut être très complexe. (Altitude, climat ...)

GESTION

- La durabilité des collectes de données et de partage n'est pas assurée.

Figura 68 : SWOT** de un lago transfronterizo (MJ'Ecko, 2018).

* OBТ = Organización de Cuencas Transfronterizas.

** El análisis o la matriz SWOT, del inglés Strengths (fuerzas), Weaknesses (debilidades), Opportunities (oportunidades), Threats (amenazas) es una herramienta de estrategia de empresa que permite determinar las opciones ofrecidas en un sector de actividad estratégico.

Los puntos fuertes y débiles de la gestión de un lago transfronterizo son recapitulados en el SWOT realizado más arriba. En este ejemplo de gestión compleja, se pusieron de manifiesto muchas debilidades. Es necesario explotar las oportunidades globales detalladas en el SWOT para obtener la mejor gestión posible (Vaessen et al., 2015).

Con el fin de comprender mejor las relaciones entre los diferentes organismos responsables de la gestión del lago el Titicaca, a continuación se presenta un organigrama:

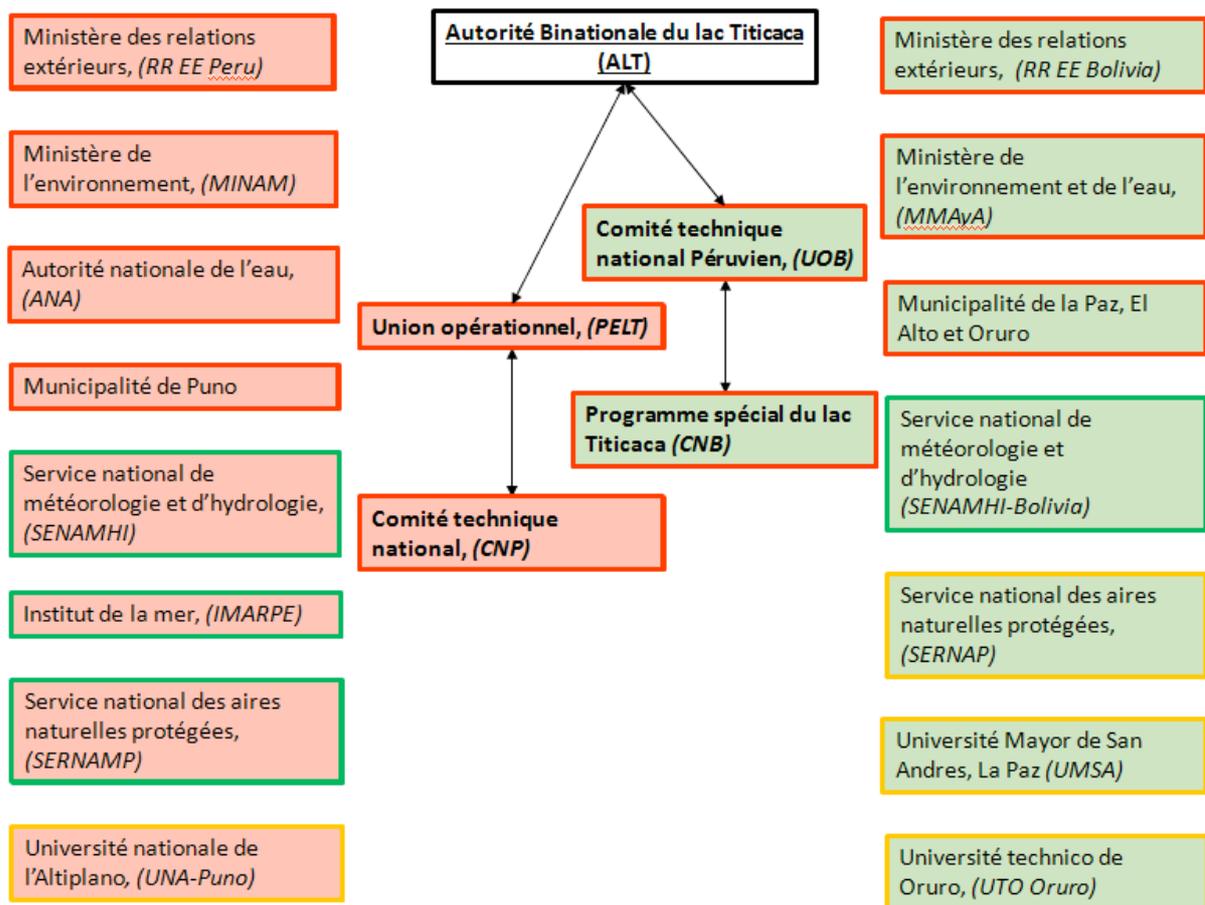
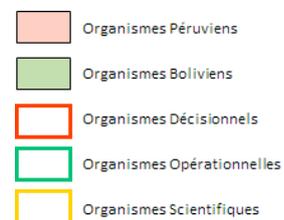


Figura 69 : Organismos peruanos y bolivianos actores de la gestión del Lago Titicaca (MJ'Ecko, 2018).



B- Ejemplo de gestión de lagos transfronterizos

1) Gestión del lago Lemán (o de Ginebra)

El lago Lemán es un ejemplo de lago transfronterizo administrado binacionalmente. Está situado entre Francia y Suiza y representa el lago alpino más grande.

La CIPEL (Comisión Internacional para la Protección de las Aguas del Lemán) es un organismo público compuesto de ingenieros e investigadores franceses y suizos. Esta comisión comprende tres niveles de acción:

1. El órgano directivo está compuesto de trece altos funcionarios suizos y franceses.

La delegación suiza comprende consejeros de estados encargados del medio ambiente provenientes de la oficina federal suiza. El departamento federal de Relaciones Exteriores suizas también está implicado. La delegación francesa es representada por ejecutivos de la delegación de la Prefectura de la Región la Auvernia Rhône-Alpes, de agentes del Ródano y consejeros departamentales (del Ain y de la Haute-Savoie).

2. La Secretaría permanente es responsable de la coordinación de los trabajos, de la gestión administrativa, técnica, científica y financiera de la comisión.
3. La subcomisión técnica está compuesta de científicos y expertos franceses y suizos (CIPEL, 2014).

La organización se aplica de la siguiente manera:

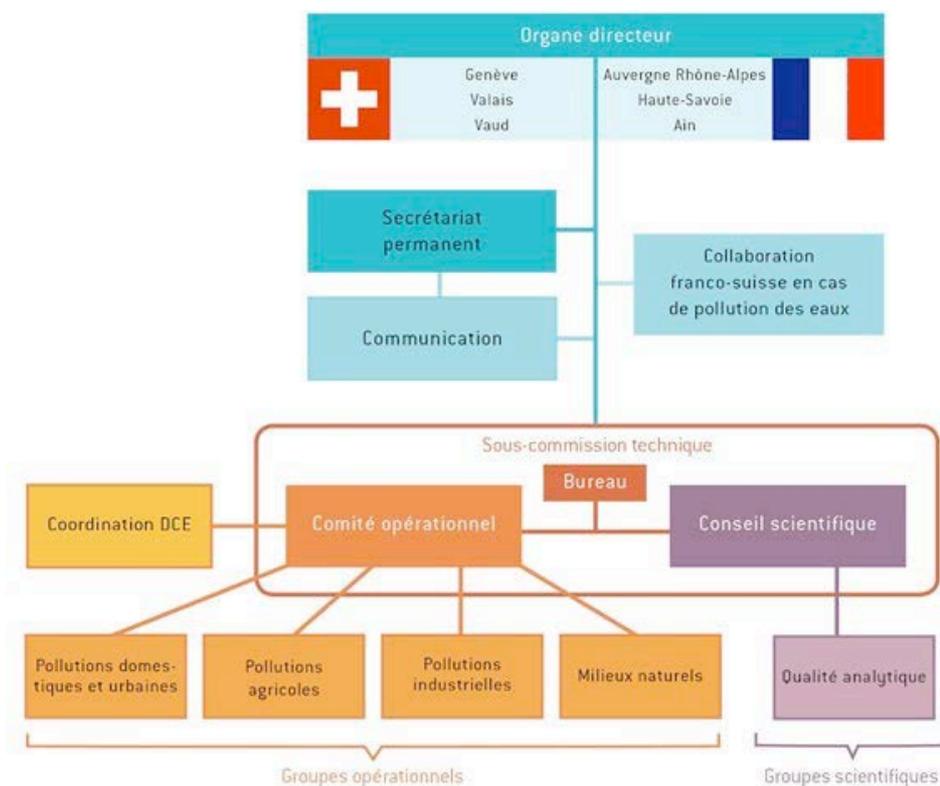


Figura 70 : Organización de la CIPEL (CIPEL, 2014).

2) Gestión de los grandes lagos de Norte América

Los grandes lagos de Norte América, que tienen una superficie de 745 600 km² y se extienden sobre más de 244 100 km², alimentan a 40 millones de personas con agua potable. Desde el siglo 19, este ecosistema es amenazado por la evolución de la economía de las regiones situadas al borde de los lagos que comprenden las grandes ciudades tales como Chicago. Así, desde 1972, Canadá y los Estados Unidos establecieron “el Acuerdo relativo a la calidad de las aguas de los Grandes Lagos”, que fue adaptado frente a los desafíos ecológicos que pesan sobre los lagos. Actualmente, y según “el Acuerdo relativo a la calidad de las aguas de los Grandes Lagos”, la gestión de los grandes lagos americanos la realiza el CEGL (Comité Ejecutivo de los Grandes Lagos). Es una colaboración canadiense y americana creada para mantener la buena calidad del agua de los grandes lagos transfronterizos.

La secretaría binacional del CEGL se ocupa del buen acuerdo y la buena gestión y también permite priorizar las expectativas y los objetivos de ambos países. Diversos comités son miembro, tales como: los representantes de los gobiernos federales, provinciales, autóctonos y municipales. Estos comités priorizaron diez temáticas de misiones principales, confiadas a agencias americanas y canadienses. Éstas están rodeadas de subcomités y equipos de trabajo con el fin de llevar a cabo las diferentes misiones.

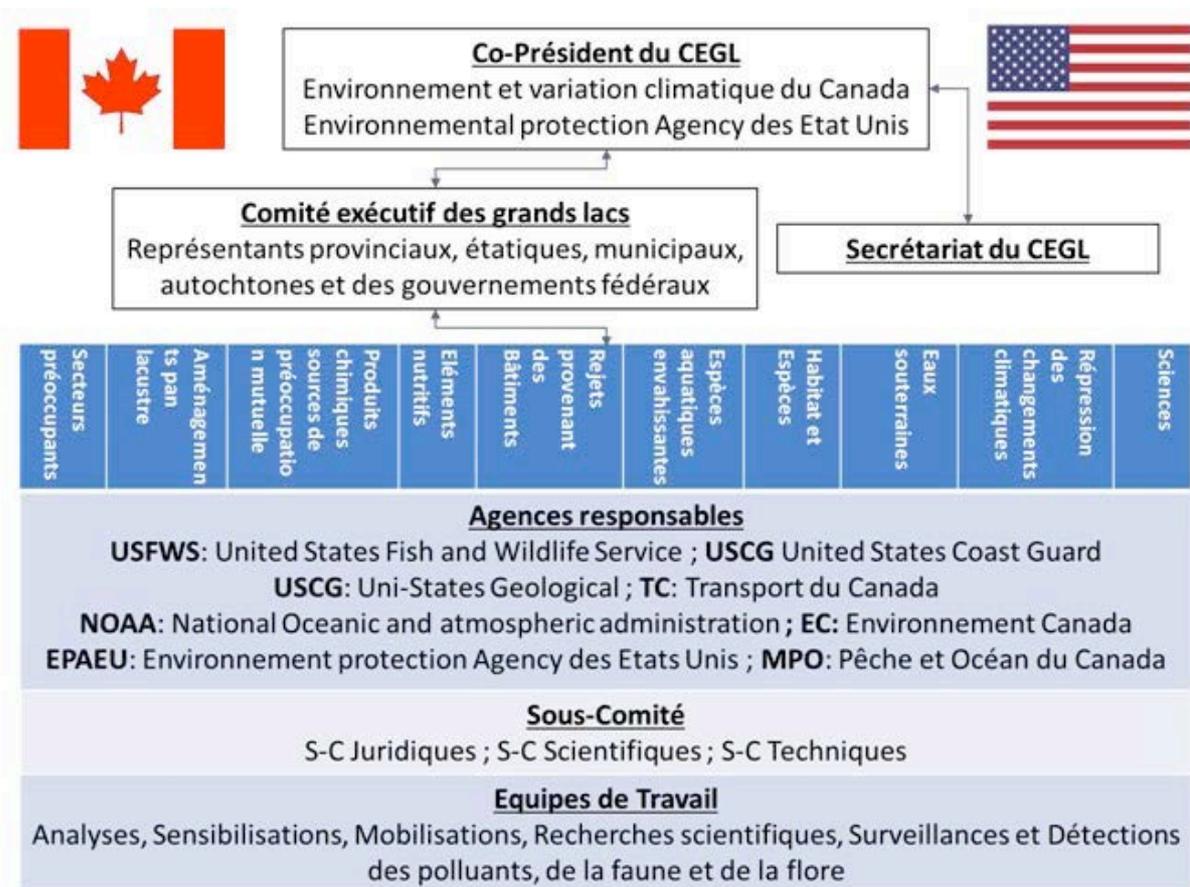


Figura 71 : CEGL Gestión de los grandes lagos norteamericanos (MJ'ecko, 2018).

3) Gestión del lago Tchad

Hasta hoy, el lago Chad es un gran lago africano (el 4to más grande) con una superficie actual de 2 000 km², contra 25 000 km² antes de 1973. Es compartido entre cuatro países transfronterizos: Chad, Níger, Nigeria y Camerún. La población de la cuenca del lago Chad está estimada en 37,2 millones de habitantes en 2003.

Al borde del lago se encuentran importantes actividades: pesca, ganadería, transporte fluvial, agricultura (con irrigación) y turismo (e.j.: safaris). El lago Chad presenta numerosos problemas como una baja importante del nivel de agua, la salinización del agua y la intensificación de la desertificación en un contexto de cambio climático. Estos problemas impactan fuertemente los modos de vida de las poblaciones locales (e.j.: desnutrición).

El lago es administrado por la Comisión de la Cuenca del Lago Chad, creada el 22 de mayo de 1964, por los cuatro países ribereños del lago. La República centroafricana se adhirió a la organización en 1996 y Libia ha sido admitida en 2008. La comisión tiene por objeto administrar de manera sostenible y equitativa el lago Chad y otros recursos en aguas compartidas, preservar los ecosistemas del estanque convencional del lago y promover la integración regional, la paz y la seguridad en conjunto de la cuenca.

La comisión de la cuenca del lago Chad es organizado en tres niveles decisorios:

1. El consejo de los jefes de estado que es la instancia suprema de decisión y de orientación de la comisión. Se reúne una vez por año.
2. El consejo supervisor es la instancia de supervisión y de control de la comisión. Se reúne anualmente para definir el presupuesto y el programa de la comisión. Hay dos comisionados por estado miembro. El consejo de los comisionados también puede pedir el apoyo de los comités consultivos (partes interesadas, proveedores de fondos, etc.)
3. La secretaría ejecutiva aplica las decisiones para los dos actores anteriores según los principios directivos definidos entre los estados miembro. Está dividida en dos direcciones generales, “administrativa y finanzas” y “operaciones”. La dirección general de operaciones tiene como objetivo aportar el apoyo científico y técnico de la CBLT (Comisión de la Cuenca del Lago Chad, 2016).

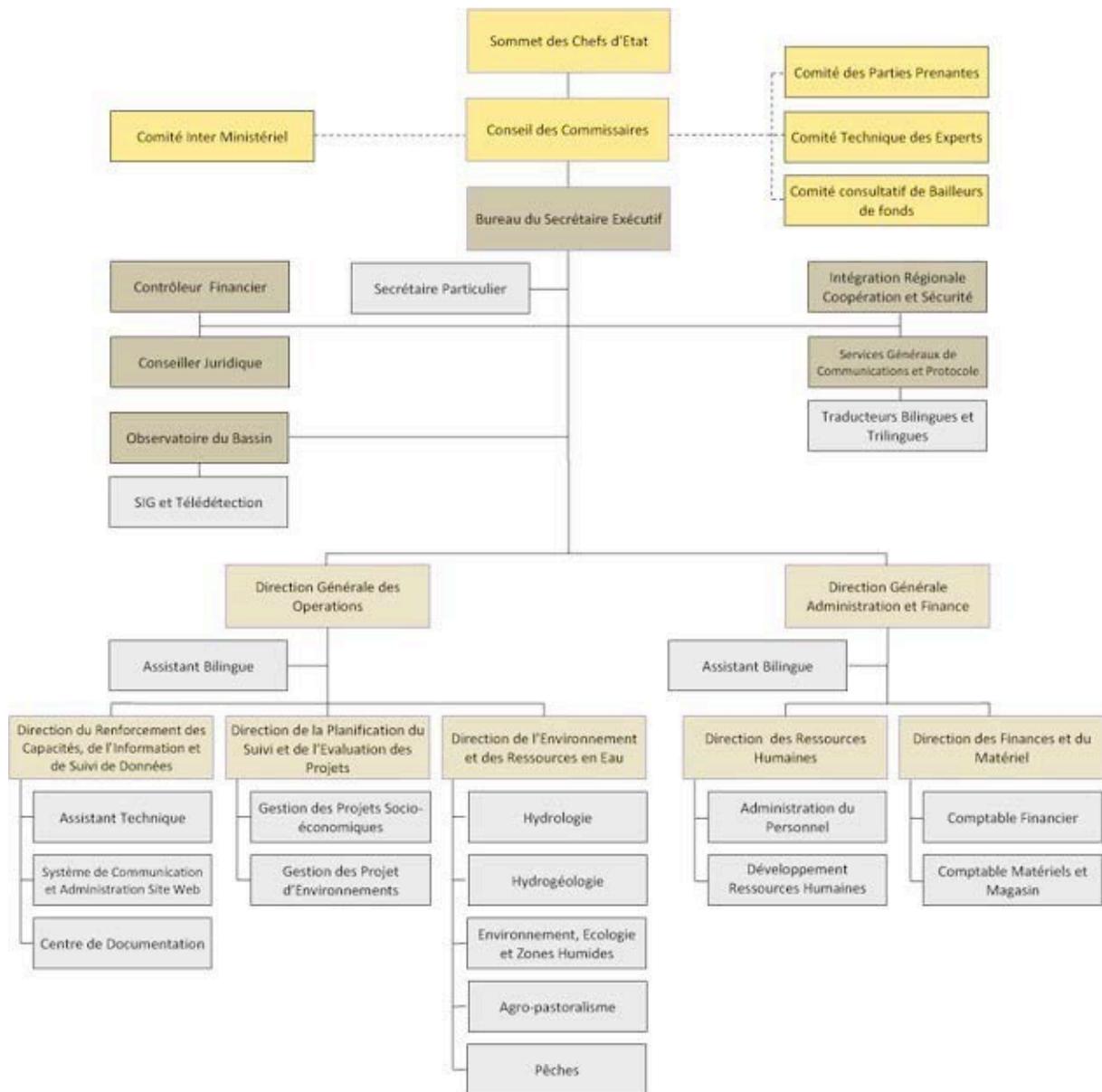


Figura 72 : Organigrama del Consejo de la Cuenca del Tchad (Comisión de la cuenca del Lago Tchad, 2016).

C- Propuesta de gestión del Lago Titicaca

Inspirándose en la organización de la CIPEL y retomando a cada uno de los actores bolivianos y peruanos que actúan en la gestión del lago, podría ser factible una organización similar que comprendería un órgano directivo, una secretaría permanente de comunicación, un comité operacional y un consejo científico.

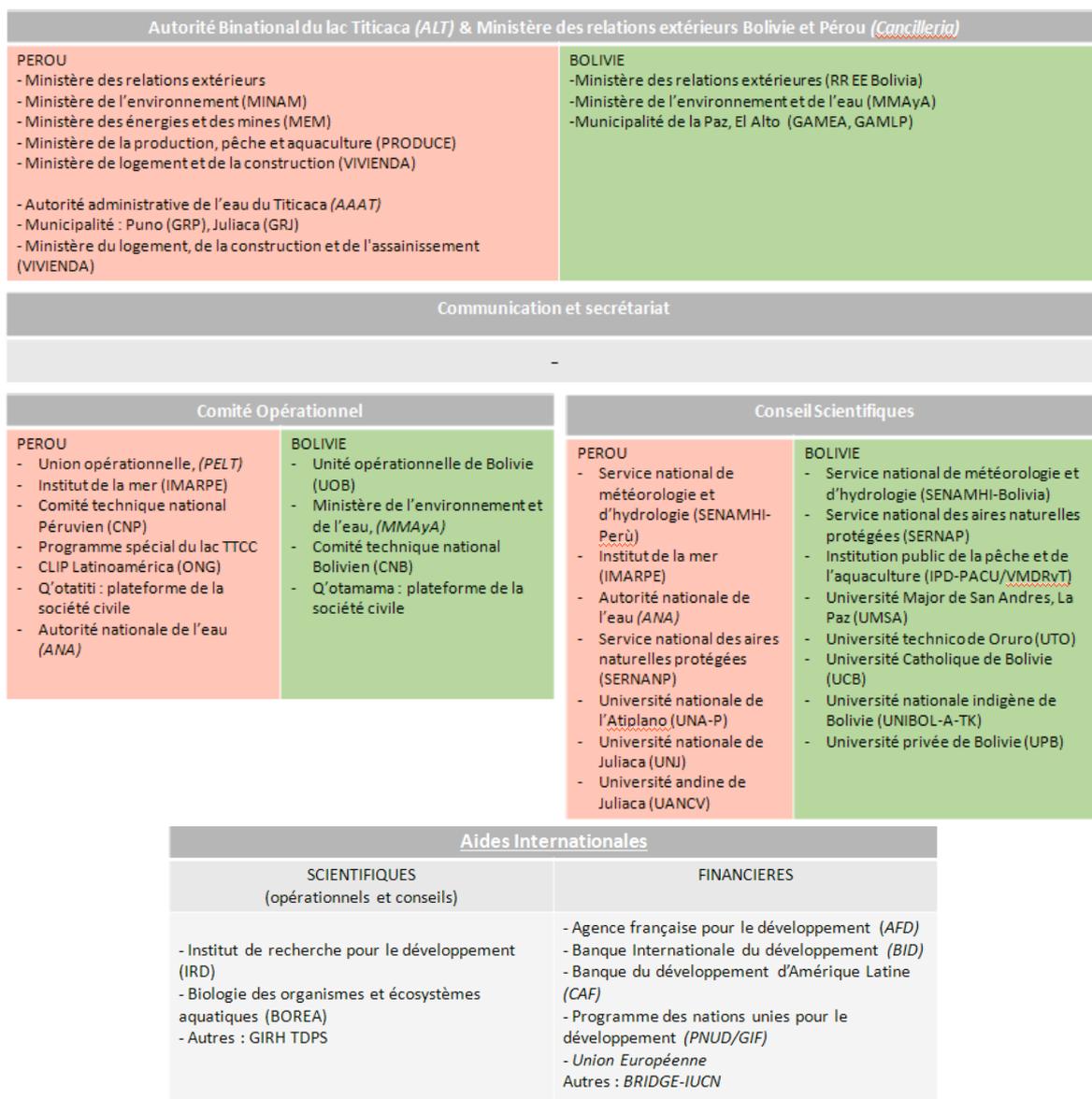


Figura 73 : Esquema de propuesta de gestión para el Lago Titicaca (MJ'Ecko, 2018).

En comparación con el esquema de organización de la CIPEL, observamos que no existe el polo comunicación y secretaría. Este podría ser útil para centralizar las informaciones y favorecer la comunicación entre ambos países. Debería contemplarse la implementación de este polo con el fin de optimizar las relaciones entre estos dos países. El objetivo de buen entendimiento es querer crear un proyecto a largo plazo. Se debe repensar la explotación de los recursos del lago a fin de que sean metas y objetivos comunes. Los organismos peruanos y bolivianos deben concentrarse en ambiciones colectivas. Además, la gestión del lago Titicaca es sostenida por varios actores internacionales (científicos y financieros) a diferencia del lago Lemán. Estos organismos internacionales son verdaderos apoyos con los que el ALT y el OBLT pueden contar. Los gestores del lago deberían pensar en una fuente local de financiación para el mantenimiento del lago Titicaca a largo plazo.

FIN



El equipo MJ'Ecko con la asociación QotaTiti en las orillas del Lago Titicaca (J. Février, 2018)

Anexos:

Anexo 1: Enfoque de Penman (Ramiro Pillco Zolá, et al, 2018):

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(R_n - Q_{heat})}{\lambda \rho} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (a' + b'U)(e_s - e_a)$$

- E: referencia evapotranspiración (mm/d),
- Rn: Radiación neta de superficie (MD/m²/d),
- G: densidad de flujo de calor del suelo (MJ/m²/j),
- T: Temperatura del aire a 2 metros de altura (°C),
- U: Velocidad del viento a 2 metros de altura (m/s),
- e_s: presión de vapor saturando (kPa),
- e_a: presión de vapor actual (kPa),
- e_s-e_a: déficit de presión de vapor saturando (kPa),
- ⊗: curva de presión de vapor de la ladera (kPa/°C),
- γ: constante psicométrica (kPa/°C).

Detalle de los cálculos:

$$e_a = (e_s * RH) / 100$$

$$RH_{mean} = 50 * e^0(T_{min}) / e^0(T_{max}) + 50.$$

$$e_s = (e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})) / 2$$

$$e^0 = 0,6108 \exp((17,27 * T) / (T + 237,3))$$

$$\gamma = (C_p * P_a) / (0,622 * \lambda)$$

⊗ = Doc hess (*Table 4. Monthly average parameters for evaporation calculations for the 2015-2016 period*) -127

$$\lambda = 2,487 * 10^6 - 2,132 * 10^3 * T_{air}$$

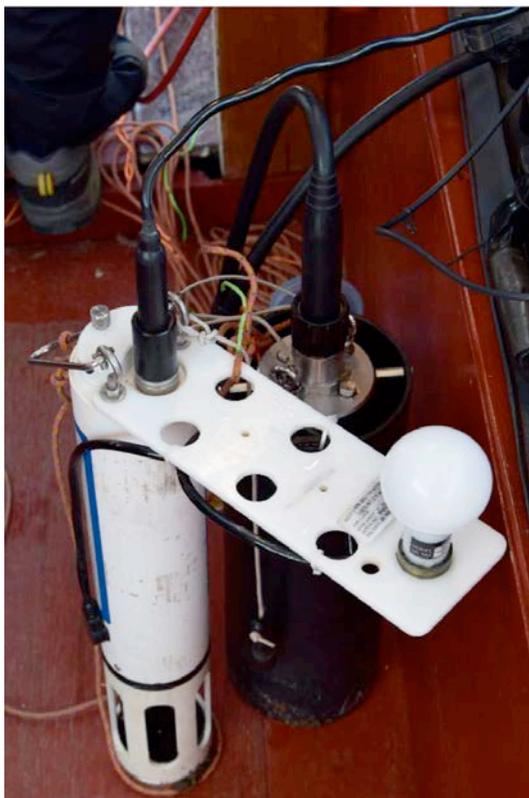
Anexo 2: Fotografías del material de campo



*Botella de extracción de agua de tipo Niskin
(foto J. Février, 2018)*



Espectroradiómetro Biospherical C-OPS de radiaciones UV- PAR incidentes (foto J. Février, 2018)



A la izquierda: Sonda multiparamétrica Hydrolab DS5: profundidad, temperatura, pH, conductividad, OD et %OD, turbidez y radiación solar incidente (LiCor PAR esférico, 400-700 nm).

A la derecha: Sonda fluorimétrica Fluoroprobe BBE para la medición de la concentración en clorofila-a por clases de algas: Chlorophyceae, Cryptophyceae, Dinoflagelados+ Diatomeas, y Cianobacterias.

(Foto J. Février, 2018)

Sonda espectro-radiométrica sumergible BIOSPHERICAL C-OPS para la medición de la atenuación vertical de 8 longitudes de onda entre UV-B, UV-A y PAR (Foto J. Février, 2018)

Central de alimentación y adquisición Deckbox Biospherical (caja amarilla) y PC portátil Panasonic Toughbook CF-19 para el almacenamiento y análisis de los datos de atenuación vertical de las radiaciones solares UV-B, UV-A y PAR (Foto J. Février, 2018)

Profundímetro de mano Plastimo (Foto J. Février, 2018)

Jaulas flotantes para la cría truchas, Puno (Foto J. Février, 2018).

Bibliografía:

- Achá Cordero D., Quezada Portugal J., Guedron S., Sarret G., Point D. & Lazzaro X., 2015.** Proyecto Piloto AWP 07-P-02: Técnicas de fitoremediación en cuerpos de agua afectados por aguas residuales domésticas. Proyecto Binacional GIRH TDPS PNUD/GEF, 15 p.
- Abdelly C.** 2007. Bioremédiation / Phytoremediation, Tunis : Université de Tunis.
- Achá Cordero D., Portugal J.Q., Guedron S., Sarret G., Point D., Lazzaro X.** 2015. Evaluación para la fitoremediación de aguas contaminadas.
- Agence de l'Eau Loire-Bretagne.** 2016. Analyse selon les règles d'évaluation de l'Etat des Eaux : Résultats de l'année 2016.
- Agurto J. & Hurtado Mariño J.** 2015. Les « paquetazos normativos » ou paquets législatifs.
- ALT - Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca.** 2016. La ALT Gestor del TDPS, Una Cuenca Transfronteriza Compartida.
- ALT - Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca.** 2014. Programa SIGAR (Sistema Integral de Gestión de Aguas Residuales). Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo Circunlacustre del Lago Titicaca.
- ALT - Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca.** 2009. Proyecto integral de gestión ambiental de residuos sólidos en los municipios de Desaguadero (Perú – Bolivia).
- ANA.** 2017. Fuentes contaminantes en la cuenca del lago Titicaca (132).
- ANA.** 1996. Evaluación de la contaminación en el lago Titicaca.
- Anderson C., Lafontaine N., Meunier P., Turgeon S.** 2007. Guide d'élaboration d'un plan directeur de bassin versant de lac et adoption de bonnes pratiques. Québec : Développement durable Environnement et Parcs. [2018/06/01]. www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/cyanobacteries/guide_elaboration.pdf
- Anthelme F., Cavieres L.A., Dangles O.** 2014. Facilitation among plants in alpine environments in the face of climate change.
- Archundua D., Duwig C., Spadini L., Uzu G., Guédron S., Morel M.C., Cortez R., Ramos Ramos O., Chincheros J., Martins J.M.F.** 2017. How to uncontrolled urban expansion increases the contamination of the Titicaca Lake Bassin (El Alto, La Paz, Bolivia).
- Ascencio Costa N.L., Pineda Arce Latorre J.V.** 2010. Plan de desarrollo urbano de la ciudad de Puno.
- Baby V.** 1998. El Alto de La Paz, cité pauvre d'altitude au cœur de l'Amérique latine. [05/05/2018]. https://www.persee.fr/doc/spgeo_0046-2497_1998_num_27_2_1144
- Bachand C.** 1999. Les rejets d'azote et de phosphore par les bovins laitiers.
- Baignade naturelle et écologique.** Rôle et fonctionnement des plantes aquatiques. [13/07/2018]. <http://baignade-naturelle-tpe.e-monsite.com/pages/informations/role-et-fonctionnement-des-plantes-aquatiques.html>
- Banque mondiale.** 2018. Perspective monde. [04/09/2018]. <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays?codeTheme=1&codeStat=SP.URB.TOTL.IN.ZS&codePays=BOL&optionsPeriodes=Aucune&codeTheme2=1&codeStat2=x&codePay2=BOL&optionsDetPeriodes=avecNomP>
- Barbieri F.L., Cournil A., Souza Sarkis J.E., Benefice E. & Gardon J.,** 2011. Hair Trace Elements Concentration to describe polymetallic mining waste exposure in Bolivian Altiplano. Biol. Trace Elem. Res. 139: 10-23.
- Beaugrand G. & Goberville E.** 2010. Conséquences des changements climatiques en milieu océanique. Gestion intégrée des zones côtières : risques et responsabilités. Hors-Série 8. Vertigo <https://journals.openedition.org/vertigo/10143#tocto1n10>
- Beveridge M.C.M.,** 1996. Cage Aquaculture. Fishing News Books Ltd. Farnham, U.K., 346 p.

- Bradley R.S., Keimig F.T. & Diaz H.F.**, 2004. Projected temperature changes along the American cordillera and the planned GCOS network. *Geophysical Research Letters* 31 ; L16210, doi:10.1029/2004GL020229
- Brenner T.** 1994. Las pesquerías de aguas continentales frías en América Latina. COPESCAL Documento Ocasional. No. 7. Roma, FAO. 1994. 32p. <http://www.fao.org/docrep/008/t4675s/T4675S04.htm#ch4>
- BID - Banco Interamericano de Desarrollo - Banque interaméricaine de développement.** 2014. La economía del cambio climático en el Estado Plurinacional de Bolivia.
- Boulangé B., Aquize J.E.** 1981. Morphologie, hydrographie et climatologie du lac Titicaca et de son bassin versant. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale*, 14 (4) : 269-287. [10/05/2018]. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:01812>
- Bustamante E. & Treviño H.**, 1977. Artes y métodos de pesca del “ispi” *Orestias* sp., en aguas someras y profundas del Lago Titicaca. IMARPE - Puno: 12 p.
- Cadier M.** 2016. Diversité des communautés phytoplanctoniques en relation avec les facteurs environnementaux en mer d'Iroise : approche par la modélisation 3D. France : Université de Bretagne Occidentale, 366 p. Thèse : Sciences de la mer.
- Capblancq J.** 1972. Phytoplancton et productivité primaire de quelques lacs d'altitude dans les pyrénées. *Annales de Limnologie*, 8 (3) : 231-321.
- Capriles J.M., Domic A.I., Hastorf C.A., Moore K.M.** 2014. Fishing and environmental change during the emergence of social complexity in the Lake Titicaca Basin. *Journal of Anthropological Archaeology*, 34 : 66-77.
- Carpenter S.R., Kitchell J.F.** 1992. Trophic Cascade and Biomanipulation: Interface of Research and Management. *Limnology and Oceanography*, 37 (1) : 208-213.
- Carter N.H., Viña A., Hull V., McConnell W.J., Axinn W., Ghimire D. & Liu J.** 2014. Coupled human and natural systems approach to wildlife research and conservation. *Ecology and Society* 19(3): 43.
- Charpina D., Paironb J.-C., Annesi-Maesano I., Caillaud D., De Blaye F., Dixsaut G., Housset g B., Meurice h J.-C., Roussel I., Zmirouj D., Delaval k P., Dalphin J.-C.** 2016. La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire. PAPPEI et SPLF http://splf.fr/wp-content/uploads/2017/03/Pollution.RMR_2016.pdf
- Chen Y.S., Beveridge M.C.M. & Telfer T.C.**, 1999. Physical characteristics of commercial pelleted Atlantic salmon feeds and consideration of implications for modeling of waste dispersion through sedimentation. *Aquaculture International* 7 : 89-100.
- Chura C.R., Hualpa H.M.** 2009. Desarrollo de la acuicultura en el Lago Titicaca (Perú). *Revista AquaTIC*, (31): 6-19.
- CIPEL.** 2014. Commission internationale pour la protection des eaux du Léman. [10/06/2018]. <http://www.cipel.org/la-cipel/organisation/>
- Cochet L.** 2009. La sécurisation du sous-système d'approvisionnement en eau d'El Alto (Bolivie) à l'épreuve du climat. Grenoble, France : Université Pierre Mendès France, 93 p. Master « EIG » (GODI).
- Commission du Bassin du Lac Tchad.** 2016. Commission du Bassin du Lac Tchad. [11/07/2018]. www.cblt.org/fr
- Conseil scientifique de l'environnement de Bretagne.** 2015. Cause et conséquences sur la vie aquatique en eau douce. [09/05/2018]. <http://www.cseb-bretagne.fr/index.php/conferences/proliferation-de-phytoplancton-2015/154-1-4-causes-des-blooms-phytoplanctoniques-et-consequences-sur-la-vie-aquatique-en-eau-douce-m-bormans.html>
- CNRS - Centre National de Recherches Scientifiques.** Ecosystèmes aquatiques continentaux : eutrophisation. [11/07/2018]. <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/ecosys/eutrophisat.html>
- CNRS - Centre National de Recherches Scientifiques.** 2018. Des robots pour mieux comprendre la floraison du phytoplancton. [12/07/2018]. <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/5389.htm>

- Cruz, R. C., Hualpa, H. M.** 2009. Desarrollo de la acuicultura en el Lago Titicaca (Peru). Revista AquaTIC n°31.
- CRAAQ – Centre de Référence en Agriculture Agroalimentaire du Québec.** 2003. Charges fertilisantes des effluents délevage.
- Dabouineau L., Lamy Y., Collas P.** 2015. Phytoremédiation et phytorestauration ou L'utilisation des plantes pour la dépollution et l'épuration des eaux usées. *Le Rôle d'eau*, **124** : 8-15.
- Dejoux C., Iltis A.** 1992. Lake Titicaca A Synthesis of Limnological Knowledge. Netherlands : Kluwer Academic Publishers. (Monographiae Biologicae, n. 68).
- Dejoux C.** 1994. Le Lac Titicaca. *La Recherche*, **25** (263) : 276- 284.
- Demoraes F.** 1998. Etude de l'évolution de l'agglomération de La Paz-El Alto depuis les vingt dernières années, compte tenu des contraintes environnementales du site. France : Université de Savoie, 63 p. Département géographie.
- Dillon P.J., Rigler F.H.** 1974 The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. *Limnology and Oceanography* 19 : 767-773.
- Drenner R.W., Hambright K.D.** 1999. Biomanipulation of fish assemblage as a lake restoration technique. *Arch. Hydrobiol.*, **146** : 129-165.
- Drenner R.W., Hambright K.D.** 2002. Piscivores, Trophic Cascades, and Lake Management. *TheScientificWorldJOURNAL*, **2** : 284-307.
- Duarte Tejerina J.,** 2018. Distribución espacial de las totoras en el Lago Menor del Titicaca – Analisis multitemporal, propuesta de conservación. Perfil de Licenciatura, IIGEO/UMSA, La Paz, 9 p. Tutor : X. Lazzaro (IRD).
- Everett G.,** 1973. The rainbow trout *Salmo gairdneri* (Rich.) fishery of Lake Titicaca. *J. Fish. Biol.*, **5**: 429–440.
- Fenet H., Gomez E., Leclerc M., Casellas C.** 2006. Devenir des médicaments dans l'environnement. *Environnement, Risques & Santé*, **5** (4) : 243 - 247.
- Firmencich E.** 2015. Metodología para la construcción de escenarios. [04/06/2018]. https://issuu.com/isnellybalza/docs/metodologia_para_la_construccion_de
- Fonturbel F.E.** 2008. Contaminación ambiental y cultural en el lago Titikaka, estado actual y perspectivas.
- Fontúrbel F.E., Barbieri E., Herbas C., Barbieri F.L. & Gardon J.,** 2011. Indoor metallic pollution related to mining activity in the bolivian Altiplano. *Environmental Pollution* 159: 2870-75.
- GEO Titicaca - Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).** 2011. Perspectivas del Medio Ambiente en el Sistema Hídrico Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa (TDPS).
- Gestion.** 2014. Bolivia promulga nueva ley minera. [17/07/2018]. <https://gestion.pe/economia/bolivia-promulga-nueva-ley-minera-61445>
- Gomez C., Fernandez M., Garcia M.** 2009. Adaptation in agricultural systems to climate change in highlands of the Andes. *Earth and Environmental Science*, **6** (412022) : 41-12.
- Gonzales I.M., Roncal R.Z., Miranda A.P., Gotilla J.S.** 2007. Lake Titicaca case study. *Gonzales Roncal. UNESCO*, 30-31.
- Groga N.** 2012. Structure, fonctionnement et dynamique du phytoplancton dans le lac de Taabo (Côte d'Ivoire).
- Guédron S., Point D., Achá D., Bouchet S., Baya P.A., Tessier E., Monperrus M., Molina C.I., Groleau C.I., Chauvaud C.I., Thebault J., Amice E., Alanoca L., Duwig C., Uzu G., Lazzaro X., Bertrand A., Bertrand S., Barbraud C., Delord K., Gibon F.M., Ibanez C., Flores M., Fernandez Saavedra P., Ezpinoza M.E., Heredia C., Rocha F., Zepita C. & Amouroux D.,** 2017. Mercury contamination level and speciation inventory in Lakes Titicaca & Uru-Uru (Bolivia): Current status and future trends. *Environmental Pollution* 231 : 262-270.
- Gulati R.D., van Donk E.V.** 2002. Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration : state- of-the-art review. *Hydrobiologia*, **478** : 73-106.

- Hansson L.-A., Annadotter H., Bergman E., Hamrin S.F., Jeppesen E., Kairesalo T., Luokkanen E., Nilsson P.A., Søndergaard M., Strand J.** 1998. Biomanipulation as an application of food-chain theory: constraints, synthesis, and recommendations for temperate lakes. *Ecosystems* 1 : 558-574.
- Hoffmann D. & Requena C.** 2012. Bolivia en un mundo 4 grados mas caliente. La Paz, Bolivia : Instituto Boliviano de la Montana, 168 p.
- Hoffmann D. & Weggenmann D.** 2011. Climate change induced glacier retreat and risk management; Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) in the Apolobamba mountain range, Bolivia.
- Hootsmans M.J.M. & Vermaat J.E.** 1991. Macrophytes, a key to understanding changes caused by eutrophication in shallow freshwater ecosystem. The Netherlands : International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, 1-5.
- IBNORCA,** 2010. Agua potable requisitos. Norma Boliviana NB 512. Carta Revisión ICS 13.060.20. MMayA. Agua Potable Diciembre 2010, 20 p.
- IFREMER.** 2018. Equivalent habitant. [05/12/2018]. http://envlit.ifremer.fr/infos/glossaire/e/equivalent_habitant.
- IFREMER.** 2008. La farine de poissons et autres produits d'origine aquatique. [24/06/2018]. <http://aquaculture.ifremer.fr/Fiches-d-information/Filiere-Poissons/La-farine-de-poisson-et-autres-produits-d-origine-aquatique>
- IMARPE., PELT.** 2015. Crucero de evaluación de recursos pesqueros y condiciones limnológicas del lago Titicaca - CR. 1407. Instituto del Mar del Perú, Project Binational Lake Titicaca, Peru : 16-20.
- INE.** 2018. Notas de prensa y monitoreo. [16.07.2018]. <https://www.ine.gob.bo/index.php/notas-de-prensa-y-monitoreo/itemlist/tag/La%20Paz>.
- INE.** 2018. Población de El Alto alcanza a más de 922 mil habitantes. [16.07.2018]. <https://www.ine.gob.bo/index.php/principales-indicadores/item/3118-poblacion-de-el-alto-alcanza-a-mas-de-922-mil-habitantes>
- INE.** 2014. Población de El Alto alcanza a mas de 922 mil habitantes. [18/07/2018]. <https://www.ine.gob.bo/index.php/principales-indicadores/item/3118-poblacion-de-el-alto-alcanza-a-mas-de-922-mil-habitantes>
- INEI.** 1994. La actividad pecuaria regional y nacional. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0386/cap0409.htm
- INEI.** 2015. Población 2000 al 2015. [11/08/2018]. <https://proyectos.inei.gob.pe/web/poblacion/>
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática)** 2018. Primeros Resultados de los Censos Nacionales 2017.
- INRA., IFREMER., IRSTE.** 2017. Eutrophication, manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. [06/07/2018]. <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqué/5197.htm>.
- Instituto Boliviano de Comercio Exterior.** 2017. Cifras del comercio exterior Boliviano. Santa Cruz, Bolivia : CNDA, 4 p. (Comercio Exterior, n. 249)
- IRD - Institut de Recherche pour le Développement.** 2008. Biomasse et production phytoplantonique. [12/07/2018]. <http://www.atolls-polynesie.ird.fr/fnatoll/prodphy.htm>
- Jeppesen E.** 1998. Ecology of Shallow lakes. Danemark : Ministry of Environment and Energy, p.21-23 [16/10/2018] http://www.dmu.dk/1_viden/2_publicationer/3_fagrappporter/rapporter/FR247.pdf
- Jeppesen E., Søndergaard M., Mazzeo N., Meerhoff M., Branco C.C., Huszar V., Scasso F.** 2005. Lake restoration and biomanipulation in temperate lakes: relevance for subtropical and tropical lakes.
- Jeppesen E., Søndergaard M., Lauridsen T.L., Davidson T.A., Liu Z., Mazzeo N., Trochine C., Özkan K., Jensen H.S., Trolle D., Starling F., Lazzaro X., Johansson L.S., Bjerring R., Liboriussen, Larsen S.E., Landkildehus F., Egemose S., Meerhoff M.** (2012) Biomanipulation as a Restoration Tool to Combat Eutrophication: *Recent Advances and Future Challenges*. *Advances in Ecological Research*, 67 :

411-488.

JOAPE. 2015. Agropecuario. 49 p. (Diagnosticos Sectoriales, n. 8).

Keita M. 2013. Evaluation environnementale comme outil de prévention et de gestion des risques : cas de l'exploitation de fer au Mali.

Kolpin D.W., Furlong E.T., Meyer M.T., et al. 1999-2000. Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in US streams, a national reconnaissance. *Environ Sci Technol.* 2002 ; 36 : 1202-11.

Kramer, D.B., Hartter J., Boag A.E., Jain M., Stevens K., Ann Nicholas K., McConnell W.J. & Liu J. 2017. Top 40 questions in coupled human and natural systems (CHANS) research. *Ecology and Society* 22(2): 44.

Kuypers M. 2009. Impacts de l'aquaculture de saumon sur l'environnement et analyse des politiques de gestion. Bruxelles, Belgique : Université libre de Bruxelles, 85. Master en Sciences et Gestion de l'Environnement.

La Nación. 2014. Bolivia pone en vigor nueva ley minera. [17/07/2018]. <https://www.nacion.com/el-mundo/bolivia-pone-en-vigor-nueva-ley-minera/GPXNKKRMOJEBHILJ4EKBZ7UP5I/story/>

Lanza W.G., Achá D., Point D., Mashou J., Alanoca L., Amouroux D. & Lazzaro X., 2017. Accumulation in Periphyton of a Tropical High-Altitude Andean Lake. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 72:1-10.

Larec A., Mathé F. 2016. La phytoremédiation. *Défis du CEA*, (208). [2018/05/08]. <http://www.cea.fr/multimedia/Documents/infographies/posters/defis-du-CEA-infographie-phytoremediation.pdf>

Lauzanne L. sd Especies nativas los orestias. 415-420. [2018/07/17]. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers08-10/36638.pdf

Lazard J. 2017. Les systèmes aquacoles face au changement climatique.

Lazzaro X. 1981. Biomasses, peuplements phytoplanctoniques et production primaire du lac Titicaca.

Lazzaro X. 1997. Do the trophic cascade hypothesis and classical biomanipulation apply to tropical lakes and reservoirs ? *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26 : 719-730.

Lazzaro X., Bouvy M., Ribeiro Filho RA., Oliviera VS., Sales LT., Vasconcelors ARM., Mata MR. 2003. Do fish regulate phytoplankton in shallow eutrophic Northeast Brazilian reservoirs?

Lazzaro X. 2009. Rôle structurant des poissons filtreurs omnivores sur la dynamique des communautés planctoniques et les efflorescences dans les lacs tropicaux peu profonds. Université Pierre & Marie Curie (UPMC) - Paris 6, France : IRD.

Lazzaro X., Pagano M., Corbin D., Carré C., Dione B., Ndour E.H., Lacroix G., Danger M., Benest D., Mériguet J., Oumarou C. 2010. Eutrophisation, cyanobactéries et biomanipulations : approches expérimentales en lacs tropicaux peu profonds. Cochabamba, Bolivie : Universidad Mayor de San Simon (UMSS).

Lazzaro X. 2016. L'Observatoire Binational du Lac Titicaca (OBLT). [05/08/2018]. <https://borea.mnhn.fr/fr/OBLT>

Lazzaro X., Lanza W.G., Alcoreza M.P., Flores A.J., Fernández L.A., Fernández P.E., Loayza E.Z. & Ibáñez C., 2017. Análisis e interpretación de los resultados de la expedición científica de evaluación de las características limnológicas y ecológicas del Lago Menor del Titicaca (programa ECERP, Agosto 2016). VRHR/MMAYa, Instituto de Ecología de la UMSA, Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD – Francia ; UMR BOREA). La Paz, Bolivia, Mayo 2017, 90 p.

Lazzaro X., Starling F. 2005. Biomanipulation to control eutrophication in a shallow tropical urban reservoir (Lago Paranoá, Brazil). *Reddy V. (Ed.) Restoration and Management of Tropical Eutrophic Lakes. Science Publishers Inc* : 361-387.

Lenntech. 2018. Water treatment. [17/06/2018]. <https://www.lenntech.fr/eutrophisation/eutrophisation-effets.htm>.

- Levi Y.** 2006. Inquiétudes sur la présence d'antibiotiques et de bactéries antibiorésistantes dans les eaux. *Environnement, Risques & Santé*, 5 (4) : 261 - 265.
- Le Roux S.** 2018. Le poisson fuit les zones d'oxygène. Ouest-France. Agriculture-Marine. Le marin.
- Liu J. et al.,** 2007. Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science* 317 : 1513-1516.
- Manjón C.A.A.** 2006. Determinacion de metales pesados en plantas acuaticas de la parte norte y noreste de la cuenca del lago Poopo. La Paz, Bolivia : Universidad Mayor de San Andres, 76-78.
- Martinez A.E., Aranibar D.F. & Gutierrez E.R.,** 2006. An assessment of the abundance and distribution of the Titicaca Flightless Grebe *Rollandia microptera* on Lake Titicaca and evaluation of its conservation status. *Bird Conservation International* 16: 237–251.
- Ministerio de agricultura y riego.** 2017. Boletín estadístico de la producción agrícola y ganadera 2017. [06/07/2018]. http://minagri.gob.pe/portal/download/pdf/herramientas/boletines/prod-agricola-ganadera/prod-agricola-ganadera-ii-trimestre2017_041017.pdf
- Meijer M.L., deBoois I., Scheffer M., Portielje R., Hosper H.** 1999. Biomanipulation in shallow lakes in Netherlands: an evaluation of 18 case studies. *Hydrobiologia* 408/409 : 13-30.
- Ministerio de Salud,** 2011. Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA / Ministerio de Salud. Dirección General de Salud Ambiental, Lima, Perú, 44 p.
- Molina C.I., Gibon F.-M., Pinto J. & Rosales C.,** 2008. Estructura de macroinvertebrados acuáticos en un río altoandino de la cordillera real, Bolivia: variación anual y longitudinal en relación a factores ambientales. *Ecología Aplicada* 7:105-116.
- Molina C., Ibañez C., Gibon F.M.,** 2012. Biomagnification process of heavy metals of a hiperhaline lake (Poopó, Oruro, Bolivia): risks to consumer health. *Ecología en Bolivia* 47: 1605-2528.
- Mongabay.** 2016. Bolivia: Mas de 130 toneladas de mercurio son emitidas por año. [13/07/2018]. <https://es.mongabay.com/2016/12/bolivia-mineria-mercurio-contaminacion/>
- Monroy M.** 2017. Investigador tadeista halla metales toxicos en aguas y peces del lago Titicaca. [30/06/2018]. <https://www.utadeo.edu.co/es/noticia/destacadas/expeditio/264566/investigador-tadeista-halla-metales-toxicos-en-aguas-y-peces-del-lago-Titicaca>
- Monroy M., Maceda-Veiga A. & de Sostoa A.,** 2014. Metal concentration in water, sediment and four fish species from Lake Titicaca reveals a large-scale environmental concern. *Science of the Total Environment* 487 : 233–244.
- Moya N., Gibon F.-M., Oberdorff T., Rosales C. & Dominguez E.** 2009. Comparación de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en ríos intermitentes y permanentes del altiplano boliviano : implicaciones para el futuro cambio climático. *Ecología Aplicada*, 8:105-114.
- Moya N., Hughes R.M., Domínguez E., Gibon F.-M., Goitia E. & Oberdorff T.,** 2011. Macroinvertebrate- based multimetric predictive models for evaluating the human impact on biotic condition of Bolivian streams. *Ecological Indicators* 11:840-7.
- Ocola Salazar J.J., Laqui Vilca W.F. & Fermin W.,** 2017 Fuentes contaminantes en la cuenca del lago Titicaca: un aporte al conocimiento de las causas que amenazan la calidad del agua del maravilloso lago Titicaca. El Palomar, Lima : ANA, 188 p. (Calle Diecisiete, n. 355)
- Olin M., Rask M., Ruuhijarvi J., Keskitalo J., Horppila J., Tallberg P., Taponen T., Lehtovaara A., Sammalkorpi I.** 2006. Effects of biomanipulation of fish and plankton communities in ten eutrophic lakes of southern Finland. *Hydrobiologia* 553 : 67-68.
- Ortelli D., Edder P., Rappin F., Ramseier S.** 2010. Métaux et micropolluants organiques dans les rivières et les eaux du Léman. *Campagne 2010, 2011*, 65 - 86 p.
- Orzag V.** 2018. Agronome - *Communication personnelle*.
- Patzi Saire B.** 2013. Tesis de grado, evaluacion de dos tipos de alimentos en alevinos de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*), en estanques en la comunidad.
- Perez O.M., Telfer T.C., Beveridge M.C.M. & Ross L.G.,** 2002. Geographical Information Systems (GIS) as a simple tool to aid modelling of particulate waste distribution at marine fish cage sites. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 54 : 761-768.

- Petit J.** 1991. L'aquaculture : un problème pour l'environnement ? *INRA Productions animales*, 4 (1) : 67-80.
- Peyraud J., Vérité R., Delaby L.** 1995. Rejets azotés chez la vache laitière : effets du type d'alimentation et du niveau de production des animaux.
- Pillco Zolá R., et al.** 2018. Modeling Lake Titicaca Daily and Monthly Evaporation. 8 p.
- Pillco Zola R., Bengtsson L., Berndtsson R., Horst P., Canedo C., Mollericon L.** 2016. Climate changes scenarios impact on the lakes of TPDS – Poopo and Titicaca. Bolivie : Universidad Mayor de San Andres, Suecia : Universidad de Lund. 15 p.
- Pinel-Alloul B., Mazumder A., Lacroix G. & Lazzaro X.,** 1998. Les réseaux trophiques lacustres : structure, fonctionnement, interactions et variations spatio-temporelles. *Revue des Sciences de l'Eau*, n° spécial : 163-197.
- PNUMA -Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.** 2011. Perspectivas del Medio Ambiente en el Sistema Hídrico TITICACA-DESAGUADEROPOOPÓ-SALAR DE COIPASA (TDPS) - GEO Titicaca.
- Quéguiner B.** 2013. Structure et Fonctionnement des Ecosystèmes Pélagiques Marins. Centre d'Océanologie de Marseille : Aix-Marseille Université, 93 p.
- Quenta Herrera E.** 2017. Structure multi-échelles de la biodiversité aquatique d'écosystèmes alpins sous l'influence du changement climatique. Tours, France : Université François-Rablais, 160 p. Thèse (écologie).
- Rabatel A., Francou B., Soruco A., Gomez J., Cáceres B., Ceballos J.L., Basantes R., Vuille M., Sicart J.-E., Huggel C., Scheel M., Lejeune Y., Arnaud Y., Collet M., Condom T., Consoli G., Favier V., Jomelli V., Galarraga R., Ginot P., Maisincho L., Mendoza J., Ménégoz M., Ramirez E., Ribstein P., Suarez W., Villacis M. & Wagnon P.,** 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7 : 81–102.
- Ramseier Gentile S., Edder P., Loizeau J.L.** 2013. Polluants émergents ; stratégie de surveillance de la contamination des eaux de surface et implications pour le traitement des eaux potables. Cas du Léman. Genève, Suisse : Archives des sciences. 173 - 174 p.
- Réalité Minière.** 2012. Les sociétés canadiennes exerçant des activités à l'étranger sont-elles soumises à une réglementation environnementale plus laxiste?. [17/07/2018]. <https://www.miningfacts.org/Environnement/Les-societes-canadiennes-exercant-des-activites-a-letranger- sont-elles-soumises-a-une-reglementation-environnementale-plus-laxiste/>
- Redfield A.C.,** 1934. On the proportions of organic derivatives in the sea water and their relation to the composition of plankton. In : James Johnstone Memorial Volume, ed. Daniel R. J., editor. (Liverpool: University Press of Liverpool), 176–192.
- Redfield A.C.,** 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.* 46 : 205–221.
- Revollo Vargas M.F., Liberman Cruz M., Lescano Rivero A.** 2003. Lake Titicaca, management experience and lessons learned. <http://www.worldlakes.org/uploads/Titicaca%20 12.03.pdf>
- Revollo Vargas M.F., Liberman Cruz M., Lescano Rivero A.** 2006. Lake Titicaca. *Experience and Lessons Learned Brief*, 377-387.
- Ruiz-Castell M., Carsin A.E., Barbieri F.L., Paco P., Gardon J. & Sunyer J.,** 2013. Child patterns of growth delay and cognitive development in a bolivian mining city. *Am. J. Hum. Biol.* 25: 94-100.
- Sakamoto M.** 1966. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Arch. Hydrobiol.* 62: 1-28.
- Salas R., Macnaughton Alison.** 2015. Amélioration de la gouvernance du secteur piscicole dans le bassin amazonien de la Bolivie.
- Samia K.** Caractérisation des micropolluants organiques (perturbateurs endocriniens) et minéraux contenus dans les eaux résiduaires brutes et traitées des stations d'épuration de la région d'Alger. Elimination de ces micropolluants par procédé d'adsorption et pa (Doctoral dissertation, Université Saad Dahlad de Blida 1).

- Scheffer M.**, 1998. Ecology of shallow lake. Springer, 357 p.
- Scheffer, M.** 2009. Critical transitions in nature and society. Princeton University Press, 387 p.
- Scheffer, M.** 2010. Foreseeing tipping points. *Nature* 467 : 411-412.
- Scheffer M., Carpenter S.R.** 2003. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *TRENDS in Ecology and Evolution*, **18** (12) : 648-656.
- Scheffer M., Carpenter S., Foley J.A., Folke C. & Walker B.**, 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413 : 591-596.
- Scheffer M. & Jeppesen E.**, 1997. Alternative stable states. In : Jeppesen E., Søndergaard M., Søndergaard, Christoffersen K. (eds.). The structuring role of submerged macrophytes. Springer, 423 p.
- Scheffer M., Hosper S.H., Meijer M-L., Moss B. & Jeppesen E.**, 1993. Alternative equilibria in shallow lakes. *TREE* 8 : 275-279.
- Schindler D.W., Armstrong F.A.J, Holmgren S.K., Brunskill G.J.** 1971. Eutrophication of Lake 227, Experimental Lakes Area, northwestern Ontario, by addition of phosphate and nitrate. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 28: 1763-1782.
- Sebastian K., Herzog Rodney Martinez Peter M., Jørgensen Holm Tiessen.** 2011. Climate Change: Evidence and Future Scenarios for the Andean Region.
- Seibel B.A.** 2011. Critical oxygen levels and metabolic suppression in oceanic oxygen minimum zones.
- SEMANA economica.** 2017. Ejecutivo aprobó decreto que modifica la Ley General de Minería. [17/07/2018]. <http://semanaeconomica.com/article/sectores-y-empresas/mineria/208703-ejecutivo-aprobo-decreto-que-modifica-la-ley-general-de-mineria/>
- Somos Sur.** 2014. Ley Minera: Análisis para una decisión soberana. [17/07/2018]. <https://www.somossur.net/bolivia/40-economia/mineria-en-bolivia/1361-analisis.html>
- Soulier C., Gabet V., Lardy S., Lemenach K., Pardon P., Esperanza M., Miede C., Choubert J-M., Martin S., Bruchet A., Coquery M., Budzinski H.** 2011. Zoom sur les substances pharmaceutiques : présence, partition, devenir en station d'épuration. *TSM/Astee*, 63 - 77 p. (TSM numéro 1/2, 106e année).
- Starling F., Lazzaro X., Cavalcanti C. & Moreira R.**, 2002. Contribution of omnivorous tilapia to eutrophication of a shallow tropical reservoir: evidence from a fish kill. *Freshwater Biology* 47 : 2443–2452.
- Sterner R.W., Elser J.J.** 2002. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. *Princeton University Press*, 464 p.
- Terrazas V.W.**, 1966. Problemas de conservación de los recursos pesqueros de Bolivia. Ministerio de Agricultura., La Paz, Bolivia.
- Terrazas E. M., et al.** 2017. Determinación interactiva de metales totales en las aguas de la bahía interior del Lago Titicaca- Puno Peru. Artículo original, vol 19 n°2 : 125 – 134.
- Testard P.** 2013. Rôle des macrophytes littoraux dans le fonctionnement des écosystèmes lacustres. [12/07/2018]. <http://baladesnaturalistes.hautefort.com/archive/2013/02/20/macrophytes-littoraux-et-ecosystemes-lacustres.html>
- Tomanova S., Moya N. & Oberdorff T.**, 2008. Using macroinvertebrate biological traits for assessing biotic integrity of Neotropical streams. *Riv. Res. Appl.* 24:12301239.
- Urquieta P.**, 2014. Los desafíos de las ciudades vulnerables. Construcción de ciudad y co-gestión del riesgo entre Estado y sociedad. *Bulletin de l'Institut français d'études andines* 43(3) : Políticas de vivienda posdesastres en América Latina.
- UVED (Université Virtuelle Environnement et Développement Durable).** 2008. La Pompe Biologique - processus d'adsorption de CO₂ par le phytoplancton. [12/07/2018]. http://www.cima.ualg.pt/piloto/UVED_Geochemie/UVED/site/html/2/2-3/2-3-1/2-3-2-4.html
- Vaessen V., Brentführer R.** 2015. Évaluation des besoins et du cadre de gestion des eaux souterraines dans les organisations de bassins transfrontaliers en Afrique - un manuel de

- formation produit par AGW-Net, BGR, IWMI, CapNet, RAOB, et IGRAC. Hannover, Allemagne : GmbH, 7-11.
- Villeneuve C.** 2015. Vivre les changements climatiques. University of Québec. Chicoutimi <https://www.researchgate.net/publication/267260292>
- Vuille M., Carey M., Huggel C., Buytaert W., Rabatele A., Jacobsen D., Soruco A., Villacis M., Yarleque C., Elison Timma O., Condom T., Salzmann N. & Sicart J.-E.,** 2018. Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews* 176 : 195–213.
- Walker B. & Meyers J.A.,** 2004. Thresholds in Ecological and Social–Ecological Systems: a Developing Database. *Ecology and Society* 9: 3 ; <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art3/>