

Monitoreo espacial de los efectos del cambio climático en el Lago Titicaca con imágenes de Satélite



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Cooperación Suiza en Bolivia

Javier Nuñez-Villalba

Edición y coordinación

Monitoreo espacial de los efectos del cambio climático en el Lago Titicaca con imágenes de Satélite

SERIE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA

Vol. 1 / Año 3 / 2018



Los conocimientos generados en las acciones de investigación resultado del proyecto PIACC, apoyado por la Cooperación Suiza en Bolivia, se constituye en un bien público de acceso libre y gratuito. Todos/as los generadores de conocimiento deben ser debidamente reconocidos/as en su nivel de contribución en cada uno de los materiales producidos.

SERIE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA
VOL. 1, AÑO 3, 2018

Esta publicación es posible gracias a la ejecución del proyecto PIA-ACC.UMSA.37: “Monitoreo Espacial de los Efectos del Cambio Climático en el Lago Titicaca con Imágenes de Satélite” presentado por el Instituto de Investigaciones Geográficas-IIGEO de la Universidad Mayor de San Andrés-UMSA.

Instituto de Investigaciones Geográficas-IIGEO
Carrera de Ingeniería Geográfica
Universidad Mayor de San Andrés-UMSA
Calle 27 de Cota Cota, Campus Universitario, Edificio de Geografía, Piso 3.
Teléfono / fax: +591 2 2772100
Web: iigeo.umsa.bo

Portada: Superior; Fotografía tomada desde la Isla del Sol por J. Nuñez. Inferior izquierda: NDVI de la imagen satelital Landsat MSS de 1986 del Lago Menor del Titicaca. Inferior derecha: Imagen de satélite RapidEye 2 del del bloom ocurrido en abril 2015 en el Lago Menor del Titicaca.

© Javier Nuñez-Villalba, 2018
© PIA-ACC.UMSA.37/AGRUCO/UMSA, 2018

Primera edición: noviembre de 2018

DL: 4-1-2907-18
ISBN: 978-99954-1-885-4

Producción
Plural editores
Av. Ecuador 2337 esq. calle Rosendo Gutiérrez
Teléfono: 2411018 / Casilla Postal 5097, La Paz, Bolivia
e-mail: plural@plural.bo / www.plural.bo

Impreso en Bolivia

Índice

Presentación	9
Agradecimientos	11
Introducción: Monitoreo Espacial de los efectos del Cambio Climático en el Lago Titicaca con imágenes de satélite <i>Javier Nuñez-Villalba</i>	13

PRIMERA PARTE

Monitoreo en base al conocimiento local

Percepciones del cambio climático, sus efectos en la economía y las acciones de mitigación en las comunidades de Yumani y Qhewaya <i>Carlos Peñaranda Argandoña</i>	21
Cartografía participativa para entender el conocimiento local del Cambio Climático en las comunidades de Yumani y Cutusuma <i>Zulma Yhoana Pusari Ramos</i>	39
Monitoreo de los fenómenos climáticos bajo el conocimiento local y científico para reducir daños en la agricultura familiar Comunidad Cutusuma, Municipio Batallas <i>Wilson Mamani Gomez</i>	55

SEGUNDA PARTE

Monitoreo técnico científico

Situación actual de la eutrofización y escenarios futuros para el Lago Titicaca - aportes de la percepción remota <i>Xavier Lazzaro</i>	79
Identificación y cuantificación de las poblaciones afectadas por eutrofización en el Lago Menor del Titicaca, a partir de técnicas de Teledetección <i>Inez Ana Villca Calle</i>	107
Análisis de la concentración de fósforo y clorofila en tres niveles de espectro de radiación satelital: alto, medio y bajo emitida por fitoplancton en el Lago Menor del Lago Titicaca <i>Claudia Adriana Piza Paz, Xavier Lazzaro, Javier Nuñez Villalba, Ines Villca, Daniel Callisaya, Verónica del Carpio, Jhasmin Duarte, Janina Espinoza, Wilson Mamani</i>	121
Detección de la biomasa fitoplanctónica mediante teledetección para determinar el estado eutrófico de los cuerpos de agua <i>Daniel Callisaya Machaca</i>	137

TERCERA PARTE

Herramientas de monitoreo espacial

Implementación de una aplicación móvil para el levantamiento de información geográfica para el monitoreo del clima con indicadores bioclimáticos <i>José Luis Soza Santos</i>	155
Metadatos Raster para el monitoreo espacial del Lago Titicaca <i>Tatiana Yamilka Vargas Condori</i>	165
Plataforma de colaboración binacional para el monitoreo espacial de los efectos del cambio climático en el Lago Titicaca <i>Javier Nuñez-Villalba & Mario Polar</i>	179

SÍNTESIS DE INVESTIGACIÓN

Recuperando los saberes ancestrales de las casas bioclimáticas de adobe y champas con la adaptación al Cambio Climático <i>Fortunato Condori</i>	193
Análisis espacial de datos batimétricos obtenidos con Ecosonda entre Huatajata y Bahía Cohana. Sector Lago menor del Titicaca <i>Edgar Castro</i>	199
Protocolo limnológico mediante la aplicación de índices de estado trófico como herramienta en la determinación del nivel de eutrofización en el Lago Menor, sector Huatajata <i>Verónica del Carpio</i>	202
Distribución espacial de las totoras en el Lago Menor del Titicaca. Análisis multitemporal, propuestas de conservación <i>Jhasmin Duarte Tejerina / Mishel Justiniano Ayllón</i>	205
Monitoreo multitemporal de la calidad de agua mediante el método de estimación de sólidos suspendidos totales en la Bahía de Cohana utilizando sensores remotos <i>Janina Melissa Espinoza Zegarrundo</i>	208
Autores	212

Presentación

Como seres vivos nos encontramos en constante cambio, ya sea de tiempo o espacio, pero como seres humanos debemos adaptarnos buscando alternativas de vida para no ser afectados por dichos cambios.

Siendo comunario de Yumani en la Isla de Sol, Lago Titicaca, desde mi infancia he visto como la población del lugar sobrevivía con la actividad de pesca y agricultura. Tuve la oportunidad de vivir y compartir esa etapa en la que mi padre se dedicaba a la pesca. Recuerdo con nostalgia, que en los años 1970, el Lago Titicaca se encontraba en su plenitud con un gran número de peces, se podría decir que había una sobre población de peces como Ispi, K'arachi, Pejerrey, Trucha y Mauri. Alrededor de 1980 había un grupo grande de comunarios que se dedicaban a la pesca. La producción era tal que se extraía aproximadamente Un quintal (1qq) de peces por bote, al punto de conformar una asociación de pescadores. Pero, con el pasar del tiempo, debido al crecimiento de las ciudades y la contaminación, dicha producción fue disminuyendo. Poco a poco fue reduciendo la población de peces y con ello el número de comunarios que se dedicaban a la actividad pesquera.

Por otro lado, también se vio la reducción del nivel de agua en nuestro Lago por efecto del Cambio Climático. Esta situación provoco la reducción de la población de peces, ya que los huevos de los peces se depositan en las orillas del lago para su posterior desarrollo. La disminución del nivel del Lago hizo que los huevos se secaran sin desarrollarse, ocasionando la disminución de la población de peces.

Por tal motivo, la población fue cambiando de actividad productiva, enfocándose más a la agricultura y un porcentaje mínimo a la actividad del turismo. Por mi parte, me dedique al sector del turismo. Fue así que en el año 1990 empecé a trabajar con turismo en mi comunidad Yumani, y de manera paralela también fui cumpliendo con cargos en la dirigencia de la comunidad. Durante mi gestión

como presidente de la asociación de lanchas, que brindaba servicio de embarcación, cambiamos el nombre de “Asociación Laboral Yumani” a la asociación “Sol Tours” con el objetivo de unificar las lanchas de servicio de transporte de turismo y trabajar de manera conjunta.

Con el pasar del tiempo empecé a trabajar de manera individual, creando mi agencia de viajes y turismo “Las Islas Tours”, fue así que desde el año 2001 empecé a aportar al Estado. Pero siempre trabajando en pos de mejorar la comunidad Yumani y su calidad de vida; promoviendo el consumo de productos locales, respetando sus valores y normas. Es así que no solo me dedico al campo turístico, sino que, también participo de manera muy activa cumpliendo funciones de cargo en la dirigencia y gobierno de la comunidad Yumani. He llegado a ocupar posiciones como Secretario General, Secretario de Justicia, Secretario de Educación, Secretario de Actas, entre otros, y actualmente cumpla con el cargo de Secretario de Relaciones. Siempre atrayendo turismo y generando más empleo y desarrollo a mi comunidad, trabajando de manera responsable con la naturaleza y la Madre Tierra, apoyando a la protección del medio ambiente como nuestro patrimonio.

De esta manera, en busca de proteger nuestro Lago sagrado y la necesidad de información sobre la adaptación al Cambio Climático fue que se llegó a trabajar en conjunto con el Instituto de Investigaciones Geográficas de la Carrera de Ingeniería Geográfica perteneciente a la Universidad Mayor de San Andrés.

Coadyuvando con el proyecto “Monitoreo espacial de los efectos del Cambio Climático con imágenes de satélite en el Lago Titicaca” se pudo evidenciar los efectos que ocasionan el Cambio Climático y la contaminación del Lago Titicaca. Los Talleres impartidos, tanto a estudiantes de la Unidad Educativa Yumani como a hombres y mujeres involucrados en la problemática del Cambio Climático, fue de gran ayuda porque desde esos intercambios de información los comunarios fuimos comprendiendo nuestra realidad y el valor del conocimiento ancestral para adaptarnos a los cambios que sufre la naturaleza.

La implementación de tecnología de última generación para el monitoreo del Lago Titicaca, fue un gran aporte para entender nuestra situación y concientizarnos sobre nuestra realidad.

Es tiempo de revalorizar lo que nuestros abuelos nos han dejado, esto no significa que nos aferremos a nuestro conocimiento sino que, debemos saber trabajar en conjunto. La tecnología y la información científica nos ayuda a comprender mejor el cómo funciona nuestro planeta y con el apoyo de nuestro saber ancestral tenemos una mejor idea de cómo enfrentar y adaptarnos frente a los efectos del Cambio Climático.

Gonzalo Pusari Callisaya
Comunidad Yumani
Isla del Sol, Lago Titicaca

Agradecimientos

Es necesario expresar un agradecimiento especial a nuestros colaboradores en la ejecución de este proyecto empezando por Gonzalo Pusari, habitante de la comunidad Yumani, que aceptó participar del proyecto como OAPI. A nuestra contraparte institucional académica representada por el Msc. Arq. Fortunato Condori del Instituto de Investigaciones de Ciencias del Habitat de la Universidad Técnica de Oruro. A nuestros investigadores asociados como el Dr. Xavier Lazzaro del IRD que lleva más de 30 años de investigación en el Lago Titicaca.

En los trabajos de campo pudimos conocer personas que nos colaboraron en el proyecto como Máximo Catari, comunario de Huatajata, que tiene toda la paciencia para recibir investigadores en su casa y nos permitió instalar los equipos en sus botes para las navegaciones que se realizaron. A la Ing. Fabiola Encinas, docente de la Universidad Indígena Tupac Katari en el Sector de Huarina por abrirnos las puertas a los talleres con sus estudiantes. A todas las comunidades que nos recibieron en su territorio en especial a Yumani, Quehuaya, Cutusuma, Huarina, Huatajata, Isla Suriki, Isla del Sol, Bahía Cohana.

Este proyecto hubiera sido imposible sin el apoyo incondicional del personal administrativo del II GEO-UMSA, a Zaida Torrez, Miguel Villca, Miroslav Orellana, Viviana Copari,

Y, finalmente al esforzado grupo de AGRUCO que impulsa los proyectos PIA-ACC.



Isla del Sol 2016.

INTRODUCCIÓN

Monitoreo Espacial de los efectos del Cambio Climático en el Lago Titicaca con imágenes de satélite

Javier Nuñez-Villalba

Coordinador

El monitoreo espacial con imágenes de satélite es cada vez más común en los estudios globales y de Cambio Climático. Las imágenes de satélite son un elemento importante para vigilar los cambios dinámicos de la geografía de nuestro planeta. Desde el primer programa espacial de observación de la Tierra en Bolivia, denominado ERTS¹ el año 1974, se han ido almacenando una gran cantidad de imágenes de satélite que evidencian el crecimiento de las ciudades como El Alto, o la evaporación de glaciares como el Chacaltaya y el Lago Poopo. Estos cambios afectan entornos vulnerables y el Lago Titicaca no es la excepción.

El año 2015, la noticia de un Bloom que mato una gran cantidad de fauna en el Lago Titicaca nos encontró desprevenidos. Las imágenes de satélite captaron este fenómeno y de esta manera se pudo ver la dimensión del desastre. Este suceso nos motivó a la realización de un monitoreo con imágenes de satélite para no estar desprevenidos en el futuro.

En ese contexto se presentó el proyecto, en colaboración entre el Instituto de Investigaciones Geográficas de la UMSA, el Instituto de Investigaciones de Ciencias del Habitat de la UTO, y el Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo-IRD a la 2da convocatoria del “Proyecto de Investigación Aplicada para la Adaptación al Cambio Climático-PIAACC” con apoyo financiero de la Cooperación Suiza en Bolivia-COSUDE.

Lo interesante de este proyecto es que no sólo se enfocó en la parte técnico científica de las herramientas que usualmente utilizamos como las imágenes de satélite y sus programas especializados de procesamiento, sino también se relacionó con el conocimiento de saberes y los bio-indicadores locales. Esto fue genial

1 Earth Resources Technology Satellite - <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19740022631>

porque nos permitió establecer una relación entre el conocimiento local y las herramientas técnicas para un mejor aprovechamiento de los resultados. Ambos puntos de vista nos ayudaron entender los efectos del Cambio Climático en el entorno geográfico del Lago Titicaca.

Por esta razón se decidió dividir el libro en 3 partes:

- Primera parte: Monitoreo en base al conocimiento local
- Segunda parte Monitoreo técnico científico
- Tercera parte: Herramientas de monitoreo espacial

En el primer taller realizado en la localidad de Yumani, en la Isla del Sol, junto con autoridades locales que nos facilitaron su escuela, y con la participación de los alumnos de secundaria, se pudo evidenciar que el término Cambio Climático no estaba claro en los alumnos y profesores. Al finalizar el taller se pudo comprobar que existe una confusión entre el término Cambio Climático y contaminación ambiental. Las respuestas respecto al Cambio Climático generalmente se desvían a temas de contaminación ambiental por desechos o residuos líquidos y sólidos.

También se pudo evidenciar que las actividades económicas han ido cambiando. Antes, la pesca era una actividad importante de subsistencia, sin embargo ahora el turismo es una de las actividades más importantes de la Isla. Este cambio de actividad económica, ha influido en los conocimientos locales y saberes ancestrales de la zona. Las nuevas generaciones están perdiendo el conocimiento desarrollado en pesca y se están especializando en la mejor atención y servicios turísticos de la zona. Por otro lado, la gran oleada de turistas, principalmente del extranjero, influye en las costumbres locales del lugar. Un resumen sobre la percepción del Cambio Climático y sus efectos sobre la economía se puede leer en el **capítulo I** presentado por el **Lic. Carlos Peñaranda**.

En el transcurso del trabajo se pudo verificar que existe un ruido en la comunicación entre científicos y las poblaciones locales. Desde el idioma, entre castellano y aymara, hasta los protocolos sociales que varían de una comunidad a otra. Este ruido aumenta si tomamos en cuenta la lectura de información científica como los mapas. Muchos de los trabajos realizados por los científicos, por ejemplo el mapa de riesgos, tienen una gran cantidad de variables que son difíciles de leer. Por esta razón se empleó la metodología de Cartografía Participativa para entender el conocimiento local acerca del Cambio Climático desarrollado por la **Ing. Zulma Pusari** en el **capítulo II**.

El **capítulo III** es un vínculo entre los conocimientos locales y el conocimiento científico. Este capítulo, presentado por **Wilson Mamani**, nos describe cómo se puede relacionar la información entre lo que predicen los equipos sofisticados

como el SENAMHI, y los conocedores locales como los *Pachayatiris*². Ambos conocimientos son importantes y pueden ser diferentes, según la localización de las comunidades, donde hay una diversidad de bio-indicadores y costumbres que tienen las comunidades. El punto focal de este estudio fue la comunidad de Cutusuma, en el municipio de Batallas, en el sector Sur del Lago Titicaca. Además, de hacer inventarios de las amenazas y posibles riesgos de la zona, también se pudo realizar un aplicativo móvil (APP)³ con la lista de indicadores bioclimáticos de la zona como método de prevención y difusión de los saberes locales a través de la tecnología actual.

A partir del **capítulo IV**, los estudios se enfocan en el monitoreo técnico científico de los sectores más críticos del Lago Titicaca, el Lago Menor. El Lago Titicaca se divide en dos partes. El Lago Mayor o Chucuito al Norte y el Lago Menor o Wiñay Marka al Sur. El Lago Menor es vulnerable por su baja profundidad en el sector boliviano, casi 1 metro, y su exposición a desembocaduras de los ríos que vienen de las ciudades como El Alto y Viacha que expulsan todos sus desechos líquidos a esta zona. La preocupación está latente y **Xavier Lazzaro**, investigador del IRD de Francia, ha visto por más de 30 años como se va deteriorando el ecosistema del Lago y describe el trabajo que se realizó en el capítulo IV

Por esta razón se ha visto conveniente analizar la eutrofización del Lago Menor del Titicaca. El **capítulo V**, presentado por **Inez Villca**, explica e intenta encontrar las zonas afectadas a través de imágenes de satélite. A pesar de tener algoritmos que ayuden a identificar las zonas expuestas a eutrofizarse en las imágenes de satélite, aún existe la incertidumbre de relacionar los datos de gabinete con datos de campo.

El **capítulo VI**, presentado por la **Lic. Claudia Piza** muestra los resultados de algunas salidas de campo con equipos especializados y muestras de laboratorio que ayudan en el mejor detalle del contenido, por ejemplo, de clorofila, fósforo, nitrógeno, etc. Si bien, no se pudo realizar una correlación entre los datos de campo y las imágenes de satélite para detectar la clorofila en el Lago Menor del Titicaca, si se pudieron obtener mejores resultados con la detección de biomasa fitoplanctónica para determinar el estado trófico del Lago Menor.

En el **capítulo VII**, **Daniel Calisaya**, nos presenta la combinación de los trabajos de campo realizado con el espectroradiómetro de campo para medir las longitudes de onda y compararlas con las longitudes de onda detectada por las imágenes de satélite. En este proceso se pudo determinar que en mayor porcentaje, el Lago Menor del Titicaca todavía es Mesotrófico, con una excepción en el sector de Bahía Cohana que ya se encuentra en proceso de eutrofización. Sin embargo

2 Conocedores del clima locales y ayudan a prevenir a la comunidad de posibles amenazas naturales como sequías, heladas, granizadas a través de indicadores bioclimáticos.

3 El aplicativo móvil está disponible para su descarga en www.geovisorumsa.com

hay que tomar en cuenta que los niveles tróficos están subiendo. Aún estamos a tiempo de revertir esta situación. El Bloom del 2015 que menciona Daniel, en su artículo, fue una advertencia de lo que puede ocurrir a mayor escala si es que no se revierte el proceso de eutrofización en esta zona.

A partir del capítulo VIII se presentan algunos productos tecnológicos desarrollados en base a los estudios del proyecto. Uno de ellos es una aplicación móvil (APP) creada viendo la necesidad, primero, de coleccionar datos de campo, y segundo de clasificar estos datos. Un ejemplo, para esta aplicación móvil, fueron los bio-indicadores. Es así que en el **capítulo VIII**, el **Lic. José Luis Soza**, presenta esta aplicación que servirá para futuros proyectos.

Otra herramienta desarrollada fue un portal web de imágenes de satélite con apoyo del programa ERDAS APOLLO adquirido gracias al proyecto PIA-ACC.37. El portal consiste en la catalogación de información geográfica y principalmente de imágenes de satélite. Los servidores del proyecto almacenan imágenes de satélite desde los años 70 hasta la actualidad. Además de los resultados del procesamiento de imágenes de satélite realizada por los distintos investigadores. La **Ing. Tatiana Vargas**, explica en el **capítulo IX**, como se logró catalogar estas imágenes con el funcionamiento de Erdas Apollo en la investigación y en futuras investigaciones que se puedan desarrollar.

El último **capítulo X** trata sobre una propuesta para integrar los datos geográficos del Lago Titicaca entre Perú y Bolivia. Es el caso de una Plataforma Binacional (Perú y Bolivia) sobre el Lago Titicaca que se propone junto con el Geog. **Mario Polar**, investigador de IMARPE⁴. Nos atrevemos a realizar esta propuesta, de una Plataforma Binacional, puesto que ya tenemos la información geográfica necesaria para poder plasmar esta información en un Atlas. Es importante tomar en cuenta que se debe realizar la estandarización, no sólo de los formatos digitales, sino también de los términos utilizados, las unidades geográficas político administrativas, las leyendas de los diferentes mapas.

Por último, aunque el tiempo no alcanzó, se siguen desarrollando investigaciones en la línea del proyecto inicial para Monitorear los efectos del Cambio Climático del Lago Titicaca con imágenes de satélite. La lista de proyectos que se están desarrollando, y se detallan al final de los capítulos, son:

- *Recuperando los saberes ancestrales de las casas bioclimáticas de adobe y champas con la adaptación al Cambio Climático - Sector Lago Poopó* presentado por **Fortunato Condori** de la Universidad Técnica de Oruro-UTO.
- *Análisis espacial de datos batimétricos obtenidos con ecosonda entre Huatajata y Bahía Cobana. Sector Lago Menor del Titicaca* por **Edgar Castro** de la Autoridad del Lago Titicaca-ALT.

4 Instituto del Mar del Perú.

- *Protocolo limnológico mediante la aplicación de índices de estado trófico como herramienta en la determinación del nivel de eutrofización en el Lago Menor del Titicaca, sector Huatajata* por Verónica del Carpio de la Universidad Loyola.
- *Distribución espacial de las totoras en el Lago Menor del Titicaca. Análisis multitemporal y propuestas de conservación*, por Jhasmin Duarte y Mishel Justiniano de la Universidad Mayor de San Andrés.
- *Monitoreo multitemporal de la calidad de agua mediante el método de estimación de sólidos suspendidos totales en la Bahía de Cobana utilizando sensores remotos* por Janina Espinoza de la Universidad Católica.

PRIMERA PARTE

Monitoreo en base al conocimiento local

Percepciones del cambio climático, sus efectos en la economía y las acciones de mitigación en las comunidades de Yumani y Qhewaya

Carlos Peñaranda Argandoña

Resumen

Los comunarios de Yumani y Qhewaya perciben el cambio climático como un incremento de la temperatura, menos lluvia, descenso en el nivel del agua del lago, mayor sequedad en las plantas y un trastorno de la época de heladas.

Los efectos de estos cambios crean perjuicios en las principales actividades económicas, generando problemas que difícilmente encuentran una solución en los conocimientos y prácticas tradicionales.

La pluriactividad económica de los comunarios es un antecedente que permite que los efectos perjudiciales en una actividad sean menos importantes en su economía en su conjunto.

Las acciones de mitigación se encuentran en la estructura religiosa tradicional de los comunarios, en sus rituales y oraciones, que persisten en conservar una relación equilibrada con la naturaleza y los seres sagrados que existen en ella, aún a pesar del cambio climático y la creciente dificultad de predecir sus efectos.

Abstract

The community members of Yumani and Qhewaya perceive climate change as an increment in temperature, less rain, decrease in the level of the lake's water, increase in the dryness of the plants and a disorder in the time of frosts.

The effects of these changes are a cause of harm in the main economic activities, generating problems, which with difficulty can find solutions in the knowledge and traditional practices.

The economic pluriactivity of the community members is an antecedent that permits that the harmful effects in an activity are less important to their economy as a whole.

The mitigating actions are found in the traditional religious structure of the community members, in their rituals and prayers, which persist in keeping a balance relationship with nature and the sacred beings that exist within, even in spite of climatic change and the increasing difficulty of predicting its effects.

Introducción

La presente investigación es componente del Proyecto “Monitoreo espacial de los efectos del cambio climático en el Lago Titicaca con imágenes de satélite”.

Las percepciones del cambio climático se investigan en las comunidades de Yumani y Qhewaya, en las riberas del Lago Titicaca, entre el 15 de noviembre y el 30 de diciembre del año 2016. El tiempo de trabajo convierte este resultado solo en un avance de investigación.

Las percepciones de los comunarios acerca del cambio climático y sus efectos se sitúan en la cosmovisión aymara que concede gran importancia a las relaciones con los seres sagrados, a un orden que rige las relaciones entre los seres de la naturaleza y a la conducta de los seres humanos. Su perspectiva incorpora también una evaluación de los efectos del cambio en sus actividades económicas, correspondientes a una sociedad campesina.

En principio se presenta una caracterización de ambas comunidades. Después las percepciones de los entrevistados se presentan en dos partes, la primera que permite conocer las variables establecidas por ellos mismos acerca del cambio climático. La segunda que presenta y analiza sus percepciones sobre los efectos del cambio en algunas de sus actividades económicas. Una tercera parte desarrolla la relación entre los efectos del cambio climático y la manera en la que los comunarios actúan para lograr un cierto control sobre esos cambios. Esta secuencia de presentación se realiza por separado para cada una de las comunidades, pues existe una integralidad entre todas las partes.

Finalmente se presentan las conclusiones que exponen una clara percepción de las transformaciones climáticas de los últimos tiempos, de desequilibrio entre la naturaleza y la sociedad humana. Aunque aún se recurre a las formas tradicionales de mitigación o de reparación de los desequilibrios climáticos tradicionales, algunos efectos se sitúan en parámetros extremos y no logran ser controlados.

I. Las comunidades de las riberas del lago

Las comunidades en las que se realiza este estudio son: Yumani se encuentra en la Isla del Sol y Qhewaya en la bahía de Cohana, en el Lago Menor. (figura 1)

I.1. La comunidad de Yumani

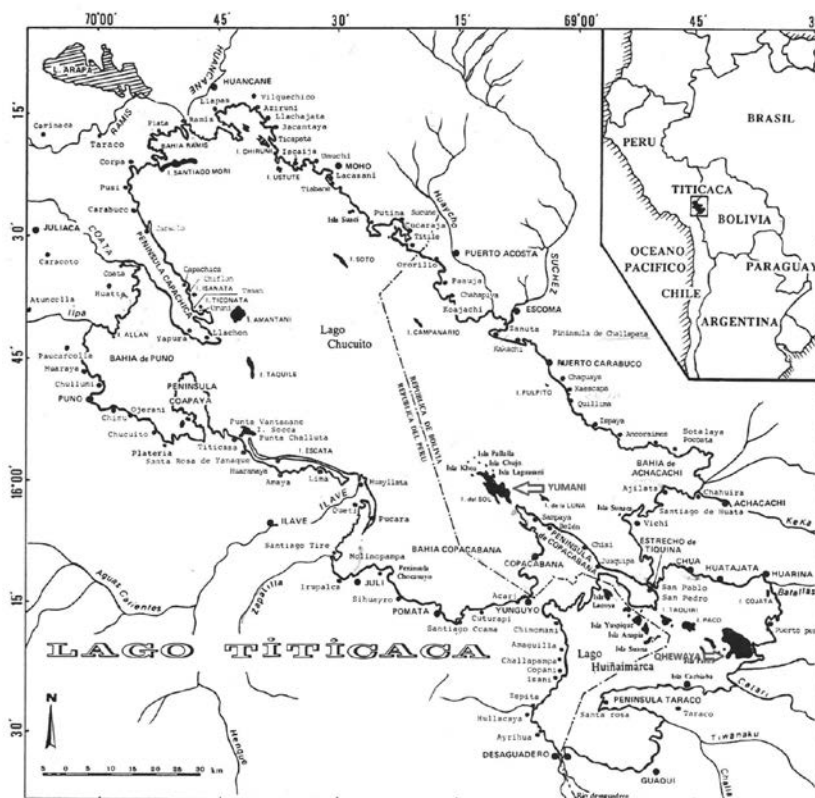
La comunidad de Yumani es una de las tres que se encuentran en la Isla del Sol, cuenta con una población de algo más de 700 personas distribuidas en 200 familias (Gonzalo Pusari y lista del Sindicato); los últimos años retornaron antiguos migrantes por el auge del turismo.

Las principales actividades económicas de la comunidad son la agricultura, la pecuaria, la pesca, la recolección, y en las últimas décadas el turismo, que se ha convertido en el eje de una serie de transformaciones en la población.

El turismo en Yumani se articula con un centro importante en estos circuitos, la población de Copacabana, con la que existe un intenso tráfico en lanchas, que contamina el trayecto.

Muchos de los comunarios practican varias de estas actividades y esta pluriactividad ha significado y significa el aprendizaje de las nuevas, que requieren de habilidades y cualidades distintas a las tradicionales.

Figura 1



Fuente: Dejoux Claude et Ittis, André. Editores.1991:7

I.2. La comunidad de Qhewayaya

La comunidad de Qhewayaya está en una pequeña península en torno de la cual aún hay extensos totorales, se encuentra al interior de la bahía de Cohana en el Lago Menor.

Las familias de la comunidad son 60, aunque incluyendo a algunas personas jóvenes, que recientemente han formado nuevos hogares suman 85 (Oscar Limachi), sin embargo la población joven en gran medida ha emigrado afuera.

Las actividades económicas más importantes en la comunidad de Qhewayaya son la agricultura, la pecuaria, la pesca, la recolección de huevos de aves del lago y la artesanía de totora. De manera similar a Yumani, en Qhewayaya muchos comunarios practican varias de estas actividades.

La bahía de Cohana vive un intenso proceso de contaminación con los residuos de la ciudad del Alto y de otras poblaciones situadas en la parte alta de la cuenca de los ríos Seque y Seco.

I.3. Necesidad y objetivo de la investigación

El cambio climático genera variaciones: en la temperatura, la humedad, los vientos, en los recursos hídricos, en la fauna y flora del lago y de esa manera afecta las actividades económicas de los comunarios.

En este proceso los comunarios recurren a conocimientos y prácticas tradicionalmente usados para encontrar soluciones a los problemas de variaciones climatológicas; sin embargo perciben cambios que se presentan en eventos extremos, sobre los que no existe aún una experiencia social de control.

Estas percepciones necesitan ser investigadas pues en ellas se funda la relación de estas comunidades con la naturaleza y sus cambios.

Ante esta situación el objetivo de la investigación es determinar las percepciones del cambio climático, sus efectos en las actividades económicas y las acciones de mitigación en las comunidades de Yumani y Qhewayaya.

II. Marco teórico

El concepto central es el de cambio climático:

... un incremento en la temperatura promedio del planeta debido a una excesiva concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. (Ichuta.2016:11-12)

Y sus efectos en la región lacustre:

En el ámbito de la producción agrícola, los factores concretos que derivan de una irregularidad climática serían: una variación térmica que influiría, irreversiblemente, en la disponibilidad de agua para el riego, sequías prolongadas, modificación de la secuencia

de las precipitaciones pluviales, inusual caída de granizos, presencia de heladas tempranas o tardías; producto de un recrudecimiento del frío en el periodo invernal, los mismos que afectarían el normal desarrollo de los cultivos. (Ichuta.2016:6-7)

Los entrevistados proceden de una sociedad indígena: la aymara, al interior de la cual la relación del hombre con su entorno es distinta.

En la cultura andina la diversidad es holística, es decir incluye a cuanto existe ... es viva una alpaca o una planta de maíz. El río, las piedras, las estrellas, el viento ... son también apreciados como formas de vida. (Rengifo.1987:3)

"... los aymaras ... consideran todas las cosas mutuamente relacionadas, que todo tiene que ver con todo y no hay nada ni nadie aislado, separado" (Paxi et.al.1986.7). citado en (Van den Berg.1989:118)

El ayllu, en este sentido, no es solo la comunidad de parientes humanos por lazos de consanguinidad y afinidad. Los andinos llaman abuelos a los Apus y a los Achachilas como madre a la Pachamama. (Rengifo.1987:13)

Los astros, los fenómenos meteorológicos, las plantas, los animales y los seres humanos, constituyen la naturaleza y el equilibrio entre ellos se manifiesta o exterioriza en la normalidad o regularidad con que se presentan o desarrollan los componentes de la misma ... (Van den Berg.1989:119)

Además esta relación mutua se caracteriza por una reciprocidad, un dar y recibir, que se extiende a todas las dimensiones del universo. ... (Van den Berg.1989:118)

La inexistencia de reciprocidad genera una deuda, es una de las razones para que las relaciones dejan de realizarse en un ámbito de regularidad y normalidad. Y es por eso que el abandono de la reciprocidad con los seres sagrados, el dejar de venerarles y ofrecerles sacrificios, puede devenir en la carencia de lluvia:

A fin de cuentas hoy se interpreta la sequía como CASTIGO por el abandono de la religión andina ... La deuda sacrificial consiste en haber abandonado a sus dioses. (Rosing.1996:466)

... las oraciones y los ritos tienen dos objetivos mayores. En primer lugar tienen por objetivo agradecer, complacer a los habitantes de ese otro mundo ... En segundo lugar por medio de los ritos y las oraciones, los aymaras quieren cumplir con esos seres: phupaña, cumplir un compromiso, pagar un préstamo. (Buttner & Condori 1984:165) citado en: (Van den Berg.1989:130)

III. Estrategia del método

Inicialmente, durante todo el período de la consultoría y para esta publicación se ha revisado las fuentes documentales pertinentes al tema de investigación.

Se realizaron viajes para el trabajo de campo: cinco días de viaje a la comunidad de Yumani y cuatro días a la comunidad de Qhewaya.

Se obtuvo la información en entrevistas¹ semiestructuradas realizadas a personas adultas que tienen distintas actividades económicas principales.

La información recolectada se organizó y analizó de acuerdo al objetivo, luego se elaboraron las conclusiones y se redactó el informe final, que es la base de este trabajo.

IV. Percepciones del cambio climático en Yumani

La relación entre la naturaleza y el ser humano se concibe como una unidad, de la cual los seres humanos somos parte, y en esta unidad se incluyen los efectos de las acciones humanas como la contaminación.

... los cambios climáticos causamos nosotros mismos, porque nosotros somos los que contaminamos. ¿Cómo contaminamos?. Ya sea quemando basuras y muchas cosas más, cuando el humo sube altera, perfora lo que es la capa de ozono, y así ya hace entrar más directamente lo que son los rayos del sol, y así afectan a la sequía y puede ser una razón por la cual el lago baja su nivel. (Carlos Vidal)

Uno de los efectos percibidos es la mayor intensidad del calor:

... ya no es como antes, el calor es fuerte, el sol seco, si sería húmedo por lo menos se mantendría, pero seco es aquí, entonces eso quema realmente fuerte, tienen algunas personas dolor de cabeza, con el sol que realmente que es muy fuerte ... porque también el agua se calienta, ya no es como antes ... (Porfirio Quispe)

... a las diez ya empieza la calor, ya no soportas otra chompa más, porque antes no era así, usábamos medias las mujeres, pero ahora no, todas estamos en poleras, o sea ha aumentado mucho, no se cuántos grados estará, no hemos tomado eso en cuenta, pero es la calor que yo siento y la gente también siente en la isla ... (Verónica Quispe)

Y en las percepciones el mayor calor se asocia a la menor cantidad de lluvia.

He notado la temperatura más alta digamos, mayormente como no ha llovido, como ya no llueve como antes, yo he notado que es por calentamiento global ... por el calor, porque no ha llovido, se siente el calor ... (Ramiro Pusari)

La percepción de otro efecto es que las vertientes en la Isla del Sol han disminuido:

Más antes había habido vertientes, pozos, como ya no está lloviendo mucho, ya desaparecen esos pozos, único que tenemos, que queda, la fuente del Inca, que tenemos encima del cerro, otros ya están todos secos. (Ramiro Pusari)

Los entrevistados indicaron que actualmente la única vertiente permanente en Yumani es la conocida como la fuente del Inca, de la que se abastece toda la comunidad, sin embargo esta fuente también ha disminuido su caudal.

1 La entrevista de investigación es una interacción limitada y especializada, conducida con un fin específico y centrada sobre un tema particular. (Deslauriers.2005:33)

El descenso del agua del lago es también otro efecto percibido.

He notado la temperatura más alta digamos, mayormente como no ha llovido, como ya no llueve como antes, yo he notado que es por calentamiento global ... por el calor, porque no ha llovido, se siente el calor, por eso es que ya está queriendo secarse el lago... Comparando desde antes hasta ahora, llueve menos, por eso también se cae el nivel del lago... (Ramiro Pusari)

También se menciona que las heladas suceden en períodos en los que antes no ocurrían.

Tiempo de invierno digamos junio, julio es tiempo de helada, después septiembre, octubre, tiene que ser cambio, como verano digamos así, ese ya no es su tiempo de la helada, pero ahora sigue, de repente una noche congela, la helada llega, sigue, sigue, las plantas maltrata, quema, seca. Cambia su época digamos, la época de helada cambia ya, en su tiempo ya no cae la helada, ahorita (mes de noviembre) un poco sigue está helando, anteanoche he salido de la pesca, en la orilla había estado mojado, he salido, de repente he pisado unas maderas mojadas, me resbalé al lago, a la orilla, entonces he mirado, qué ha pasado?, ahí sobre el hielo, en la helada he resbalado. De repente una noche sigue está helando, pero no mucho. (Ramiro Pusari)

Un indicador de los efectos del cambio son las plantas, las terrestres como las acuáticas:

Las plantas, yo veo que eucaliptos, ya no son medio verdes y también lo que teníamos las antiguas plantas como la qhiswara, todo está muy afectado, seco ya está, ya no es muy verde y con el tiempo incluso se puede secar, porque esas plantas viven con agua. Igual los totorales medio amarillos ya están, ya no son verdes. (Porfirio Quispe)

IV.1. Percepciones de los efectos del cambio climático en la agricultura

En la comunidad de Yumani la producción agrícola se realiza principalmente en las terrazas que datan de épocas prehispánicas, pero que son mantenidas de manera permanente.

Las terrazas sostienen la masa del suelo, retienen el agua de lluvia y son una eficaz protección contra la erosión del suelo. (Rosing.1996:44)

Se produce principalmente haba, papa, maíz, oca, quinua, y cebada; existiendo formas de mantener la fertilidad de la tierra como la rotación de cultivos y los períodos de descanso de la tierra, principalmente en las aynoqas.

En relación a los efectos en la agricultura del incremento de la temperatura y la menor cantidad de lluvias señalados anteriormente, el mismo fue claramente percibido, pues el año 2016 se inició la siembra en el mes de septiembre, pero la falta de lluvias hasta el 10 de noviembre determinó que no se siguiera sembrando.

Realmente está seco la tierra, ya no se puede sembrar, porque si le sembramos ya no va a salir, entonces eso es lo que se está esperando: la lluvia, que llueva, recién para empezar a sembrar, si en este mes ya no llueve, entonces ya no se va a poder sembrar, la

siembra es en octubre, tanto octubre, como septiembre, ahí sembramos, entonces ya se está pasando para sembrar, porque tiene su época, por ahí va a llegar la lluvia, eso no se sabe, ese es el problema de los habitantes, por esa razón ya no han sembrado. (Porfirio Quispe)

... justamente estos días ya sabe llover, sabemos estar listos para la siembra, esa esperanza tenemos, la época de siembra y como no ha llovido, las siembras ya no hemos podido sembrar, hay unas partes que algunos han sembrado y poquito ya ha crecido y ahí nomás, estamos muy atrasados, muy diferente ha sido este último año, recién nos hemos dado de cuenta. (Gonzalo Pusari)

Hacia el 24 de noviembre, los efectos de la falta de lluvia para el crecimiento de las plantas que ya se habían sembrado, son expresados de la siguiente manera por los comunarios:

... papa está saliendo, al salir la papa está muy negro, ya está el sol dañando a la papa que sale, y ese es un gran problema realmente en la Isla del Sol, y lo que preocupa, están muy preocupados todos los habitantes. (La papa) está saliendo, pero como la tierra no es igual, hay lugares secos, y hay lugares que tienen humedad, en lugares húmedos ya está saliendo la papa, pero muy mal, ya no es como antes, en lugares secos nada, nada. Haba también ya hemos sembrado, pero en lugares secos ya no va salir, porque la semilla está dañado ya. La oca ya hemos sembrado pero lo mismo. (Porfirio Quispe)

La pérdida, por una parte, de la posibilidad de seguir sembrando, y, por otra, la de perder lo que ya se había sembrado, por causa de la falta de lluvias, motivan incertidumbre en la comunidad.

IV.2. Percepciones de los efectos del cambio climático en la pecuaria

Los comunarios de Yumani poseen animales domésticos, la principal fuente de alimentación de los animales son los pastizales y los rastrojos de la producción agrícola de la tierra propiedad de cada comunario. Las pequeñas superficies de tierra poseídas por los comunarios significan una exigua provisión de forraje y esta situación impide que puedan tener mucho ganado.

Aquí, como la gente tiene poquito burro, oveja, no tienen bastante, entonces un poquito para los burros se traen afrecho, con eso le ayudan, para las ovejas no casi, tallos de habas, hojas de haba seca guardamos, de las habas su cáscara se guarda, entonces para esta época seca le dan a las ovejas lo que sacan del haba su cáscara, con eso mantienen también algo. (Ramiro Pusari)

El cambio climático ha afectado principalmente a los pastizales, y por eso:

Ya no hay forraje, porque el forraje para alimento para los ganados, algunos ya no tienen, muchos compran ya afrecho, otro tipo de alimento pa que coman, artificiales, porque lo que ellos comían, lo que realmente daba en la Isla del Sol, era mejor para ellos, actualmente está afectado, no ve que en esta isla ya está muy seco, porque ya no hay un lugar que esté verde, están sufriendo todo tipo de ganados. (Porfirio Quispe)

Por otra parte, el lago provee a los comunarios de Yumani de totoras y algas (*llachu*), las mismas que sirven para alimentar al ganado que ellos tienen:

Sí, algunos se sacan totora también, eso también sirve para alimentar a los ganados, llachu sacan poquito pero dan al burro, a la oveja. (Ramiro Pusari)

La totora solo se produce en pequeñas superficies por la profundidad del lago, además no es de propiedad comunal sino solo de algunas personas, de esa manera son pocos los comunarios que cuentan con esos recursos del lago para alimentar a sus animales.

IV.3. Percepciones de los efectos del cambio climático en los recursos lacustres

Inicialmente veamos las percepciones en relación a los cambios en los períodos en los que ocurren las heladas y los resultados de las actividades de la pesca.

Los peces digamos también se desaparecen en tiempo de helada, poquito hay, poco. Cuando ya calienta digamos en septiembre empieza, noviembre, hasta diciembre, ya aparece los peces, ahora (noviembre) sigue está un poquito helada el agua, entonces ya no hay muchos peces, no hay pesca. (Ramiro Pusari)

... cuando hay helada no hay peces, no salen los peces, se entran adentro. (Porfirio Quispe)

Como el desove se realiza en las orillas, los peces tienen esa nueva dificultad para reproducirse:

Cuando vienen a la orilla a hacerse cría, entonces ese es gran problema para ellos porque la orilla es caliente, ese es problema. (Porfirio Quispe)

Como señalan los entrevistados la presencia de peces el año 2016 disminuyó inicialmente, pero luego la situación cambió, aparecieron bastantes como suele suceder en la época de sequía, aunque ya era época de lluvias.

... digamos cuando ya no llueve, los peces van a aparecer en el lago, ha aparecido bastante ispi, trucha, qarachi, mauri, ahorita hay bastante. (Ramiro Pusari)

El ispi, el mauri y el qarachi, se pescan principalmente para el autoconsumo de los pescadores y para la población de Yumani, pues estos peces no se destinan al mercado del turismo.

La creciente actividad turística, los hoteles y hostales en la Isla, determinan una alta demanda de peces y los turistas prefieren las truchas:

Como la trucha tiene el precio más alto, entonces nos dedicamos a la trucha, para ganar siquiera un poco más de recurso, ese es el motivo, qarachi, ispi, mauri, tiene menos precio, ese es el motivo para no pescar. (Ramiro Pusari)

Hoy en Yumani existen muchos menos pescadores que hace décadas y las opiniones de los comunarios destacan algunos aspectos fundamentales como la menor cantidad de peces que existe hoy, que explican por procesos principalmente de sobreexplotación y por la contaminación.

Veamos ahora la percepción de la gente de Yumani en relación a los efectos del cambio climático sobre las aves del lago.

Si, ya he visto como transformación digamos, yo he visto, hay plantas pero no sé su nombre, algas le llamamos, hay unas aves, se llaman chuqa, es como vegetariana, no come los pecesitos nada, con esa yerba de algas se alimenta, vive; yo según siempre veo en la orilla donde hago mi trabajo con la pesca, abí vienen esas avecitas acuáticas, y ven y sacan esas algas, comen, entonces ahora ya no hay para ellas, todo ese lugar se acabó para ellas, entonces hay otra clase de algas, cambia eso, ya no hay para ellas, su alimentación en lo que era antes, ha desaparecido digamos. (Ramiro Pusari)

IV.4. Acciones de mitigación

Cuando se realizó el primer viaje a la Isla del Sol a mediados de noviembre, llegamos justamente cuando la comunidad dirigida por las autoridades, realizaba un ritual para llamar a la lluvia.

La comunidad de Yumani tiene como organización principal el Sindicato, dentro de su directiva existen las siguientes autoridades que deben participar en la realización de rituales para mitigar, o resolver problemas debido a, las variaciones climáticas.

Secretario de Agricultura: *su trabajo es velar por la producción, también cuidar los animales, abí daña a la producción, ahora ya va a venir San Andrés, más o menos este lunes, vamos a hacer una ceremonia* (para llamar a la lluvia), él tiene que organizar, fuera de eso con sus dos vocales, ellos hacen bailar la llama, después dan una ofrenda. (Porfirio Quispe)

Dos vocales que se preocupan de cuidar los cultivos de los animales, no dejan maltratar los cultivos y también hay ceremonias para que no caiga el granizo, para eso también hacemos una ceremonia. (Gonzalo Pusari)

La participación de estos directivos en la realización de rituales para llamar a la lluvia o ahuyentar el granizo permite una participación organizada y conjunta de la comunidad en la búsqueda de soluciones a los problemas en la actividad agrícola que devienen de las variaciones climáticas.

La realización del ritual en la comunidad de Yumani se realizó:

... para que llueva, esa es una costumbre que se hace, ceremonia, en esta época, actualmente están haciendo, ya las autoridades, dirigentes ya hemos hecho, y por zona están haciendo, están muy preocupados, es muy triste, la gente en la mañana se levanta triste, ya no es como antes, con esa alegría que tenía realmente por la producción, realmente la gente de la Isla del Sol muy preocupado, la lluvia ya no llega. (Porfirio Quispe)

Este ritual (para que llueva) no corresponde a un orden cíclico de relación con las deidades que aseguran una buena producción, sino que es principalmente coyuntural, dependiente de circunstancias climáticas particulares que se presentan en el año agrícola. (Ichuta.2016:136)

El ritual realizado en la Isla del Sol no logró la llegada de la lluvia y unos días después se realizó un nuevo ritual:

La costumbre que tenemos, hay un cerro aquí en el frente de Copacabana, el cerro Qeñuani se llama, en Perú, en ese cerro hay un lago, hay agua de la lluvia, agua de granizada, agua de helada, las personas que conocen de eso tienen que ir a alzar esa agua, esa agua traemos en una olla de barro nuevo, ariphuku le llamamos, adornadito con flores, con una ranita más, eso traemos desde Perú, desde ese cerro. La semana anterior gentes mayores han traído, saben también, porque hay lugares de donde se alza el agua, justamente esa noche cuando han hecho llegar esa agua, ha caído la helada, entonces dijeron las gentes “no han traído agua de aguacero, de la lluvia, se han equivocado, agua de helada han traído” así. (Gonzalo Pusari)

Con este segundo ritual tampoco llegó la lluvia. Como señala el entrevistado la falta de efectividad del mismo se explica por un error en su realización, porque en el ritual realizado no se trajo un agua adecuada para producir lluvia, sino agua para producir helada; días después del ritual hubo una helada que confirmó que había habido un error cuando se trajo el agua del cerro Qeñuani.

V. Percepciones del cambio climático en Qhewayá

En la comunidad de Qhewayá se tienen las siguientes percepciones acerca del cambio climático.

El primer efecto en ser destacado es una mayor intensidad en el calor del sol.

Sí, ha habido mucho cambio, el sol ya te pica fuerte, es muy fuerte, incluso dice que antes las ropas se secaban en dos días o en tres días y hoy en día rápido seca, máximo en un día, rápido, pronto. (Saigón Wara Wara)

Otra percepción destaca la menor cantidad de lluvia:

Ahorita tiempo de lluvia es, pero no ha llovido hasta ahora, poquito sabe llover pero no como antes. (Mario Mendoza)

También se ha percibido como otro efecto el cambio de período de las heladas:

La helada sigue cae, no era así, en el mes de junio sabe caer la helada, hasta octubre está cayendo ahora, bien fuerte, cambio siempre es. (Alejandro Mamani)

El entrevistado expresa que otro efecto del cambio climático es la transformación temporal de la época de heladas que antes se circunscribía a la época de invierno y los últimos años ha continuado hasta el mes de octubre, como sucedió el año 2016.

Concomitante a la casi inexistencia de lluvias, a la mayor intensidad del calor y a la continuidad de las heladas, variaciones todas presentes en el mes de noviembre, se destaca como otro efecto la disminución del nivel del agua en el Lago Titicaca.

... nosotros pensábamos que en agosto, septiembre, octubre, como no ha llovido; entonces va a llover en noviembre, pero no ha llovido siempre hasta ahora (fines de noviembre), porque ya cambia el clima, como no llueve ya ha rebajado el agua, como está helando más está rebajando el agua, cuando llega la helada lo congela el agua y cuando llega más la helada, rebaja más el agua, en mes de junio, en San Juan, en esas fechas el agua rebaja

harto, así está rebajando cuando llega la helada, en estos meses está rebajando fuerte, si no llueve o sigue llegando la helada, más va a rebajar el agua. (Oscar Limachi)

Aborita el sol es fuerte no hay caso de echarse por ahí aunque sea un minuto, cuando hay sol en la casa nomás estamos. Porque el sol es más fuerte, con el sol se ha secado el lago, también ha bajado el lago. (Lorenzo Mamani)

Otro cambio percibido es el calentamiento del agua:

Hay cambio, aborita como es bajo, aborita el lago está calentando, caliente es, afecta a los peces, a las aves, a las totoras. (Mario Mendoza)

El notable calentamiento del agua del lago entorno de la comunidad se debe principalmente a la poca profundidad que tiene el mismo en la zona, pero se ha acentuado con el mayor calor y la poca lluvia caída hasta el mes de diciembre.

V.1. Percepciones de los efectos del cambio climático en la agricultura

Los comunarios de Qhewayá afirman que todas las familias en la comunidad se dedican a la agricultura; incluso los pescadores que son pocos, son simultáneamente agricultores.

Los principales productos que se obtienen en la comunidad son papa, maíz, haba, oca, quinua y cebada, que se obtienen en terrenos sin riego.

El año 2016 la siembra empezó a realizarse desde temprano, pues se realiza en varias etapas, esperando una regularidad en las lluvias; sin embargo la ausencia de lluvias:

Ha perjudicado la papa, habíamos sembrado, lo ha hecho caer, ya no hay papa, ya no va a recuperar, con lluvia recupera, pero esos días no ha llegado lluvia, de mí igual ya me he sembrado, en el cerrito, bien era, cuando ya ha salido ya no ha llovido, ahí ha fracasado, puro sol, falta de lluvia, recién está recuperando, ya tenía que estar floreciendo, fin de julio he sembrado, ahí nomás se ha quedado, tenía que estar grande. (Alejandro Mamani)

Por otra parte las heladas tardías, del mes de octubre, arrasaron con las pequeñas plantas que ya se habían sembrado.

La producción de papa, algunos hemos colocado por las orillas, a inicios de octubre, ha llegado la helada, la causa ha sido la llegada de la helada, dos noches anteriores ha helado fuerte ... por eso nuestro sembradío, en meses anteriores que hemos sembrado, ya estaba encima de la tierra, estaba verde, papa, haba, maíz, ya lo ha quemado todos los sembradíos esa helada, esas dos noches que ha llegado, entrando lo ha quemado unas hojas de la papa, de la oca, haba, más que todo lo ha quemado el maíz, débil es maíz y oca, ya han sembrado muchos. Cuando va a llover va a retoñar, pero ya no va a dar una buena producción. (Oscar Limachi)

Los productos sembrados tempranamente, que apenas estaban creciendo y no habían sido dañados por las heladas señaladas, corrían el riesgo de ser perjudicados luego por la granizada cuya presencia es cada vez más impredecible, por una nueva helada ó por la falta de continuidad en las lluvias, es decir por variaciones climáticas inusuales en esa época.

... de algunos están saliendo las papas pequeñas todavía, con lo que está lloviendo ahora va a poder producir, porque hasta el momento ya tiene que estar alto, más o menos como 10 centímetros o 20, solamente está saliendo recién la papa, y eso por falta de lluvia, no se sabe cómo va a dar, si agarra la helada o agarra la granizada lo mismo que nada va a ser. Sembré haba, el haba produce un poco más rápido, pero igual está en su crecimiento ahorita, pequeño todavía, no está grande. También depende de la lluvia, si llueve hasta mes de marzo del próximo año, puede que produzca bien nomás, ahora si deja de llover no va a producir nada. (Saigón Wara Wara)

Los comunarios que habían previsto sembrar posteriormente, cuando lloviera, no pudieron hacerlo hasta el mes de noviembre, pues no hubo lluvias:

La lluvia ha faltado, totalmente ha faltado, por eso recién el 8 de noviembre, por ahí, unas dos noches ha llegado la lluvia, poquito pero ha llegado, y entonces a eso hemos sembrado recién, ha entrado a una profundidad de veinte centímetros, o quince centímetros, ha entrado la lluvia a remojar la tierra, ahí hemos sembrado la papa, ojalá que llueva hasta quincenales de diciembre, antes de enero, si llueve entonces directamente va a crecer la papa, haba, lo que hemos sembrado. (Oscar Limachi)

La semilla que aún no había sido usada ya no se iba a poder sembrar tardíamente pues:

... ya no llueve en estos meses, a qué tierra remojada vamos a sembrar, si sembramos a tierra seca, la papa se va a quemar y no va a crecer, entonces esperamos la lluvia, antes no era así, cada año está cambiando el clima. (Oscar Limachi)

La percepción de los efectos de la falta de lluvia en la productividad de otro producto importante en la comunidad, el haba, es la siguiente:

... si cae la lluvia da buena producción, da más producción, cuando no cae es poco, de un tallo podemos bajar, si no llueve, tres habitas, cuatro habitas, así nomás, si llueve de un tallo bajamos por lo menos veinte habas, treinta habas, esa es una diferencia. (Oscar Limachi)

V.2. Percepciones de los efectos del cambio climático en la pecuaria

Los efectos del cambio climático percibidos determinan que no exista suficiente forraje producto de la actividad agrícola o de sus rastros, lo cual incide en la ganadería.

Sí, afecta, más en la alimentación, porque como antes llovía a su debido tiempo, a las ovejas, a los chanchos, teníamos que llevar a la chacra para que coman, y en este año como no ha llovido, entonces nosotros tenemos que comprarnos alimento en la ciudad, afrecho, para el chancho más que todo, y de las cebadas lo que sacan de las espigas, eso también para las ovejas y como algunos no tenemos ingresos, como en la ciudad, entonces eso un poco nos limita para nosotros, y eso afecta a nuestros animales. (Saigón Wara Wara)

Los comunarios tratan de suplir la carencia de pastizales, y rastros incrementando la cantidad de totora y algas que recogen del lago para la alimentación de su ganado, pero:

... aborita como usted está viendo, esas totoras ya tienen que estar totalmente verdes, verde, verde, entonces como están así secos, entonces no puede comer la vaca o el chanco o la oveja, está seco. (Saigón Wara Wara)

Además de la sequedad de las plantas forrajeras del lago; en relación a su uso para alimentar a los animales la contaminación de los lugares del lago más próximos a la comunidad las ha inutilizado y por eso ahora los comunarios deben ir en sus botes, que en su generalidad se impulsan con remos y no con motores, hasta unas dos horas de distancia para encontrar plantas forrajeras en mejores condiciones.

V.3. Percepciones de los efectos del cambio climático en la pesca

Hoy en el lago circundante a la comunidad de Qhewayaya, situada en una zona de amplios totorales, las especies más comunes son las de qarachis.

La percepción primera para explicar la disminución de peces en el lago durante la investigación, se refiere a un cambio en la temperatura del agua del lago:

Con el calentamiento global el agua está calentando, como el pescado es sangre fría, entonces no puede aguantar en el calor; se entra a más profundo del agua, por el calentamiento se van, como decía el pescado tiene sangre fría y se está calentando el agua, ya se está entrando más adentro, más adentro es frío, abí se están escapando, creo que se han escapado los peces de esos lugares, que hay, hay hartos, chiquititos, pero desaparecen. (Oscar Limachi)

V.4. Percepciones de los efectos del cambio climático en la totora y en la realización de artesanías de totora

La alta densidad de totorales en la región lacustre próxima y la tradición en el manejo y aprovechamiento de los recursos del lago, han determinado la existencia de una actividad importante económicamente como es la realización de artesanías de totora.

Hacemos balsas de totora, antes eran barcos en el Lago Titicaca, en aymara se llama yampu, hoy les llamamos balsa, fuera de eso se hace paneros, aves, aves de las totorales, viendo las aves, hay diferentes clase de aves, viendo se puede trenzar la forma del ave y se puede vender, fuera de eso abarquitas, se hacen llamas grandes, pequeñas medianas, de diferentes tamaños, esos totorales para esa clase de artesanía sirve. (Oscar Limachi)

Su creativa actividad se incrementó cuando a Qhewayaya empezaron a llegar turistas:

Como está yendo al fracaso el pescado, ya no hay más pesca, como viene el turismo, quieren artesanías, por eso yo me he animado a hacer barquitos de totora, aves del lago, flamenco, choqa, qiri qiri, hay otras aves, según yo veo la forma, trenzo, sí, como vivimos en el lago, entramos, salimos, al lago, conocemos bien, viendo trenzo la totora. (Oscar Limachi)

La contaminación de la bahía ha frustrado los proyectos de turismo. Por otra parte, los efectos del cambio climático han secado las plantas de totora, que deben

estar maduras y aún verdes para recogerlas para la confección de las artesanías, pero no secas como nos explican unos artesanos:

Porque yo veo que ahorita los totorales están secos, en estas épocas ya debería estar verde, ya totora retoñando sabe haber barto, ¿por qué ya no hay? por el cambio climático, por falta de lluvia, cuando llueve del cielo, es agua dulce, que hace retoñar rápidamente a los tororales, ese es lo que falta ahorita. (Oscar Limachi)

Ahora como está seco, paralizamos, no es bueno, se rompe (la totora), no es un buen material, también no podemos hacer una buena producción. (Lorenzo Mamani)

V.5 Acciones de mitigación

En Qhewaya durante el año 2016 se han realizado los acostumbrados cuatro rituales propiciatorios de la fertilidad de la tierra y para que haya lluvia suficiente, en los cuales han participado los directivos del Sindicato, como nos informa su Secretario General. A diferencia de la comunidad de Yumani, no se ha realizado ningún ritual específico para propiciar la lluvia.

Todo es para Secretario General, a algunos cerros tenemos que ir a rezar, nosotros hemos sacado a la gente para ir a rezar, para que llueva, ya ha llovido un poquito, siempre sabe escuchar el Dios, escucha. Costumbre es, en un año salimos cuatro veces al cerro, la autoridad se encarga. (Alejandro Mamani)

Otra acción destinada a prevenir variaciones climáticas, en este caso amenazas focalizadas como las granizadas, es la intervención de uno de los directivos del Sindicato, su secretario General:

A veces hay granizadas, no ve, siempre dicen al Secretario General, ¿cómo es? Nosotros ya buscamos, ¿porqué estará cayendo aquí? Ya pescamos en abí, con eso ya zanjamos, también a veces fuerte cae granizada. ¿No ve abortan?, de abí siempre viene granizada. (Alejandro Mamani)

Conclusiones

Yumani y Qhewaya son comunidades situadas en las orillas del Lago Titicaca, y se benefician de las condiciones climáticas que el lago propicia: buenos suelos, regularidad en las lluvias y tiempo de heladas breve en comparación al altiplano. (Vacher et. al.1991.517-521)

Las semejanzas entre ambas comunidades se expresan también en la prevalencia del minifundio, que limita la capacidad de las familias de lograr importantes cosechas o de tener ganado en cantidades significativas. De igual manera ambas comunidades son semejantes en los productos agrícolas que logran y en los animales domésticos que crían.

Por otra parte Yumani y Qhewaya acceden a los recursos lacustres: la fauna y la flora, que se constituyen en significativos soportes de su economía.

Sin embargo existen diferencias en la profundidad del lago que entorno de la Isla del Sol, donde está Yumani, suele tener más de 100 metros, excepto en la bahía de Japapi donde es mucho menor (comunicación personal del Licenciado Raúl Salas); mientras que en la bahía de Cohana, alrededor de la comunidad de Qhewaya, la profundidad suele ser menor a los 5 metros, como señalan los comunarios y las fuentes documentales.

La diferencia en las características del lago determina el tipo de peces existentes, así los pescadores de Yumani pescan mucha trucha; mientras que los de la comunidad de Qhewaya pescan principalmente qarachi.

La menor profundidad en la bahía de Cohana influye también en una mayor temperatura del agua en momentos de mayor irradiación solar y menos heladas.

Una diferencia fundamental es el proceso creciente de contaminación de la bahía de Cohana que determina una serie de transformaciones de los recursos lacustres, que en muchos casos confluyen con los efectos del cambio climático en el daño al ecosistema zonal.

Las distintas profundidades del lago significan también una diferencia en la existencia de plantas acuáticas, así en Qhewaya hay más totora y algas que se recolectan para alimentar a los animales y para realizar artesanías.

Ambas comunidades se asemejan también en la pluriactividad que sus pobladores han asumido ante las debilidades de sus actividades económicas: su población es agricultora, ganadera, y se dedica a la pesca; pero las comunidades se diferencian en algunas de las varias otras actividades que desarrollan y en la importancia de las mismas, así en Yumani el turismo se ha convertido en la actividad más lucrativa, mientras en Qhewaya son actividades económicas importantes la artesanía de totora, la caza de aves y la recolección de huevos de las mismas.

Las percepciones del cambio climático en ambas comunidades expresan las mismas variaciones: un incremento de la temperatura producido por la mayor intensidad de la irradiación solar, menos cantidad de agua de lluvia, descenso en el nivel del agua del lago, mayor sequedad en las plantas tanto terrestres como acuáticas, y finalmente un trastorno de la época de heladas. Estas variaciones se relacionan con precisión con el cambio climático y sus efectos desde una perspectiva científica, corroborándoles en la región desde la perspectiva comunaria.

En esta percepción, semejante en ambas comunidades, se evidencia que los indicadores del cambio climático señalados corresponden a elementos bióticos y abióticos, pues para los comunarios ambos son seres vivos, e informan al hombre de la presencia de ese cambio.

El cambio climático y sus efectos se perciben a través de la temperatura del aire y del agua, también en la menor presencia o ausencia de los peces y en el color de las plantas, reiterando la interrelación entre los distintos seres de la naturaleza.

La adecuada lectura de las señales de la naturaleza que informan de los efectos del cambio climático, es el fundamento del conocimiento de los comunarios respecto

de las condiciones más propicias para la continuidad de la vida; conocimiento que comprende además las posibilidades de lograr una continua adaptación al mismo.

Incluir al hombre en la relación con este cambio, a través del problema de la contaminación, no solo reitera la interrelación entre la naturaleza y los seres humanos, sino que avala la perspectiva científica de esa inclusión.

En relación a los efectos del cambio climático en la agricultura se puede apreciar, en ambas comunidades, que las actividades de siembra iniciales, realizadas desde fines de julio en Qhewayá y desde septiembre en Yumani, no lograron un buen desarrollo de los productos por las escasas lluvias.

Las siembras posteriores se realizaron tardíamente por la carencia de lluvia suficiente, y el desarrollo y maduración de los productos de estas siembras se puso en riesgo por la continuidad de las escasas precipitaciones, poniendo en una situación de zozobra a los comunarios cuya economía descansa también en esa producción.

En Qhewayá los momentos iniciales de la sequía provocaron la incertidumbre de la población; pero la sequía que continuó hasta noviembre y la helada tardía que se presentó hasta octubre, finalmente afectaron de una manera importante las posibilidades de una adecuada producción agrícola, determinando trastornos en la vida de los comunarios.

En el ámbito de la ganadería, en ambas comunidades el mayor calor y la falta de lluvia han significado una menor posibilidad de alimentar al ganado con los pastizales que cada comunario posee y con los rastrojos de su producción agrícola; la diferencia está en que en Qhewayá se accede más fácilmente a las plantas forrajeras acuáticas, aunque su recolección resulte en un mayor esfuerzo realizado por los comunarios, porque la contaminación les obliga a buscar la totora y algas cada vez más lejos.

La relación entre las variaciones climáticas, los efectos sobre la producción agrícola y los recursos lacustres, significa finalmente un problema de escasez en el forraje para los animales y una mayor articulación al mercado para conseguirlo.

En relación a la pesca, en la comunidad de Yumani uno de los efectos del cambio climático han sido las heladas tardías que determinaron una menor pesca. Mientras en Qhewayá la disminución de la pesca se atribuyó al calentamiento del agua.

Es decir que diferentes efectos del cambio climático, relacionados con las distintas cualidades del lago cerca de las dos comunidades, produjeron un decremento de los resultados de la pesca, afectando a ambas comunidades.

Los efectos del cambio climático, perceptibles en las totoras, en la sequedad expresada en su color, han significado la menor posibilidad de usarlas como forraje y una cierta pérdida de las cualidades que les permiten ser utilizadas para la realización de artesanías, incidiendo así también el cambio en la economía de la comunidad de Qhewayá.

Ante todas estas nuevas situaciones de pérdida e incertidumbre, el proceso de adaptación de los comunarios se funda en su pluriactividad económica, forjada durante mucho tiempo, que les permite irse adaptando a los problemas en una

determinada actividad económica, dedicando más atención a las otras, en combinaciones que buscan la optimización de su tiempo, esfuerzos y recursos y que les dan la posibilidad, de alguna manera, de enfrentar las transformaciones que produce el cambio climático.

Finalmente, en ambas comunidades se realizaron rituales para propiciar la fertilidad de la tierra, pero solo en Yumani se ha llegado a realizar un ritual explícitamente destinado a llamar a la lluvia en el período de sequía que se vivió. La realización de estos rituales denota que estas comunidades, a través de su estructura religiosa tradicional, persisten en conservar una relación de equilibrio con la naturaleza y los seres sagrados con los cuales se relacionan, aún a pesar del cambio climático y la creciente dificultad de predecir sus efectos.

Sin embargo el proceso del calentamiento global al generar con mayor frecuencia eventos extremos e irregulares y desequilibrar las relaciones entre la naturaleza y los seres humanos, en el futuro se constituirá en un desafío para la actualización de los conocimientos, creencias y prácticas tradicionales.

Bibliografía

- Dejoux, Claude; Iltis Andre
1991 "Introducción" En: Dejoux Claude et Iltis, André. Editores.
El Lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual. Pp. 11-16
ORSTOM/HISBOL. La Paz.
- Deslauriers, Jean-Pierre
2005 *Investigación cualitativa. Guía Práctica* Ed: Papiro. Colombia.
- Ichuta Nina, Jose Luis
2016 "... es que el tiempo ya no es como antes. Cambio climático y manifestaciones rituales en El municipio de Guaqui, provincia Ingavi. Departamento de La Paz. El caso del ciclo agrícola de la papa." Tesis de Licenciatura. La Paz.
- Rengifo, Grimaldo
1997 *Agricultura andina, diversidad y derechos de propiedad en los Andes*. Pratec. Lima.
- Rosing, Ina
1996 *Rituales para llamar a la lluvia*. Ed: Los amigos del Libro. La Paz
- Vacher, Jean; Brasier De Thuy Emmanuel; Liberman, Maximo
1991 "Influencia del lago en la agricultura litoral." En: Dejoux Claude et Iltis, André. Editores *El Lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual*. Pp.517-529 ORSTOM/HISBOL. La Paz.
- Van den Berg, Hans
1989 *La tierra no da así nomás: los ritos agrícolas en la religión de Aymara-cristianos de los Andes* Ed: CEDLA. Amsterdam.

Cartografía participativa para entender el conocimiento local del Cambio Climático en las comunidades de Yumani y Cutusuma

Zulma Yhoana Pusari Ramos

Resumen

Este artículo argumenta la importancia que tienen las interpretaciones y conocimientos locales que se emplean en las poblaciones o comunidades aledañas al Lago Titicaca, en torno al Cambio Climático. Para ello, en este artículo se muestra algunas reflexiones que se identificaron mediante talleres de intercambio de conocimientos sobre efectos del Cambio Climático. Así también, se enfatiza la conformación de representantes locales como pronosticadores del tiempo (*Pachayatiris*), quienes en base a los indicadores naturales predicen el comportamiento del tiempo, como una medida de adaptación frente a los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres producidos por las alteraciones climáticas que tienen una escala y un alcance claramente planetario y global. Finalmente desarrolla algunas ideas de mejorar la adaptación al Cambio Climático mediante la complementación de conocimiento ancestral y conocimiento científico.

Palabras claves: Cambio Climático, indicador natural, *Pachayatiris*, conocimiento ancestral, dialogo de saberes.

Abstract

This article argues the importance of local interpretations and knowledge that are used in the populations or communities surrounding Lake Titicaca, around climate change. This article shows some reflections that were identified through knowledge exchange workshops on the effects of Climate Change. Also, the conformation of local representatives as weather forecasters (*Pachayatiris*) is emphasized, who based on natural indicators predict the behavior of time, as a measure of adaptation to the risks of extreme weather events and disasters

caused by alterations climate that have a clearly planetary and global. Finally, he develops some ideas to improve the adaptation to Climate Change through the complementation of ancestral knowledge and scientific knowledge.

Keywords: Climate change, natural indicator, *Pachayatiris*, ancestral knowledge.

Introducción

Mediante el Proyecto de Investigación aplicada para la adaptación al cambio climático (PIA-ACC), el Instituto de Investigaciones Geográficas (IIGEO) de la carrera de Ingeniería Geográfica, dependiente de la Universidad Mayor de San Andrés; dio inicio al proyecto de Monitoreo espacial de los efectos del cambio climático en el Lago Titicaca con imágenes de satélite, organizando talleres de “fortalecimiento y consolidación de conocimientos sobre la adaptación a los efectos del cambio climático”. La interacción se desarrollo en las comunidades circundantes al Lago Titicaca.

A continuación se muestra el desarrollo del taller en las comunidades de Isla del Sol Yumani, municipio de Copacabana y la comunidad Cutusuma, Batallas.

El objetivo de los talleres que se realizaron en las comunidades fue: difundir y socializar información sobre la percepción de fuentes de contaminación y adaptación a los efectos del cambio climático, con la finalidad de fortalecer conocimientos en las poblaciones de comunidades involucradas en la problemática, dando un enfoque a la importancia de la revalorización de los conocimientos ancestrales frente a los efectos del cambio climático, mediante el dialogo o intercambio de saberes.

Taller desarrollado en la comunidad Isla del Sol Yumani

Cabe resaltar que a la llegada a la comunidad, en compañía con los investigadores del IIGEO se presencio una ceremonia que consistía en un grupo de comunarios que, bajo la coordinación de los dirigentes con vestimenta colorido típico de la región, estaban reunidos realizando un ritual para atraer lluvia para sus cultivos, tomando en cuenta que era tiempo de siembra, sin embargo existía ausencia de lluvia (véase fig.1). La ceremonia consistía en extraer agua en una olla de barro del lado oeste de la Isla y challar en el mismo sitio para luego llevar la olla de barro danzando con cánticos y oraciones en aymara pidiendo misericordia al Dios Padre para que envíe lluvia.

La caminata lo realizaron danzando en compañía de un grupo de músicos autóctonos del lugar, con bombos y pinquillos, desde el punto más bajo de la serranía de la parte sur de la comunidad Yumani hasta el punto más alto de la comunidad, que viene siendo el “Mirador Pallacasa”, lugar donde lo dejaron la olla, depositando dentro de ella una rana para que cuando la olla se quede seca, con su llanto la rana atraiga la lluvia.

Figura 1

Comunarios de Isla del Sol Yumani, realizando el ritual para atraer la lluvia.

Fuente: II GEO-UMSA - 10/11/2016.

Cumpliendo con nuestro objetivo se dio inicio a las actividades programadas. En la mañana se realizó la visita al Establecimiento Educativo de la comunidad, donde estudiantes de la Unidad Educativa Yumani bajo la organización de la junta de profesores y el Secretario de Educación Sr. Porfirio Quispe Mendoza - dirigente de la Comunidad Yumani, nos recibieron con un acto cívico y un poema sobre el valor de la “Pachamama” interpretado por una de las estudiantes de 5to de secundaria.

Figura 2

Acto cívico en la U. E. Yumani, la bienvenida a los Investigadores del Proyecto.

Fuente: II GEO-UMSA, 11/11/2016.

Figura 3

Palabras de bienvenida por parte del Sr. Porfirio Quispe Mendoza, Secretario de Educación de la Unidad Educativa Yumani, Dirigente de la Comunidad Yumani, Isla del Sol.

Fuente: II GEO-UMSA, 11/11/2016.

Aprovechando el acto, el coordinador del proyecto, Ing. Javier Nuñez Villalba se dirigió tanto a los dirigentes presentes, profesores y la comunidad estudiantil, agradeciendo por el recibimiento y dando a conocer el objetivo del proyecto sobre el monitoreo y la adaptación al cambio climático, y por consiguiente la finalidad del taller a desarrollarse en dichas instalaciones con estudiantes de 5to y 6to de secundaria.

Figura 4

Ing. Javier Nuñez Villalba, Director de II GEO-UMSA, dando a conocer la finalidad de la visita a la Unidad Educativa Yumani.

Figura 5

Estudiantes de la Unidad Educativa Yumani - IIGEO-UMSA, 11/11/2016

Posterior al acto de recibimiento, se dio la apertura del Taller de difusión de información por parte de los Investigadores con la finalidad de enriquecer y fortalecer conocimientos de los jóvenes estudiantes de 5to y 6to de secundaria y profesores de la Unidad Educativa Yumani, con las siguientes presentaciones:

- Presentación de la Autoridad Binacional del Lago Titicaca, Sistema Hídrico TDPS: Perú - Bolivia. Por Edgar Castro y Verónica Chambilla.
- GeoVisor aplicado al Monitoreo del Lago Titicaca. Por Olivia Quispe Aguilar, Martha Silva, Jimena Copa, Inez Vilca, Zenobio Mollo y Gabriel Condori bajo la coordinación del Ing. Javier Nuñez Villalba, Director del IIGEO-UMSA.
- Eutrofización asociado a la piscicultura en el sector boliviano del Lago Titicaca. Por Lic. Raúl Salas, docente investigador del IIGEO-UMSA.

Figura 6

Presentación de la Autoridad Binacional Lago Titicaca, Sistema Hídrico TDPS Perú-Bolivia, Ing. Edgar Castro.
Fuente: IIGEO-UMSA, 11/11/2016.

Figura 7

Adam Zemans, compartiendo su experiencia del voluntariado sobre el Monitoreo de Lagos en Maine e incentivando a los estudiantes en el Monitoreo del Lago Titicaca con apoyo de voluntarios. - II GEO-UMSA, 11/11/2016.

Figura 8

Profesor de la Unidad Educativa Yumani, manifestando la preocupación sobre la actualidad de la comunidad respecto al Cambio Climático y la Contaminación.

Fuente: II GEO-UMSA, 11/11/2016.

Concluida las presentaciones, se desarrollo una dinámica entre los estudiantes de 5to y 6to de secundaria, lo cual consistió en elaborar Mapas Parlantes sobre la temática de la adaptación al Cambio Climático y las fuentes de Contaminación del Lago Titicaca bajo la coordinación del Lic. Carlos Peñaranda, Antropólogo. Para tal efecto se distribuyo material cartográfico correspondiente al Lago Titicaca y cartillas que se elaboraron en el II GEO-UMSA.

Figura 9

Distribución de material cartográfico a los estudiantes de 5to y 6to de secundaria, y enseñando como interpretar o hacer la lectura de mapas e imágenes de satélite.

Fuente: IIGEO-UMSA, 11/11/2016.

Figura 10

Estudiantes de la Unidad Educativa Yumani, realizando la lectura de mapas.

Fuente: IIGEO-UMSA, 11/11/2016.

Figura 11

Estudiantes de U. E. Yumani, elaborando Mapas Parlantes, reflejando la percepción que tienen sobre la problemática de la contaminación y la adaptación al Cambio Climático.

Fuente: IIGEO-UMSA, 11/11/2016.

Figura 12

Elaboración de Mapas Parlantes, reflejando la situación actual de la Comunidad Yumani, desde la perspectiva de los jóvenes Estudiantes de la Unidad Educativa Yumani.

Fuente: IIGEO-UMSA, 11/11/2016.

Concluida la elaboración de mapas parlantes, cada grupo explico lo que representaban los dibujos que realizaron, llegando a la conclusión de que el sector del Lago Titicaca está siendo muy contaminada, por consiguiente se ve la reducción de peces, motivo por el cual, la población de la comunidad ha optado cambiar de actividad productiva, y es por esta razón que más del 50% de la población en la actualidad se dedica a ofrecer servicios de turismo, ya sea con hospedajes y/o embarcaciones. Según los estudiantes, al incrementar el turismo fue aumentando la contaminación, botando basura que no es reciclada sino que es quemada o dejada en ciertos lugares de la región. Por otro lado, están las lanchas y las grandes embarcaciones de las empresas de Turismo, contaminando en lago al desechar diesel y/o gasolina.

Figura 13

Grupo de investigadores y estudiantes de unidad Educativa Yumani.

Fuente: IIGEO-UMSA, 11/11/2016.

En una segunda etapa, se realizó el recorrido de las zonas de pesca de Carachi e Ispi, en compañía del comunario Sr. Pascual Ramos, uno de los últimos pescadores de la comunidad Yumani, (véase Fig. 14).

Figura 14



Recorrido por lugares de pesca en compañía del Sr. Pascual Ramos, pescador de la Comunidad Yumani.

Fuente: IIGEO-UMSA, 11/11/2016.

El pescador Sr. Pascual Ramos, persona de tercera edad, solo hablaba aymará, por lo tanto en una pequeña entrevista en idioma aymara nos indico que la población de peces había reducido a comparación de hace años, motivo por el cual, que los pescadores habrían cambiado de actividad productiva a la actividad de

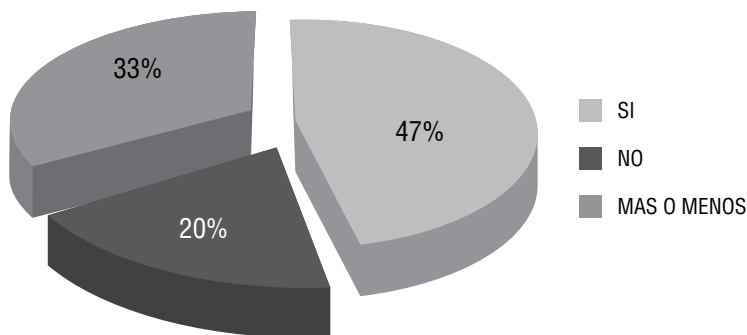
turismo. Por otro lado nos informo que en la actualidad solo pescan Carachi cerca a la orilla del lago, para consumo propio y en caso de que sobre, lo comercializan con las demás familias de la comunidad. Los pescados como la trucha se encuentran a grandes profundidades, por lo que los pescadores que aun se dedican a la actividad, van a lugares donde el lago tiene más profundidad, alejados de la comunidad por 2 a 3 noches, con el objetivo de pescar uno que otro pejerrey y truchas más grandes para luego poder comercializar en los restaurantes y hostales que existen en la comunidad.

Según el testimonio de otro pescador, Ramiro P. Mendoza, antes existía una asociación de pescadores que estaba conformada de alrededor de 160 pescadores, pero en la actualidad solo existen aproximadamente 10 pescadores. Indica que con el cambio climático, el lago fue bajando su nivel y subiendo la temperatura del agua, por lo que ya no llegan a reproducirse los peces. Si en caso de que llegaran a reproducirse, los huevos de los peces que son depositados en las orillas del lago, se van secando por el mismo hecho de que el nivel del lago se va disminuyendo. Por otro lado está la contaminación que hace que los peces vayan muriendo antes de desarrollarse.

En una segunda visita se realizó la encuesta a los comunarios (hombres y mujeres de la comunidad) involucrados en la problemática del cambio climático para intercambiar conocimientos sobre los efectos del cambio climático y la contaminación en la región.

A fin de identificar el grado de conocimiento de la población sobre los temas asociados al cambio climático, en primera instancia, se les solicitó responder unas preguntas de la encuesta, previo intercambio de conocimientos entre investigadores y actores involucrados. Y como resultado de algunas preguntas realizadas se obtuvo:

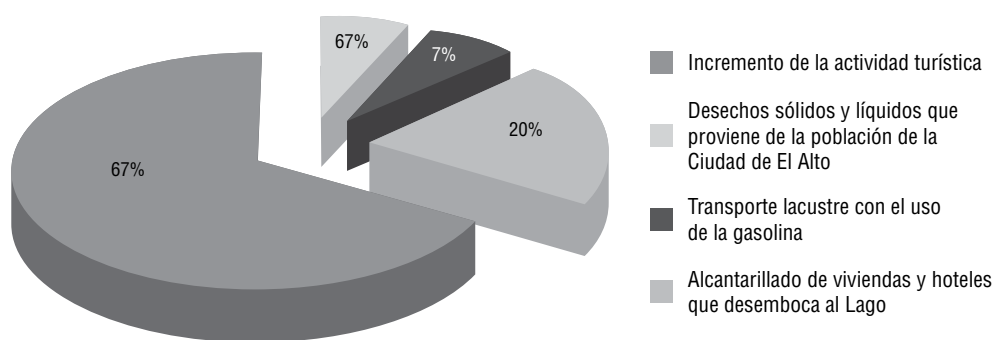
Gráfico 1
¿Usted tiene conocimiento sobre el cambio climático?



Fuente: Propia.

- Del total de las personas entrevistadas el 47% de los comunarios indicaron conocer la problemática del cambio climático, mientras que el 33% de las personas entrevistadas indicaron que no tenían conocimiento alguno sobre la temática, y el 20% de ellos expusieron que tenían más o menos una idea de lo que engloba el cambio climático pero que no estaban muy bien informados (Grafico 1).
- Respecto a la consulta sobre la causa de la contaminación del Lago Titicaca, el 67% considero que dicha problemática se debe al incremento de la actividad turística, desechos sólidos y líquidos que provienen de la población de la ciudad de El Alto, transporte lacustre con el uso de la gasolina y alcantarillados de viviendas y hoteles que desembocan al Lago. Mientras el 20% de la población entrevistada declaro que la contaminación se dio por los alcantarillados de viviendas y hoteles que desembocan al Lago, especialmente de Copacabana donde se siente el olor desagradable, indicaron. Y el 7% considera que la contaminación es producida por el transporte lacustre de la región con el uso de la gasolina. Asimismo en la actualidad existen mas empresas de turismo como Transturin, Crillon Tours, etc. que operan en el sector del Lago Titicaca, los cuales emplean sus propias embarcaciones con uso de diesel y gasolina que son desechados al lago. Y el resto del 6% manifesto que la contaminación proviene de los desechos sólidos y líquidos que provienen de la Ciudad de El Alto, que si bien por el momento no se siente tanto en el sector de la comunidad Yumani, sigue siendo un factor contaminante que afecta al Lago Titicaca

Grafico 2
Según usted, cual es la causa de la contaminación del Lago Titicaca?



Fuente: Propia.

Taller realizado en la comunidad Cutusuma, Batallas

El taller dio inicio con la presentación del avance del proyecto de investigación, para lo cual hubo un número de comunarios que participaron de manera activa.

Figura 15



Comunarios en la presentación del Proyecto de Investigación.
Fuente: IGEO-UMSA, 17/03/2018.

Durante el intercambio de opiniones y conocimientos tanto local como científico, se pudo identificar que la comunidad toma sus propias medidas de adaptación ante los cambios que se dan como efectos del cambio climático. Dichas medidas están basadas en el conocimiento ancestral, sus costumbres y creencias en la pachamama (Madre tierra).

Por ejemplo, para saber si va ser un buen año para la siembra y cosecha o para saber si será un año de lluvia o ausencia de la misma, se guían con Indicadores Biológicos los cuales pueden ser a través de *Zooindicadores* o animales; que consisten en la observación del comportamiento y migración de los animales, *Fitoindicadores* o plantas donde se ve la floración, crecimiento y frutos de cierto tipo de plantas, o a través de los indicadores astronómicos que consisten en la observación de la luna, el sol y las estrellas, y por ultimo están los indicadores atmosféricos que se basan en las nubes, la nevada y el viento.

Es así que los *Pachayatiris* van anunciando el comportamiento del clima o tiempo en base a los saberes ancestrales. Vale resaltar que los *Pachayatiris* generalmente son personas de tercera edad siendo que son los que mantienen vivo dichos conocimientos.

Pachayatiris de la comunidad Cutusuma - Batallas

Nombre y Apellido	Nº de Doc. de Identidad	Edad	Nº de Celular
Juan Machaca Mamani	435902 LP	69	70539752
Gregorio Villa Quispe	498317 LP	71	78868783
Zacarías Alanoca	2485604 LP	66	77242283
Felipe Sancalle Quispe		90	
Esteban Tacachira	329444 LP	69	
Victor Machaca Alanoca	2089856 LP	62	60543449

Por otro lado, se resaltó cómo la complementación entre conocimiento local y científico puede dar buenos resultados en el monitoreo del estado del tiempo.

A continuación se dio inicio a la dinámica de grupos de trabajo en la que los comunarios en coordinación con los *Pachayatiris* presentes debían identificar los indicadores naturales.

Figura 16



Intercambio de opiniones entre Comunarios e Investigadores.

Fuente: II GEO-UMSA, 17/03/2018.

Con el objetivo de revalorizar los saberes ancestrales y que la población joven de la comunidad también tome conciencia de las prácticas de conocimiento ancestral, se dividió en tres grupos de trabajo, para que en cooperación con los *Pachayatiris* identifiquen los diferentes tipos de indicadores que se conocen y que aun se practican en la comunidad.

Luego de la dinámica de grupos se procedió a defender o mostrar los indicadores que se han identificado.

El primer grupo se enfocó en indicadores biológicos (zooindicadores), donde mediante el comportamiento y migración de los animales podían pronosticar un buen o mal año agrícola.

El trabajo del segundo grupo fue identificar los identificadores naturales (fitoindicadores) en base a plantas existentes en el sector.

El tercer grupo identificó indicadores naturales astronómicos; en base a la observación de la luna, el sol y las estrellas.

Presentación del Grupo 1

De esta manera el Grupo 1 presentó como primer indicador el aullido del animal Tiwula, que indica que si su aullido termina bien, pronostica un buen año de producción agrícola, pero si el dicho aullido acaba mal, será un mal año para la agricultura. Y como un segundo indicador identificaron el comportamiento del Toro en el evento de corrida de Toros; este indicador natural consiste en que si el primer Toro en ingresar a la cancha se posiciona con vista hacia el Este, será un buen año de producción.

Presentación del Grupo 3

El trabajo del Grupo 3 consistía en identificar indicadores de tipo astronómico, es decir, pronósticos observando astros, estrellas y la luna. Es así que algunos de los indicadores que identificaron son:

- Presencia de estrellas de manera masiva con mucho brillo que pronostica heladas que afectan a los cultivos.
- Salida de Cruz del Sur posicionándose en forma de una cruz perfecta con sus cuatro puntos, indica buen año para la producción agrícola.
- Si la luna nueva está inclinado hacia el Lago y con un tono amarillo, pronostica mucha lluvia.
- Arco iris cayendo al Lago, pronostica un año lluvioso.
- Radiación solar intensa por las montañas pronostica presencia de granizada en las tardes.

Figura 19



Grupo 3: Presentando los resultado del trabajo en grupo sobre la identificación de indicadores astronómicos (la luna, el sol y las estrellas).

Fuente: II GEO-UMSA, 17/03/2018.

Conclusiones

Los estudiantes de la Unidad Educativa Yumani, están conscientes de la realidad que está viviendo la comunidad y por lo mismo manifiestan su preocupación por el nivel de contaminación y los efectos del cambio climático.

Los comunarios del lugar están alarmados por los efectos que trae consigo el cambio climático, en el caso de los agricultores de la zona quienes manifestaron la falta de lluvia, tomando en cuenta que la comunidad se encuentra en época de siembra sin embargo no logran cumplir con sus expectativas de sembrar los diferentes productos como ser papa, oca, haba, cebada, maíz, etc. debido a la aridez de la tierra y por otro lado, aunque no sea su tiempo, hay días en las que llega la helada y no logran producir lo debido.

Respecto a la actividad de la pesca, se vio una notable disminución del desarrollo de esta actividad debido a la disminución de la población de peces.

Mientras que, la actividad del turismo va incrementando de manera considerable, con asentamientos de hoteles y restaurantes próximos al Lago y por otro lado un gran número de embarcaciones que transportan extranjeros a los diferentes sitios turísticos de la región. Si bien las personas que se dedican a estas actividades están conscientes de los efectos de la contaminación y del cambio climático, no toman acciones que puedan combatir a dicha problemática más que adaptarse a la realidad intercalando actividades para su subsistencia.

La difusión de información del avance del proyecto de investigación *Monitoreo espacial de los efectos del cambio climático en el Lago Titicaca con imágenes de satélite*, tuvo un impacto positivo en las comunidades de Cutusuma e Isla del Sol Yumani. En ambas comunidades resaltan la importancia de monitorear el tiempo a través de los indicadores naturales en complementación con datos científicos, es decir, trabajar de manera conjunta y combatir los eventos extremos ocasionados por el cambio climático.

En la comunidad de Cutusuma, Batallas están vigentes los saberes ancestrales. Los agricultores hombres y mujeres en coordinación con los *Pachayatiris* manejan una diversidad de indicadores naturales o llamados también señales de la naturaleza para generar pronósticos y orientarse para organizar su sistema de producción agrícola.

Todo ser vivo, plantas, animales y otros tienen una manera de comportarse o reaccionar ante los cambios bruscos o fenómenos climatológicos adversos y son estos comportamientos que observa e interpreta la gente de la tercera edad o los *Pachayatiris* para pronosticar el cómo se comportara el año agrícola.

No todos manejan estos conocimientos, por eso hay comunidades que tienen buena producción agrícola y otras comunidades que tienen algún fracaso en su producción. Tal es el caso de la comunidad Isla del Sol Yumani que poco a poco va dejando atrás los saberes ancestrales sobre indicadores naturales y hay más apego a la actividad del turismo.

Si no se retoma con seriedad dichos saberes ancestrales, las familias en las comunidades serán más vulnerables al cambio del clima, y estarán expuestas a una mayor incertidumbre y sometidos a altos riesgos del clima.

Recomendaciones

Buscar mecanismos para revalorizar los saberes, involucrando a los actores locales multisectoriales.

Difundir estas experiencias principalmente en los espacios educativos de esta manera concientizar a los jóvenes en la revalorización del conocimiento local o saberes ancestrales.

Hacer el monitoreo al comportamiento del tiempo mediante los indicadores naturales en complementación con información científica bajo la organización de un equipo multidisciplinario.

Monitoreo de los fenómenos climáticos bajo el conocimiento local y científico para reducir daños en la agricultura familiar Comunidad Cutusuma, Municipio Batallas

Wilson Mamani Gomez

Resumen

El monitoreo de los fenómenos climáticos, sea científico o mediante el conocimiento local, es una forma de aportar a la mitigación de los posibles daños en los cultivos agrícolas. La combinación de ambas informaciones es muy necesaria para la época agrícola en coordinación con la comunidad, instituciones locales o instituciones Nacionales como SENAMHI¹.

Palabras Clave: Monitoreo, agricultura, fenómenos climáticos.

Summary

The monitoring of climatic phenomena, the scientific sea or local knowledge, is a way of contributing to the mitigation of possible damage to agricultural crops. The combination of both information is very necessary for the agricultural season and coordination with the community, local institutions or national institutions such as SENAMHI.

Keywords: Monitoring, agriculture, climatic phenomena.

1 Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología-SENAMHI.

Introducción

El monitoreo de los fenómenos climáticos es sumamente importante en la época de cultivos agrícolas. En los últimos años se da mucha importancia a los acontecimientos climáticos en las instituciones privadas y estatales, pero no hay una coordinación entre expertos científicos y expertos locales para poder mitigar los posibles daños en la agricultura.

Una de las amenazas más constantes son los fenómenos del Niño o de la Niña que tiene impactos en la agricultura donde las precipitaciones no son normales. Hay momentos en que hay heladas, granizadas, sequías o inundaciones, en otras regiones estos acontecimientos causan la disminución total o parcial de la producción agrícola en el Altiplano.

El trabajo se realizó en la comunidad de Cutusuma, Municipio de Batallas, para enlazar el conocimiento científico con el conocimiento local. En el conocimiento científico uno de los componentes del SENAMHI está basado en sub sistemas como las Mediciones, Obcecaciones y Vigilancia, esto mediante el Satélite y estaciones meteorológicas para poder difundir la información agroclimática en la época agrícola.

La otra parte es el conocimiento local a partir de los indicadores naturales como Biológicos, Atmosféricos y Astronómicos que dan información a los conocedores locales y luego es interpretada de diferentes indicadores en su debido tiempo para el manejo de los cultivos agrícolas.

Monitoreo

En la teoría de la planificación se define al monitoreo como un ejercicio destinado a identificar de manera sistemática la calidad del desempeño de un sistema subsistema o proceso. Posteriormente se requiere introducir los ajustes o cambios pertinentes y oportunos para alcanzar los resultados esperados y lograr ciertos efectos en el entorno, los cuales en este caso contribuyen a la sostenibilidad de los recursos hídricos en el sector agrícola. Así el monitoreo y el seguimiento permiten analizar el avance y proponer acciones para alcanzar los objetivos, identificar los éxitos o fracasos reales o potenciales del sistema lo antes posible y hacer ajustes oportunos para su sostenibilidad (Loaiza, Reyes, & Carvajal, 2011).

Monitoreo de los fenómenos climáticos

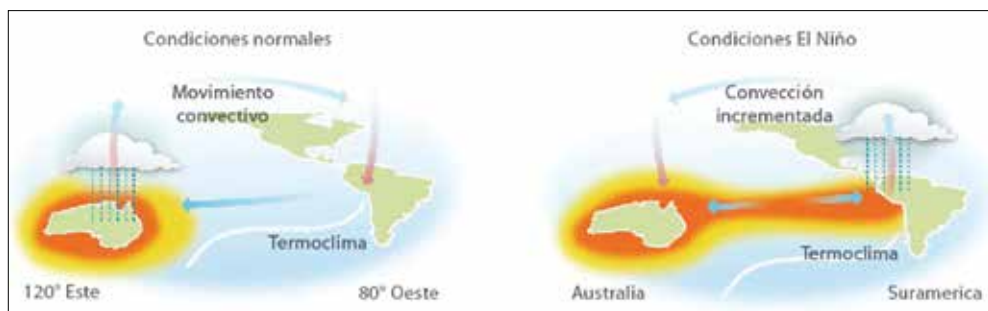
El monitoreo es el proceso de seguimiento que se hace a los fenómenos climáticos en la época de verano para la región, específicamente en el Altiplano Norte.

También se hace el seguimiento a los indicadores naturales que permiten analizar cada uno de sus componentes a su debido tiempo. Por otro lado, se hace el proceso de seguimiento en la época del desarrollo de los cultivos agrícolas, desde diciembre hasta mediados de marzo principalmente.

Fenómeno del Niño y la Niña

Los vientos que corren sobre la superficie del océano pacífico se conocen como vientos alisios, soplan de este a oeste y así van alejando de Sud América las aguas de la superficie oceánica, en dirección hacia Indonesia y Australia, en lo alto de la atmósfera el viento se mueve en dirección opuesta, el resultado es un sistema de circulación del aire.

Figura 1
Circulación Atmosférica en condiciones normales y fenómeno del Niño

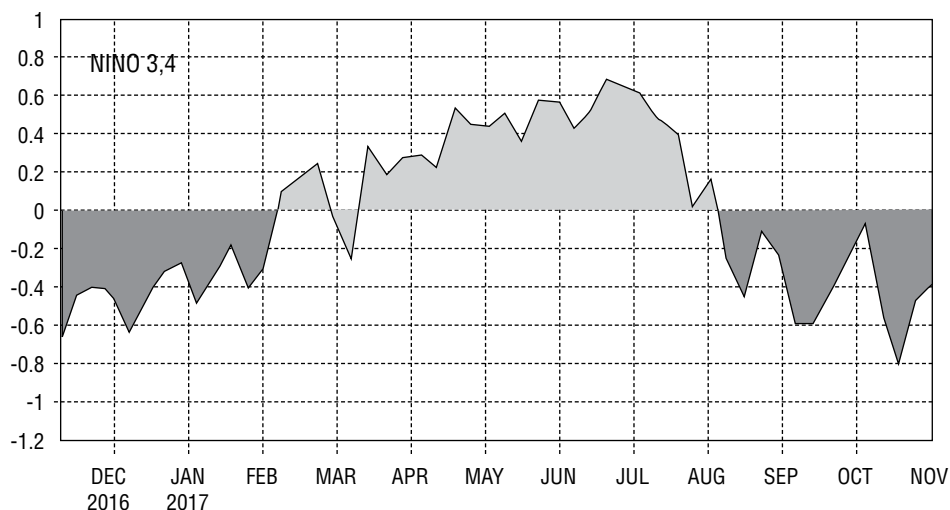


Fuente: Adaptado de Luhr (2003, p449).

El fenómeno del Niño es el calentamiento de la superficie de las aguas del océano pacífico que recorre entre Australia y Sud América, en los cuales están definidas de la siguiente manera: El Niño 1.2 que impacta al norte de las costas del Ecuador y Perú, el Niño 3 llega a más alejado de nuestro país, a Bolivia nos afecta El Niño 3.4 que impacta más al centro de Sud América, en donde está Bolivia y fenómeno de La Niña es el enfriamiento de la superficie de las aguas del océano pacífico que recorre desde Sud América hacia Australia, este calentamiento o enfriamiento nos afecta a nuestro país por lo tanto se hace una vigilancia constante por el SENAMHI en los meses del año, si bajo o subió la temperatura de las agua en el Pacífico. Por ejemplo la segunda semana del Abril del 2018 fue de 3.4, otro informaron que se mantenía en 0.7 bajo cero todavía está frío, entonces teníamos una Niña débil.

En el SENAMHI se basan en un modelo que indica cuales son las probabilidades de existir una Niña o un Niño, en este caso el Niño de 2016-2017 mostraba lo siguiente:

Figura 2
Anomalías de las temperaturas superficiales del océano pacifico 2017



Fuente: Boletín informativo N° 11 de 2017 publicada por SENAMHI Bolivia.

Estos son los modelos dinámicos y estadísticos, en los cuales nos muestra el 0°C que es el neutro, cuando estamos en condiciones neutras es normal y cuando está debajo de la línea central entramos a condiciones de enfriamiento a esto lo llaman fenómeno de la Niña o viceversa cuando entramos en condiciones de calentamiento está por arriba de la línea del cero, entonces es fenómeno del Niño.

Estos estudios de medición de la temperaturas del aguas del océano pacifico lo realizan en Perú y Ecuador ellos tienen Boyas que puede medir la temperatura de las aguas del océano pacifico, van midiendo y que en cinco meses continua bajando la temperatura de las aguas, entonces ya anuncian que hay una presencia del Fenómeno de la Niña. Por ejemplo, en octubre del año 2017 hubo el enfriamiento, en primero, segundo, tercero, cuarto y en quinto mes ya tenían la presencia del fenómeno de la Niña y fue ascendiendo, posteriormente llegando a la neutralidad.

Cuando empieza el calentamiento, hay cambios dentro de los cinco meses, va subiendo la temperatura de las aguas, entonces anuncian que hay presencia del Fenómeno del Niño. De igual manera en 2017 se tuvo calentamiento en los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre pero fueron debilitándose hasta neutralizarse.

Para el Niño o Niña se adquieren los datos de temperatura de la superficie o del interior del océano pacifico, también se hace observación mediante el satélite, todos esos trabajos son científicamente elaborados. Los trabajos de

seguimiento se hacen mediante los datos adquiridos del **Satélite GOES 16**, de la misma forma se adquiere la información para el Servicio Nacional de la Meteorología (SENAMHI).

Riesgo climático en cultivos agrícolas

El riesgo es el grado de pérdidas debido a los fenómenos naturales como la granizada, inundación o Heladas. El riesgo a perder cuando se concreta una amenaza en los cultivos agrícolas, en caso de suceder cualquiera de los eventos, generará la disminución de los productos alimenticios para las familias que están en las poblaciones rurales.

Riesgo agroclimático se refiere a los perjuicios que se dan en los sistemas de producción debido a la ocurrencia de eventos climáticos extremos. La producción agropecuaria tiene lugar en el sistema suelo-cultivo-atmosfera, por lo que se encuentra muy expuesta a las condiciones meteorológicas. El nivel de riesgo se caracteriza por ser dinámico y cambiante de acuerdo a las variaciones que sufren sus componentes en el tiempo, en el territorio, en el ambiente o en la sociedad, lo que requiere monitorear y actualizar los datos en forma continua (Basualdo, Berterretche, & Vila, 2015).

Los elementos en riesgo en esta región actualmente son los sistemas productivos como los cultivos agrícolas, que están expuestos ante las diferentes amenazas que van en aumento.

Según las definiciones de IICA (Basualdo, Berterretche y Vila, 2015), es de la siguiente manera

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Vulnerabilidad}$$

Amenazas

La amenaza o peligro es la probabilidad de ocurrencia de los fenómenos naturales que ocasionan graves daños en la región o en la localidad.

Las principales amenazas que en su mayoría son:

- Amenazas meteorológicas como la granizadas y heladas
- Amenazas climatológicas como las sequías
- Amenazas hidrológicas como las inundaciones

Los cultivos de papas, habas, arvejas, papa lisas, quinua y los forrajes son afectados cada año por estas amenazas latentes en época de lluvias.

Definición de la Granizada

Desde el Punto de vista de la microfísica de nubes, el origen y formación del granizo tiene lugar en el interior de las nubes. Este se forma a partir de núcleos de condensación existentes siempre y cuando se disponga de un ambiente sobreenfriado, agua líquida con temperaturas a 0 °C. A partir de estas condensaciones (Ceperuelo M., 2008).

Entonces los núcleos de condensaciones por el enfriamiento, se congelan los cristales de hielo y se añaden más hasta formar un cuerpo sólido (hielo), cada vez aumenta del tamaño cuanto la temperatura alcanza -20 °C. Para mantener el peso del hielo a medida que va en aumento existen unas fuertes corrientes ascendentes vertical, una vez el tamaño del granizo ya no puede ser mantenido por las corrientes este va precipitando por que el granizo tiene peso y por gravedad cae hacia la superficie (Ceperuelo M, 2008).

Definición de las heladas

La helada es un fenómeno atmosférico que se presenta cuando la temperatura del aire en cercanías del suelo, de 1.5 a 2 metros, desciende por debajo de cero grados Celsius. El fenómeno es conocido como helada meteorológica.

Sin embargo, de manera más amplia, el término helada también se utiliza en el sentido agrologico para designar los efectos que el descenso de la temperatura puede generar sobre los cultivos según la fase vegetativa en que se encuentren (CONARADE, 2011).

Otro de las investigaciones indica donde se clasifican las heladas según su origen la época en que ocurre son lo siguiente: heladas de radiación normalmente se da en invierno, heladas de advección y heladas de evaporación. Las heladas de advección: tienen su origen en una invasión de aire frío, trasladado por viento constante y relativamente fuerte, con duración de varias horas o hasta de días. El aire frío reseca el follaje causando su muerte, por lo que los vientos son causantes de daños a la plantas.

El análisis de los datos meteorológicos muestra que la ocurrencia de heladas, durante la época agrícola, se produce con una disminución notable y muy rápida de las temperaturas mínimas donde se puede observar diferencia de temperaturas de un día al otro.

Heladas de evaporación: Se produce al evaporarse el agua depositada sobre las plantas con mucha rapidez, situación dada por una baja humedad relativa ocasionando que la temperatura de éstas desciendan notablemente, ocasionando daño. Se pueden producir heladas de este tipo, cuando después de una precipitación se presentan vientos fríos fuertes del aire seco o corrientes del aire.

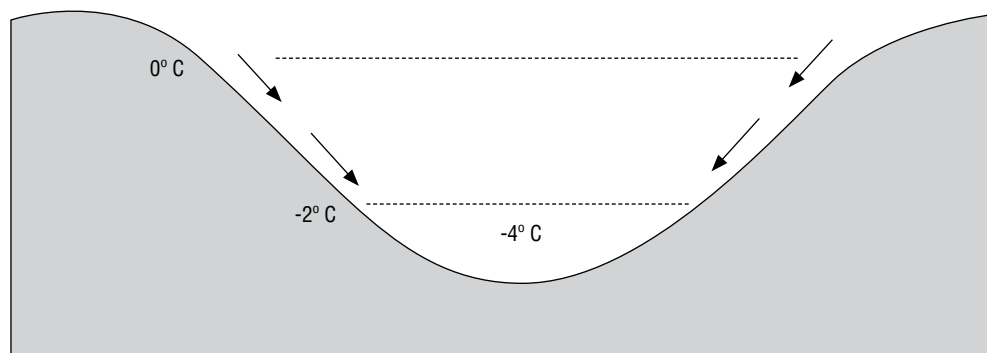
Estas heladas, en el Altiplano, se dan a partir del mes de abril en adelante cuando ya está completada la época de producción (Trasmonte, 2009).

Influencia de características topográficas

En terrenos planos las heladas son uniformes manteniendo las mismas características en toda la zona. En terrenos con pendientes y ondulaciones no muy profundas, el aire frío denso se deposita en el fondo del valle como se muestra en la figura 3.

En la cresta la temperatura es bastante más alta. Sin embargo, si se forma niebla en el valle, el calor de la condensación es lo suficientemente significativo para que la temperatura en la cima sea aceptable que en la hondonada o valle que está debajo de cero.

Figura 3
Concentración del aire frío en el valle



Definición de la sequía

La sequía es un fenómeno climático recurrente caracterizado por una reducción en la precipitación pluvial con respecto a la considerada como normal, que no presenta epicentro ni la trayectoria definida, tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y del espacio, y provoca que el agua disponible sea insuficiente para satisfacer las distintas necesidades humanas y de los ecosistemas (CONARADE, 2014).

De manera general la sequía es la deficiencia de la precipitación en un periodo relativamente prolongado, que tiene como consecuencia una alteración transitoria del régimen hídrico de las cuencas.

De manera precisa, para cada región geográfica, es el déficit de lluvias y el tiempo durante el que se prolonga.

Entonces la sequía es un fenómeno normal y recurrente del clima. Puede ocurrir en todas las zonas climáticas, con características variables de una región a otra y es una situación temporal (CONARADE, 2011).

Los tipos de Sequía clasificados por CONARADE son cuatro: Sequías Meteorológicas, Hidrológicas, Agrícolas y Socios económicas. El tipo de sequía más incidente en los cultivos agrícolas es la Sequía Agrícola. Este tipo de sequía se produce cuando no hay suficiente humedad en el suelo para permitir el desarrollo de un cultivo en cualquiera de sus fases de crecimiento.

La cantidad de agua necesaria es diferente para cada cultivo, la sequía se establece, por lo tanto, para cada tipo de cultivo y región, esta sequía ocurre poco tiempo después de la meteorológica.

Definición de la inundación

La inundación es un evento generado por la caída de intensas lluvias que puede verse agravado por los altos niveles de vulnerabilidad de las poblaciones y de los sistemas productivos, principalmente agrícolas (CONARADE, 2010).

Son procesos o fenómenos de origen hidrológico en este caso se tomó más énfasis en el desbordamiento de lago a causa de una mayor precipitación pluvial en la cuenca correspondiente.

Una precipitación mayor de lo normal provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua. Esto genera invasión de agua en sitios donde usualmente no la había y generalmente causa daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura.

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se refiere una serie de características diferenciadas de la sociedad o sub conjunto de la misma, que disponen a sufrir daños frente al impacto de un evento físico externo, y que dificultan su posterior recuperación (Chuquisengo, Condori, & Medrano, 2010). La vulnerabilidad es propensión de la agricultura de sufrir daños o ser dañada y su posterior recuperación si es posible.

Es la medida que un sistema agrícola en la región del altiplano es incapaz de resistir a los efectos negativos de cada amenaza específicamente los cultivos que practican las familias son vulnerables ante las amenazas meteorológicas (granizadas y heladas), climatológica (la sequía) e hidrológica (inundación).

Figura 4
Imágenes de fotografías de los eventos pasadas de heladas, sequías, granizadas e inundaciones

Sequía en 2017 Cutusuma



Heladas en 2018 Cutusuma



Granizada



Inundación Pucarani de 2018



Fotografías de Wilson Mamani de eventos ocurridos en Cutusuma y William Huayhua de la inundación a causa del desborde de los ríos Seguenca, Pongo y Katari en Pucarani.

Metodología

Estándares y parámetros técnicos

Las normas técnicas para la administración de la información georreferenciada utilizaron sistemas de referencia y sistemas de proyección en la generación de información a nivel de representación local.

Estándares técnicos

Para el procesamiento, manejo y representación de la información georreferenciada se utilizó los siguientes estándares técnicos:

Sistema de referencia: Sistema Geodésico Mundial WGS 84 (World Geodetic System de 1984).

Sistema de proyección cartográfica: Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 19.

Escala de trabajo

En el monitoreo de fenómenos climáticos locales y monitoreo de cultivos en la comunidad se trabajó a diferentes escalas, de 1:1000 a 1:8000, esto para lograr la mayor precisión en la medición y poder identificar áreas de cultivos de las familias que posiblemente puedan ser dañadas en la época de lluvias, granizadas, heladas, sequías o por las inundaciones.

El estudio se hizo para un periodo de retorno de treinta y dos años o más, a una escala de 1:8000 y 1:30.000. El estudio consistió en un análisis multitemporal de imágenes de satélite para detectar una probable inundación en la zona baja de la comunidad por el aumento de las aguas del Lago Titicaca. En este rango el evento que más resalta es la inundación del año 1986 que afectó la zona Sur Oeste de la comunidad de Cutusuma.

Conocimiento científico

La meteorología es la ciencia encargada del estudio de la atmósfera, de sus propiedades y de los fenómenos que en ella tiene lugar, los llamados meteoros. El estudio de la atmósfera se basa en el conocimiento de una serie de magnitudes, o variables meteorológicas, como la temperatura, la presión atmosférica, viento, radiación solar, la humedad y la precipitación las cuales varían tanto en el espacio como en el tiempo (Rodríguez, Argueda, & Portela, 2004).

Cuando describimos las condiciones atmosféricas en un momento y lugar concretos, estamos hablando del tiempo atmosférico es uno de los principales condicionantes de las actividades que realizamos, especialmente de aquellas que se realizan al aire libre, como la agricultura (Rodríguez, Argueda y Portela, 2004).

Actualmente las comunidades sufren los cambios del clima en comparación con las décadas pasadas. Por esta razón se resaltó el uso de los equipos tecnológicos que aportan datos sobre los comportamientos meteorológicos en la zona como parte de un conocimiento científico plasmado y aplicado. Algunos ejemplos de estos equipos son: el satélite meteorológico, estaciones meteorológicas, para medir el comportamiento del clima en cualquier momento, implementado y controlado por las instituciones especializadas como el SENAMHI. Luego los datos son procesados y difundidos a la población en general de la región.

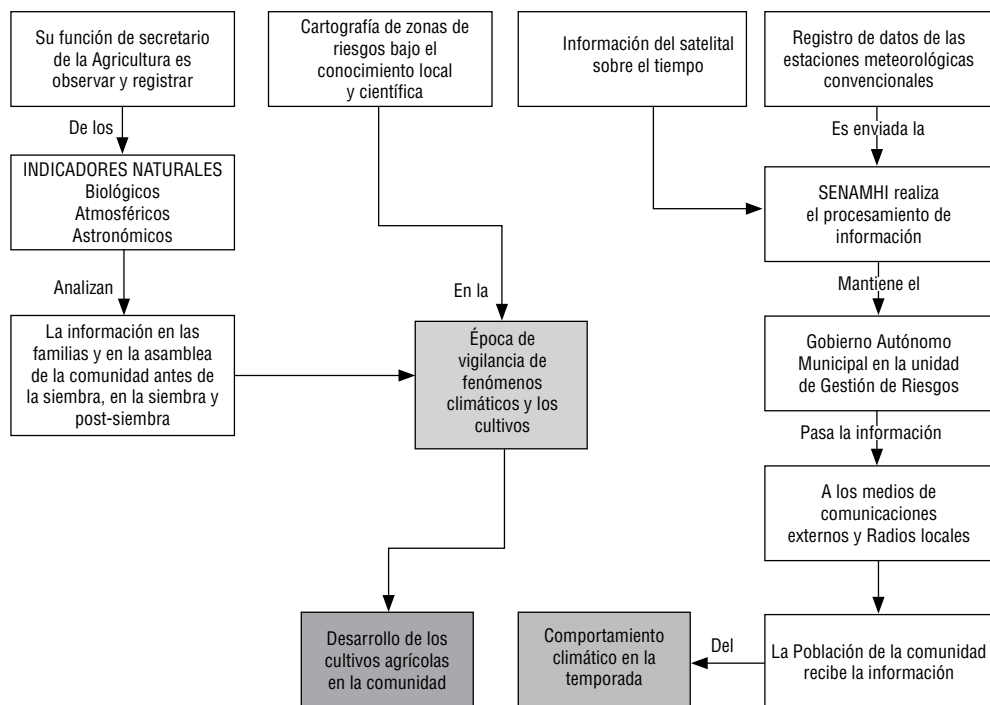
Conocimiento local

Conocimiento local son las prácticas ancestrales que se mantienen todavía, respecto al conocimiento científico. Los sistemas de pronósticos locales están en base a los indicadores naturales propios que existen en la comunidad y donde se observa su desarrollo. Los indicadores, según la época, se clasifican en: biológicos como los fitoindicadores (plantas), zooindicadores (animales), el comportamiento atmosférico (meteorológicos) e indicadores astronómicos que son observados por los pobladores.

Metodología de trabajo

La metodología del trabajo se realizó tomando en cuenta dos aspectos fundamentales que tienen el mismo objetivo para el monitoreo o para pronóstico del tiempo. La primera parte consistió en generar información mediante las estaciones meteorológicas convencionales o automáticas y mediante la información de imágenes de satélite para los pronósticos del tiempo. En este punto se elaboró el siguiente flujograma para ver cuáles son las relaciones de información.

Figura 5
Flujograma de metodología de monitoreo



Fuente: Elaboración propia para la aplicación de la metodología de monitoreo.

Metodología aplicada para monitoreo de los fenómenos climáticos bajo el conocimiento científico

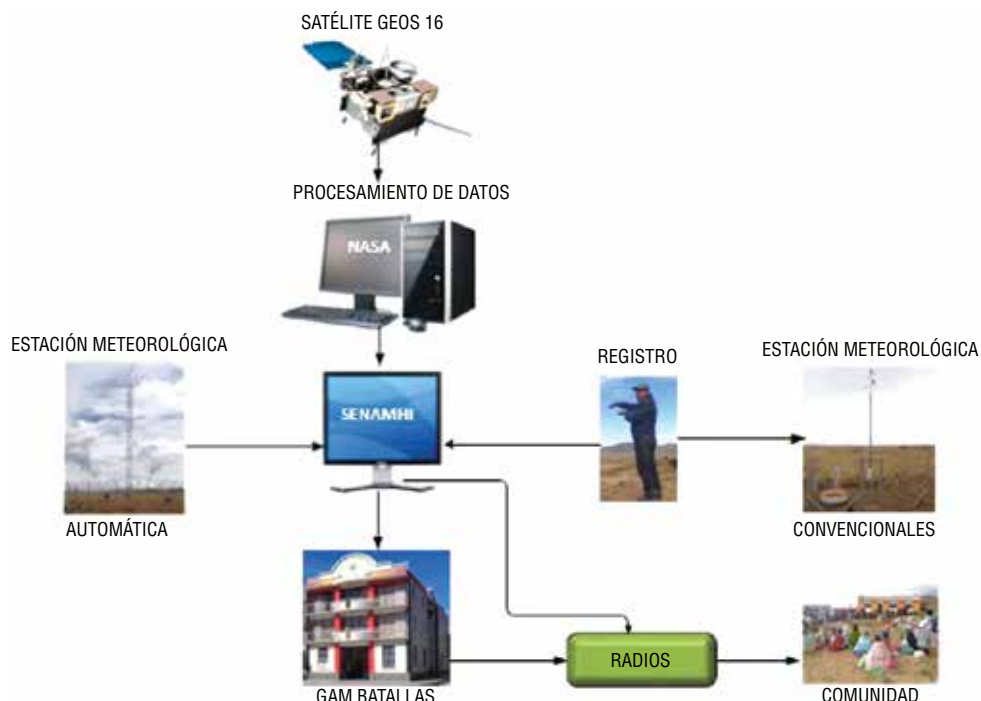
De manera general, los satélites meteorológicos se usan para dar el seguimiento a muchas condiciones atmosféricas que afectan a la Tierra y su atmósfera. Los satélites utilizados son de dos tipos: los geoestacionarios que tienen una posición fija, y los satélites de órbita polar que giran alrededor de la tierra.

En Bolivia el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), es el encargado de recoger toda la información, descargas y procesamiento de información del satélite meteorológico.

Según la información del SENAMHI uno de los satélites que más se usa como repetidora de la información hacia otras estaciones de recepción central es GOES 16, Satélite Geoestacionario Norteamericano que orbita en la línea del Ecuador.

Para el monitoreo climático se determinó dos elementos fundamentales, la precipitación y la temperatura, que son incidentes en la época de verano. En este contexto se elaboró el siguiente diagrama que muestra las relaciones de información de los fenómenos meteorológicos.

Figura 6
Componentes de difusión de la información para alertas agroclimáticas



Fuente: Elaboración propia.

El SENAMHI es una institución que ofrece servicios en hidrometeorología basándose en investigaciones científicas con el objetivo de proporcionar información sobre fenómenos atmosféricos, climáticos e hidrológicos del Estado Plurinacional de Bolivia. Al ser una institución del Estado sus productos y servicios determinan la toma de decisiones sobre las actividades del clima y el agua (Pereyra, 2015).

Los componentes del Sistema Nacional de Información del SENAMHI están basados en sub sistemas que tienen interacciones relacionadas entre sí. Uno de los sub sistemas que se tomó con mucha importancia es el Subsistema de Medición, Observación y Vigilancia.

Figura 7
Subsistema de Medición, Observación y Vigilancia

INGRESO	PROCESO	SALIDA
Datos de estaciones Meteorológicas, principalmente para este trabajo.	El subsistema de Medición, Observación y Vigilancia tiene como proceso principal la generación de información primaria sobre mediciones y observación de las diferentes variables meteorológicas e Hidrológicas, así como de recopilación de los mismos e información de vigilancia como ser imagines satelitales.	Metadatos de estaciones meteorológicas, catálogo nacional de la red observación, datos instantáneos, diarios, mensuales de observación y mediciones de las diferentes variables meteorológicas e hidrológicas, imágenes satelitales y otros. Esta salida orientada a los subsistemas principalmente para el estudio se tomó en cuenta lo siguiente: • Pronóstico para procesos de asimilación de datos para la elaboración de los diferentes pronósticos. • Difusión para su publicación en los diferentes medios de difusión del SENAMHI como ser la página web, redes sociales y otros. • Comunicación y transferencia para ser transferidos y comparados con otras instituciones fuera del límite del Sistema.

Fuente: SENAMHI.

Como se monitorea

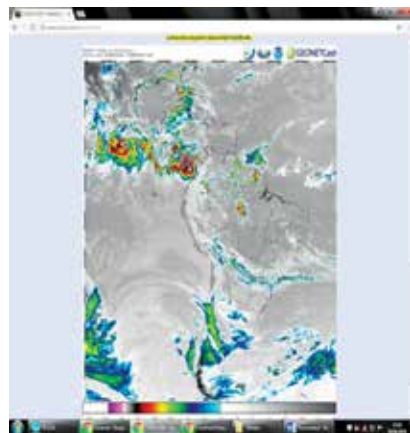
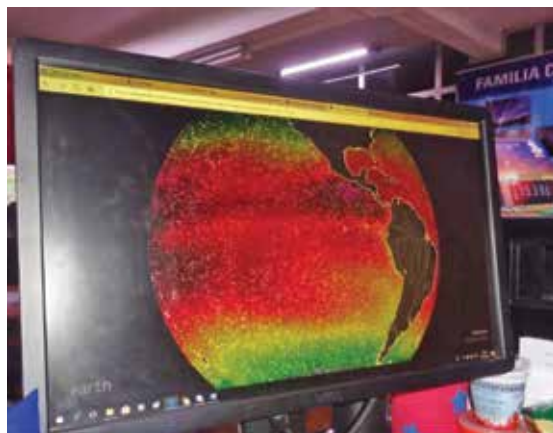
El monitoreo se realiza bajo la observación del comportamiento del clima como la temperatura, máximas, mínimas, precipitaciones diarias, y las probables precipitaciones.

El principal instrumento de monitoreo son las estaciones meteorológicas que generan la información y son obtenidas directamente por el SENAMHI. Esta información es procesada y transmitida a los medios locales de comunicación que están encargadas de difundir datos como la temperatura, máximas, mínimas, precipitaciones diarias, las probables precipitaciones para los siguientes días.

La Unidad de Prevención y Gestión de Riesgos debe tener acuerdos con los medios de comunicación locales para la transmisión del estado del tiempo de cada día, de esta manera pueden estar alerta en las temporadas de producción en la época de verano.

Otra alternativa a las estaciones meteorológicas son las imágenes de satélite. El SENAMHI brinda información del comportamiento del tiempo mediante imágenes satelitales que muestran los movimientos de las masas del aire y la dirección con la que se mueven.

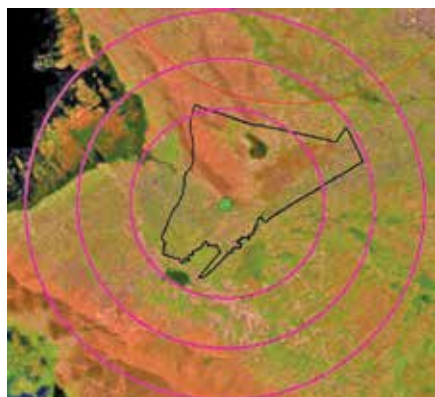
Figura 8
Comportamiento de masas del aire mediante imágenes de Satélite



Fuente: Elaboración propia, fotografías tomadas en el SENAMHI.

Figura 9
Área cubierta por la estación meteorológica en la comunidad Cutusuma

Estación Meteorológica de Cutusuma



Procesamiento y monitoreo climático (SENAMHI)



Fuente: Elaboración propia con imágenes LANDSAT 7 del 27 de abril de 2016 y monitoreo SENAMHI.

Las estaciones meteorológicas instaladas en el municipio de Batallas son de dos clases: estaciones meteorológicas convencionales y estaciones meteorológicas automáticas.

Las estaciones meteorológicas convencionales tienen personas capacitadas para el registro de valores de datos de cada día. Los datos registrados se entregan a SENAMHI mensualmente para luego ser procesados y difundidos. Estos datos son necesarios para hacer análisis históricos de precipitación.

La información generada por las estaciones meteorológicas automáticas se procesan directamente en SENAMHI para su interpretación y difusión de datos como la temperatura, vientos, precipitación en su página web.

Figura 10
Página web del SENAMHI



Fuente: Captura de pantalla de la página web de SENAMHI - <http://senamhi.gob.bo>

El SENAMHI recomienda que las estaciones meteorológicas convencionales y automáticas se complementen entre sí. Los datos de la estación convencional se complementan con los datos de la estación automática para tener datos más precisos. El defecto de la estación automática es que puede fallar cualquier momento.

La Unidad de Gestión de Riesgos es el encargado gestionar con medios de comunicaciones locales para difundir la información del estado de tiempo, presente y futuro, en la época agrícola.

Los medios de comunicaciones locales difunden la información pero siempre y cuando haya un convenio con el municipio para la transmisión de información climática.

En la comunidad de Cutusuma, y sectores vecinos al Lago Titicaca, la población recibe la información generalmente por radios locales. El tipo de información que se transmite son los estados del tiempo agrícola en la época de verano para desarrollar las diferentes plantaciones de los cultivos agrícolas.

Metodología aplicada para monitoreo de los fenómenos climáticos bajo el conocimiento local

Como se monitorea en la comunidad

El monitoreo se realiza bajo la observación del comportamiento del tiempo en la época de cultivos a través de indicadores locales. Los indicadores locales están a cargo de personas observadoras que difunden la información del comportamiento del tiempo u ocurrencia de algún fenómeno. Los indicadores que se registran se clasifican en: indicadores naturales (plantas, animales), atmosféricos y astronómicos. Estos indicadores están vinculados a los procesos productivos locales.

Observación de los indicadores naturales

Los indicadores naturales son señales o guías que permiten pronosticar el comportamiento del clima (fenómenos climáticos), su conducta determina el éxito o fracaso de la producción agrícola (FAO Bolivia, 2013).

La observación e interpretación de los indicadores que se observan, se analizan a partir de los meses de agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, hasta la época de desarrollo de los cultivos. Estas observaciones permiten predecir los comportamientos climáticos en la época agrícola para el manejo de los cultivos. Para realizar la predicción se toman en cuenta los siguientes aspectos:

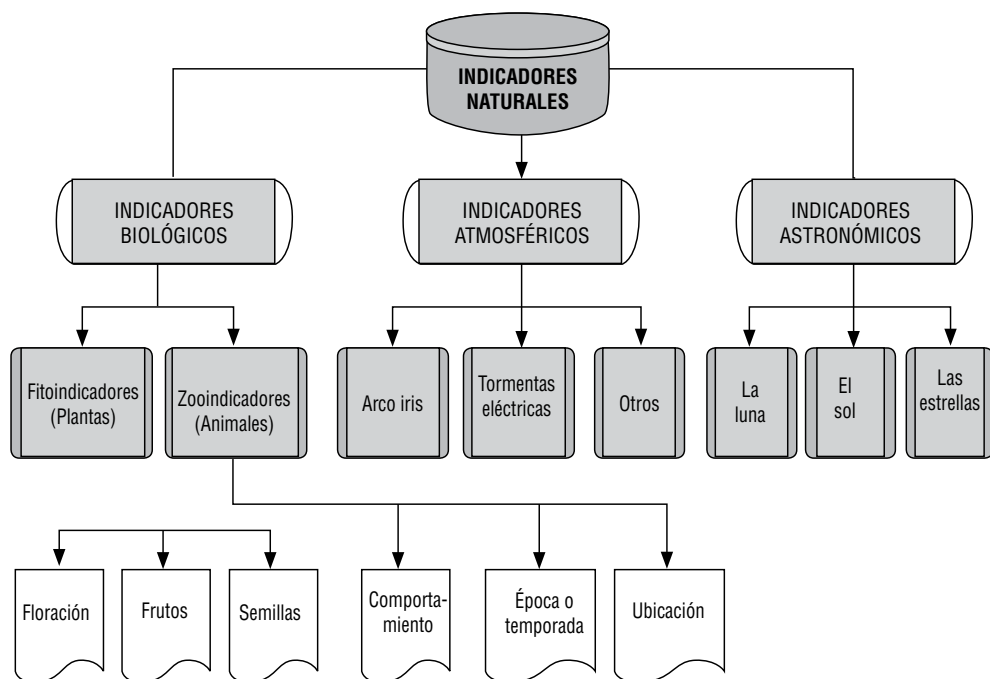
- Los indicadores que se observan son: naturales o biológicos, atmosféricos y astronómicos.
- Descripción y explicación de manera detallada y ordenada de los indicadores en tiempo agrícola.
- Analizar el espacio-tiempo tomando en cuenta el mes y el lugar. Hay que registrar los meses que se observa y también los lugares favorables para los cultivos.
- Tomar en cuenta los riesgos climáticos, producto de las amenazas climáticas que afectan a los cultivos.

Los análisis de los indicadores están clasificados según la época de la observación como ser:

- Con anterioridad
- Para la época de siembra
- En el momento de desarrollo de los cultivos

Clasificación de los indicadores:

Figura 11
Indicadores Naturales



Fuente: Elaboración propia adaptada de la FAO-BOLIVIA.

Cuando se debe monitorear

El monitoreo puede ser en dos etapas:

Primero: En esta etapa el monitoreo se realizará anticipadamente en la comunidad, como ser antes de la siembra, o puede ser más antes según cada comunidad.

Segundo: los momentos más determinantes son la época de verano. Desde el primer momento de la siembra siguiendo toda la etapa fenológica (juvenil, vegetativo y maduro) de las plantas.

El monitoreo debe ser constante ya que muchos factores pueden influir, como la falta de precipitación después de la siembra, o el exceso de lluvias, o la localización de los cultivos según el tipo de terreno.

Por tanto el monitoreo se realiza de forma permanente en busca de señales que permitan predecir la ocurrencia de lluvias. Cualquier tipo de señal debe ser registrada por los miembros de la comunidad, con los registros los observadores deben interpretar y compartir la información de las posibles amenazas adversas.

El monitoreo diario del comportamiento climático es importante en la temporada de cultivos agrícolas. El objetivo de la comunidad, a través de los

observadores del clima conocidos como *Pachayatiris*, es vigilar el comportamiento de las lluvias. Existen normas y estatutos en cada comunidad para designar a los observadores del clima para predecir la ocurrencia de eventos extremos y ayudar en la toma de decisiones.

***Pachagrama* comunal**

El *Prachagrama* es una herramienta que apoya los procesos de gestión de información agro-climática, que se constituye en una buena práctica que sirve a los productores y a los tomadores de decisión (PROSUCO, 2013).

Esta herramienta se adaptó a la comunidad para su aplicación en el registro de las observaciones de los bio-indicadores locales. De esta manera se pudo planificar los procesos productivos agrícolas en el tiempo y espacio adecuados (ver figura 12).

Quién monitorea en la comunidad

En la comunidad el monitoreo está a cargo del secretario de agricultura, él es encargado de coordinar y vigilar los fenómenos climáticos. Según el estatuto de la comunidad tiene la función de difundir la información climática a su organización sindical.

En cada comunidad se designa un secretario de agricultura que tiene dentro de sus atribuciones más importantes:

- Vigilar y supervisar el ciclo agrícola de sembradíos en diferentes lugares dentro de la comunidad.
- Cuidar los cultivos agrícolas de los fenómenos naturales como sequía, granizos, heladas inundaciones y otros.
- Coordinar con las autoridades en caso de desastres naturales ocasionados por fenómenos climáticos y evaluar los efectos para gestionar apoyo ante las autoridades del gobierno Municipal o Nacional.
- Planificar la siembra y cosecha de productores agropecuarios con debida anticipación.

El monitoreo está a cargo de los *Pachayatiris* que se encargan de vigilar el clima para anticiparse a los eventos adversos e informar a su comunidad.

Para que monitorear el comportamiento climático

En los últimos años el Cambio Climático fue evidente en la región Andina. Por esta razón, es necesario estar alerta ante cualquier situación. En el sector de Batallas se registra un déficit de lluvias con recurrentes sequías en época seca, o

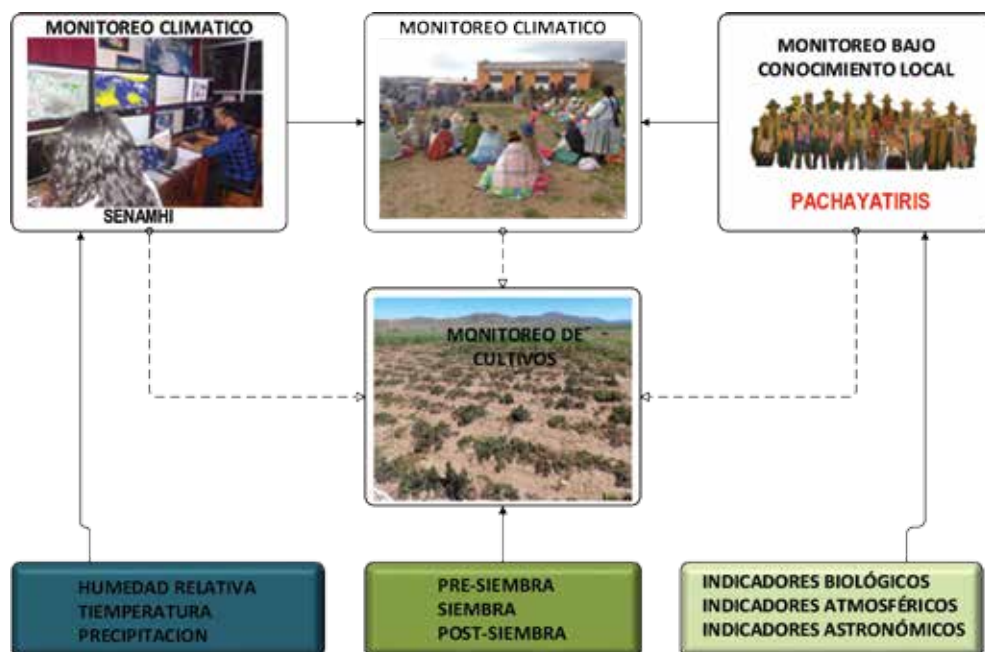
inundaciones en época de lluvias acompañadas por granizadas. También se hacen más frecuentes inesperadas heladas, en plena temporada de crecimiento de plantaciones de papas, que han causado daños graves en los cultivos. Así, se presentan una serie de eventos emergentes y muy localizados que solo pueden detectarse con la vigilancia del clima por parte de la comunidad (ver figura 13).

Figura 12
Formato de registro de pronósticos agroclimático

Pronóstico local agroclimático de cutusuma							Año: _____	
Conocimiento local sobre indicadores naturales								
1 ¿Que es lo que se observó?				3 ¿Cual es el pronóstico generado?				
N°	Indicador observado			Mejor época de siembra	Siembra adelantada			
1	Primeros aullidos del zorro fue bien terminado en el último mes				Siembra intermedia			
					Siembra tardía	1		
2	Flor de Sangayo floreció bien en la última temporada			Mejor lugar para la siembra	Ladera sud este			
					Ladera este			
3	Corrida del toro fue efectivo en la tarde				Planicie a pie de monte	2		
					Uanura			
					Uanura de inundación			
				Comportamiento de la lluvia	Poca lluvia			
					Lluvia irregular			
					Mucha Lluvia			
					Lluvia normal			
					Lluvia adelantada			
					Lluvia tardía	3		
				Resultado de la cosecha	Buena producción			
					Regular producción			
					Mala producción			
				Ocurrencia de heladas	Sin helada			
					Helada leve			
					Helada intensa			
2 ¿En que momento se observó?								
Mes	Inicio de mes (1 al 10)		Mediados de mes (11 al 20)		Finales de mes (21 al 31)		Ocurrencia de granizada	Sin granizo
Enero							Granizada leve	
Febrero							Granizada intensa	
Marzo							Ocurrencia de inundación	No hubo
Abril								En algunos lugares
Mayo								Mayor inundación
Junio			3				Ocurrencia de sequía	No hubo
Julio								Sequía leve
Agosto								Sequía total
Septiembre							Otros:	
Octubre	1	2			1	1	2	
Noviembre								
Diciembre								
Fecha de recolección de información:							/ /	
Fecha de socialización en asamblea:							/ /	

Fuente: elaboración propia adaptado del Ministerio de desarrollo Rural y Tierra.

Figura 13
Componentes del monitoreo climático basado en la comunidad



Conclusiones

¿Cuál es la relación entre el conocimiento científico y el conocimiento local?

La relación entre el conocimiento local y el conocimiento científico, para el manejo de los cultivos, son las siguientes: las imágenes de satélite y estaciones meteorológicas permiten medir y registrar diversas variables climáticas. Estos datos son utilizados para la elaboración de predicciones meteorológicas en el SENAMHI. Por otro lado, los *Pachayatiris* orientan el lugar y la época de siembra para reducir los eventos climáticos adversos.

El conocimiento científico, producto de la investigación, utiliza equipos de alta tecnología para obtener resultados que solamente le sirven al investigador. Estos resultados usualmente no se comparten con la población rural de manera sencilla. Las comunidades rurales de esta región, cercanos a la comunidad de Cutusuma, no se apropian de la información porque no se difunde en su propio idioma, por ejemplo el aymara. Por lo tanto esta comunidad no puede contrarrestar o mitigar los eventos climáticos adversos que la afectan.

Los conocimientos locales, también denominados saberes ancestrales, están siendo olvidados por la falta de transmisión de información entre grupos etarios

de abuelos, padres e hijos. La información que más se pierde son los indicadores naturales a causa del crecimiento de los centros urbanos que atrae a los jóvenes donde pierden el contacto con la naturaleza de su lugar de origen y ya no perciben la relación entre los indicadores y el clima. Otro factor que influye en la pérdida de conocimientos locales es el uso de la tecnología para pronósticos climáticos que está determinado por el conocimiento científico.

Los tomadores de decisión no están contribuyendo a enriquecer ambos conocimientos, el científico y el local, para plasmarlas en políticas de gobierno que puedan prevenir eventos climáticos extremos. Los gobiernos locales y regionales son responsables de articular ambos conocimientos en coordinación con los representantes de la población locales y científicos.

Bibliografía

- Basualdo, A., Berterretche, M., & Vila, F.
2015 Inventario y características principales de los mapas de riesgos para la agricultura disponibles en los países de América Latina y el Caribe. *IICA*, 20. Recuperado el Jueves de Junio de 2018, de <http://repositorio.iica.int/bitstream/11324/2550/1/BVE17038647e.pdf>
- Ceperuelo, M.
2008 *Identificación y caracterización del granizo mediante el radar meteorológico. Modelos de predicción del ciclo de vida de las células convectivas*. Barcelona: Universidad de Bcelona.
- Ceperuelo, M.
2008 (Junio de 2008). *Departament d' Astronomia i Meteorologia*. Obtenido de UNIVERSITAT DE BARCELONA: <http://divulgameteo.es/uploads/Granizo-radar.pdf>
- Chuisengo, O., Condori, F., & Medrano, M.
(Agosto de 2010).
- CONARADE
2010 (Diciembre de 2010). PLAN NACIONAL DE CONTINGENCIA Componente: Inundaciones, Desbordes y Riadas. *CONARADE*, 45.
- 2011 (Mayo de 2011). Obtenido de <http://saludpublica.bvsp.org.bo/cc/bolp.016/documentos/doc763-contenido.pdf>
- 2011 (Mayo de 2011). Plan Nacional de Contingencias por Sequías. *CONARADE*. Obtenido de <http://saludpublica.bvsp.org.bo/cc/bolp.016/documentos/doc763-contenido.pdf>
- 2011 (Mayo de 2011). *Plan Nacional de Contingencias por Heladas y Fríos Intensos*. Obtenido de <http://saludpublica.bvsp.org.bo/cc/bolp.016/documentos/doc621-contenido.pdf>

- 2014 (13 de Febrero de 2014). Plan Nacional de Contingencias por Sequías. *CONARADE*, 22. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/260163188_Sequia_Causas_y_Efectos_de_un_Fenomeno_Global
- FAO Bolivia
- 2013 Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-as976s.pdf>
- Loaiza, W., Reyes, A., & Carvajal, Y.
- 2011 (26 de Septiembre de 2011). Universidad del Valle Colombia. *Modelo para el monitoreo y seguimiento de indicadores de sostenibilidad del recurso hídrico en el sector agrícola*, 80. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-215X2011000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=
- Pereyra, L. E.
- 2015 (Diciembre de 2015). Modelo Conceptual del “Sistema Nacional de Información Meteorológica, Climatológica, Agrometeorológica e Hidrológica (SNIMCAH). *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología*, 4. Obtenido de http://senamhi.gob.bo/Sistema_SENAMHI.pdf
- PROSUCO
- 2013 (Noviembre de 2013). Obtenido de <http://www.bivica.org/upload/cuaderno-agroclimatico.pdf>
- Rodriguez, R. M., Argueda, B., & Portela, A.
- 2004 METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA . *FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA*, 6.
- Trasmonte, G. L.
- 2009 (Julio de 2009). Propuesta de Gestión de Riesgo de Heladas que afectan a la Agricultura del Valle del Mantaro. LIMA, Lima, Peru. Obtenido de http://www.met.igp.gob.pe/publicaciones/2009/g_trasmonte_TESIS.pdf

SEGUNDA PARTE

Monitoreo técnico científico

Situación actual de la eutrofización y escenarios futuros para el Lago Titicaca - aportes de la percepción remota

Xavier Lazzaro

Resumen

El propósito de este capítulo es demostrar: (a) Porque es esencial estudiar cómo funciona el ecosistema del Lago Titicaca y monitorear su estado de calidad de agua en relación al cambio global para poder anticipar escenarios futuros y eventos extremos. (b) Cuales son las áreas más vulnerables a las perturbaciones, o sea más susceptibles en deteriorarse. Para esto, (c) como nos pueden ayudar las tecnologías de la percepción remota corroboradas por mediciones en campo.

Summary

The purpose of this chapter is to demonstrate: (a) Why it is essential to study how the Lake Titicaca ecosystem works and monitor its water quality status in relation to global change in order to anticipate future scenarios and extreme events. (b) Which areas are the area's most vulnerable to disturbances, i.e. the most susceptible to deterioration. For this, (c) How remote sensing technologies can help us when corroborated by field measurements.

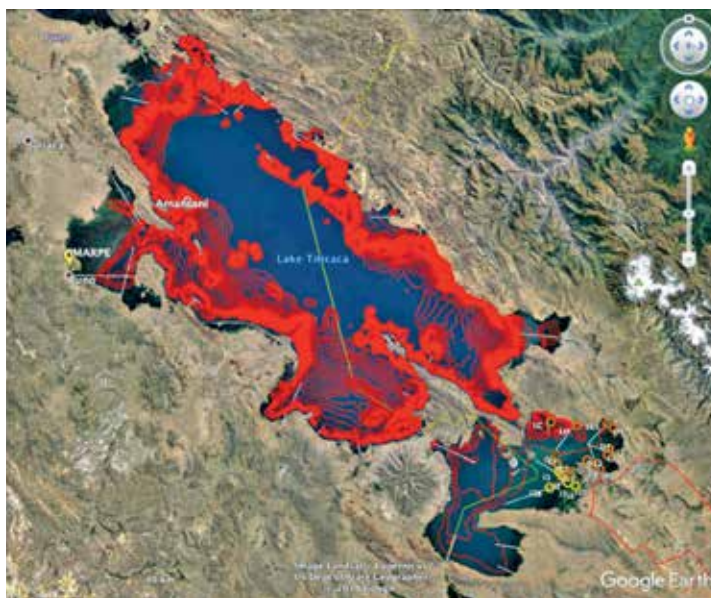
El contexto del Lago Titicaca

Entre los grandes lagos, por su gran altitud (3.809 m msnm) y su latitud tropical (16°S), el Lago Titicaca es único. Combina las características de un lago de montaña, sin que sus aguas lleguen a congelarse en superficie, con una estacionalidad

poca marcada. Por estar encerrada entre las dos Cordilleras de los Andes en el Altiplano sin salida al mar, la cuenca del Titicaca está calificada de endorreica. O sea que sus aguas se pierden principalmente (95%) por evaporación así como por infiltración a lo largo del río Desaguadero, su único desagüe, hasta el Lago Urú Urú, el Lago Poopó y finalmente el Salar de Coípasa.

Para complicar aún más, el Lago Titicaca está constituido de dos lagos: un Lago Mayor profundo (promedio 135 m, máximo 285 m) y un Lago Menor somero (en promedio 9 m debido al máximo de 40 m de la Fosa de Chúa; aunque la profundidad de la parte boliviana en su mayoría sea inferior a 5 m) conectados por el estrecho de Tiquina (40 m) (Fig. 1). Debido a esta distinta combinación de clima y morfometría su funcionamiento ecológico y biogeoquímico es complejo. Por su aislamiento geográfico, gran parte de las especies animales y vegetales que allí coexisten tienen un alto grado de endemismo, o sea que son originarias y únicas de esta área geográfica limitada. Esto contribuye a la extrema vulnerabilidad de este ecosistema frente a las perturbaciones climáticas y las generadas por las actividades humanas. Estas perturbaciones tienen efectos sinérgicos (o sea efectos superiores a los que se conseguiría con la suma de los efectos individuales) promoviendo mediante la fotosíntesis el crecimiento de los productores primarios (llamados de autótrofos), tales como las plantas y las algas.

Figura 1



Mapa batimétrico del Lago Titicaca en base a isólineas con 5m de intervalo (digitalización ALT a partir de la batimetría realizada en 1976 por los servicios hidrográficos de las marinas Boliviana y Peruana). Se tiene que tomar en cuenta que desde 1976 el nivel del lago ha bajado en torno de 1 m. O sea que la isólinea de 5 m, en realidad delimita la zona de profundidad ≤ 4 m (fuente: ALT 2015, www.geotiticaca.org).

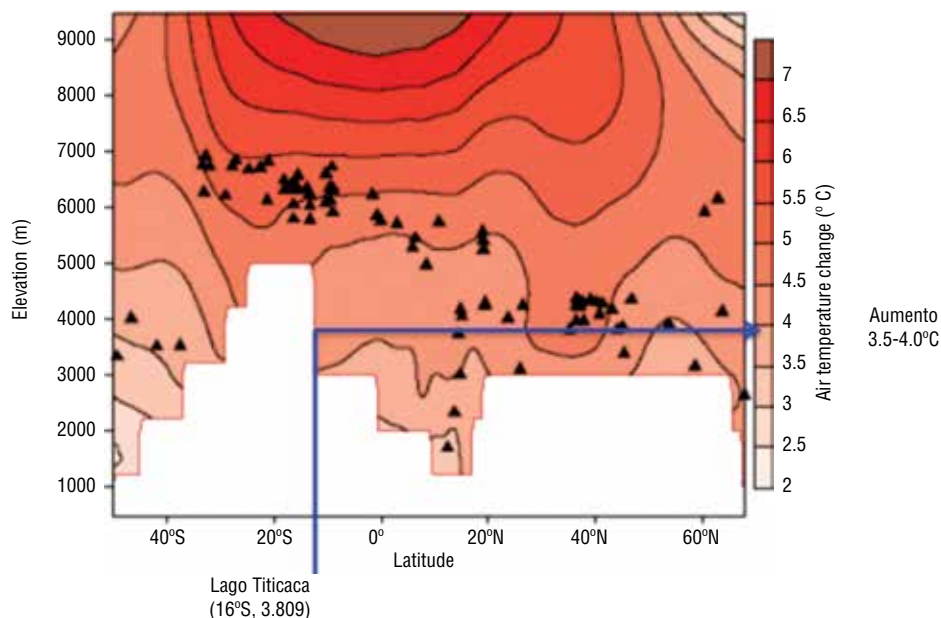
De hecho, siendo una región tropical de altura, se anticipa que el calentamiento del Altiplano será entre los más intensos. Sus efectos se combinarán con los del acelerado crecimiento demográfico y el éxodo rural. La población humana residente en la cuenca binacional del Titicaca ya alcanza los 3 millones de habitantes. En Bolivia, estos efectos antrópicos están especialmente relacionados con la rápida extensión de la mancha urbana de El Alto, la mayor del Altiplano (hoy con 1,2 millones de habitantes), responsable de la deterioración de la integridad de la bahía de Cohana. También se deben a la artificialización de las zonas litorales someras circundantes del Lago Menor, la cual provoca el deterioro de los hábitats de reproducción, alimentación y refugio de los peces (comprometiendo la productividad pesquera), las ranas y aves acuáticas, entre otros. En el Perú, una degradación semejante afecta las bahías interior y exterior de Puno, debida al crecimiento de las ciudades de Puno y Juliaca, respectivamente, desde los años 1980. Puno ha crecido en la orilla de la bahía interior provocando la desaparición del cordón litoral de totora. Ambas áreas urbanas carecen de plantas de tratamiento eficientes. Estas características más el carácter transfronterizo del Lago complican aún más el manejo coordinado de sus recursos naturales y su gobernanza, generando una multitud de desafíos para su adecuada gestión, conservación y restauración.

Los efectos del cambio climático

La cuarta evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 2007) anticipaba un aumento promedio de la temperatura del planeta en 2°C hacia 2100. En 2010, luego de una polémica, las críticas de políticos hacia los científicos resultaron irrelevantes. En vista de los compromisos de los países y las faltas de cumplimiento de las medidas, recientes estudios científicos, como el de New et al. (2011), demostraron que se llegaría más bien en un promedio de 4°C.

En el proceso de calentamiento global, las regiones montañosas en alturas mayores a 3.000 m tienen tendencia a calentarse más que las regiones al nivel del mar. Así, debido a su altitud y latitud, se anticipa que el calentamiento del Altiplano podría alcanzar +3-6°C hacia 2090, o sea 1,5 veces el calentamiento promedio del planeta (+2-4°C) (Bradley et al. 2004, 2006) (Fig. 2). Si los modelos climáticos globales tienen una cierta confiabilidad para predecir el calentamiento, existe mucha incertidumbre para la evaporación y la pluviometría. El retroceso de los glaciares de la Cordillera Real está en marcha, los pequeños glaciares siendo los primeros en desaparecer. Este encogimiento de los glaciares generaría un aumento transitorio de los aportes de las cuencas glaciares al lago, pero a largo plazo sería una reducción durante la época seca (abril-noviembre) (Vuille et al. 2018).

Figura 2

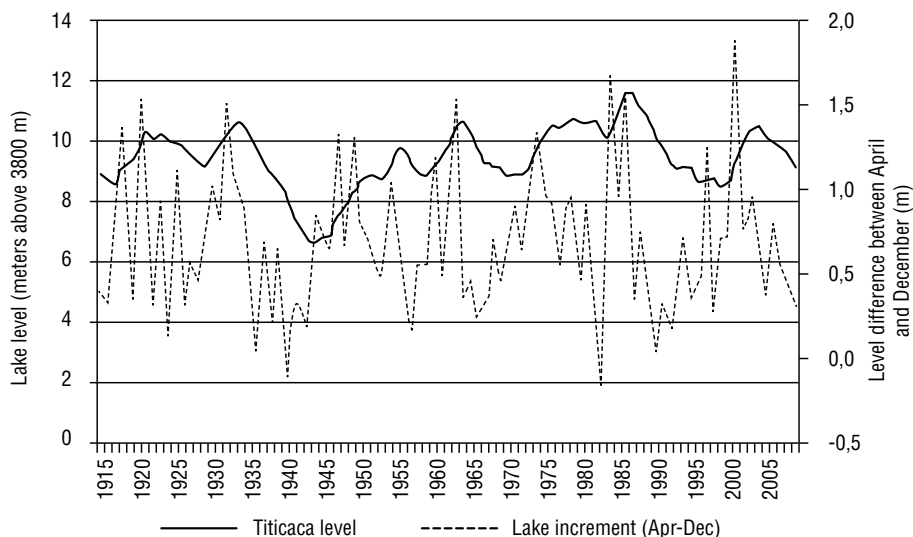


Cambios proyectados en la temperatura anual media del aire entre 1990-1999 y 2090-2099 a lo largo de la Cordillera Americana entre Alaska (68°N) y el Sur de Chile (50°S), en función de la altura (m), a partir de la media de ocho modelos de circulación general del IPCC (2001). En esta época, la proyección de calentamiento global medio del planeta era en los 2°C. Así que para la ubicación del Lago el calentamiento hacia 2100 sería 3,5-4,0°C, o sea 1,5-2,0 veces el promedio del planeta (modificado de Bradley et al. 2006).

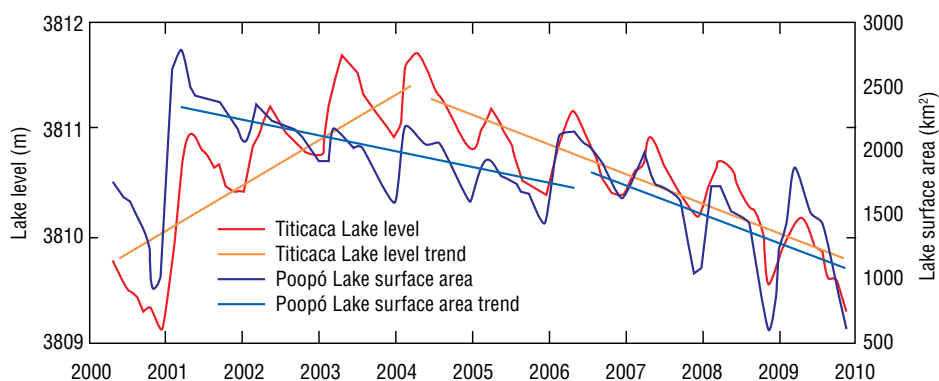
El nivel del Lago Titicaca ha variado de 5 m entre un mínimo de 3.807,7 m en 1944 y 3.811,6 en 1986. Fluctúa anualmente sin clara tendencia, en asociación con las condiciones térmicas de los océanos tropicales. Su nivel es mayor durante los eventos La Niña y cuando el Océano Atlántico tropical norte es más frío de lo normal (Ronchail et al. 2014) (Fig. 3). Lo preocupante es que el nivel actual del Lago Titicaca (3.809 m) queda apenas 2 m arriba del nivel del desagüe del río Desaguadero en la obra de regulación de la ALT en Desaguadero (3.807 m). Esto resulta en un caudal mínimo hacia el sur de la cuenca del TDPS y el Lago Poopó (Abarca-del-Rio et al. 2012) (Fig. 4), que podría cortarse en las próximas décadas con la evolución del clima hacia la sequía y el retroceso glaciar. De hecho, en base a un estudio de las condiciones interglaciares hace 370.000 años atrás, Bush et al. (2010) describen eventos climáticos y mecanismos de retroalimentación (*'feedback'* en inglés) con temperaturas probablemente 1-3°C más calientes que las actuales en los Andes, alcanzando un punto de inflexión (*'tipping point'* en inglés) que lleve en alterar profundamente el funcionamiento del ecosistema regional, el Lago Titicaca calienta el ambiente local en aproximadamente 4-5°C en relación a las áreas alejadas en decenas de kilómetros y también aumenta la

pluviometría del Altiplano norte en relación al sur (400 mm/año vs. 200 mm/año, con 890 mm/año sobre la cuenca del Titicaca) (Roche et al. 1992). Así, contrariamente a la hipótesis generalmente aceptada de un calentamiento gradual y continuo, con una adaptación progresiva de la vegetación a las nuevas condiciones, los autores presentan un modelo conceptual. Con el calentamiento del Pacífico ecuatorial oriental resultando en un evento El Niño, el cielo sería menos nublado y la radiación solar más intensa provocando un aumento de la evaporación y de la sequía en el Altiplano. Un mecanismo de retroalimentación positiva podría exacerbar este efecto en lo cual el nivel del lago bajaría, su área se reduciría, disminuyendo la humedad y aumentando la evaporación. Esta combinación de fenómenos reforzaría la reducción del área del lago. Las bajas temperaturas nocturnas sobre la tierra se calentarían, disminuyendo el diferencial de temperatura entre el lago y la tierra (actualmente 4-5°C, el lago siendo más cálido que la tierra por la noche). Esta reducción del diferencial debilitaría la brisa térmica del lago que normalmente promueve la lluvia nocturna sobre el lago, reduciendo aún más los aportes de agua y acentuando aún más el descenso del lago. Para que el Lago Titicaca se vuelva un lago salado, sería necesario una reducción de >50% de la precipitación. La hipótesis de Bush et al. (2010) es que el aumento de la tasa de evaporación y del descenso del lago, desencadenaría mayor aridez en el Altiplano por la retroalimentación positiva. Solo un descenso de 5 m del nivel del lago cortaría el drenaje hacia la parte central y sur del Lago Menor (Fig. 5). Así, el desbordamiento en el río Desaguadero se detendría y el sistema aguas abajo del Lago Poopó se secaría. En consecuencia, un clima más cálido en lugar de estimular el aumento de la temperatura local y el aumento de la precipitación convectiva podría últimamente inducir la caída de la temperatura y el incremento de la aridez en la cuenca del Lago Titicaca, con consecuencias desastrosas sobre la disponibilidad de los recursos hídricos, la biodiversidad, la sostenibilidad de las actividades humanas y finalmente su coexistencia en el Altiplano.

Aunque el aporte de los glaciares al balance hídrico del lago sea inferior al 5%, este permite que actualmente la amplitud anual de fluctuación del nivel de agua no pase de 1,5 m. Así que con una previsión de mayor aridez, la reducción del nivel del agua sería acompañado de una mayor fluctuación anual, comprometiendo la perennidad del Lago Menor. Por supuesto, la gran magnitud y rapidez de este cambio tendrán consecuencias desastrosas para la mayoría de las especies animales y vegetales, sus interacciones, en particular las redes alimenticias podrían desconectarse. Porque coexisten al límite superior de su rango de condiciones fisiológicas óptimas, las especies endémicas de la región andina y altiplánica son muy frágiles ante las perturbaciones. Varias especies de peces, ranas y aves acuáticas ya están en peligro de extinción, ya que no podrían ser remplazadas (ver el libro rojo del MMAyA 2009).

Figura 3

Nivel anual (LEV) del lago Titicaca (metros sobre 3800 m) y diferencia anual (DIF) entre los niveles de abril y de diciembre del año anterior (DIF-LEV, metros) (fuente: Ronchail et al. 2014).

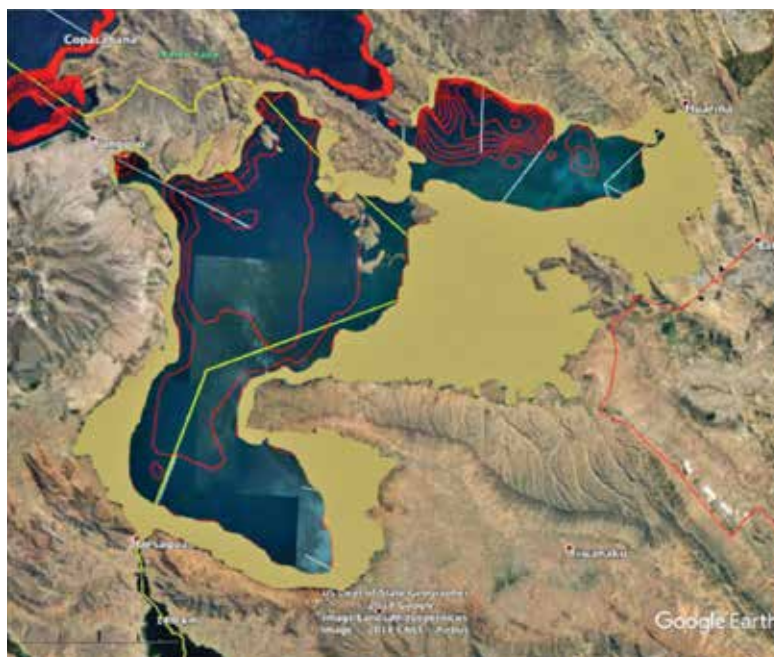
Figura 4

Evolución mensual del nivel del Lago Titicaca (en rojo) y tendencia de evolución entre 2000 et 2010 (en naranja). Se observa una tendencia positiva hasta 2004 y luego una tendencia negativa (fuente: Abarca-del-Rio et al. 2012).

Poco se puede hacer para mitigar el cambio climático. Para luchar contra la reducción drástica de los recursos hídricos, se prevé la construcción de represas en la Cordillera Real para alimentar La Paz y el Alto con agua potable. Una tasa anual de evaporación mayor a 2 m implica que se debe usar el agua durante los primeros meses de la época lluviosa para aprovechar este recurso valioso antes que se volatilice. También, se perforan más pozos, a pesar de no conocer

precisamente la disponibilidad y dinámica de la reserva en aguas subterráneas, y que las concentraciones de nitratos y contaminantes metálicos sean altas debajo la zona urbana de El Alto.

Figura 5



Mapa batimétrico del Lago Menor (o Lago Hunaímarca) ilustrando el efecto del descenso del nivel de agua en 5 m (área verde claro). Se puede notar que la parte boliviana del lago está predominantemente ≤ 5 m. Con un descenso de 5 m, las regiones central y sur del Lago Menor serían desconectadas de la región norte y sin desagüe por el río Desaguadero. Progresivamente, estas regiones se salinizarían por consecuencia de la evaporación y terminarían por secarse, al igual que el sur de la cuenca del sistema hídrico del TDPS, así como el Lago Poopó. La parte más profunda (> 5 m) de la región norte quedaría conectada al Lago Mayor por el estrecho de Tiquina (Lazzaro X., elaboración propia).

Los efectos antrópicos

A los efectos del cambio climático magnificados en el Altiplano (en relación al promedio del planeta), se combinan sinérgicamente (o sea, con efectos conjuntos incrementados) con los efectos antrópicos de las actividades humanas, en especial la acelerada urbanización y expansión de la mancha urbana de El Alto y municipios aledaños (Viacha, Laja, Pucarani, Puerto Pérez) de la cuenca Katari.

Entre 1976 y 1992, la población de El Alto –inicialmente un suburbio de La Paz– llegó a crecer en promedio +9,21 % por año. En 2018, con 922.598 habitantes se estabilizó en +1,14 % anual. Sin embargo, si se considera una tasa promedio

de +2 % anual a futuro, la población de El Alto podría duplicarse en 2060. Este crecimiento poblacional será asociado con un crecimiento equivalente de la contaminación hacia el Lago Menor, por aguas servidas domésticas e industriales, así como por la producción de basura sólida y escombros. Esto sin contar con la contaminación generada por el aumento consecuente de las actividades agrícolas (fertilizantes, agrotóxicos) y ganaderas (descargas de nitrógeno, fósforo, materia orgánica, y gas metano¹).

Con una tasa de producción diaria de desechos sólidos (plásticos, papel, cartón, metal, vidrio) estimada en 0,6 kg/hab./día, y una población urbana de 922.598 habitantes (INE 2018), la ciudad de El Alto producirá 202.048 t/año en 2018. Las proyecciones para 2060 llegarían entre 325.252 t/año (1,14%/año) y 464.156 t/año (2%/año). Considerando tasas promedias de emisiones de 15 g N/hab./día y 4 g P/hab./día (IFREMER 2018), así como 80% de las aguas residuales de El Alto llegando a bahía Cohana, la contaminación anual de la población de El Alto al Lago Menor representará 4.041 t N/año y 1.347 t P/año en 2018. Con un crecimiento poblacional de 2% anual, la población de El Alto llegaría en 2.119.433 habitantes en 2060, generando emisiones de 9.283 t N/año y 2.475 t P/año al Lago Menor.

También, se tiene que considerar los aportes en N y P del rebaño de bovinos de Bahía Cohana, el cual abastece en carne y leche a la población de El Alto. No son comparables con los aportes de origen humano, porque la mayor parte no se va para el lago sino que esta utilizada y valorizada como abono natural para la agricultura familiar. En 2018 este rebaño está estimado en 9.609 cabezas sobre una superficie de 8.372 km² (INE 2018). Para satisfacer a la demanda, el tamaño del rebaño debería crecer proporcionalmente a la población. Así, en 2060 las proyecciones llegarían entre 17.229 bovinos (1,14%/año) y 22.074 bovinos (2%/año). Esto corresponde a densidades de 1,1 bovino/km² en 2018 y proyecciones de 2,0-2,6 bovinos/km², respectivamente. La producción de nutrientes está estimada en 100 kg N/bovino/año y 18,4 kg P/bovino/año. Así, los aportes anuales del rebaño serían en 2018: 961 t N/año y 177 t P/año, y como proyecciones para 2060: entre 1.723 t N/año y 317 t P/año (1,14%/año) y 2.207 t N/año y 406 t P/año (2%/año). Entonces, si la contaminación de Bahía Cohana no se controla, la actividad ganadera no podrá crecer más para atender la demanda de la zona urbana.

O sea que si el crecimiento demográfico de El Alto no se estabiliza en el nivel actual de 1,14% anual, la producción de desechos sólidos, nitrógeno y fósforo, podría duplicar en 2060. Estos valores no consideran los aportes de las industrias (formales e informales) que en gran mayoría no cuentan con tratamiento adecuado de sus residuos. La degradación de los hábitats naturales y la contaminación por las actividades humanas de las áreas poco profundas litorales y bahías urbanizadas,

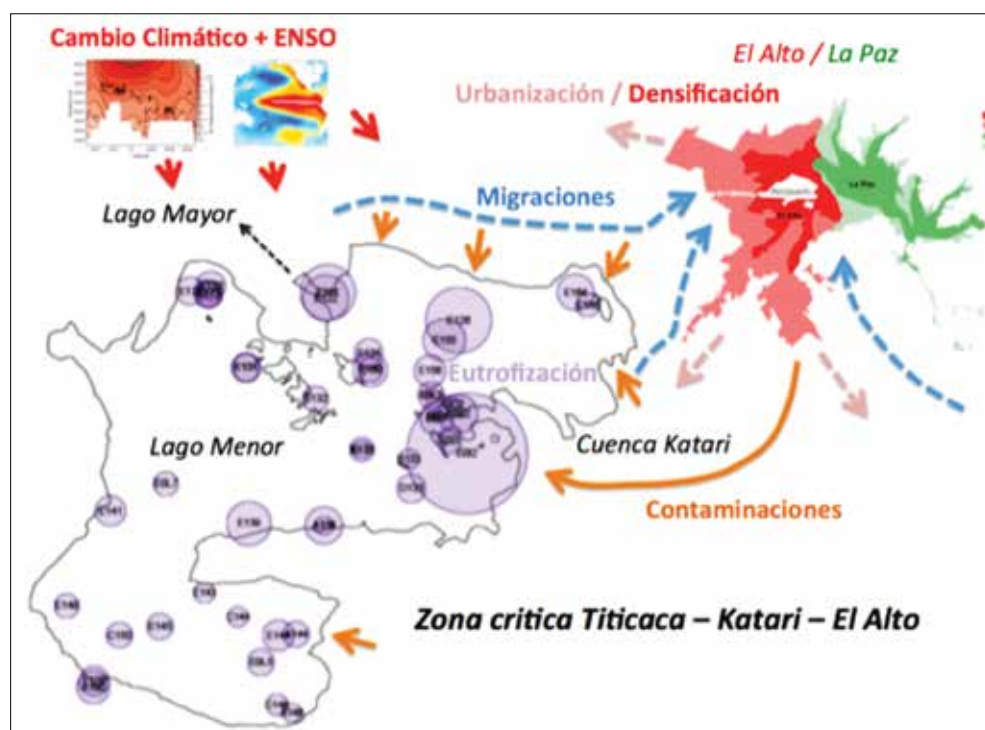
1 Gas contribuyendo al efecto invernadero o sea al calentamiento global, producido en la pansa de los bovinos, por fermentación natural durante la degradación de la celulosa.

altera el funcionamiento biogeoquímico y ecológico del Lago Titicaca, de manera aún no plenamente conocida.

Las áreas más comprometidas del Lago Titicaca

Las dos áreas más vulnerables del Lago Titicaca son: (a) gran parte del Lago Menor, sobre todo en los alrededores de Bahía Cohana y la región Norte, en Bolivia, y (b) las bahías interior y exterior de Puno (BIP y BEP) en la parte peruana del Lago Mayor. De hecho, son regiones poco profundas (< 5 m) impactadas por las descargas de contaminantes provenientes de grandes aglomeraciones e intensas actividades humanas (minería, agricultura, agropecuaria, sobrepesca, piscicultura en jaulas flotantes, turismo) (Fig. 6). Ocola Salazar & Laqui Vilca (2017) presentan un inventario de las fuentes contaminantes por subcuencas del Lago Titicaca.

Figura 6



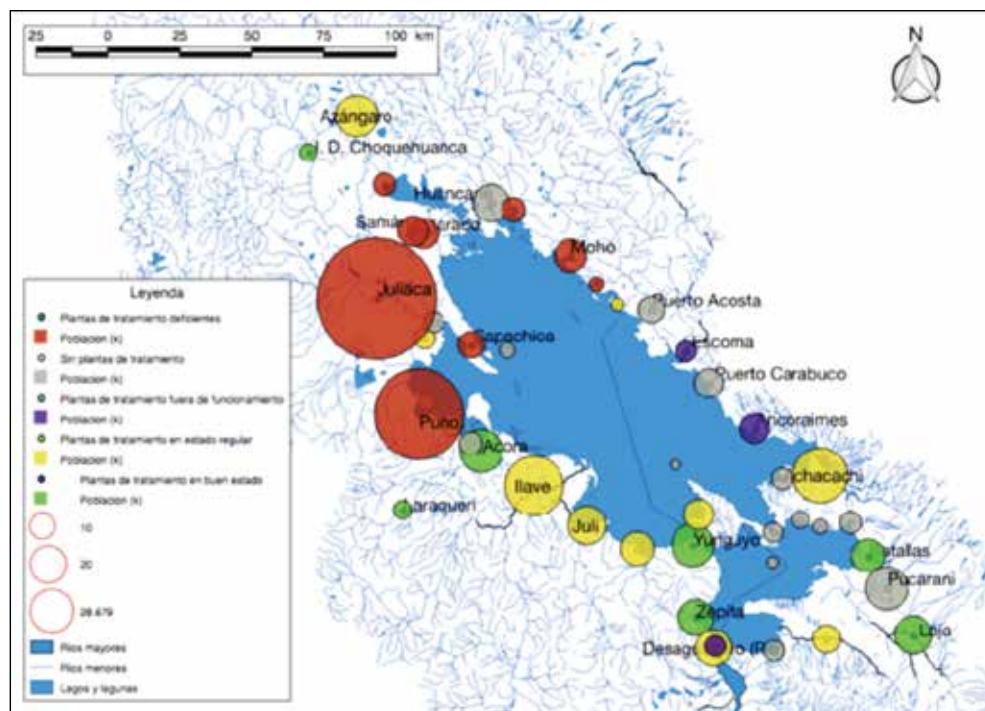
Representación esquemática de la combinación de efectos del cambio climático (Intensificación en regiones tropicales de montaña, eventos ENSO-El Niño) y de la contaminación por la acelerada urbanización de la cuenca Katari con la expansión/densificación de la mancha urbana de El Alto (límites de El Alto en 1970' en rojo oscuro y actuales en rojo claro; comparación con la menor expansión de La Paz en verde oscuro y verde claro, respectivamente) (Lazzaro X., elaboración propia).

La red de plantas de tratamiento de las aguas residuales

Las dos plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), Puchukollo y Espinar, a cargo del control de las contaminaciones por parte de las dos mayores urbanizaciones, El Alto en Bolivia y Puno en el Perú, están sub-dimensionadas, a punto de colapsar o colapsada, respectivamente. Fueron varias tentativas de implementar pequeñas plantas (siendo apenas lagunas de estabilización) en los municipios ribereños del lago, tanto en el Perú como en Bolivia. En mayoría estos proyectos han fracasado y son inoperativos (ALT 2014, Fig. 7).

Actualmente, en Bolivia para las regiones Norte y centrales del Lago Menor solo existe la PTAR de Puchukollo. Fue construida en 1998 con capacidad para 500.000 habitantes, cuando El Alto no existía, mas era un suburbio de La Paz alrededor del Aeropuerto. Puchukollo trata una pequeña parte de las aguas residuales del distrito del Aeropuerto Internacional de El Alto. Su ampliación así como el alcantarillado proveniente de El Alto están actualmente en construcción.

Figura 7



Mapa del Lago Titicaca indicando las principales ciudades, su densidad de población y el estado de funcionamiento de las plantas de tratamiento: deficiente (círculos azules), ausente (círculos rosados), fuera de servicio (círculos verdes), funcionamiento normal (amarillo), en buen estado (púrpura) (fuente: ALT 2014).

El plan de monitoreo y vigilancia del estado del lago

El Lago Titicaca es el único de los Grandes Lagos del mundo que aún no cuenta con un monitoreo permanente global en tiempo real ni de la calidad de sus aguas, ni del estado de sus recursos naturales. Apenas existe desde 2006 un programa ECERP - Expediciones binacionales Científicas de Evaluación de Recursos Pesqueros y Calidad de Agua, a cargo del IMARPE (Instituto del Mar del Perú) y del PELT (programa Especial del Lago Titicaca) en el Perú. Consiste en medir y muestrear 1-2 veces por año, durante un período de un mes, las características físico-biogeoquímicas y ecológicas de una red de 150-180 estaciones en todo el Lago Mayor y Lago Menor. Estas expediciones incluyen mediciones de la columna de agua a lo largo de perfiles verticales con sondas automáticas, colectas de fitoplancton (micro-algas), zooplancton, macro-invertebrados (siendo bio-indicadores de la calidad de agua), así como una evaluación de la distribución, composición y biomasa de las comunidades de peces por pesca experimental y con ecosonda (método hidro-acústico) a lo largo de transectos. En este ámbito, en julio y diciembre 2015, y agosto 2016, un equipo de investigadores del Instituto de Ecología de la Universidad Mayor de San Andrés (IE/UMSA) y del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD-Francia), se encargaron en 15 días de caracterizar la totalidad del Lago Menor, mediante una red de monitoreo de 55-85 estaciones ubicadas en áreas representativas (Lazzaro 2016). Este estudio realizado en coordinación con el IPD-PACU (Institución Pública Desconcentrada de Pesca y Acuicultura, del MDRyT - Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras), el VRHR/MMaYA (Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, del Ministerio de Medio Ambiente y Agua), la UOB (Unidad Operativa de Bolivia), la ALT (Autoridad Binacional del Lago Titicaca), y el IMARPE, ha permitido mediante la combinación de varios bio-indicadores de identificar unas 13 zonas más comprometidas poco profundas, en mayoría en territorio boliviano (Lazzaro et al. 2016, 2017; Fig. 8).

Esta estrategia de monitoreo anual es apenas un fotografía instantánea del estado del lago. No permite anticipar la deterioración de ciertas áreas, ni la ocurrencia de eventos extremos, analizar los mecanismos de evolución multi-temporal (escala diaria, estacional, inter-anual), tampoco implementar una zonificación ecológica del lago a fin de mapear las áreas de conservación, restauración, y de usos más adecuados. Además, el análisis de las muestras y de los datos demora varios meses a un año. Los resultados no son publicados en informes binacionales globales, si no por separado por cada país, los protocolos no siendo todos estandarizados. Esto dificulta la interpretación y gestión global por parte de los tomadores de decisiones políticos, a la escala del ecosistema.

En el Perú, el IMARPE, el PELT y la ANA (Agencia Nacional de Agua) son institutos técnico-científicos encargados de realizar investigaciones, monitoreos e implementar alertas tempranas en el Lago Titicaca, siendo financiados por el Ministerio de Medio Ambiente (MINAM) y el Ministerio de la Producción

(PRODUCE). En Bolivia, las investigaciones están a cargo de las universidades, no siempre existen convocatorias relevantes dedicadas al lago, tampoco existen financiamientos para programas de monitoreo y vigilancia permanentes a largo plazo, ni una coordinación nacional y binacional.

Figura 8



Mapa de zonas de riesgos de eutrofización en el Lago Menor del Titicaca, caracterizadas en 85 estaciones limnológicas de la red de monitoreo UMSA-IRD (Lazzaro 2016), durante la expedición del programa ECERP de Agosto 2016. Elaboración a partir de una combinación de (bio)indicadores de calidad de agua, como: turbidez, atenuación vertical de la radiación solar visible en la columna de agua (sonda Biospherical C-OPS), concentración en sulfuro de hidrógeno (H_2S) producido por las bacterias sulfato reductoras, fluorescencia in vivo de la clorofila-a total y por clase de fitoplancton (microalgas verdes, Dinoflagelados/Diatomeas, Cianobacterias; sonda FluoroProbe BBE), dominancias de grupos taxonómicos en el fitoplancton y zooplancton, composición y biomasa de macro-invertebrados bénticos (índice BMWP/Bol) (fuente: Lazzaro et al. 2017).

Frente a esta carencia se han implementado tres iniciativas:

- Observatorio Binacional del Lago Titicaca (OBLT): <https://borea.mnhn.fr/fr/OBLT> , apoyado por BOREA/IRD. Coordinadores: X. Lazzaro (BOREA/IRD), D. Achá (IE/UMSA) & J. Nuñez Villalba (IIGEO/UMSA) en Bolivia, y C. Gamarra Peralta (LCP/IMARPE) en el Perú. Con implementación de la Infraestructura de Datos Espaciales GeoVisor IIGEO/UMSA, apoyado por BOREA/IRD: <http://www.geovisorumsa.com> . Coordinadores: J. Nuñez Villalba (IIGEO/UMSA) & X. Lazzaro (BOREA/IRD).
- Proyecto Titicaca Sensors (TTKKS) - A joint IRD-IPGP research initiative *in situ* biogeochemical and ecological sensing of Lake Titicaca. Coordinadores: D. Point (GET/IRD), X. Lazzaro (BOREA/IRD) & A. Groleau (IPGP/LGE). El

- primer monitoreo automático de alta frecuencia (15-45 min) de parámetros físico-químicos (sonda multiparametrica NKE MP, SDOT y SPDT) y concentración de clorofila-*a* por fluorescencia *in vivo* (sonda FluoroProbe BBE) en 1,5 m de profundidad en el litoral de Huatajata durante 2 años (2013-2014).
- Proyecto PIA-ACC.UMSA.37: Monitoreo espacial de los efectos del cambio climático en el Lago Titicaca con imágenes de satélite. Estimación de la distribución espacial de la concentración en clorofila-*a* del fitoplancton y de los totales del Lago Menor del Titicaca mediante imágenes Landsat-8 TM, calibradas en campo con una sonda fluorométrica FluoroProbe BBE sumergible y un espectroradiómetro de reflectancia HandHeld2. Implementación de algoritmos de conversión.
 - Proyecto piloto ‘Observatorio permanente’ PNUD/GEF (2018-2020), combinando un monitoreo rutinario a cada 16 días (paso del satélite Landsat-8 encima del Lago Menor) con el despliegue de una boya hidro-meteo de mediciones automáticas de alta frecuencia (15 min) con perfilador multiparametrico de la columna de agua (2 horas). Coordinadores: X. Lazzaro (BOREA/IRD) & D. Achá (IE/UMSA).

Se puede encontrar informaciones sobre la evolución del estado trófico del Lago Titicaca desde los años 1960’ en dos libros de síntesis: Dejoux & Iltis (1992) y Pouilly et al. (2014).

¿Qué es la eutrofización? Por qué y cómo sucede?

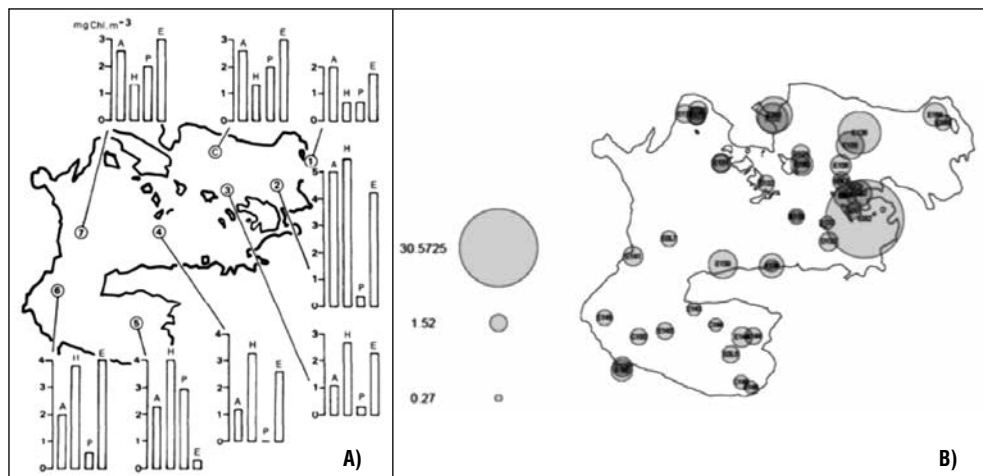
La eutrofización de los ecosistemas acuáticos es una sucesión de procesos biológicos desencadenados en respuesta a un aporte excesivo en nutrientes, o sea nitrógeno y fósforo. Puede ser progresiva o brutal. Sus efectos más notables son la proliferación de los productores primarios (plantas acuáticas llamadas macrófitas, micro-algas del fitoplancton, en particular algas verdes, diatomeas y cianobacterias en fase última), fenómenos de anoxia (ausencia de oxígeno disuelto en el agua), pérdida de biodiversidad, y eventualmente toxicidad. Para el público general, más frecuentemente aparece como un problema ambiental muy localizado. Sin embargo, los factores que controlan la eutrofización no solamente se practican en escalas locales ni de manera puntual. Los procesos son controlados por factores que se practican también a grande escalas espacio-temporales. De hecho, los nutrientes que llegan a un lago pueden originarse cuesta arriba en cuencas hidrográficas a veces alejadas, antes de ser transportados y diluidos a lo largo de hasta centenas de kilómetros.

La eutrofización afecta numerosos lagos, represas, ríos y zonas costeras en todo el mundo. Genera importantes perturbaciones en los ecosistemas acuáticos y consecuentemente tiene impactos sobre los bienes y servicios asociados, sobre la salud

humana y sobre las actividades económicas. Puede volverse un tema socialmente muy animado, fuente de conflictos. Cualquier sea el ecosistema en cuestión, el compartimiento de los productores primarios – o sea de los organismos (macrófitas, fitoplancton) que producen su propia materia orgánica – es siempre el primer impactado durante los procesos de eutrofización. Unas reacciones en cadena siguen en los otros compartimientos biológicos con consecuencias para los ciclos biogeoquímicos, las dinámicas de las comunidades biológicas, la topología (arquitectura) de las redes alimenticias, y finalmente la evolución del ecosistema acuático como un todo.

De manera clásica, la concentración en clorofila-*a*, el mayor pigmento responsable por la fotosíntesis del fitoplancton es utilizado como un *proxy* de la biomasa del fitoplancton y sirve para caracterizar el nivel de eutrofización de un lago. Originalmente determinada mediante su extracción con solventes (e.g., acetona, metanol, cloroforme) y luego lectura en un espectrofotómetro, con los progresos tecnológicos la concentración en clorofila-*a* ahora es frecuentemente determinada mediante un fluorómetro sumergible, como la sonda FluoroProbe BBE, capaz de separar la clorofila-*a* entre cuatro clases de fitoplancton (micro-algas verdes o Clorófitas, Diatomeas+Dinoflagelados, Criptófitas y Cianobacterias). Así, por ejemplo, se ha podido determinar la distribución espacial de la clorofila-*a* por fluorescencia *in vivo* en el Lago Menor del Titicaca en Agosto 2016 (Programa ECERP) y compararla con las concentraciones medidas durante el monitoreo de 1979-1980 (Lazzaro 1981) (Fig. 9).

Figura 9



A) Distribución estacional (A = Otoño, H = invierno, P = primavera, E = verano) de la concentración promedio en Clorofila-*a* (extracción con acetona) en 1979-1980 durante el monitoreo del Lago Menor a cada 18 días (paso del satélite Landsat-1). Las concentraciones raramente pasaban de 1-3 $\mu\text{g/L}$, excepto en la estación 2-Yayi, frente a Puerto Pérez, en la región norte (fuente: Lazzaro 1981, 1985). B) Distribución espacial de la concentración promedio en Clorofila-*a* total en la camada superficial (0-5 m) de la columna de agua, por fluorescencia *in vivo* (mediante la sonda FluoroProbe BBE) en el Lago Menor del Titicaca en Agosto 2016. Los diámetros de los círculos son proporcionales a las concentraciones. Se nota la mayor concentración en Bahía Cohana (> 25 eq. $\mu\text{g Cl-a/L}$) (Programa ECERP; fuente: Lazzaro X. & Hubas C., no publicado).

Manifestaciones más corrientes de la eutrofización

Los lagos someros (i.e., poco profundos) sujetos a la influencia de zonas agrícolas, agro-pastorales y/o urbanas son más propicios en desarrollar fenómenos de eutrofización, provocados por los aportes masivos de nutrientes (N y/o P) y contaminantes (e.g., agrotóxicos, fertilizantes). Los lagos someros son también caracterizados por encontrarse en dos estados tróficos alternativos: un estado 'claro' dominado por macrófitas acuáticas litorales (con baja biomasa de fitoplancton) o un estado 'turbio' dominado por un abundante biomasa de fitoplancton en su columna de agua (con macrófitas escasas o ausentes) (Scheffer 1998). Las áreas someras (≤ 5 m) del Lago Menor del Titicaca no escapan a esta regla, en particular Bahía Cohana donde se observa una sucesión de macrófitas acuáticas (flotantes como *Lemna*, emergentes como *Totora* y sumergidas como *Chara*), entre la desembocadura del río Katari y el agua abierta frente a la isla Paco (Suriqui) (Lazzaro X., observ. pers.).

Proliferaciones de macrófitas acuáticas: Estas se pueden producir en las zonas poco profundas, como las zonas litorales y las bahías. En particular, las macrófitas flotantes y sumergidas que desarrollan la mayoría de su biomasa en la superficie o el fondo del agua son las que causan problemas. Por ejemplo en el Lago Titicaca, se trata de la lenteja de agua (*Lemna* sp.), cuya biomasa flotante impide el intercambio gaseoso entre el agua y la atmósfera, así como el acceso de la luz para los productores primarios al fondo (fitoplancton perifiton, macrófitas sumergidas). Estos eventos de dominación masiva de macrófitas flotantes serán incentivados en el contexto del calentamiento global.

Proliferaciones de micro-algas del fitoplancton, en especial las cianobacterias: Las cianobacterias son particularmente competitivas para acceder a los recursos en nitrógeno, fósforo así como a la luz, porque tienen numerosas estrategias nutritivas. Las cianobacterias tienen una gran afinidad para el fósforo. Ciertas son capaces de fijar el nitrógeno atmosférico. Otras pueden usar las formas orgánicas del nitrógeno y del fósforo. Numerosas especies de cianobacterias producen vacuolas de gas, lo que les permite flotar y entonces mantenerse próximas a la superficie donde la luz es máxima. En el Lago Titicaca, deben contar con pigmentos fotoprotectores para poder evitar daños por la muy intensa radiación ultravioleta incidente. Varias especies son capaces de producir células de latencia las cuales contribuyen en aumentar su reclutamiento el siguiente año.

Se puede distinguir varios tipos de proliferaciones: (a) Las eflorescencias (blooms) en la superficie, como para *Microcystis*. (b) Los desarrollos dispersos en la columna de agua, con las especies adaptadas a las luces débiles, como *Planktothrix* o *Oscillatoria*. (c) El desarrollo béntico, asociado a los biofilms, para *Oscillatoria* y *Phormidium*. Los desarrollos producidos en las capas profundas

pueden aparecer de repente en superficie cuando la disminución de la luz se combina con la mezcla por el viento. Los desarrollos dispersos en la columna de agua también pueden concentrarse rápidamente en la superficie al final de la eflorescencia, causado por una mala regulación de la flotabilidad. Generalmente, son las Clorófitas (algas verdes), los Dinoflagelados y las Diatomeas que producen eflorescencias, sin embargo, las Cianobacterias frecuentemente representan el estado último de los blooms. Todos los órdenes de Cianobacterias presentan especies capaces de producir toxinas y compuestos bioactivos. La microcystina, una hepato-toxina, es producida por *Microcystis*, y también por especies como *Planktothrix* o *Dolichospermum*. La anatoxina, una neuro-toxina, es principalmente producida por *Dolichospermum*, mas también por *Aphanizomenon* y *Oscillatoria*. A partir del conocimiento actual, es imposible anticipar que clase o especie de fitoplancton desarrollará un Bloom, tampoco la toxicidad potencial de una proliferación (que no siempre ocurre) cuando se desarrolla. De hecho, en una misma especie de Cianobacteria, algunas cepas producirán toxinas y otras no. También, la proporción de células conteniendo los genes permitiendo la síntesis de toxinas puede variar considerablemente durante una proliferación o entre eflorescencias, mismo cuando estas proliferaciones se desarrollan en ecosistemas muy próximos geográficamente unos de los otros.

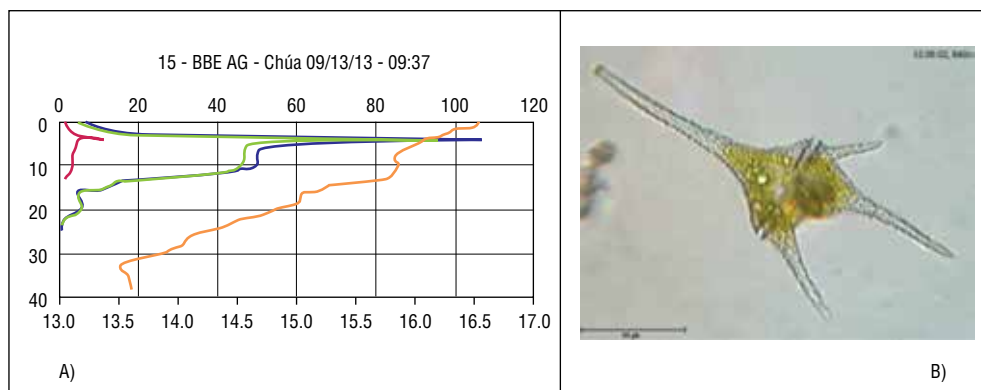
Caso del Lago Titicaca: En la Bahía interior de Puno, desde la década de 1980, los síntomas de la eutrofización se manifiestan en recurrentes eventos de proliferaciones de macrófitas (plantas acuáticas) flotantes, en particular la lenteja de agua (*Lemna* sp.), así como de floraciones de micro-algas (proliferaciones de fitoplancton o ‘Blooms’) nocivas e inocuas representadas por cianobacterias (*Microcystis*, *Anabaena*, *Gomphosphaeria*, *Limnographis*, *Nodularia*, *Oscillatoria*) y dinoflagellados (*Ceratium*, *Peridinium*, *Glenodinium*). Por suerte, los fenómenos de toxicidad nunca fueron reportados en el Lago Titicaca. Estos eventos acompañados de efectos de anoxia (o sea, una reducción de la concentración en oxígeno disuelto, ya reducida en 30% en relación al nivel del mar debido a la altura) en el agua han provocado en marzo del 2013 una masiva mortandad de peces (*Orestias* sp.) y ranas (*Telmatobius culeus*), especies endémicas en peligro de extinción.

El ‘bloom’ de 2015 en el Lago Menor y el aporte de la percepción remota

En el Lago Menor, en 1979-1980 las concentraciones de Clorofila-*a* del fitoplancton raramente alcanzaban 1-3 µg Cl-*a*/L (Lazzaro, 1981), debido a la ausencia de uso de fertilizantes (agricultura manual con aprovechamiento de los

residuos de la ganadería de subsistencia), la baja densidad poblacional y la inexistencia de la zona urbana de El Alto. De nuestro conocimiento, el primer Bloom documentado con mediciones *in situ* ocurrió en noviembre 2013 en la Fosa de Chúa en la región norte. Fue muy localizado y fugas. Duro dos días, con niveles de fluorescencia *in vivo* alcanzando un máximo de $> 100 \mu\text{g Cl-}a/\text{L}$ el primer día, y $> 200 \mu\text{g Cl-}a/\text{L}$ el segundo día (FluoroProbe BBE), a 5 m de profundidad (Fig. 10). Fue generado por una proliferación de un dinoflagelado, *Ceratium* sp., probablemente *C. hirundinella*, una especie cosmopolita invasora, muy dominante en el Lago Titicaca.

Figura 10



A) Perfil vertical de fluorescencia *in vivo* de la Clorofila-a (sonda FluoroProbe BBE) el 9 de Noviembre 2013 durante el Bloom fugas de *Ceratium* sp. (mas probablemente *C. hirundinella*, una especie cosmopolita invasora, muy dominante en el Lago Titicaca). En la Fosa de Chúa. Se pudo observar que el máximo de concentración total (línea azul, $>100 \mu\text{g Cl-}a/\text{L}$) ocurrió a 5 m de profundidad. Fue dominado por Clorófitas (línea verde). El perfil de temperatura (escala inferior) esta indicado por línea naranja. El día siguiente, 10 de Noviembre, la concentración llego en $> 200 \mu\text{g Cl-}a/\text{L}$ (Lazzaro X., obs. pers.; durante una salida del proyecto ANR CESA La Pachamama (2014-2017)). B) Imagen microscópica de *Ceratium hirundinella*, cuyo tamaño puede llegar a $100 \mu\text{m}$.

Sin embargo, el primer Bloom masivo en extensión y duración, jamás reportado, ocurrió en Marzo-Mayo 2015, causado por una estación lluviosa (típicamente de diciembre a marzo) que se prolongo durante Abril-Mayo, y se extendió en las regiones norte y central. La superficie del lago tenía apariencia de una sopa verde y fue grabada por las imágenes de satélites. La micro-alga responsable era una Clorofita (*Carteria* sp.), afortunadamente no siendo nociva. Sin embargo, este fenómeno generó anoxia y libero importantes cantidades de sulfuro de hidrogeno (H_2S , un potente neurotóxico), debido a la mineralización del exceso de materia orgánica por las bacterias sulfato reductoras, resultando en mortandades masivas de peces, ranas y aves acuáticas (Molina et al. 2017, Achá et al., en prep.). Mediante una animación 3D, Achá & Pabon (2018) demuestran

los mecanismos al origen de la ocurrencia de los blooms de fitoplancton en el Lago Menor del Titicaca.

Las fuentes de contaminación (en nutrientes, materia orgánica y contaminantes) responsables por la extensión y duración de este Bloom no son todavía completamente elucidadas. Indiscutiblemente las aguas residuales y los contaminantes llevados mediante los ríos de la cuenca Katari hacia la Bahía Cohana (Duwig et al. 2014, Archundia et al. 2016) generaron el Bloom en la región central a lo largo de la Península de Taraco, siguiendo la circulación hidrodinámica general. Sin embargo, esta circulación no puede explicar la extensión del Bloom hacia la región norte. Para que esto ocurra, lo más factible es que las aguas pluviales escuraron a lo largo de la cuenca, en terrenos agrícolas y agropecuarios, también bastante poblados, llevando en exceso los nutrientes, la materia orgánica y los contaminantes hasta las orillas del litoral norte y noreste. Allí se acumularon y se mezclaron verticalmente por la acción cotidiana de los vientos térmicos, antes de dispersarse. Luego fueron incorporados por la fotosíntesis del fitoplancton durante periodos de calma con intensa radiación solar.

La ausencia de un plan de monitoreo de la calidad de agua, extenso, permanente a largo plazo, deja el Lago Menor totalmente desprotegido y sin capacidad de anticipar cualquier tipo de evento extremo, de desarrollo rápido y fugas, como en particular los Blooms de fitoplancton, los cuales tienen consecuencias desastrosas para el funcionamiento del ecosistema y perjudican las actividades humanas, tanto en termino productivo, como socio-económico. Tampoco, existen todavía actividades de observaciones y monitoreo participativos por parte de los comunarios de los municipios ribereños del lago, para las cuales se necesitan equipamientos de medición específicos. Frente a este cuadro, la percepción remota se revela una herramienta única, irremplazable, por su capacidad de integrar escalas multi-temporales y multi-espaciales.

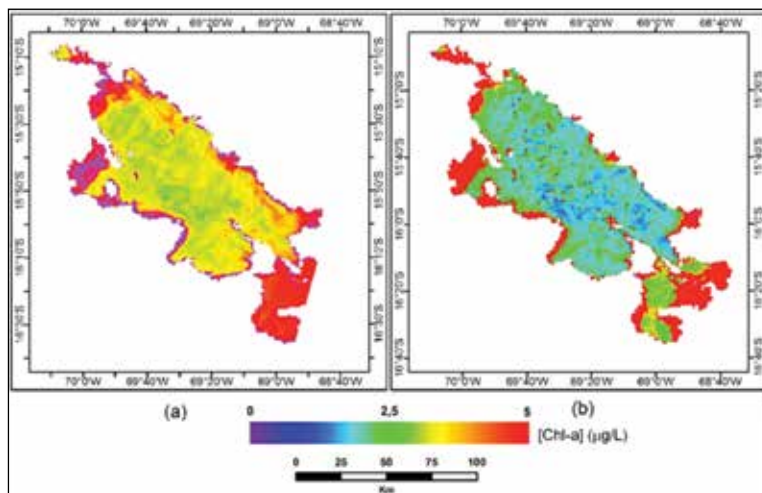
A pesar de la disponibilidad de satélites de tecnología cada vez más avanzada y precisa, para la observación del Lago Titicaca existen varias barreras tecnológicas, debido a sus características ambientales muy peculiares, como entre las principales:

- La radiación solar incidente muy intensa ($>30\%$, en relación al nivel del mar) obliga el descenso de los organismos del fitoplancton para protegerse en la profundidad de la columna de agua, > 5 m en zonas profundas, y al nivel del fondo en las zonas someras (≤ 3 m). Así, los satélites que evalúan las concentraciones superficiales en Clorofila-*a*, las subestiman porque las micro-algas evitan la superficie donde la radiación UV incidente es dañina.
- En las zonas poco profundas (< 3 m) transparentes, donde el fitoplancton es poco abundante debido a la dominancia de *Chara* sp. –siendo las macrófitas

- sumergidas dominantes en condiciones saludables, la señal que reciben los satélites puede estar alterada por la reflectancia de las macrófitas del fondo.
- En las zonas someras cubiertas de *Charas*, los vientos solares que soplan diariamente levantan el carbonato de calcio (componente del esqueleto de las *Charas*), dejando rastros que podrían ser identificados erróneamente por los observadores como la floraciones de micro-algas. Provocan cambios de color del agua de celeste, azul profundo, hacia verde-amarillo, esmeralda, que engañan.
 - En las zonas someras litorales y en bahía Cohana, los totorales dispuestos en mechones dispersos, de dimensiones < 10-30 m, perturban la percepción de los satélites, se confundiendo entre pixeles de agua y pixeles de vegetación-terresta. Así que las zonas de mayor interés de ser mapeadas escapan.
 - Más importante, la mayor parte de los estudios de percepción remota de la Clorofila-*a*, carecen de calibración de las estimaciones satelitales con medidas simultáneas *in situ* (en campo). El uso de algoritmos globales (por ejemplo, estándares de la NASA establecidos como promedios para los océanos), o implementados en ecosistemas diferentes del en estudio, puede ser engañoso.

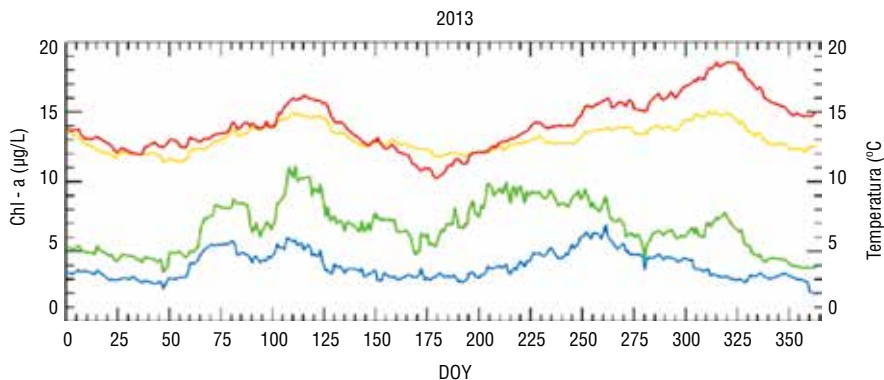
Se realizaron varios estudios estimando las concentraciones superficiales en Clorofila-*a* del fitoplancton del Lago Titicaca, en particular el Lago Menor, mediante percepción remota a partir de los satélites Landsat-8 y MODIS. A pesar de no contar con mediciones *in situ* simultáneas, mas solo usar algoritmos estándares, los resultados fueron bastante satisfactorios en condiciones habituales (Pereria Sandoval 2015, Jiménez-Muñoz et al. 2015, Ruiz-Verdú et al. 2016), o sea con gamas reducidas de concentraciones de Clorofila-*a* entorno de 5 µg Cl-*a*/L, fuera de condiciones de eutrofización y de Blooms. Más bien, demostraron poca sensibilidad a fluctuaciones, se revelando limitados para la identificación de áreas de gradientes. Las estimaciones con Landsat-8 y MODIS fueron bastante realísticas y equivalentes (Jiménez-Muñoz et al. 2015, Figs. 11-12), más limitadas en la detección de concentraciones ≤ 5 µg Cl-*a*/L. Las imágenes Worldview provenientes de los satélites Aqua y Terra de MODIS, aplicando el algoritmo de la NASA, se revelaron más sensibles a concentraciones más elevadas (≤ 20 µg Cl-*a*/L) durante el Bloom de 2015. Sin embargo, no tuvieron resolución espacial suficiente para mapear las zonas litorales, el entorno de las islas, y Bahía Cohana en vista de la presencia de mechones dispersos de *Totora* (Fig. 13). El algoritmo de TERRASIGNA (2017) a partir de imágenes Landsat-8, tuvo mejor sensibilidad para las concentraciones más elevadas (aunque todavía ≤ 40 µg Cl-*a*/L) durante el Bloom de 2015. Sin embargo, no consiguió mapear correctamente la clorofila en el interior de Bahía Cohana (Fig. 14).

Figura 11



Mapas de concentraciones en clorofila-*a* obtenidos a partir de la imagen Landsat-8 (a) y de MODIS (b) del 16-Agosto-2013 (fuente: Jiménez-Muñoz et al. 2015). Para Landsat-8, se han utilizado los algoritmos propuestos por Tenjo et al. (2014), basados en el modelo de transferencia radiativa para agua HydroLight y validados con una extensa base de datos de espectros de reflectividad de agua junto a medidas de concentración de clorofila-*a* [Chl-*a*] *in situ* en diferentes lagos y embalses de la Península Ibérica, según la formula: $[Chl-a, \mu g/L] = 4.46 (R_{560} / R_{440}) - 0.55$, donde R_{λ} es la reflectividad en la banda de longitud de onda λ (en nm). Para MODIS, la [Chl-*a*] fue calculada utilizando el algoritmo empírico OC3-M (Ocean Chlorophyll three-band algorithm for MODIS) – una adaptación del desarrollado para SeaWiFs (O'Reilly et al. 2000), basado en el cociente entre una banda verde (en la que la absorción de la clorofila-*a* es mínima) y una banda azul (en la región espectral de máxima absorción de la clorofila-*a*), según el polinomio: $\log [Chl-a] = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4$, donde $X = \log [\max (R_{rs444}, R_{rs489}) / R_{rs555}]$, con los coeficientes a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 siendo 0.2500; 2.4752; 1.4061; 2.8233 y 0.5405, respectivamente. Se puede notar que – en ausencia de mediciones *in situ* simultáneas – el máximo del rango de Clorofila-*a* fue arbitrariamente limitado en 5 $\mu g/L$ para coincidir con las mediciones de Lazzaro & Point (2011) en el Lago Menor.

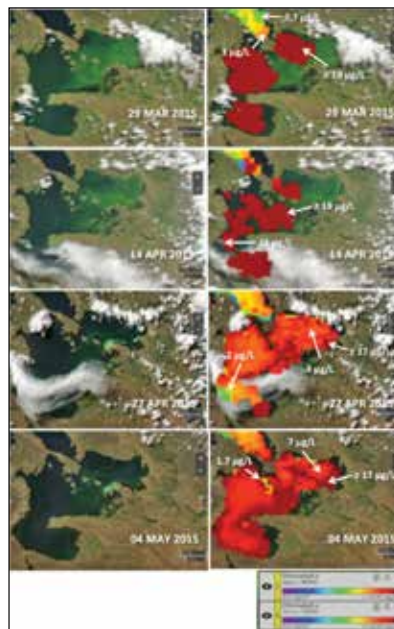
Figura 12



Evolución de la concentración [Chl-*a*] de los lagos Mayor (Chl. L.Mayor) y Menor (Chl. L.Menor) del Titicaca (media móvil de 15 días), a partir de datos diarios MODIS del año 2013, en función del día del año (DOY) (fuente: Jiménez-Muñoz et al. 2015). En condiciones habituales, estas concentraciones estimadas corresponden bastante bien a las reales medidas en campo. Sin embargo, los algoritmos de conversión utilizados deben ser testados a partir de una gama mas amplia de concentraciones, por ejemplo en las zonas eutrofizadas ($> 20 \mu g \text{ Cl-a/L}$) y en condiciones de Blooms ($> 100 \mu g \text{ Cl-a/L}$).

Figura 13

Imágenes Worldview © en colores naturales (a izquierda) y después de la aplicación del algoritmo de la NASA), mostrando el Lago Menor del Titicaca y Bahía Cohana durante el evento del Bloom de 2015 entre el 29 de Marzo (paroxismo) y el 04 de Mayo, de arriba para abajo (NASA Worldview, reflectancia corregida, combinando las vistas de los satélites Aqua y Terra de MODIS. Las regiones litorales y de Bahía Cohana no muestran el rango de colores de las concentraciones en Clorofila-a, porque el tamaño del pixel de MODIS (250 m a 1 km) es demasiado grande para mapear precisamente la interface entre la tierra y el agua, debido a la existencia de áreas con parches de macrófitas acuáticas, en particular de los totorales (fuente: Lazzaro X., implementación propia de las imágenes y anotaciones de las concentraciones).

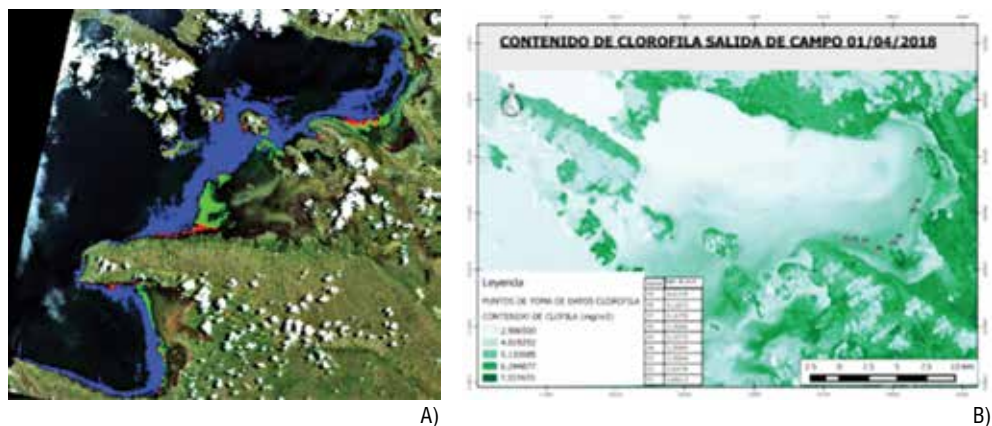


El proyecto PIA-ACC.UMSA.37 de monitoreo espacial del Lago Menor

Para levantar estas limitaciones, implementamos el proyecto PIA-ACC.UMSA.37 de monitoreo espacial de los efectos del cambio climático. De nuestro conocimiento, este representa la primera tentativa en el Lago Menor de usar mediciones *in situ* de reflectancia de la radiación solar (300-1.000 nm) mediante un espectroradiómetro HandHeld2 y de fluorescencia *in vivo* de la Clorofila-*a* mediante un fluorímetro sumergible FluoroProbe BBE, simultáneamente al paso del satélite Landsat-8, para intentar calibrar las imágenes e implementar algoritmos para estimar con la mayor precisión:

- La distribución espacial de la concentración en Clorofila-*a* del fitoplancton, a fin de poder anticipar procesos de eutrofización a la escala del lago y frecuencia de 16 días (ver los Capítulos de Inéz Villca, Daniel Callisaya y Claudia Piza; Fig. 15).
- La distribución espacial de los totorales, así como su estado fisiológico en relación con las fuentes de contaminación y eutrofización (ver el Mapa Jhasmin Duarte; Fig. 16).

Figura 15



A) Imagen Landsat-8 de la Clorofila-*a* clasificada mediante firmas espectrales (rojo = rango mayor concentraciones, verde = rango mediano, azul = rango menor) (Daniel Callisaya 2018. Perfil de Tesis de Licenciatura). B) Imagen Landsat-8 de la Clorofila-*a* clasificada mediante el algoritmo de la NASA para las estaciones P1 a P9 del litoral noreste (rango 4,5-5,5 $\mu\text{g Cl-a/L}$) (fuente: Inéz Villca 2018. Perfil de Tesis de Licenciatura).

Esperamos que nuestra reflexión incentive investigadores en realizar mayores estudios sobre el funcionamiento ecológico y los procesos de eutrofización del Lago Titicaca, así como convencerles en implementar un plan y una red de monitoreo permanente del Lago Menor. También, frente a tales escenarios futuros

tan excesivos, se necesita una coordinación eficiente y un diálogo constructivo entre las tres clases de actores de ambos países: los científicos (generadores de conocimientos), los tomadores de decisión (responsables de la gestión) y la sociedad civil (beneficiarios ansiosos por conocer mejor el estado y el futuro de su Lago, y a su vez actores claves para su conservación).

Figura 16

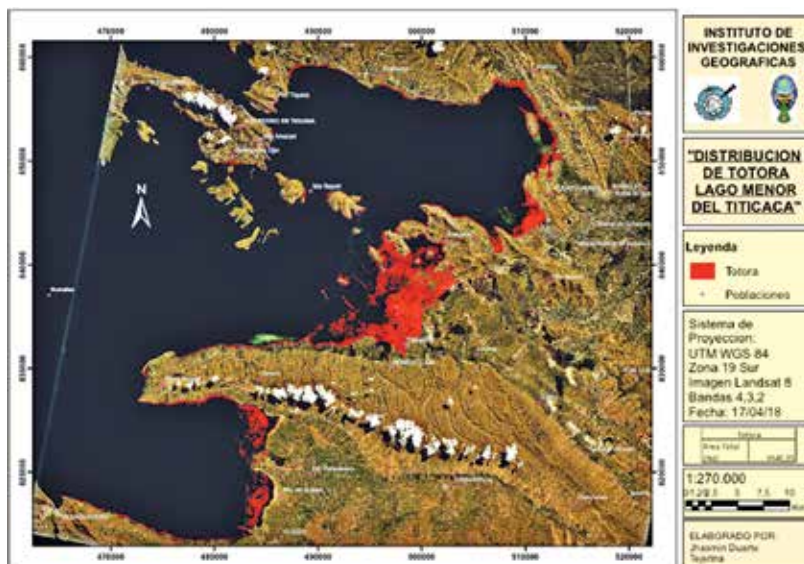


Imagen Landsat-8 de los totorales clasificada mediante firmas espectrales medidas en campo, en 17 de Abril de 2018 (fuente: Jhasmin Duarte 2018. Tesis de Licenciatura, II GEO/UMSA).

En este sentido, para lograr éxitos en la conservación, restauración y gestión de las áreas más vulnerables del Lago Titicaca, evitando su colapso, los objetivos de nuestro reciente Coloquio Internacional del Lago Titicaca “Un solo lago con dos países” (Lazzaro 2018) fueron de contribuir en: (a) construir las bases de una mejor organización para la gobernanza nacional y binacional, (b) reforzar el dialogo y la colaboración, y (c) optimizar el acceso a los datos, las informaciones y el conocimiento, entre las diferentes clases de actores.

Bibliografía

- Abarca-del-Rio R., Crétaux J.-F., Berge-Nguyen M. & Maisongrande Ph.
2012 Does Lake Titicaca still control the Lake Poopó system water levels? An investigation using satellite altimetry and MODIS data (2000-2009). Remote Sensing Letters 3: 707-714.

Achá D. & Pabon C.

2018 Problemática Lago Menor. Presenta la primera síntesis y recomendaciones sobre la problemática de la contaminación y cambio climático en el Lago Menor del Titicaca. Esta animación 3D demuestra los mecanismos de ocurrencia de los blooms de fitoplancton. IE/UMSA, IRD-Francia, con el auspicio de la cooperación Suiza y el proyecto PIA-ACC: https://youtu.be/poH_l6T5jX4

Achá D., Guédron S., Amouroux D., Point D., Lazzaro X., Fernández P.E. & Saret G. (submitted)

Algae bloom exacerbates methylmercury and hydrogen sulfide contamination in the emblematic high altitude Lake Titicaca. Special issue of Geosciences.

ALT

2015 GeoTiticaca - GEOPORTAL BINACIONAL DEL SISTEMA HÍDRICO TDPS, 27 paginas, www.geotiticaca.org

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 circumlacustre del Lago Titicaca.

Archundia D., Duwig C., Spadini L., Uzu G., Guédron S., Morel M.C., Cortez R., Ramos Ramos O., Chincheros J. & Martins J.M.F.

2016 How uncontrolled urban expansión increases the contamination of the Titicaca Lake Basin (El Alto, La Paz, Bolivia). *Water, Air & Soil Pollution* 44:1-17.

Bradley R.S., Keimig F.T. & Henry F. 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

Bradley R.S., Vuille M., Diaz H.F. & Vergara W.

2006 Threats to Water Supplies in the Tropical Andes. *Science* 312: 1755-1756.

Bush M.B., Hanselman J.A. & Gosling W.D.

2010 Nonlinear climate change and Andean feedbacks: an imminent turning point? *Global Change Biology* 16: 3223-3232.

Dejoux C. & Iltis A.

1992 Lake Titicaca - A Synthesis of Limnological Knowledge. Kluwer Academic Publishers, 626 p.

Duwig C., Archundia D., Lehembre F., Spadini L., Morel M.C., Uzu G., Chincheros J., Cortez R. & Martins J.M.F.

2014 Impacts of anthropogenic activities on the contamination of a sub watershed of Lake Titicaca. Are antibiotics a concern in the Bolivian Altiplano? *Procedia Earth and Planetary Science* 10: 370-375.

- IFREMER - Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
 2018 Equivalent habitant. [05/12/2018]. http://envlit.ifremer.fr/infos/glossaire/e/equivalent_habitant
- 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>
- Jiménez-Muñoz J.C., Llinares Llorens M., Ruiz-Verdú, Tenjo Gil C., Delegido Gómez J., Sobrino Rodríguez J.A. & Moreno Méndez J.
 2015 Propiedades ópticas y térmicas del Lago Titicaca a partir de imágenes Landsat-8 y MODIS. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE, 8 p.
- Lazzaro X.
 1981 Biomasses, peuplements phytoplanktoniques et production primaire du Lac Titicaca. Rev. Hydrobiol. Trop. 14(4): 349-380.
 1985 Poblaciones, biomasas y producciones fitoplanctónicas del Lago Titicaca. Ecología en Bolivia. 7: 23-63.
 2016 Red de Monitoreo IRD-UMSA (2016) de la calidad de agua del Lago Menor del Titicaca Elaborada por Xavier Lazzaro (IRD/BOREA) y el Equipo Boliviano UMSA/IE* en coordinación con Cesar Gamarra Peralta (IMARPE/LCP) para la Expedición Binacional ECERP del 04-14/08/2016, 85 estaciones limnológicas. Con mapas y posiciones geográficas (GPS). 4 p.
 2018 Justificativas. In: Coloquio Internacional del Lago Titicaca - Un solo lago con dos países - Consecuencias del deterioro del ecosistema en el bienestar humano - Dialogo entre científicos, tomadores de decisión y sociedad civil. En el ámbito de los 50 años de cooperación científica del IRD en Bolivia, 6 p.: <http://www.bolivia.ird.fr/toda-la-actualidad/coloquios-y-manifestaciones/coloquio-internacional-el-lago-titicaca-un-solo-lago-con-dos-paises>
- Lazzaro X., Alcoreza Ortiz M.P., Lanza Aguilar W.G., Flores Chambi A.J., Fernandez Paz L.A., Fernandez Saavedra P.E., Loayza Torrico E.Z. & Ibañez Luna C.
 2016 Guía metodológica de toma y análisis de muestras hidrobiológicas, con énfasis en el Lago Titicaca. VRHR/MMaYA, ie/umsa, borea/ird. La Paz, Bolivia, Diciembre 2016, 100 p.
 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, IE/UMSA, BOREA /IRD. La Paz, Bolivia, Mayo 2017, 90 p.

Lazzaro X. & Point D.

2011 Evolución del estado limnológico del Lago Titicaca. I Simposio internacional “El estado del Lago Titicaca - Desafíos para una Gestión basada en el Ecosistema”. Hotel José Antonio, 19 al 21 de octubre de 2011, Puno, Perú.

Accelerated eutrophication in Lake Titicaca: historical evolution, mechanisms, monitoring, and observatory approach https://www.researchgate.net/publication/304588324_Accelerated_eutrophication_in_Lake_Titicaca_historical_evolution_mechanisms_monitoring_and_observatory_approach [accessed Oct 22 2018].

MJ'Ecko - Mission Jeunes Experts

2018 Bouhassoun A., Chaptal E., Février J., François R., Hesling P., Ménage C., Picard L., Plessis M., Poirier R. & Zipper D. Diagnostic interdisciplinaire du Lac Titicaca (Bolivie - Pérou): Impacts des changements globaux sur la qualité de l'eau et les activités productives - Situation actuelle, scénarios et modes de récupération durable des zones les plus vulnérables. Rapport de fin de misión Jeunes Experts - MJ'Ecko, 130 p. Maître de stage: Dr. Xavier Lazzaro (BOREA/IRD). Tuteur de stage: Dr. Smaïl Slimani. ISTOM - Ecole supérieure d'agro-développement international. 4, rue Joseph Lakanal. 49000 Angers, France, www.istom.fr/

MMaYA - Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia

2009 Libro rojo de la fauna silvestre de vertebrados de Bolivia. Viceministerio de Medio Ambiente, Biodiversidad y Cambios Climáticos, 571 p.

Molina C.I., Lazzaro X., Guédron S. & Achá D.

2017 Contaminación de la Bahía de Cohana, Lago Titicaca (Bolivia): Desafíos y oportunidades para promover su recuperación. *Ecología en Bolivia* 52(2): 65-76.

New M., Liverman D., Schroeder H. & Anderson K.

2011 Correction for New et al., Introduction. Four degrees and beyond: the potential for a global temperature increase of four degrees and its implications. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 369: 6-19.

O'Reilly J.E., Maritorena S., Siegel D., O'Brien M., Toole D., Greg Mitchell B., Kahru M., Chavez F., Strutton P., Cota G., Hooker S., McClain C., Carder K., Muller-Karger F., Harding L., Magnuson A., Phinney D., Moore G., Aiken J., Arrigo K., Letelier R. & Culver M.

2000 Ocean color chlorophyll-*a* algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In: O'Reilly J.E. and 24 coauthors 2000: SeaWiFS Post-launch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Tech. Memo. 2000-206892, Vol. 11, S.B. Hooker & E.R. Firestone, Eds., NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 9-23. 2000.

Pereira Sandoval M.A.

2015 Estudio multitemporal mediante teledetección de la eutrofización del la Bahía Cohana. Lago Titicaca - Bolivia. Universidad de Valencia, España. Instituto de Física, Máster en Teledetección, 45 p.

PointD., Lazzaro X. & Groleau A.

2013 Titicaca Sensors (TTKKS) - A joint IRD-IPGP research initiative in situ biogeochemical and ecological sensing of Lake Titicaca. IRD/GET-BOREA & IPGP/LGE, 17 p.

Pouilly M., Lazzaro X., Point D. & Aguirre M. (Eds.)

2014 Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos e hidrobiológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca. Quito (ECU); La Paz : UICN; IRD, 320 p. ISBN 9789997441843.

Ronchail J., Espinoza J.C., Labat D., Callède J. & Lavado W.

2014 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el siglo XX. In: Pouilly M., Lazzaro X., Point D. & Aguirre M. (eds.) Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos e hidrobiológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca: 1-13. IRD, UICN, Quito, Ecuador, 320 p. www.uicn.org/sur

Ruiz-Verdú A., Jiménez J.C., Lazzaro X., Tenjo C., Delegido J., Pereira M., Sobrino J.A. & Moreno J.

2016 Comparaison of MODIS and Landsat-8 retrievals of chlorophyll-*a* and wáter temperatura over Lake Titicaca. EEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 10-15 July 2016. DOI:10.1109/IGARSS.2016.7730993

Scheffer M.

1998 Ecology of Shallow Lakes. Chapman & Hall, Population and Community Biology Series 22, 357 p.

Tenjo C., Ruiz-Verdú A., Delegido J., Peña R. & Moreno J.

2014 Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes Landsat-8. Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia.

TERRASIGNA

2017 Earth Observation (EO) Services and Applications Based on Satellite Data. Lake Titicaca, Lago Menor - Algal Bloom event - 24.03.2015. www.terrasigna.com

Vuille M., Carey M., Huggel C., Buytaert W., Rabatel A., Jacobsen D., Soruco A., Villacis M., Yarleque C., Elison Timma O., Condom T., Salzmann N. & Sicarte J.-E.

2018 Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes - Impacts, uncertainties and challenges ahead. Earth-Science Reviews 176: 195-213.

Identificación y cuantificación de las poblaciones afectadas por eutrofización en el Lago Menor del Titicaca, a partir de técnicas de Teledetección

Inez Ana Villca Calle

Resumen

Para determinar que un cuerpo de agua se encuentra en estado de eutrofización, se ha considerado varios indicadores siendo los más significativos la presencia de nitratos, fosfatos y clorofila. Los dos primeros son el resultado de la contaminación antrópica que sirve de alimento para el fitoplancton; en el entendido de que las algas son el principal componente del fitoplancton y que estas contienen clorofila. Diversos estudios demostraron que se puede obtener el contenido de clorofila-a en el agua con imágenes de satélite (Tenjo, 2014). En este caso se aplicó técnicas de teledetección comparando los datos de campo con la imagen LANDSAT 8. Para identificar las poblaciones afectadas por eutrofización se utilizó un modelo matemático para el procesamiento de las imágenes de satélite.

Palabras clave: eutrofización, imágenes de satélite.

Abstract

To determine that a body of water is in a state of eutrophication, several indicators have been considered, the most significant being the presence of nitrates, phosphates and chlorophyll. The first two are the result of anthropic contamination that serves as food for phytoplankton, and algae are the main component of phytoplankton that contain chlorophyll. Several studies show that the chlorophyll-a content in water can be obtained with satellite images (Tenjo, 2014).

In this case, remote sensing techniques are applied to compare the field data with the LANDSAT 8 image. To identify the populations affected by eutrophication, a mathematical model was used for the processing of satellite images.

Keywords: eutrophication, satellite images.

Introducción

El Lago Titicaca por su posición geográfica es el lago más alto navegable del mundo. Las poblaciones de sus orillas tienen su sustento económico de los recursos naturales que genera el lago. Los efectos del cambio climático como ser el aumento de la temperatura y precipitación extrema afectan a la pesca, agricultura, ganadería, lechería, etc. A esto se añade las actividades antrópicas, la contaminación a través de la agricultura por el uso excesivo de fertilizantes que al precipitar estos escurren en el lago. El desecho de basura y aguas domésticas residuales son vertidos en los ríos. Todos estos factores han contribuido al proceso de contenido excesivo de nutrientes en el Lago Menor del Titicaca, este proceso se lo denomina eutrofización.

Área de estudio

El área de trabajo de este estudio es el Lago Menor del Titicaca, su profundidad máxima es de 40 metros en la fosa de Chua y hasta 0.50 metros en la parte central del sector de Bahía Cohana que conecta con la cuenca Katari. Los sectores que se han catalogado fueron definidos por transectos en la parte Norte del Lago Menor navegando por los siguientes puntos:

Tabla 1
Coordenadas para expedición

	Coordenadas	
Punto	Latitud	Longitud
P1	-16.303503°	-68.665527°
P2	-16.303954°	-68.658791°
P3	-16.305001°	-68.650356°
P4	-16.311457°	-68.639068°
P5	-16.304669°	-68.627510°
P6	-16.301309°	-68.622907°
P7	-16.278446°	-68.610944°
P8	-16.273513°	-68.607739°
P9	-16.232632°	-68.606974°

Metodología y materiales

El trabajo se realizó en dos etapas: etapa 1 que es la etapa de campo, y etapa 2 que consiste en el tratamiento de imágenes de satélite aplicando algoritmos para la estimación de clorofila-a en la imagen satelital apoyado por análisis de firmas espectrales.

Etapas 1: trabajo de campo

Se ha escogido la fecha de expedición al Lago Menor del día 1 de abril de 2018, día de paso de satélite Landsat 8 OLI, con el objetivo de calibrar los datos tomados en campo con el espectroradiómetro HandHeld 2¹. El espectroradiómetro permite obtener la reflectancia de la superficie, en este caso del cuerpo de agua; entre longitudes de ondas entre 325 - 1075 nm., lo que permite ver la reflectancia de la misma en la longitud de onda de la banda verde, donde refleja la clorofila. Para la toma de datos de clorofila-a se utilizó una sonda denominada Fluoro-Probe BBE² que realiza la medición de la concentración por fluorescencia in situ, también realiza la medición de 4 clases taxonómicas de fitoplancton: Diatomeas y Dinoflagelados (sin distinción), Clorofitas (algas verdes), Criptofitas (pequeñas algas unicelulares), y Cianobacterias (algas verde - azuladas) (Lazzaro, 2017).

Dicho de otra forma: el agua ofrece importantes concentraciones de clorofila, la reflectividad en el azul (400 a 500 nm) tiende a descender, aumentando en el verde (500 a 600 nm), esto permite establecer una clara correlación, de signo negativo entre la reflectividad del agua en la banda azul y el contenido de clorofila, lo que facilita localizar concentraciones de algas y así poder estudiar procesos de eutrofización. (Chuvieco, 2002).

Se tomaron los siguientes datos (Tabla N° 2 y N° 3), en los nueve puntos que se menciona en el subtítulo anterior:

1 <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/asd-range/fieldspec-range/handheld-2-hand-held-vnir-spectroradiometer>

2 <https://www.bbe-moldaenke.de/en/products/chlorophyll/details/fluoroprobe.html>

Tabla 2
Datos tomados en campo

Estación	Hora	Coordenadas		Profundidad (m)	Espectroradiómetro (N° de firmas espectrales)
		Latitud S°	Longitud O°		
P1	10:45	16.303503°	68.665527°	2,1	402 - 408
P2	12:15	16.303954°	68.658791°	1,8	409 - 413
P3	13:06	16.305001°	68.650356°	1,9	414 - 418
P4	13:40	16.311457°	68.639068°	1,1	419 - 423
P5	14:15	16.304669°	68.627510°	1,3	424 - 428
P6	14:45	16.301309°	68.622907°	1,7	429 - 433
P7	15:27	16.278446°	68.610944°	1,9	434 - 439
P8	16:17	16.273513°	68.607739°	2	440 - 446
P9	17:04	16.232632°	68.606974°	3,6	447 - 452

Tabla 3
Datos de clorofila-a (um/l)

Estación	Clorofila-a superficial	Clorofila-a máxima	Clorofila-a media
P1	2,79	5,32	4,03
P2	3,46	3,51	3,23
P3	1,96	2,67	2,04
P4	4,80	7,63	4,94
P5	2,89	3,15	3,03
P6	3,65	7,55	3,65
P7	2,18	2,40	2,23
P8	2,93	3,13	2,74
P9	3,41	3,93	3,60

Etapa 2: procesamiento de imágenes de satélite, aplicación de algoritmo y análisis estadístico

Imágenes de satélite

Las imágenes del satélite Landsat 8 del sensor OLI, mismo que está en órbita desde febrero de 2003, tiene una resolución espacial de 30 metros, para las bandas 1,2,3,4,5,6,7 y 9; y para la banda 8 (pancromática) de 15 metros de resolución, su resolución temporal es de 16 días, lo que permite obtener estos productos cada 16 días. (Productos LDCM, Landsat 8, 2013). Para este estudio se ha obtenido la imagen satelital del mismo día de expedición (01/04/2018) con un path 01 row 071, de la aplicación Earth Explorer del USGS sigla en inglés (Servicio Geológico de los Estados Unidos) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).

Correcciones

Las imágenes Landsat 8 vienen corregidas geométricamente lo que indica que los puntos georreferenciados donde se tomaron los datos se ajustan a sus coordenadas.

Para la corrección radiométrica, que consiste en convertir los valores de niveles digitales de la imagen a valores de reflectancia; se aplicó la conversión en el techo de la atmosfera (TOA) usando para ello los coeficientes de reflectancia reescalados, suministrados en el archivo de metadatos MTL de la imagen. Para ello se ha utilizado la siguiente ecuación proporcionada por los productos *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM) de Landsat 8:

$$P\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p$$

Para la corrección atmosférica se ha empleado la conversión a reflectancia TOA con corrección angular donde el cálculo de la reflectancia real de una cubierta captada por un sensor espacial está condicionado por el comportamiento de la atmósfera, así como del ángulo de observación.

De esta manera, la reflectancia en el techo de la atmosfera TOA con una corrección para el ángulo solar, se propone la siguiente ecuación:

$$p\lambda = \frac{\lambda'}{\cos(\theta_{SZ})} - \frac{\lambda'}{\sin(\theta_{SE})}$$

Aplicación del Algoritmo

Para este trabajo se utilizó el algoritmo propuesto por Tenjo (2014), basado en el modelo de transferencia radiativa para agua HydroLight y validado con una extensa base de datos de espectros de reflectividad. Para la estimación de clorofila, se propone el siguiente algoritmo (Tenjo, 2014):

$$(\text{Chl-a}) = 4.46 (R560/R440) - 0.55 \text{ (mg/m}^3\text{)}$$

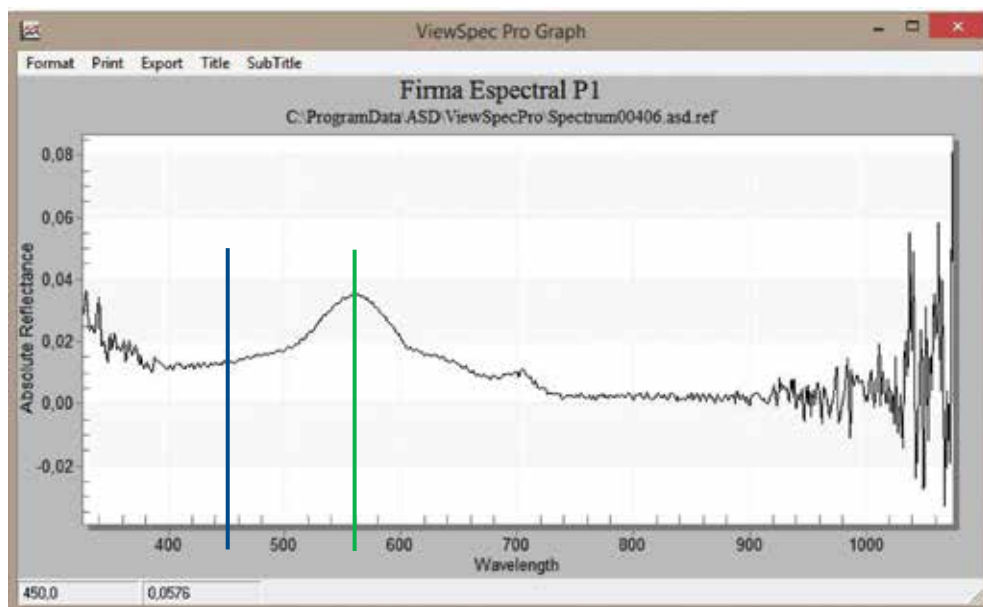
Dónde: los valores 4.46 y -0.55 son constantes, y R560 corresponde a la banda verde, y R440 a la banda azul por el rango de longitud de onda. De acuerdo a las variables que se requiere para la aplicación del algoritmo, se trabajó específicamente con las bandas 2 - azul que corresponde a una longitud de onda de 430 a 510 nm y la banda 3 - verde correspondiente a una longitud de onda 530 a 590 nm.

Espectrorradiómetro

Los datos que ofrece el espectrorradiómetro de campo son firmas espectrales que son procesadas y visualizadas en el software ViewSpecPro. Estos datos se analizaron en el software ENVI 5, con el objetivo de extraer firmas espectrales obtenidas en cada punto muestreado.

Como es de suponerse, cada firma espectral eleva su reflectancia en la longitud de onda de la banda verde y disminuye en la banda azul (figura 1):

Figura 1
Firma espectral de P1



El análisis de datos consistió en extraer el valor del centro de banda para ambas bandas (azul y verde). Para conocer cual valor debe ser tomado, teniendo en cuenta que se ha trabajado con imágenes Landsat 8, se ha acudido nuevamente a los productos LDCM:

Tabla 4
Valor del centro de banda de la imagen de satélite Landsat 8

Nº de Referencia de la banda	Descripción de la banda	Centro de Banda (nm)
1	Aerosol Costero (Operational Land Imager (OLI))	433
2	Azul (OLI)	482
3	Verde (OLI)	562
4	Rojo (OLI)	655
5	Infrarrojo cercano (NIR) (OLI)	865
6	Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1 (OLI)	1610
7	SWIR 2 (OLI)	2200
8	Pancromático (OLI)	590
9	Cirrus (OLI)	1375
10	Sensor Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10800
11	TIRS 2	12000

Fuente: Productos LDCM, Landsat 8.

Centros de banda para cada firma espectral obtenidos en los puntos de muestreo.

Tabla 5
Valor de centro de banda

Estación	Nº FIRMA	BANDA 2	BANDA 3
P1	406	0,0166	0,0348
P2	411	0,0146	0,0328
P3	416	0,0227	0,0386
P4	421	0,0227	0,0493
P5	426	0,0164	0,0355
P6	431	0,018	0,041
P7	437	0,0096	0,0221
P8	443	0,0213	0,0481
P9	449	0,0149	0,024

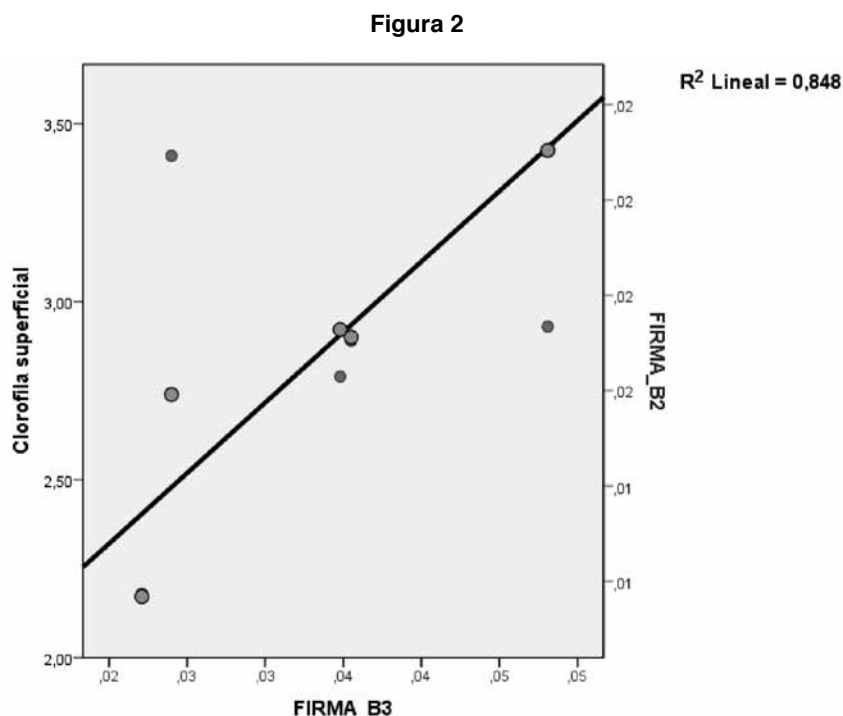
Análisis estadisco

A partir de los datos obtenidos se trata de redefinir las relaciones entre las reflectividades en las respectivas bandas y firmas espectrales con el parámetro a estudiar (clorofila-a). Empleando un tratamiento estadístico se ha elegido el modelo que ha ofrecido los mejores resultados.

Resultados

Comparación de datos para los datos de clorofila tomados en campo y firmas espectrales

Después de un análisis estadístico se ha hallado la mejor relación en una regresión con un $R^2 = 0.848$, entre los datos de clorofila-a superficial tomadas en campo y los datos de firmas espectrales con ambas bandas simultáneamente (Figura 2).



Representación de los valores utilizados para la modelización de clorofila (mg/l) respecto a la reflectividad de las firmas espectrales en ambas bandas simultáneamente se superpone mejor el ajuste por regresión a los datos.

Es importante hacer notar que para el análisis estadístico se ha anulado a los valores más altos de contenido de clorofila-a superficial, ya que estos no permitían hallar una regresión adecuada.

Aplicación de algoritmo

En la aplicación del modelo propuesto se ha obtenido un mapa preliminar de contenido de clorofila-a en cada punto muestreo, se obtiene el valor del pixel del punto georreferenciado, se realiza la calibración de estos resultados con los

tomados en campo. Como se observa en la tabla N° 6 estos resultados no coinciden o al menos no se acercan a los tomados en campo. Es importante hacer notar que los datos del algoritmo están en unidades mg/m3 y los datos que fueron tomados en campo en um/l, aun así son equivalentes.

Tabla 6
Comparación de datos algoritmo y clorofila

Estación	Cl-a Superficial (um/l)	Valores Algoritmo, Cl-a (mg/m3)
P1	2,79	5,65113
P2	3,46	5,54778
P3	1,96	5,35504
P4	4,80	5,35995
P5	2,89	5,18775
P6	3,65	5,25266
P7	2,18	5,31755
P8	2,93	5,12872
P9	3,41	4,51335

Mapa 1
Datos preliminares de la aplicación de algoritmo



A razón de los resultados de la calibración, se ha realizado un análisis estadístico a partir de los datos de clorofila-a.

Variables introducidas/eliminadas^a

Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	B3_B2REF ^b	.	Introducir

- a. Variable dependiente: chlsuper
b. Todas las variables solicitadas introducidas.

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,684 ^a	,468	,290	,37055

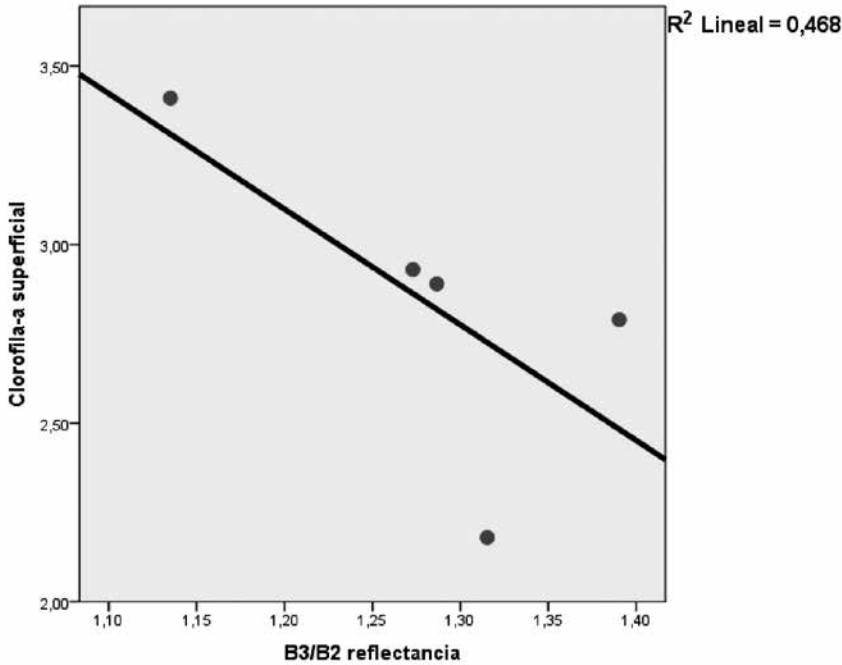
- a. Variables predictoras: (Constante), B3_B2REF.

Coefficientes^a

Modelo B		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		Error típ.	Beta			
1	(Constante)	6,984	2,558		2,730	,072
	B3_B2REF	-3,237	1,994	-,684	-1,623	,203

- a. Variable dependiente: chlsuper.

Figura 3



Representación de los valores utilizados para la modelización de clorofila (mg/l) respecto al resultado de la división de reflectividades de las bandas B3/B2; se superpone mejor el ajuste por regresión a los datos

De acuerdo al análisis de regresiones se ha elegido aquel modelo que ha ofrecido los mejores resultados con $R^2=0.468$ que se acerca al 50% para la aplicación de un nuevo algoritmo

$$(\text{Chl-a}) = - 3.23 (\text{Bverde/Bazul}) + 6.98 (\text{mg/m}^3)$$

Con el nuevo algoritmo obtenido se realizó el mapa de contenido de clorofila en el Lago Menor del Titicaca. Los nuevos datos muestran que el contenido de clorofila dentro del lago llega solo a niveles mesotróficos y no así hasta cuerpos de agua eutrofizados.

A partir de estos datos generados se identificó y cuantificó las poblaciones afectadas de acuerdo al estado trófico en que se encuentra el cuerpo de agua al que las poblaciones ribeñas están expuestas. Después del estado mesotrófico, el siguiente estado es el eutrófico, por lo que gran parte de las poblaciones están expuestas. En pocos años más, si continúa la contaminación, los cuerpos de agua serán eutrofizados.

Las poblaciones analizadas fueron las que se localizan hasta 2 km de la orilla, esta selección se realizó en una escala de trabajo 1:50.000. Las poblaciones a tal distancia de la orilla como por ejemplo Bahía Cohana, se han visto afectadas por eutrofización.

Para la clasificación trófica del cuerpo de agua se ha acudido a los valores límite de la OCDE (Organización para la Cooperación de Desarrollo Económico)

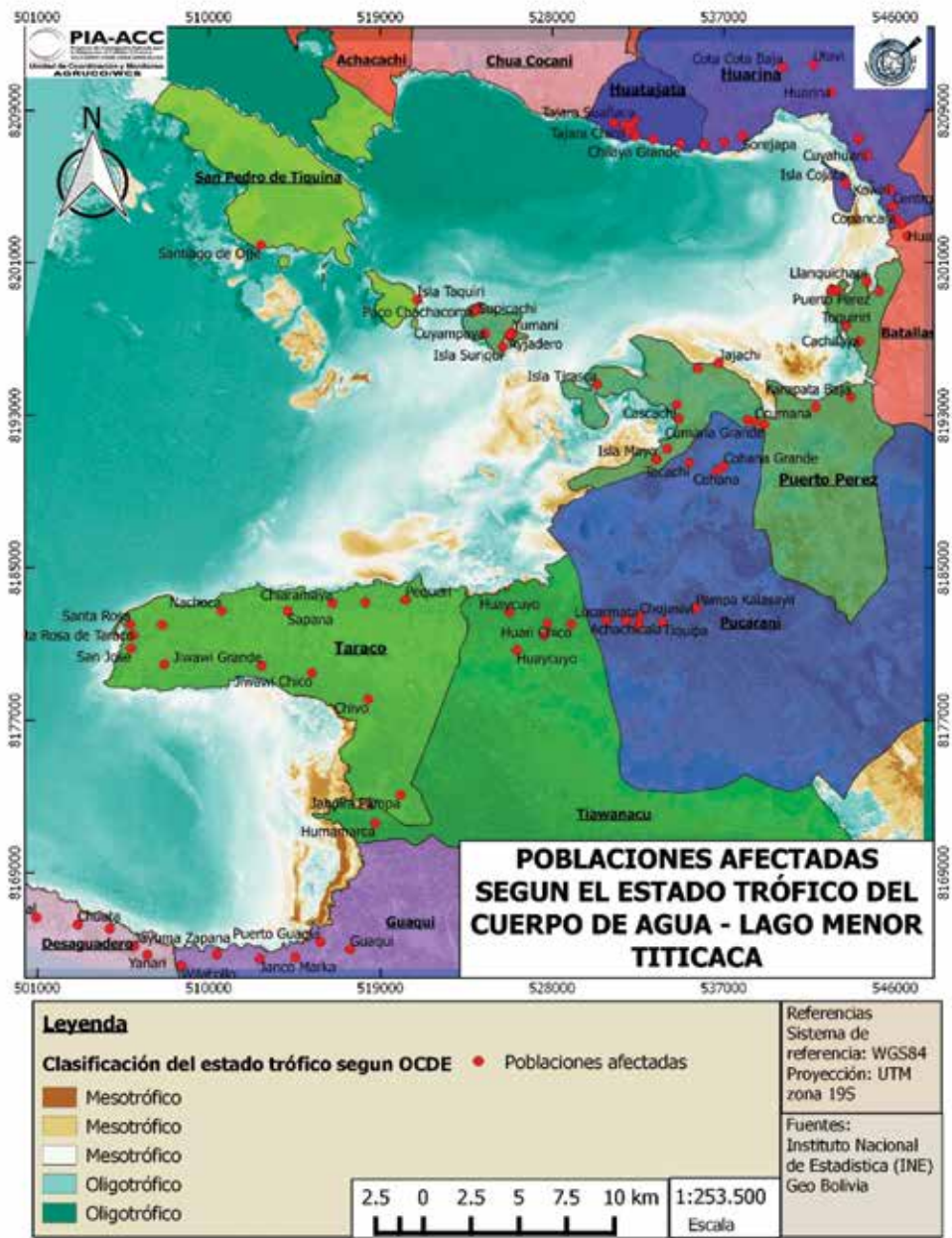
Tabla 7
Categorización de estado trófico de cuerpo de agua de la OCDE

Categoría trófica	Cl-a (um/l) media	Cl-a (um/l) máxima
Ultraoligotrófico	< 1	< 2,5
Oligotrófico	< 2,5	< 8
Mesotrófico	2,5 - 8	8,0 - 25
Eutrófico	8,0 - 25	25,0 - 75
Hipertrófico	> 25	> 75

Conclusiones

En cuanto a los resultados estadísticos obtenidos en la regresión de clorofila-a superficial en relación a los valores de centro banda de las firmas espectrales, se categoriza como muy buena pues su $R^2=0.848$ indica que más del 80% de la firma espectral de la banda 3 va influenciar en el valor de clorofila superficial. Es decir que los datos del espectroradiómetro pueden ser usados para encontrar concentraciones de clorofila-a mediante técnicas de clasificación digital de imágenes satelitales.

Mapa 2
Poblaciones afectadas según estado trófico de cuerpo de agua



El modelo propuesto para poder cartografiar el contenido de clorofila no ha sido satisfactorio. Los datos que se han obtenido de cada punto no coinciden con los datos obtenidos en campo. Por esta razón se han realizado diferentes pruebas estadísticas con diferentes variables, entre datos de reflectividad de las bandas de la imagen y los contenidos de clorofila-a de campo en máxima, media y superficial. Esta última fue la que más alto valor de R2 ofreció y ayudó a la construcción del nuevo modelo para realizar el mapa de contenido del estado trófico.

Finalmente se obtuvo un mapa de contenido del estado trófico. Este resultado final es tan solo un aproximado de las poblaciones que en un futuro cercano pueden ser afectadas por un alto grado de eutrofización. Se han identificado a 93 poblaciones ribereñas que están expuestas.

Bibliografía

Centro de Investigación y Desarrollo CIAF

2013 “*Descripción y corrección de productos Landsat 8, LDCM*”, Bogotá, Colombia.

Chuvieco, E.

2002 “*Teledetección Ambiental*”. Barcelona, España: Ariel

Fontúrbel Rada F.

2003 (Diciembre, 2003), *Algunos criterios biológicos sobre el proceso de eutrofización a orillas de seis localidades del Lago Titicaca.*, Ecología Aplicada, 2(1), 75-79.

Jiménez Muñoz J.C., Llinares Llorens M., Ruiz Verdú A., Tenjo Gil C.

2015 (Abril, 2015), “*Propiedades ópticas y térmicas del Lago Titicaca a partir de imágenes Landsat-8 y MODIS*”, Análisis del XVII simposio Brasileiro de sensoramiento remoto, 3860-3867.

Lazzaro X.

2017 (Noviembre, 2017), “*Misión de calibración de imágenes Landsat-8 con datos de campo sincrónicos a su paso para la evaluación de la concentración de la clorofila-a en la columna de agua de la región norte del Lago Menor*”.

Recuperado de: Molina C., Lazzaro X., Guédron S.

2017 (Septiembre, 2017), *Contaminación de la Bahía de Cochana, Lago Titicaca.*, Ecología en Bolivia, 52(2), 65 - 76.

Tenjo, C., Ruiz, A., Delegido, J., Peña, R., Moreno, J.

2014 “*Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes Landsat 8*”. Revista UD y la Geomántica, (9), 37-46.

Pérez, D.

2007 “*Introducción a los Sensores Remotos - Aplicaciones en Geología*”. Recuperado de: <http://studylib.es/doc/4862480/introducci%C3%B3n-a-los-sensores-remotos>

Pérez, Uriel

2005 “*La Percepción Remota*”, Universidad Tolima. P. 4. Ibagué. Recuperado de: http://desarrollo.ut.edu.co/tolima/hermesoft/portal/home_1/rec/arc_5995.pdf

Análisis de la concentración de fósforo y clorofila en tres niveles de espectro de radiación satelital: alto, medio y bajo emitida por fitoplancton en el Lago Menor del Lago Titicaca

Claudia Adriana Piza Paz, Xavier Lazzaro, Javier Nuñez Villalba, Ines Villca, Daniel Callisaya, Verónica del Carpio, Jhasmin Duarte, Janina Espinoza, Wilson Mamani

Resumen

El Lago Menor del Lago Titicaca presenta problemas de contaminación orgánica. Las aguas residuales que ingresan al lago está provocando el enriquecimiento de nutrientes y proliferación de fitoplancton (algas), este proceso es conocido como Eutrofización. El estudio se enfoca en determinar las concentraciones de clorofila del fitoplancton como un indicador de eutrofización y determinar los principales factores que influyen su concentración. Se determinó con equipo analítico (BBE) y satelital Landsat 8 la concentración de clorofila, la concentración de fósforo total y soluble en laboratorio y la profundidad de atenuación de la radiación solar con espectroradiómetro. Los resultados mostraron que los principales factores que influyen la concentración de clorofila son la concentración de fósforo total y la radiación solar, en áreas del Lago Menor: Bahía de Cohana, Huarina, Huatajata, Chua, Patapatani, Kosecani. Donde en algunos sectores se determinó mayor concentración de estos parámetros y tipos de algas presentes.

Palabras clave: *Contaminación orgánica, Eutrofización, fitoplancton, clorofila, fósforo total, radiación solar, Lago Menor del Lago Titicaca.*

Abstract

The Minor Lake of Titicaca Lake has problems of organic pollution. The wastewater that enters to the lake is causing the enrichment of nutrients and the proliferation of phytoplankton (algae), this process is known as Eutrophication. The study focuses on determining phytoplankton chlorophyll concentrations as

an indicator of eutrophication and determining the main factors that influence its concentration. The concentration of chlorophyll was determined with analytical equipment (BBE) and satellite Landsat 8, the concentration of total and soluble phosphorus in the laboratory and the depth of attenuation of solar radiation with spectroradiometer. The results showed that the main factors that influence the concentration of chlorophyll are the concentration of total phosphorus and solar radiation, in areas of Minor Lake: Bahía de Choana, Huarina, Huatajata, Chua, Patapatani, Kosecani. Where in some sectors it was determined a higher concentration of these parameters and types of algae present.

Key words: Organic pollution, Eutrophication, phytoplankton, chlorophyll, total phosphorus, solar radiation, Minor Lake of Titicaca Lake.

Introducción

El altiplano boliviano se considera una zona geográfica de particular interés, por presentar la mayor extensión de agua a una altura de más de 3800 m.s.n.m. y tener la superficie salada más grande en la tierra (Ribstein *et al.* 1995). Las cordilleras encierran una extensa planicie que alberga a la cuenca endorreica del altiplano, cuyo elemento central está constituido por el sistema TDPS conformado por el Lago Titicaca, río Desaguadero, el Lago Poopó y salares (UNEP 1996). El sistema TDPS está sujeto a diferentes tipos de contaminación. Enfrentan principalmente dos tipos. Una es contaminación por metales pesados y por contaminación orgánica (Rubén *et al.* 1995; UNEP 1996).

La contaminación orgánica en el altiplano boliviano ejerce una fuerte influencia en el Lago Titicaca, debido a las descargas de residuos orgánicos en el mismo. Este mecanismo puede llevar a un proceso de eutrofización del lago, el cual es un problema causado por la descomposición de la materia orgánica y enriquecimiento de nutrientes (Khan *et al.* 2014), que afectará la calidad de vida de los seres vivos (UNEP 1996; Ribera 2010).

Entre los nutrientes que determinan el crecimiento de las algas, se encuentra el fósforo y nitrógeno. Estos limitan la floración algal sobre ecosistemas acuáticos (Kim *et al.* 2001), que provienen de la descomposición de materia orgánica disponible, cuyas características pueden llegar a producir el proceso de eutrofización, lo cual conlleva a una disminución en la concentración de oxígeno disuelto y cambios fisicoquímicos que puede provocar severos problemas medioambientales y daño a la biodiversidad del ecosistema. Es por esto, el presente estudio se enfoca en analizar la concentración de clorofila presente en algas del Lago Menor del Titicaca, área contaminada (Archundia *et al.* 2017), para evaluar los principales factores que influyen en el crecimiento algal, de acuerdo a la radiación satelital LANDSAT 8 emitida por fitoplancton y datos analíticos en la determinación de clorofila y fósforo.

Objetivos

Objetivo general

- Analizar la concentración de fósforo y clorofila en tres niveles de espectro de radiación satelital emitida por fitoplancton en el Lago Menor del Lago Titicaca.

Objetivos específicos

- Analizar la concentración de clorofila, fósforo total y soluble.
- Determinar cuales variables tienen mayor influencia en la concentración de clorofila.
- Analizar la relación que existe entre los niveles de concentración de clorofila por equipo analítico y por imágenes satelitales Landsat 8.

Área de estudio

El área de estudio se realizó en el Lago Menor del Lago Titicaca, en puntos establecidos en áreas del lado norte del Lago Menor del Titicaca, cercanas a Huatajata, Huarina, Patapatani, Chua y Bahía de Cohana (Fig. 1-2).

Figura 1
Área de investigación y muestreo de clorofila, fósforo y parámetros fisicoquímicos en el Lago Menor del Lago Titicaca en el año 2018



Figura 2
Áreas de investigación en el Lago Menor del Lago Titicaca



(Izq.: Huatajata, Der.: Bahía de Cohana) en el año 2018.

Métodos

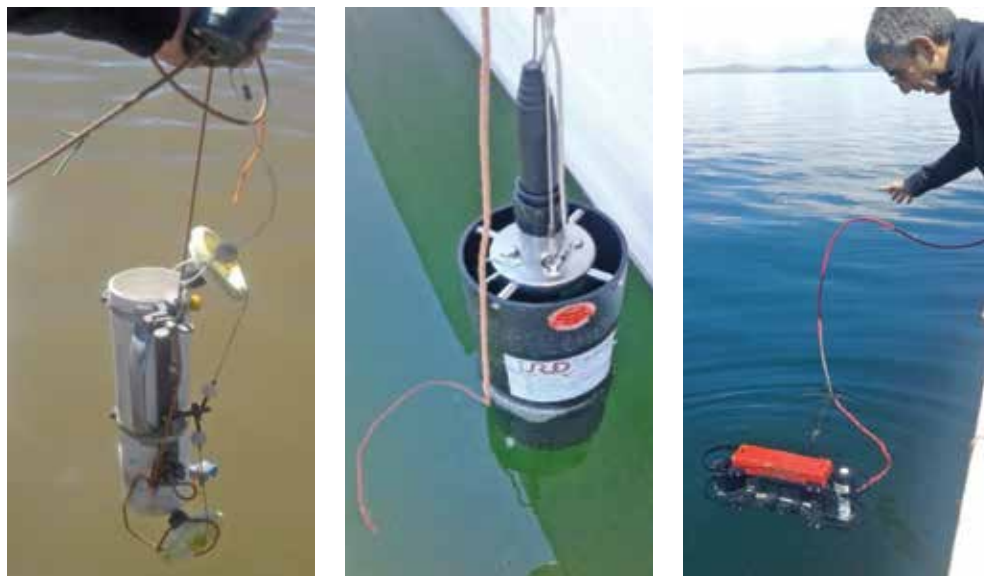
De los puntos de muestreo establecidos a través de un tubo colector de agua tipo Niskin (Colector de 5 L) se colectaron las muestras de agua de 1,5 m de profundidad para análisis de fósforo total, soluble y fitoplancton (Fig. 3). Se obtuvieron las muestras en frascos de plástico de 250 ml, se guardaron refrigerados y de 150 ml para el posterior análisis de fitoplancton. Posteriormente las muestras para análisis de fósforo se llevaron para su análisis al Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA).

Para el monitoreo de clorofila en cada uno de los puntos de muestreo se sumergió el equipo Fluoro Probe (fluorescencia de la clorofila-a, entre 4 clases de fitoplancton) a 25cm, 50cm, 75 cm, 1 m y 1,5 m desde la superficie del agua, y cada 5 metros hasta el sedimento en caso de mayor profundidad (Fig. 3). Luego se procedió a pasar la lectura del equipo a la computadora para su interpretación.

En el caso del monitoreo de radiación solar en cada uno de los puntos de muestreo se sumergió el equipo Espectroradiómetro Biospherical C-OPS (atenuación vertical de radiaciones solares UV-B 313 nm; UB-A 380 nm; PAR 412 nm y 400-700 nm) hasta la máxima profundidad en cada punto, captando el equipo cada 3 segundos la radiación en la columna de agua (Fig. 3). Luego se procedió a pasar la lectura del equipo a la computadora.

Los datos de clorofila se compararon con los valores de clorofila captados con el satélite Landsat de los mismos puntos de muestreo. En relación con el fósforo se analizó la relación con fósforo total. Los análisis estadísticos fueron mediante pruebas de regresión y correlación.

Los análisis exploratorios como gráficos de dispersión, prueba de Normalidad de Shapiro Wilk, y estadísticos descriptivos se realizaron previamente a la toma de decisión del test estadístico a utilizar. Los análisis estadísticos se evaluaron a un 95% de confianza con los programas SPSS V.23 y Excel V.2007.

Figura 3

Izq.: Colecta de muestras de agua para análisis de fósforo total, soluble y fitoplancton mediante una botella tipo Niskin (colector de 5L). Medio: Monitoreo de clorofila en perfiles de profundidad del agua, a 25cm, 50cm, 75cm, 1m, 1,5 m y cada 5m con Fluoro Probe BBE (fluorescencia de la clorofila-a, entre 4 clases de fitoplancton). Der.: Monitoreo de radiación solar UVV, UVA, PAR con Espectroradiómetro Biospherical C-OPS (atenuación vertical de radiaciones solares UV-B 313 nm; UB-A 380 nm; PAR 412 nm y 400-700 nm).

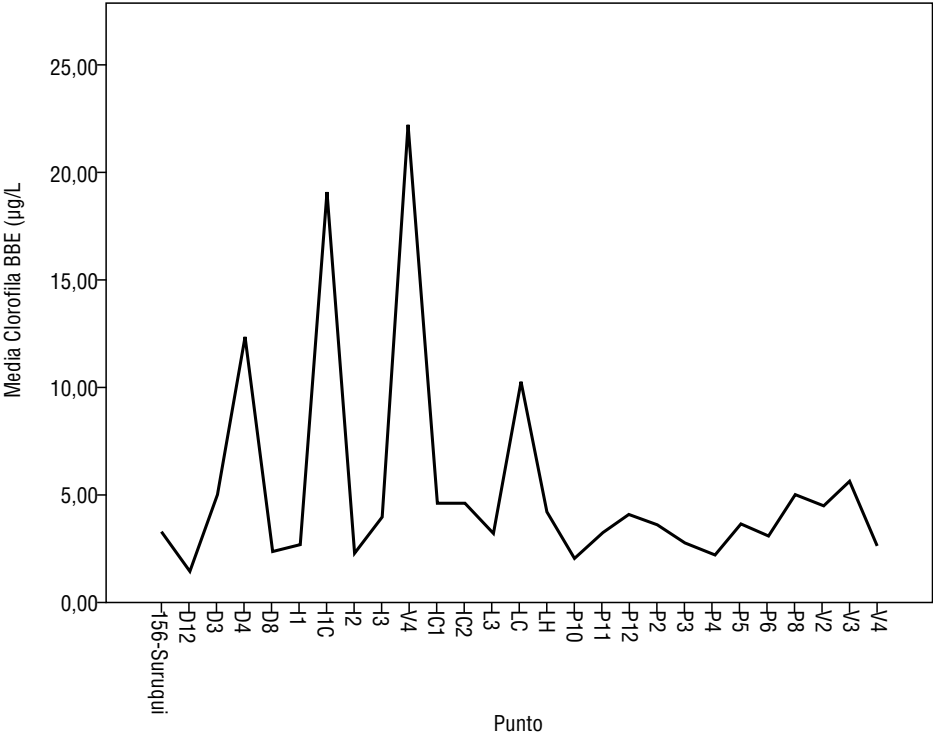
Resultados y discusión

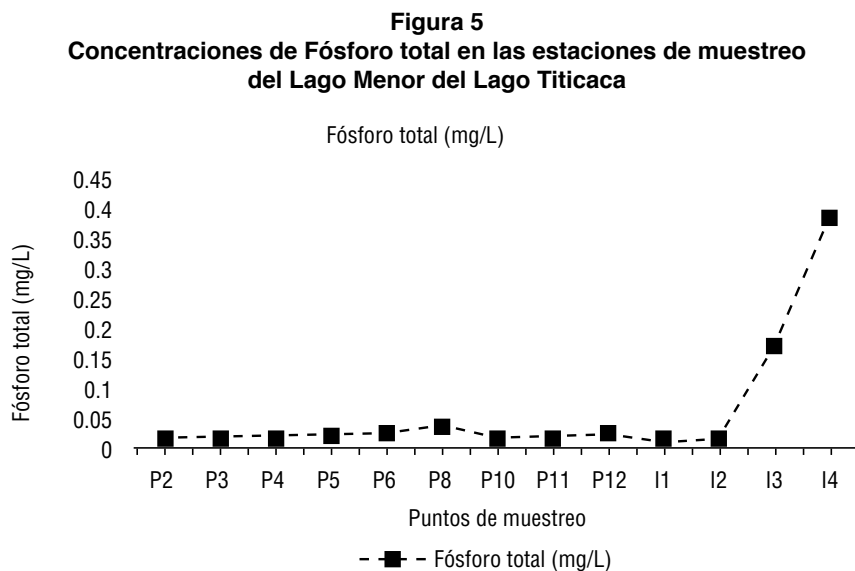
Los niveles de clorofila tomadas con el equipo analítico Fluoro probe (BBE) varían de 1,16 $\mu\text{g/L}$ a 40,31 $\mu\text{g/L}$, con valores de desviación estándar de 7,2, con un rango de 39,15. Los puntos de muestreo con mayores concentraciones de clorofila son de forma descendente: I4 (Bahía de Cohana), I1C (Bahía de Cohana), D4 (Huarina), LC (Cerca a Huatajata) (Fig. 4). La concentración de clorofila por el satélite Landsat 8 varía de 3,47 $\mu\text{g/L}$ a 6,72 $\mu\text{g/L}$, con valores de desviación estándar de 0,74, en un rango de 3,24. La concentración de fósforo total varía de 0,010 mg/L a 0,39 mg/L, con valores de desviación estándar de 0,108, en un rango de 0,38 (Tabla 1), de acuerdo a la ley del medio ambiente 1333, estos valores se encuentran en la categoría A (más baja), con las concentraciones más altas de forma descendente: I4 (Bahía de Cohana), I3 (Bahía de Cohana) (Fig. 5). Los resultados de fósforo soluble están por debajo del límite de cuantificación de <0,010. El promedio de temperatura es 14,24 °C, y una profundidad variable de acuerdo al área del lago, así mismo en áreas de Chua con 40 m y Bahía de Cohana llega hasta los 20 cm de profundidad.

Tabla 1
Estadísticos descriptivos de las variables de estudio

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media		Des- viación estándar	Varianza
	Estadís- tico	Estadís- tico	Estadís- tico	Estadís- tico	Estadís- tico	Error estándar	Estadís- tico	Estadís- tico
Clorofila mediana BBE (µg/L)	38	39,15	1,16	40,31	5,8775	1,17167	7,22268	52,167
Chl-a Landsat8 (µg/L)	23	3,24	3,47	6,72	5,2544	,15493	,74301	,552
Fósforo total (mg/L)	13	,380	,010	,390	,05823	,030060	,108383	,012
UV-A (380 nm) Z1	26	8,32	,07	8,39	3,5869	,41781	2,13042	4,539
UV-B (313 nm) Z1	26	3,23	,04	3,27	1,4088	,15289	,77957	,608
PAR (412nm) Z1	25	10,31	1,29	11,60	5,8676	,56534	2,82671	7,990
PAR (400-700 nm) Z1	25	14,44	1,83	16,27	8,5916	,81328	4,06640	16,536
N válido (por lista)	9							

Figura 4
Concentraciones de Clorofila-a promedio en las estaciones de muestreo
del Lago Menor del Lago Titicaca





Análisis de clorofila - a ($\mu\text{g/l}$) y fósforo total (mg/l)

La concentración de fósforo total está relacionada de forma positiva a la concentración de clorofila (BBE) $R^2 = 0,592$; $F_{1,7} = 10,176$; $P = 0,015$ (Fig. 6), ambos siguen una similar tendencia en general en los puntos de muestreo (Fig. 7). Con el punto I4 (Bahía de Cohana) en particular que presenta las más altas concentraciones de clorofila y fósforo total (Fig. 8). La concentración de fósforo afecta de forma significativa en la concentración de clorofila, es decir existe un incremento de la concentración de clorofila con el incremento del mismo. El fósforo es un nutriente y limitante para la proliferación de algas en el Lago Titicaca, cuya presencia puede provenir de residuos orgánicos antropogénicos que desembocan en el Lago Titicaca (Ribera, 2010; Archundia *et al.* 2017) y ocasionar contaminación orgánica.

El aporte de residuos orgánicos en ecosistemas acuáticos puede provocar el proceso de eutrofización del ecosistema (Kim *et al.* 2001). Proceso que se caracteriza por la descomposición de la materia orgánica y enriquecimiento de nutrientes (Khan *et al.* 2014). Las descargas de residuos orgánicos e inorgánicos por crecimiento urbano de la ciudad de El Alto-Bolivia, zonas agrícolas y fuentes mineras, son principales factores que contaminan el Lago Menor del Lago Titicaca (Archundia *et al.* 2017). Los mismos autores mencionan que los principales nutrientes que causan la eutrofización de la superficie del agua son los fosfatos y nitratos. Este mecanismo de contaminación está llevando a un proceso de eutrofización del lago (Ribera 2010)

Los nutrientes como el fósforo y el nitrógeno son limitantes para el crecimiento de las algas (Kim *et al.* 2001). Es decir, la eutrofización puede ocasionar

un crecimiento indiscriminado de algas (Kim *et al.* 2001) conocido como Bloom y por la toxicidad de algunas algas provocar daños más severos en los seres vivos, como en caso que fuera por cianobacterias (Falconer *et al.* 1983; Montoya *et al.* 2014) con efectos potencialmente devastadores sobre el ecosistema, (Kelley *et al.* 2016). Lo cual tiene un mayor efecto en lagos eutróficos poco profundos, debido a la reducción temprana de oxígeno por procesos de floración algal (Chen *et al.* 2016), como es el caso en algunas áreas del Lago Titicaca.

El Lago Menor del Titicaca presenta profundidades alrededor de 1,5 m y llega hasta de 20 cm en algunas áreas de la Bahía de Cohana. En estos sectores La Fluorescencia de la clorofila-a, emitida entre 4 clases de fitoplancton (algas verdes, cianobacterias, diatomeas y criptofitas) es mayor en el área de Bahía de Cohana en relación a otras áreas del Lago Menor del Titicaca que también reciben aporte de contaminación antropogénica de residuos orgánicos como Huatajata, Huarina, Patapatani. Las algas verdes se encuentran en dominancia en el Lago Menor. En Bahía de Cohana sigue el siguiente orden descendente en dominancia: algas verdes, cianobacterias, diatomeas y criptofitas. En las otras áreas del Lago Menor el siguiente orden descendente: algas verdes, diatomeas, cianobacterias y criptofitas (Fig. 9). La Bahía de Cohana, es considerada el lugar más contaminado del lado boliviano del Lago Titicaca, por las aguas que desembocan de la cuenca Katari (Rivera 2010, Archundia *et al.* 2017), no obstante otras regiones del Lago Menor como el litoral norte y noreste urbanizado Huatajata, Huarina, Puerto Pérez también reciben descargas orgánicas de origen urbano (D. Acha 2018, com pers.).

Figura 6
Diagrama de dispersión entre Clorofila (BBE) $\mu\text{g/L}$ y Fósforo total mg/L

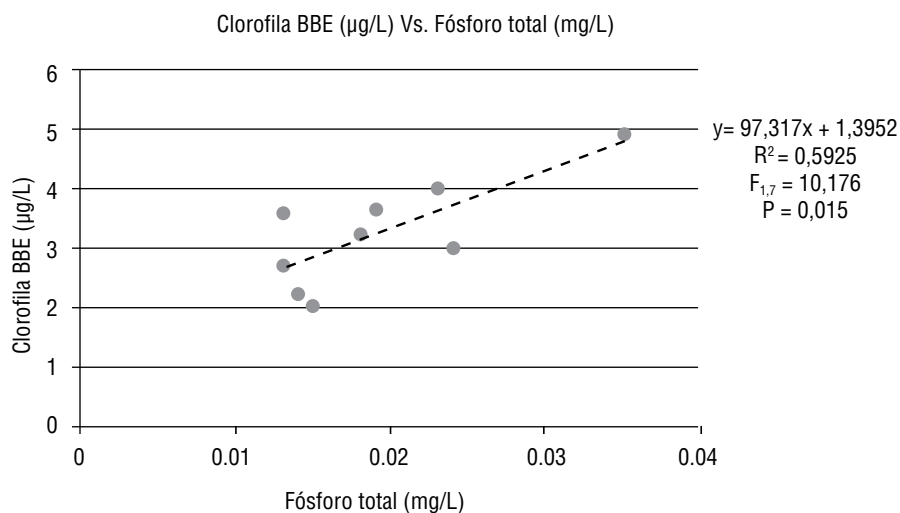


Figura 7
Concentraciones de Clorofila (BBE) $\mu\text{g/L}$ y Fósforo total mg/L en los puntos de muestreo

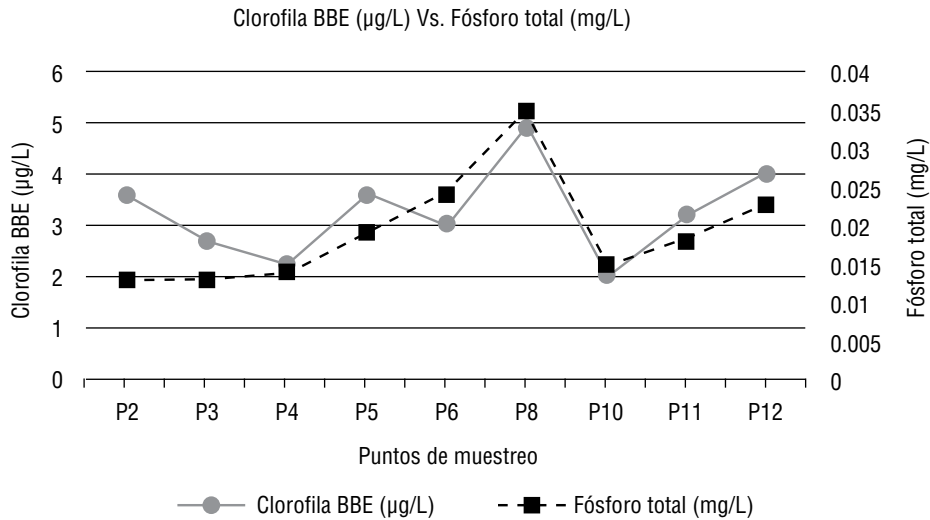


Figura 8
Concentraciones de Clorofila (BBE) $\mu\text{g/L}$ y Fósforo total mg/L en los puntos de muestreo. Punto I4 incremento en concentración de fósforo total y clorofila

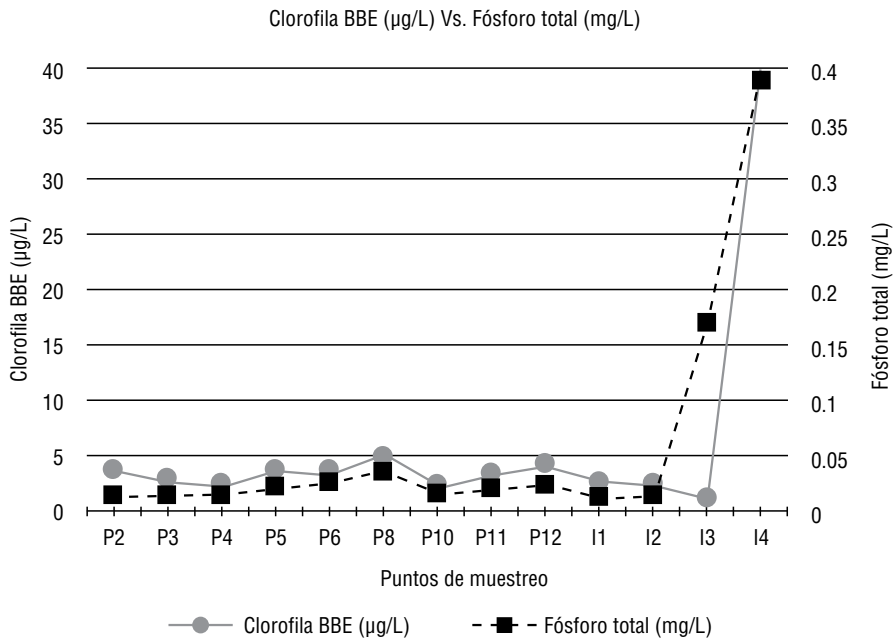
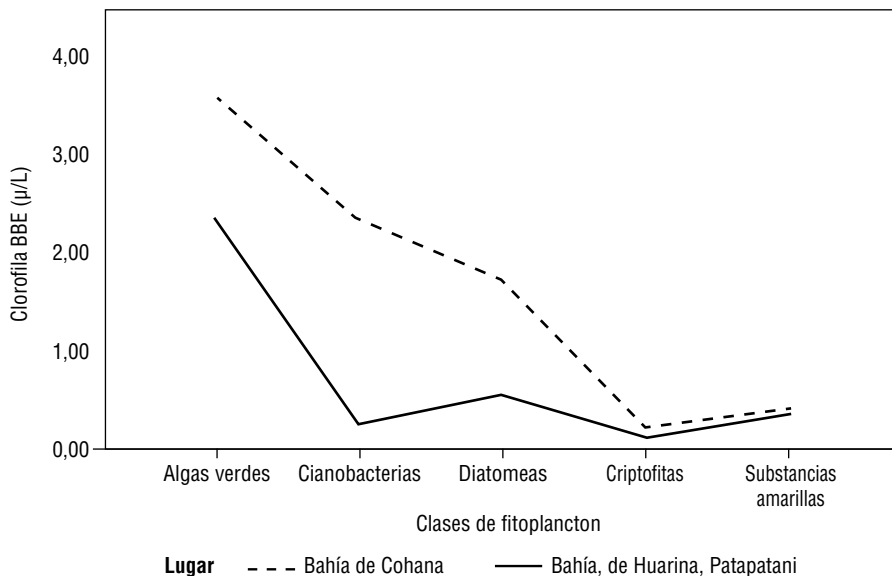


Figura 9
Fluorescencia de la clorofila-a, entre 4 clases de fitoplancton
en áreas del Lago Menor del Titicaca



Análisis de clorofila -A (BBE) y radiación UVA, UVB, PAR Visible (412 nm) Z1

Entre las variables que ejercen mayor influencia positiva en la concentración de clorofila en el Lago Menor del Titicaca están la radiación UVA, UVB, PAR Visible y la concentración de nutrientes como el fósforo $R^2_{\text{ajust}} = 0,922$; $F_{5,3} = 19,867$; $P = 0,017$. Se evidenció que ejerce un efecto significativo la radiación UV-A, UV-B y PAR visible con la concentración de clorofila-a (BBE) $P < 0,05$ (Fig. 11). Esto indica que mientras exista mayor concentración de fitoplancton en el Lago Menor existirá menor profundidad de atenuación de Luz UVA, UVB, PAR Visible, es decir que a mayor fitoplancton en el ecosistema acuático, impedirá la penetración de la radiación solar (Fig. 10). Y las algas del fitoplancton que necesitan luz solar para obtener energía mediante la fotosíntesis, proceso que se lleva a cabo en sus cloroplastos, serán beneficiadas, no obstante será lo inverso para otros organismos acuáticos que también dependen de la fotosíntesis, por la obtención de energía y el oxígeno que se produce a partir de este proceso. En consecuencia si reduce la penetración de radiación solar a causa del fitoplancton, también contribuirá a una reducción de oxígeno disuelto disponible para organismos aerobios que viven en el lago. De esta forma si un medio acuático está en proceso de eutrofización caracterizado por el enriquecimiento de nutrientes y proliferación de algas, también es un ecosistema estresante para los organismos aerobios.

Figura 10
Clorofila analítico (BBE) y Radiación UV-A, UV-B, PAR Visible (412 nm) Z1

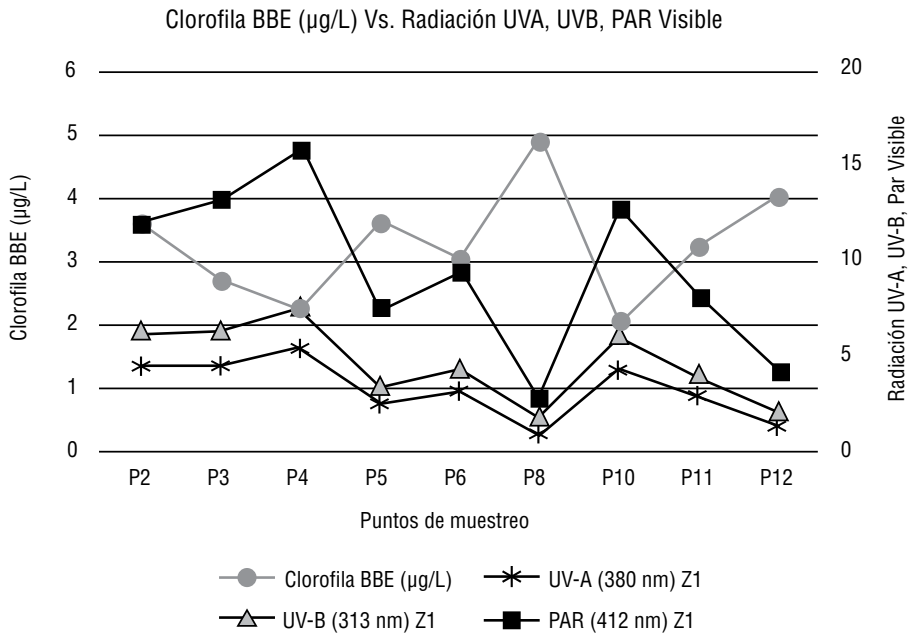
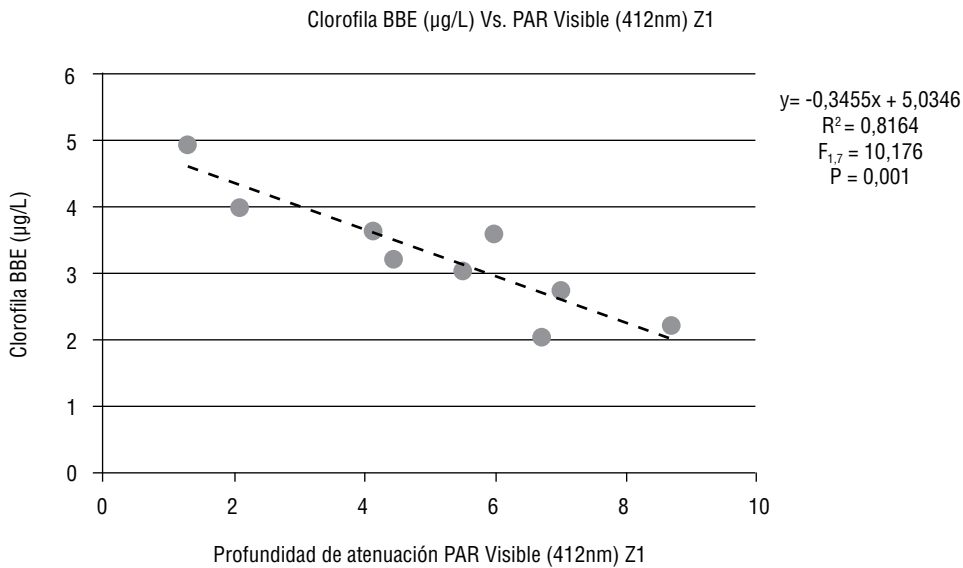


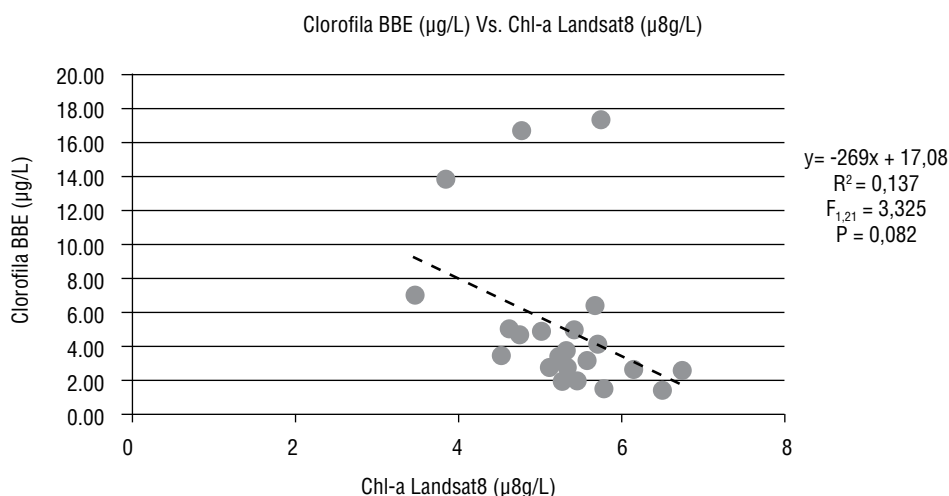
Figura 11
Diagrama de dispersión entre Clorofila analítico (BBE) y PAR Visible (412 nm) Z1



Analisis de clorofila (bbe) vs. Clorofila (landsat 8)

La concentración de clorofila obtenida por equipo analítico (BBE) no está relacionada significativamente con la concentración de clorofila obtenida por el satélite LANDSAT 8 $R^2 = 0,137$; $F_{1,21} = 3,325$; $P = 0,082$. Es decir que la concentración de clorofila por satélite (LANDSAT) actualmente no predice la concentración de clorofila (BBE) (Fig. 12).

Figura 12
Diagrama de dispersión entre Clorofila analítico (BBE) y Clorofila (LANDSAT 8)



Otro aspecto a considerar - sulfuro de hidrógeno

Existe un aspecto importante a considerar, la presencia de un toxico en el Lago Titicaca “El sulfuro de hidrogeno”, de olor característico a huevo podrido que puede ser percibido en áreas del Lago Menor del Titicaca, como en la Bahía de Cohana. Este compuesto es el producto de la reducción del sulfato “ SO_4 ” (Barton & Tomei 1995), es un compuesto químico producido naturalmente en los ecosistemas acuáticos y un neurotóxico y reductor potente cuando alcanza cierta concentración (Riesch *et al.* 2015). Puede provocar condiciones extremas en estos ecosistemas y afectar la sobrevivencia de la vida acuática (Kelley *et al.* 2016). Puede ser absorbido a través del sistema respiratorio, reducir el oxígeno transportado por la hemoglobina en los seres vivos (DLEP 2011) y gracias a su capacidad de solubilidad en lípidos, atravesar membranas biológicas (Riesch *et al.* 2015), inhibir la fosforilación oxidativa en la respiración celular de organismos aerobios (Rodwell *et al.* 2015). De esta forma reducir la biodiversidad y detener el crecimiento de organismos aerobios (Riesch *et al.* 2015).

En un ambiente rico en sulfato, como ocurre en el Lago Titicaca, la actividad de sulfato reducción es uno de los más importantes procesos en la degradación de materia orgánica presente (Barton & Tomei 1995). En la sulfato reducción intervienen distintos grupos de microorganismos, de acuerdo a los substratos disponibles en ambientes principalmente anóxicos (Fauque 1995, Wilson *et al.* 2017), aunque también óxicos (Muyzer & Stams 2008). Estos últimos autores indican que las bacterias que participan en la actividad de sulfato reducción, utilizan el sulfato disponible como un aceptor de electrones para la producción de sulfuro de hidrogeno en el proceso de degradación de la materia orgánica.

El Lago Titicaca presenta elevadas concentraciones de sulfato de origen geológico (Fernández *et al.* 2014) que condicionan la actividad de sulfato reducción, siendo biodisponible para bacterias que reducen este sustrato a sulfuro de hidrogeno (Holmer & Storkholm 2001). En tal proceso de sulfato reducción han sido identificadas como principales responsables las bacterias sulfato reductoras “BSR” (Fernández 2015). Cuya biodisponibilidad del sulfato y actividad bacteriana de sulfato reducción puede ser la principal vía metabólica asociada a la descomposición de la materia orgánica frente a otras vías de descomposición (Barton & Tomei 1995, Muyzer & Stams 2008), de esta forma contribuir al proceso de eutrofización por el enriquecimiento de nutrientes debido a la descomposición de la materia orgánica presente.

Conclusiones

La proliferación de fitoplancton (algas) en el Lago Menor del Lago Titicaca está influenciada principalmente por la concentración de fósforo total presente en el lago y por la radiación solar. El fósforo es un nutriente esencial y limitante para que exista reproducción de las algas y lleguen a colonizar la superficie del ecosistema acuático, así mismo el fitoplancton para su desarrollo y crecimiento necesita realizar el proceso de fotosíntesis, es decir depende de la luz solar como energía para sus procesos metabólicos, cuyo proceso de captación y transporte de energía se lleva a cabo en los cloroplastos u organelos de las algas, donde existen unos pigmentos específicos encargados de este proceso, que es la clorofila. La concentración de clorofila que representa al fitoplancton presente es mayor en los puntos: I4 (Bahía de Cohana), I1C (Bahía de Cohana), D4 (Huarina), LC (Cerca a Huatajata). La concentración de fósforo total es mayor en los puntos: I4 (Bahía de Cohana), I3 (Bahía de Cohana). Los valores de fósforo soluble están por debajo del límite de cuantificación. Según la ley 1333 del Medio Ambiente los valores de fósforo total ingresan en categoría “A”. La proliferación de fitoplancton en el Lago Titicaca y la descarga de residuos orgánicos en áreas del Lago Menor, provoca un enriquecimiento de nutrientes debido a la descomposición de la materia orgánica, en cuyo proceso se produce

sulfuro de hidrogeno, un toxico para la vida acuática. Este proceso conlleva que las algas se proliferen por el enriquecimiento de nutrientes y pueda llegar a ocurrir el proceso de eutrofización que impide el paso de la luz solar al cuerpo de agua y por consiguiente se reduzca la concentración de oxígeno disuelto, lo cual se convierte en un problema medio ambiental que pone en riesgo la salud de la población y de los seres vivos que habitan el Lago Menor del Titicaca.

Agradecimientos

Un especial agradecimiento a quienes hicieron posible la realización de este trabajo de investigación: El Instituto de Investigaciones Geográficas II GEO, Ing. Javier Núñez Villalba, Ph.D. Xavier Lazzaro, Lic. Raul Salas, Inez Villca, Daniel Callisaya, Verónica del Carpio, Jhasmin Duarte, Janina Espinoza, Willson Mamani, Edgar Castro, Erick Catarí, Maximo Catari, Ramon Catari.

Referencias bibliográficas

- Achá, D.
2018 Coloquio internacional: Vulnerabilidad de los recursos hídricos en la cuenca Katari, Lago Titicaca. La Paz.
- Archundia, D., C. Duwig, L. Spadini, G. Uzu, S. Guédron, M. Morel, R. Cortez, O. Ramos, J. Chincheros & J. Martins
2017 How Uncontrolled Urban Expansion Increases the Contamination of the Titicaca Lake Basin (El Alto, La Paz, Bolivia). *Water Air Soil Pollut* 228:44.
- Barton, L. & F. Tomei
1995 Characteristics and activities of sulfate-reducing bacteria. pp. 1-32. En: Barton, L. (ed.) *Sulfate-Reducing Bacteria*. Plenum Press. New York and London.
- DLEP
2011 Sulfuro de hidrógeno. Documentación toxicológica para el establecimiento del límite de exposición profesional de sulfuro de hidrógeno. Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. Documentación Límites Exposición Profesional, DLEP 69. 5 p.
- Chen, M., X. Li, Y. He, N. Song, H. Cai, C. Wang, Y. Li, H. Chu, L. Krumholz & H. Jiang
2016 Increasing sulfate concentrations result in higher sulfide production and phosphorous mobilization in a shallow eutrophic freshwater lake. *Water Research* 96:94-104.

- Holmer, M. & P. Storkholm
2001 Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review. *Freshwater Biology* 46:431-451.
- Kelley, J., L. Arias, D. Patacsil, M. Yee, C. Bustamante & M. Tobler
2016 Mechanisms Underlying Adaptation to Life in Hydrogen Sulfide-Rich Environments, *Molecular Biology and Evolution* 33(6):1419-1434.
- Khan, F., F. Naushin, F. Rehman, A. Masoodi, M. Irfan, F. Hashmi & A. Ansari
2014 Eutrophication: Global Scenario and Local Threat to Dynamics of Aquatic Ecosystems. pp. 17-27. En: Ansari, A. & S. Gill (eds.) *Eutrophication: Causes, Consequences and Control*. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Kim, B., J. Park, G. Hwang, M. Jun & K. Choi
2001 Eutrophication of reservoirs in South Korea. *Limnology* 2(3):223-229.
- Falconer I., A. Beresford & M. Runnegar
1983 Evidence of liver damage by toxin from a bloom of the blue-green alga, *Microcystis aeruginosa*. *The Medical Journal of Australia* 1(11):511-514.
- Fauque, G.
1995 Ecology of sulfate-reducing bacteria. pp. 217-242. En: Barton, L. (ed.) *Sulfate-reducing bacteria*. Plenum Press. New York and London.
- Fernández, C., Á. Cano, J. Arocena & A. Alcolea
2014 Elemental and mineral composition of salts from selected natural and mine-affected areas in the Poopó and Uru-Uru lakes (Bolivia). *Journal of Great Lakes Research* 40(4):841-850.
- Fernández, P.
2015 Actividad de bacterias sulfato reductoras sedimentarias a lo largo de un gradiente de eutrofización en Bahía de Cohana. Tesis de licenciatura en biología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. 80 p.
- Montoya, H., J. Komárková & J. Komárek
2014 Cyanobacterial species, potentially forming water-blooms in the Lake Titicaca (Peru). *Arnaldoa* 21(2):381-390.
- Muyzer, G. & A. Stams
2008 The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nature Reviews Microbiology* 6:441-454.
- Ribera, M.
2010 La Bahía de Cohana. Actualización 2009-2010, Serie de estudios de caso sobre problemáticas socio ambientales en Bolivia N° 1. LIDEMA, La Paz. 73 p.
- Ribstein, A., B. Praix, J. Quintanilla, G. Zuppi & D. Cahuaya
1995 Salinidad del recurso hídrico subterráneo del altiplano central. *Bull, Inst, fr, Etudes andines* 24(3): 483-493.

- Riesch, R., M. Tobler & M. Plath
2015 Hydrogen Sulfide-Toxic Habitats. pp. 137-159. En: Riesch, R., M. Tobler & M. Plath (eds.) Extremophile Fishes. Springer International Publishing Switzerland.
- Rubén D., A, Jiménez, S, Moreau & A, Ribstain
1995 Recursos hídricos para riego en la provincia Villarroel, Altiplano boliviano, Bull, Inst, fr, etudes andines, 24 (3): 473-482.
- UNEP
1996 Diagnostico Ambiental del Sistema Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa (Sistema TDPS) Bolivia-Perú.
- Wilson, R., M. Tfaily, V. Rich, J. Keller, S. Bridgham, C. Medvedeff, L. Meredith, P. Hanson, M. Hines, L. Pfeifer, S. Saleska, P. Crill, W. Cooper, J. Chanton & J. Kostka
2017 Hydrogenation of organic matter as a terminal electron sink sustains high CO₂:CH₄ production ratios during anaerobic decomposition. Organic Geochemistry 112:22-32.

Detección de la biomasa fitoplanctónica mediante teledetección para determinar el estado eutrófico de los cuerpos de agua

Daniel Callisaya Machaca

Resumen

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el Lago Menor del Titicaca del lado Boliviano, donde sufre severos deterioros de calidad de sus aguas por ser el principal receptor de las descargas no tratadas procedentes de la agricultura (pesticidas, fertilizantes artificiales) y de la ganadería. Esta parte del lago también recibe los desechos domésticos, industriales y mineros que se traducen en daños ambientales como el Bloom¹ del año 2015. Mediante la teledetección con el sensor OLI, a bordo del satélite Landsat-8, sus firmas espectrales de la imagen de satélite y los datos espectrales de campo, se pueden medir las concentraciones de clorofila fitoplanctónica *in situ* en las columnas agua. Para esto se utilizó la sonda FLUORO-PROBE BBE². Las medidas de concentración de fitoplancton son tomadas el mismo día de paso de sensor LANDSAT OLI por el área de estudio. Se ubicaron los puntos con previo reconocimiento de área de estudio donde existe mayor y menor impacto ambiental del norte del Lago Menor del Titicaca. Para este análisis se recurrió a escala de valores propuesto por Carlson 1977, que utiliza la biomasa algal como base para clasificar el estado trófico de los cuerpos de agua. Los análisis para esta investigación son los parámetros físico-químico y biológico. Las fórmulas utilizadas de Carlson, con los datos obtenidos de campo, indican el estado Mesotrófico con respecto a las concentraciones de clorofila-a y Mesotrófico con respecto a las concentraciones de fósforo total excepto en el punto LM-04 que se muestra Eutrófico.

Palabras clave: clorofila-a, firma espectral, Lago Menor del Titicaca, Landsat-8, teledetección.

1 Bloom: floraciones algales o proliferación de microalgas.

2 <https://www.bbe-moldaenke.de/en/products/chlorophyll/details/fluoroprobe.html>

Summary

This research work was carried out in the Titicaca lake on the Bolivian side, where it suffers severe deterioration of water quality as it is the main recipient of untreated discharges from agriculture (pesticides, artificial fertilizers) and livestock, as well as the origins of domestic, industrial and mining wastes, for these reasons the Bloom was presented in 2015. By remote sensing with the OLI sensor on board the Landsat-8 satellite, by means of spectral signatures of the image and spectral data of field, to measure the concentrations of chlorophyll phytoplankton in situ in the water columns the FLUOROPROBE BBE probe is used, the phytoplankton concentration measurements are taken on the same day as the OLI sensor pass through the study scene. The points with prior recognition of the study area where there is greater and lesser environmental impact of the north of the smaller lake of Titicaca were located. For this analysis we used the scale of values proposed by Carlson 1977, the algal biomass uses it as a basis to classify the trophic state of the bodies of water, the analyzes for this research are the physical-chemical and biological parameters. The formulas used by Carlson, with the data obtained from the field, indicate the Mesotrophic status with respect to the chlorophyll-a and Mesotrophic concentrations with respect to the total phosphorus concentrations except at the LM-04 point shown Eutrophic.

Key words: chlorophyll-a, spectral signature, Lake Titicaca minor, Landsat-8, remote sensing.

Introducción

La calidad de las aguas continentales se basa en el contenido de partículas suspendidas y estas son las que modifican las propiedades ópticas de cuerpos de agua. Las moléculas del agua absorben intensamente la radiación infrarroja y la posibilidad de reflejar en la visible es dependiendo sustancias presentes en el agua (Ruiz-Verdú *et al.* 2009).

El Lago Titicaca en su totalidad nunca ha sido objeto de ninguna vigilancia ambiental continua a largo plazo para predecir su evolución y predecir o al menos prever los eventos extremos indeseables, tales como los blooms (floraciones algales), la muerte de peces, la pérdida de la biodiversidad, la disminución de la productividad de la pesca (Lazzaro, 2016).

Todas éstas son fuentes de contaminación orgánica que al descomponerse sirven de alimentos a las bacterias, las cuales utilizan el oxígeno disuelto en el agua y oxidan la materia orgánica. El producto de la descomposición de las bacterias es dióxido de carbono, nitrato y fosfato. Dichos elementos producen un crecimiento explosivo de algas que impiden que la luz penetre hasta el fondo del lago, haciendo imposible la fotosíntesis en esas capas profundas, lo cual conduce

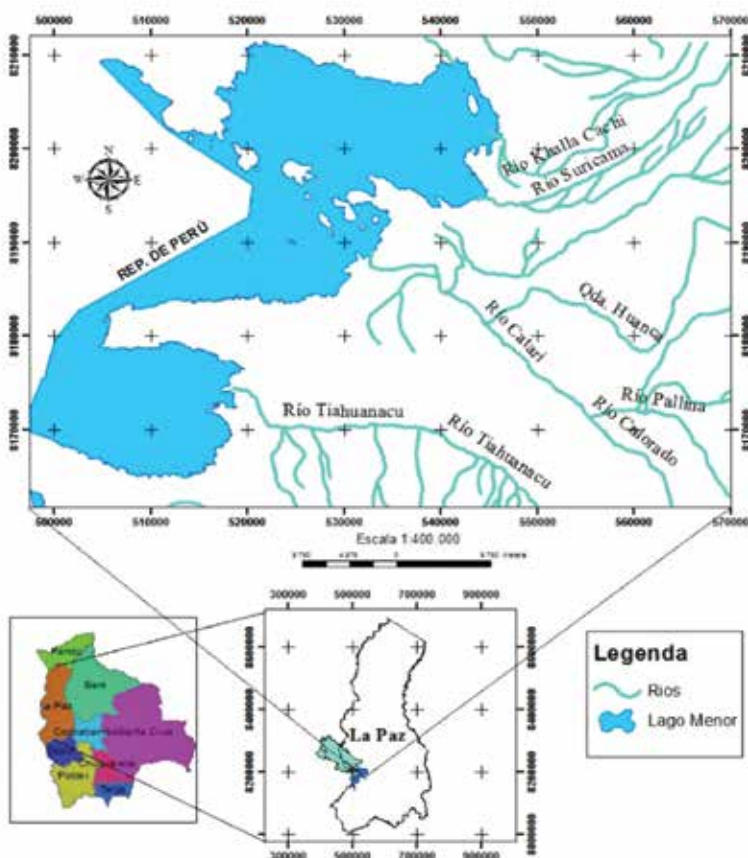
a un déficit de oxígeno, que llega a ser total (anoxia), provocando mortandad en la fauna (Moreno *et al.* 2017).

La concentración de clorofila se utiliza para estimar en forma indirecta el contenido de biomasa de las comunidades fitoplanctónica, debido a que es el principal pigmento fotosintético presente en las algas (Gregor & Marsálek, 2004).

Área de estudio

El Lago Titicaca es el lago navegable más alto del mundo, se encuentra a una altitud media de 3812 m.s.n.m. (Justiniano & Carrasco, 2001). El Lago Menor también es llamado Huiñaimarca donde se realizó la presente investigación ubicado en sector Boliviano, comprendida entre las coordenadas Longitud: 69°1'47.56"O Latitud: 16°9'28.68"S y Longitud: 68°33'19.88"O Latitud: 16°36'18.96"S.

Figura 1
Localización del área de estudio, Lago Menor del Titicaca sector Boliviano



Materiales y métodos

La metodología consta de los siguientes pasos: procesamiento de imágenes satelitales, muestras de agua recogidas y llevadas al laboratorio para fósforo total, y por otro lado trabajos de mediciones in situ en campo.

Las imágenes de Landsat-8 OLI son descargadas en forma gratuita del servidor de USGS³, correspondientes al Path 001 Row 071.

Para detectar la clorofila fitoplanctónica mediante firmas espectrales en los cuerpos de agua, se utilizó cuatro bandas del satélite en las regiones del visible e infrarroja cercana cuyos datos en valores de reflectancia son comparados con datos de firmas espectrales tomadas con el espectroradiómetro de campo mediante el método de Spectral Angle Mapper de ENVI. Los puntos de muestreo se observa en el (cuadro 1).

Cuadro 1
Puntos de muestreo en el Lago Menor del Titicaca

Puntos de muestreo	Coordenadas UTM	
	X	Y
LM-01	535778.56 E	8197402.11 S
LM-02	536509.65 E	8197408.45 S
LM-03	537340.65 E	8197223.78 S
LM-04	538553.48 E	8196595.38 S
LM-05	539841.37 E	8197329.06 S
LM-06	540338.27 E	8197697.06 S
LM-07	541606.64 E	8200264.38 S
LM-08	541976.45 E	8200797.41 S
LM-09	542279.56 E	8205458.30 S

Corrección atmosférica

Para la corrección atmosférica, es realizada con el FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercules) de ENVI 5.3 para entrar a FLAASH es necesario calibrar radiométricamente los números digitales ND del sensor OLI.

Kruse (2018) Para ello se requiere convertir los ND⁴ de cada banda a valores de radiancia L ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), la radiancia que se transforma a valores de reflectividad en el techo de la atmosfera (TOA) y se obtiene mediante FLAASH la conversión a valores de reflectancia ρ ($\mu\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$).

³ USGS: Servicio Geológico de Estados Unidos.

⁴ ND: son los niveles digitales o valores numéricos.

Calibración de escalas de valores

Para corregir y tener los valores de reflectancia similares a los valores que utilizan en las librerías de la USGS, es decir, en un rango de 0 a 1, se ha de utilizar la siguiente fórmula empleada para la corrección de escala (OSINFOR, 2014).

Figura 2
Fórmula utilizada para la corrección de escala (OSINFOR, 2014)

$$(b1 \leq 0) * 0 + (b1 \geq 10000) * 1 + (b1 > 0 \text{ and } b1 < 10000) * \text{float}(b1) / 10000$$

Análisis de firmas espectrales

De los 9 puntos de muestreo, en cada punto se colectaron 5 firmas espectrales⁵ haciéndose un total de 45 firmas espectrales obtenidas. Se realizó un análisis comparativo de gráfico de firmas, se tomó en cuenta los valores de reflectividad de las 45 firmas espectrales totales. Se identificaron la similitud en cada 3 de los 9 puntos de muestreo:

- LM-01, LM-04 y LM-06
- LM-07, LM-08 y LM-09
- LM-02, LM-03 y LM-05

Las firmas de cada 3 puntos de muestreo, es decir, las 15 firmas espectrales, en la expresión matemática de ENVI, es promediado, que no es más que la suma de todas las firmas de las muestras divididas entre el número de estas, al obtener una firma promedio por cada 3 puntos de muestreo, es asignada con el denominativo de “clase”, donde en la presente investigación se obtuvo la clasificación de cuerpos de agua con tres clases.

Ruidos en firmas espectrales

Para realizar la remoción de ruido en las firmas espectrales fue necesario convertir del formato ASD (Dispositivos Espectrales Analíticos), que es el formato propio del espectroradiómetro y convertirla a ASCII (American standard code for information interchange). Las firmas espectrales del espectroradiómetro tienen un rango espectral desde 325 a 1075 nm.

De las firmas espectrales tomadas en campo, presenta ruidos espectrales⁶ en las siguientes longitudes de onda (325 a 380 nm y 931 a 1075 nm), las cuales

⁵ Firma espectral: es la radiación reflejada de la superficie en función a las longitudes de onda.

⁶ Ruido espectral: ausencia de información en elementos de muestreo.

corresponden a las regiones de ultravioleta e infrarrojo cercana, estos espectros son removidas debido a no tener información necesaria. Los espectros libres de ruidos son de 381-930 nm y las utilizadas en la presente investigación son de 430 a 930 nm, las cuales corresponden a las regiones de visible e infrarrojo cercana; aptas para el estudio de clorofila, las cuales son mis firmas espectrales de referencia para el análisis.

Clasificación de imágenes mediante librerías espectrales

La clasificación de cuerpos de agua, se realizó a partir de librerías espectrales obtenidas en campo que es el reconocimiento de distintos tipos de coberturas en agua, en función de sus características espectrales el cual se denomina clasificación. La construcción como claves de identificación que son las “firmas espectrales de referencia” con las cuales se la compara con los espectros multivariados de la imagen mediante el método de clasificación SAM del software ENVI.

Trabajo de campo

Se seleccionó el día 01 de abril de 2018 para la campaña, en base al calendario del paso del satélite para no tener errores entre la radiometría de campo y la radiometría orbital. En esta salida de campo se obtuvieron datos de un total de 9 puntos de muestreo.

En cada punto de muestro se tomaron datos con los siguientes equipos:

- medidas radiométricas con el espectroradiómetro HandHeld 2⁷ de campo (firmas espectrales), el equipo que también posee GPS incorporado de alta precisión.
- mediciones de atenuación de luz en las columnas de agua en UV⁸ y VISIBLE con espectroradiómetro C-OPS.
- medidas de clorofila fitoplanctónica con la sonda Fluorométrica.
- mediciones de transparencia de agua con el disco de Secchi.
- muestras de agua recogidas en una botella Niskin y luego en frascos de 200 ml para el fósforo total.

Los frascos con muestras de agua utilizados para fósforo se conservaron refrigeradas en un cooler hasta su análisis en Laboratorio de Calidad Ambiental y dejadas antes de 24 hrs, el único parámetro es llevado al laboratorio y el resto son muestras tomadas *in situ*.

7 <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/asd-range/fieldspec-range/handheld-2-hand-held-vnir-spectroradiometer>

8 UV: es la radiación ultravioleta, donde detecta uno de los equipos utilizados para el análisis de atenuación de luz en perfilamientos en las columnas de agua.

Para determinar el índice de estado trófico en el Lago Menor del Titicaca se aplica la fórmula propuesto por Carlson para los parámetros de transparencia de agua (D_s), fósforo total (P_t) y clorofila-a ($Chl-a$), por cualquiera de estos parámetros se podría estimar el TSI.

Cuadro 2
Fórmulas para estimar el estado trófico aplicado a los indicadores de eutrofia

Parámetros de eutrofización	Carlson (TSI)
Disco de Secchi (D_s) (m)	$TSI\ D_s = 60 - 14,41 \ln(D_s)$
Fósforo total (P_t) (mg/m^3)	$TSI\ P_{total} = 14,42 \ln(P_t) + 4,15$
Clorofila-a ($Chl-a$) (mg/m^3)	$TSI\ Chl-a = 9,81 \ln(Chl-a) + 30,6$

Fuente: Carlson 1977; 1980.

Donde:

TSI = Índice de Estado Trófico de Carlson (Trophic state index)

D_s = Disco de Secchi (m)

$Chl-a$ = Clorofila-a (mg/m^3)

P_t = Fósforo total (mg/m^3)

$\ln$ = Logaritmo natural

Resultados y discusión

Análisis de firmas espectrales, en la cual consiste en realizar la comparativa de gráfica de firmas en función de valores de reflectividad, se logró identificar por cada 3 de los nueve puntos de muestreo.

Firma promedio de (LM-01, LM-04 y LM-06) perteneciente a la clase 1.

Firma promedio de (LM-07, LM-08 y LM-09), perteneciente a la clase 2.

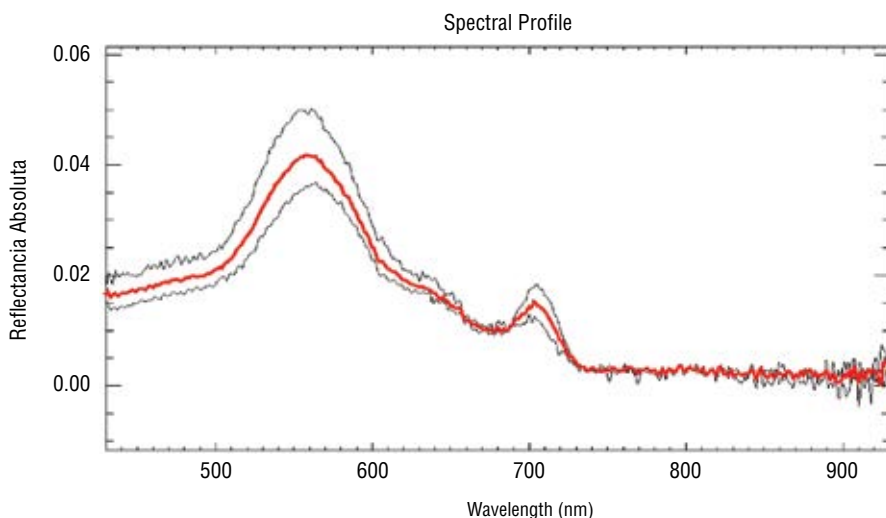
Firma promedio de (LM-02, LM-03 y LM-05) perteneciente a la clase 3.

Las clases 1, 2 y 3 donde se asignó por colores, rojo, verde y azul para identificar distribución especial en concentraciones de fitoplancton.

Las firmas espectrales correspondientes a los puntos de muestreo (LM-01, LM-04 y LM-06), presentan un comportamiento más homogéneo entre sí. Los valores de reflectancia en el espectro azul entre 0,0116 - 0,0343 $\mu W/cm^2 \cdot sr \cdot nm$; con desviación estándar de 0,0051. En el verde las reflectancias están dadas entre 0,0348 - 0,0569 $\mu W/cm^2 \cdot sr \cdot nm$; con desviación estándar del 0,0069, los valores de reflectancia mínima. En el espectro rojo de 0,0117 - 0,0289 $\mu W/cm^2 \cdot sr \cdot nm$, con desviación estándar de 0,0041. En el espectro infrarrojo la reflectancia es mínima entre 0,0008 - 0,0166 $\mu W/cm^2 \cdot sr \cdot nm$, con desviación estándar de 0,0038. Los valores de reflectancia entre los rangos azul y rojo versus verde son distantes,

es decir la curva de absorción en el azul y rojo son profundas a comparación con el espectro verde. Los valores de reflectancia entre los rangos infrarroja versus azul, verde y roja son distantes, ya que la mínima absorción en la infrarroja se debe a la cantidad de energía incidente absorbida por el agua y por otro lado indica el contenido de pigmento clorofílico en el fitoplancton. La firma promedio en la (figura 3), representa a poblaciones de mayor presencia de clorofila fitoplanctónica.

Figura 3
Firma espectral promedio de clase 1



El conjunto de firmas espectrales dadas en los puntos de muestreo (**LM-07, LM-08 y LM-09**), se observó un comportamiento homogéneo en las respuestas de reflectancia, los valores de reflectancia en el espectro azul es de $0,0125 - 0,1172 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$; con desviación estándar de $0,0305$, en el espectro verde las reflectancias están entre $0,0269 - 0,1203 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$ y con desviación estándar de $0,0265$, en el espectro roja, con valores de reflectancia de $0,0077 - 0,1023 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$; con desviación estándar de $0,0275$, en las regiones del infrarrojo se muestran la absorción con los siguientes valores de reflectancia $-0,0006 - 0,0872 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$; con desviación estándar de $0,0248$. La firma promedio en la figura 4, representa moderadas concentraciones de población fitoplanctónica.

Para las firmas espectrales en puntos de muestreo correspondientes a (**LM-02, LM-03 y LM-05**), el comportamiento de valores de reflectancia en el rango del espectro azul es de $0,0094 - 0,0297 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$; con desviación estándar de $0,0063$, en el espectro verde las reflectancias están entre $0,0206 - 0,0496 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$; con desviación estándar de $0,0116$, en los valores de reflectancia mínima en el rango del espectro roja de $0,0026 - 0,098 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$; con desviación

estándar de 0,0238, en el espectro infrarrojo la reflectancia es más inferior que el clúster anterior que esta entre $-0,0025 - 0,0062 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$; con desviación estándar de 0,0025, los valores de reflectancia entre los rangos azul y verde versus rojo son distantes, es decir la curva de absorción en el rojo es profundas a comparación entre los rangos del espectro verde y azul con reflectancias altas y bajas en el espectro infrarrojo. La firma promedio en la (figura 5), representa menores concentraciones de clorofila fitoplanctónica.

Figura 4
Firma espectral promedio de clase 2

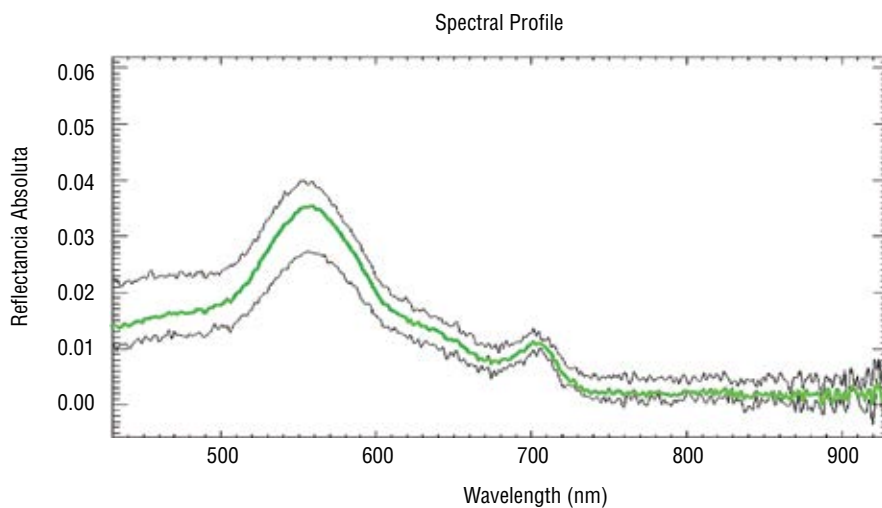
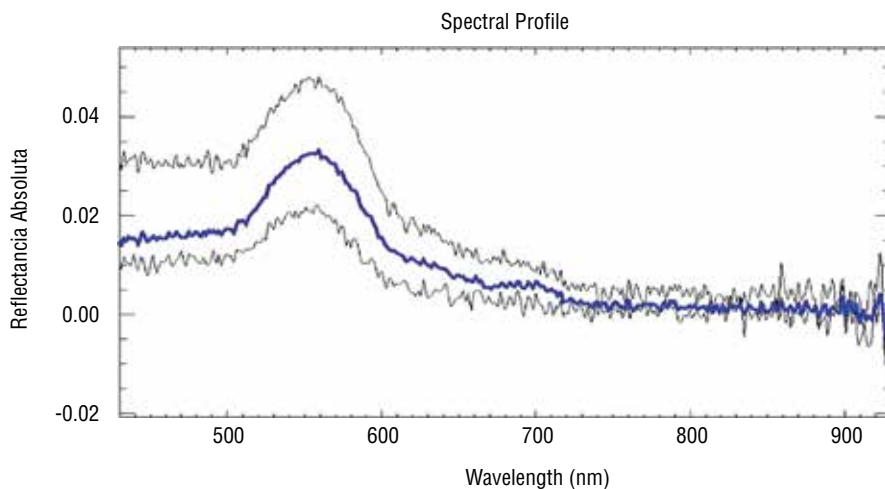
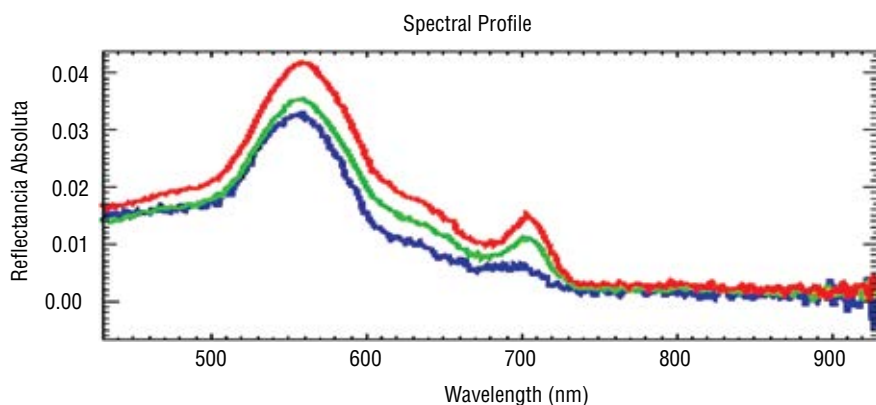


Figura 5
Firma espectral promedio de clase 3



Los datos espectrales tomados con el espectroradiómetro en los puntos del muestreo dentro de cada clúster, se obtuvo una que corresponde al promedio (figura 6), de las muestras realizadas en campo.

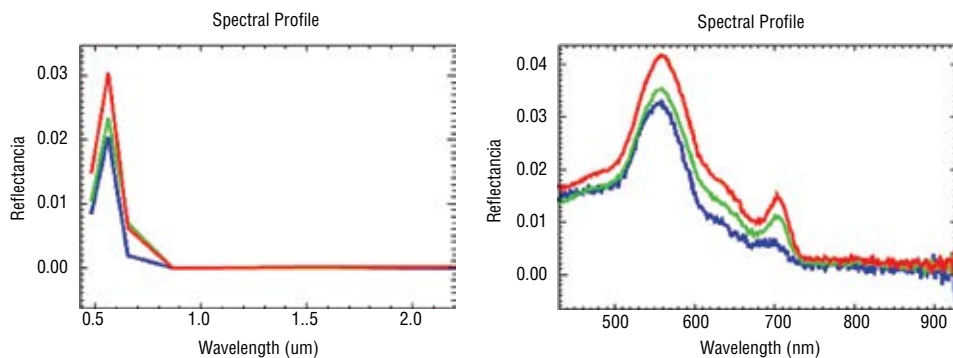
Figura 6
Comparación de firmas espectrales promedio para cada clase de estudio



Clasificación de los cuerpos de agua a partir de las librerías espectrales

A partir de la imagen de reflectancia se procedió a mapear las masas de agua según la concentración fitoplanctónica, se tiene como objetivo para esta clasificación supervisada a partir de las mediciones radiométricas en campo se obtuvo una librería espectral que consiste en asignar a un conjunto de píxeles en la imagen digital, con un conjunto de clases basadas en firmas espectrales predefinidas o de referencia. Para este fin se contó con 15 firmas espectrales dentro de cada clúster y promediadas por las mismas para tener una sola firma espectral para cada clase.

Figura 7
Librerías espectrales para las tres clases de cuerpos de agua. A) obtenida a partir de imagen Landsat-8 OLI. B) obtenida a partir de radiometría de campo

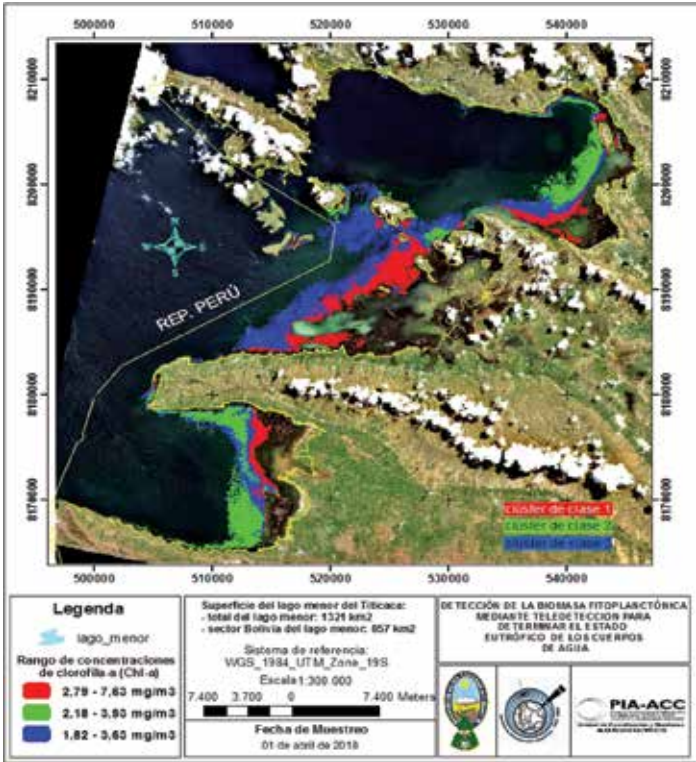


Cuadro 3
Comparación de reflectancias en la imagen vs radiómetro para las longitudes de onda correspondientes a los centros de banda

Banda	Centro de banda (λ)	Firma imagen Landsat-8 OLI (μW/cm²*sr*nm)			Firma espectralradiómetro (μW/cm²*sr*nm)			Δ Reflectancia Absoluta (μW/cm²*sr*nm)		
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 1	Clase 2	Clase 3
2	482	0,0150	0,0106	0,0087	0,0195	0,0166	0,0158	-0,0045	-0,006	-0,0071
3	562	0,0305	0,0234	0,0205	0,0416	0,0349	0,0317	-0,0111	-0,0115	-0,0112
4	655	0,0062	0,0070	0,0019	0,0142	0,0104	0,0068	-0,0080	-0,0034	-0,0049
5	865	0,0000	0,0000	0,0000	0,0026	0,0014	0,0016	-0,0026	-0,0014	-0,0016

En el (cuadro 3), se observa poca diferencia en valores de reflectancias entre la radiometría imagen y campo ya que la radiometría de imagen Landsat-8, es tomada desde una altura de 705 km y las firmas espectrales con espectralradiómetro HH2 a solo 1 m desde el espejo de agua, la variación (Δ) de reflectancia indica una buena correlación entre las firmas espectrales.

Figura 8
Clasificación en cuerpos de agua en diferentes rangos de concentración de clorofila fitoplanctónica



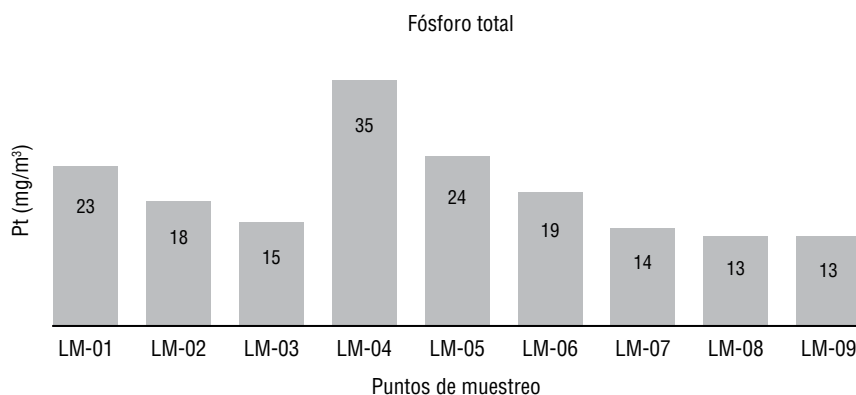
Para el presente investigación se utilizó el método de (SAM) del software ENVI 5.3 compara la similitud de la misma frecuencia radiativo entre espectros de pixeles desconocido multivariados (imagen); con una librería de espectros de referencia (radiometría de campo).

En el mapeo espectral mediante librerías espectrales obtenidas en campo, se clasifica en 3 clases de cuerpos de agua y en cada clase se forma un grupo de pixeles de la misma frecuencia radiativo “Clúster”, cada una es asignada según rango de concentración clorofila fitoplanctónica en colores: clúster de color (rojo, verde y azul).

Resultados de parámetros de campo

Concentraciones de fósforo total en los puntos de muestreo.

Figura 9
Concentraciones de fósforo total (Pt), en diferentes puntos de muestreo



En la (figura 6), La menor concentración de fósforo fue de 13 mg/m³ en los puntos LM-08 y 09, y la mayor concentración fue en el punto LM-04 con 35 mg/m³ de fósforo total.

Concentraciones de clorofila-a (Chl-a), en los puntos de muestreo

En la (figura 10), se muestra las concentraciones en las columnas de agua en los nueve puntos, la profundidad es diferente en cada punto, donde a mayores profundidades presenta menores concentraciones de fitoplancton debido a la falta de penetrabilidad de radiación solar para realizar la fotosíntesis.

Las concentraciones de clorofila fitoplanctónica en las columnas de agua son variadas, para mostrar gráficamente es promediada de cada perfil de muestreo como se observa en la (figura 11).

Figura 10
Concentraciones de Chl-a en las columnas de agua de cada punto (Lazaro, 2015)

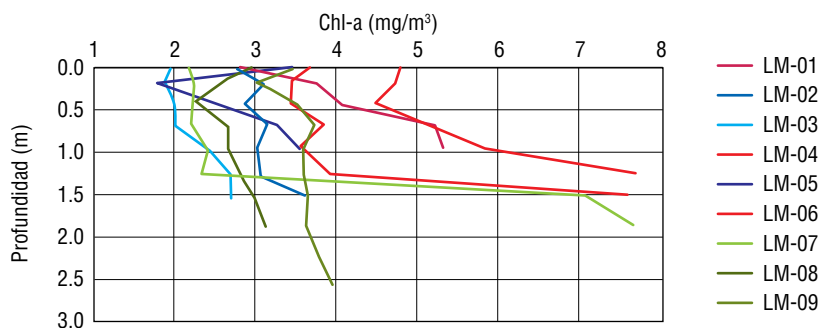
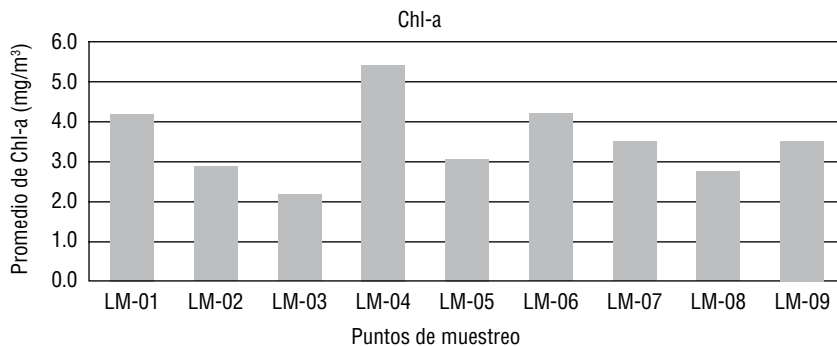


Figura 11
Concentraciones promedio de clorofila fitoplanctónica



En la (figura 11), la menor concentración promedio de clorofila-a en las columnas de agua presentan en el punto 3 con 2,23 mg/m³, y la mayor concentración es en el punto 4, con 5,43 mg/m³, los puntos LM-04, LM-5 y LM-6 se encuentran cercanas a la desembocadura del río Surimana en el sector de Puerto Pérez.

Los colores asignados como rojo, verde y azul, de acuerdo a los rangos de concentración en el mapeo realizado, son el resultado de las firmas espectrales que agrupa los puntos como: Rojo LM (01, 04 y 06), Verde LM (07,08 y 09) y Azul LM (02, 03 y 05).

Atenuación de luz solar UV y PAR en las columnas de agua en cada punto de muestreo

De acuerdo al (cuadro 4), la atenuación de la luz UV y PAR⁹, se muestra de la siguiente manera:

9 PAR: es la radiación fotosintéticamente activa que se encuentra en las regiones de longitud de onda de 400 a 700 nm.

La atenuación de la luz **uv-b**, la cual es la más dañina para los seres vivos en este caso para el fitoplancton, esta luz sufre la atenuación a la profundidad mínima de 0,60 m en el punto LM-04, y la atenuación a la profundidad máxima es de 1,96 en el punto LM-07, en este punto tiene mayor penetrabilidad de la luz UV-B que está en las longitudes de onda de 313 nm.

Cuadro 4

Se muestra la atenuación de la luz solar UV-B, UV-A y PAR, en los perfilamientos de las columnas de agua en los nueve puntos de muestreo

Atenuación de la radiación de luz solar			
Puntos de muestreo	Luz UV-B "313 nm" (m)	Luz UV-A "380 nm" (m)	PAR "400-700 nm" (m)
LM-01	0,64	1,36	3,63
LM-02	1,05	2,79	8,61
LM-03	1,58	4,26	7,89
LM-04	0,60	1,04	1,83
LM-05	1,09	3,09	11,51
LM-06	0,87	2,42	12,18
LM-07	1,96	5,39	16,27
LM-08	1,80	4,46	11,66
LM-09	1,55	4,50	4,83

Para la luz **UV-A** o también llamada ultravioleta cercana, esta luz se atenúa a una profundidad mínima de 1,04 m en el punto LM-04, y la atenuación a la profundidad máxima es a 5,39 m en el punto LM-07 esta luz UV-A se encuentra en la longitud de onda de 380 nm.

En la luz **VISIBLE o PAR**, donde se puede observar la transparencia de agua, esta luz se atenúa a la profundidad mínima de 1,83 m en el punto LM-04, es decir que en este punto, es uno de los nueve puntos donde la visibilidad se pierde a una menor profundidad por la presencia de clorofila fitoplanctónica en las columnas de agua, y la atenuación a la máxima profundidad es a 16,27 m en el punto LM-07, es decir, que en este punto las aguas se encuentran muy claras con mínimas partículas en suspensión y por esta razón es posible observar hasta estas profundidades.

Aplicación del criterio de eutrofización

Mediante el criterio de Carlson, que clasifica a un cuerpo de agua en base a los valores de concentración de Clorofila-a y Fósforo total en (mg/m³).

Aplicando estos valores de concentración obtenidas en cada punto de muestreo mediante el criterio de Carlson 1977-1980, se muestra en el (cuadro 5).

Cuadro 5
Aplicación del índice de estado trófico (TSI) en el Lago Menor del Titicaca

Puntos de muestreo	Clasificación de estado trófico de los puntos de muestreo en Lago Menor del Titicaca					
	Chl.a (mg/m ³)	TSI	Estado Trófico	Pt (mg/m ³)	TSI	Estado Trófico
LM-01	4,22	45	MESOTRÓFICO	23	49	MESOTRÓFICO
LM-02	2,93	41	MESOTRÓFICO	18	46	MESOTRÓFICO
LM-03	2,23	38	MESOTRÓFICO	15	43	MESOTRÓFICO
LM-04	5,43	47	MESOTRÓFICO	35	55	EUTRÓFICO
LM-05	3,11	42	MESOTRÓFICO	24	50	MESOTRÓFICO
LM-06	4,21	45	MESOTRÓFICO	19	47	MESOTRÓFICO
LM-07	3,53	43	MESOTRÓFICO	14	42	MESOTRÓFICO
LM-08	2,75	41	MESOTRÓFICO	13	41	MESOTRÓFICO
LM-09	3,58	43	MESOTRÓFICO	13	41	MESOTRÓFICO

Los resultados obtenidos de los puntos de muestreo en el Lago Menor del Titicaca, indican el estado Mesotrófico con respecto a las concentraciones de Clorofila-a y Fósforo total, con excepción en el punto LM-4 que indica el estado Eutrófico con relación al fósforo total.

Conclusiones

Se concluye que mediante esta técnica de teledetección puede ser la base de observación regional y global, para entender, predecir y comunicar la respuesta de los cuerpos de agua en sistemas lacustres.

Las tecnologías aplicadas como radiometría orbital y radiometría de campo permitieron obtener altas correlaciones para la detección de clorofila-a con ayuda de datos *in situ*.

Mediante datos espectrales de campo se ha demostrado la capacidad de mapear la distribución espacial de concentraciones de Clorofila-a (Chl-a), en el Lago Menor del Titicaca a partir de firmas espectrales de campo y utilizando imágenes de Landsat-8 OLI, correspondiente al mismo día del paso del satélite.

Las fórmulas de Carlson, fueron utilizadas para determinar el índice de estado trófico (TSI) en los cuerpos de agua en base a concentraciones cuantitativas de clorofila-a y fósforo total. Las cuales dieron un resultado que indican que la mayoría de los puntos tienen el estado Mesotrófico con respecto a las concentraciones de clorofila-a y fósforo total, es decir, la presencia moderada de nutrientes, con excepción en el punto LM-4 que indica el estado Eutrófico con relación al fósforo total.

Agradecimientos

Al Ing. Javier A. Núñez Villalba, director de instituto de investigaciones geográficas (IIGEO), al Dr. Xavier Lazzaro (IRD- Francia) instituto de investigaciones para el desarrollo, en la toma de datos en campo.

Bibliografía

- Carlson, R. E.
1977 A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*, 22 (2): 361 - 369.
- Gregor, J., & Marsálek, B.
2004 “Freshwater Phytoplankton Quantification by Chlorophyll a: A comparative Study of, in vivo and Methods”. *Water Res.* Vol. 38:517-522. s.l.
- Justiniano, M., & Carrasco, L.
2001 Comportamiento hidrológico de niveles de agua en el Lago Titicaca. Simposio Internacional sobre el sistema del Lago Titicaca. La Paz, Bolivia: Artes Gráficas Latina.
- Kruse, F. A.
2018 (20 de Mayo de 2018). Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder. Obtenido de http://www.hgimaging.com/PDF/Kruse-JPL2004_ATM_Compare.pdf
- Lazzaro, X.
2016 El observatorio Binacional del Lago Titicaca (OBLT). La Paz-Bolivia: IRD/BOREA.
- Moreno, D., Quintero, J., & López, A.
2017 (22 de Noviembre de 2017). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. Obtenido de <http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n78ne/eutrofia2.pdf>
- OSINFOR (organismo de supervisión de los recursos forestales y de fauna silvestre)
2014 Contribución en el monitoreo de la actividad minera en títulos habilitantes forestales. Departamento de Madre de Dios . Puerto Maldonado: Presidencia del Consejo de Ministros (PCM).
- Ruiz-Verdú, A., De Miguel, E., Roble-González, C., & Fernández-Renau, A.
2009 CINCLUS: UN INSTRUMENTO PARA LA TELEDETECCIÓN DE LAS AGUAS CONTINENTALES. Montesinos, S; Fernández, L (eds.). Madrid: INTA.

TERCERA PARTE

Herramientas de monitoreo espacial

Implementación de una aplicación móvil para el levantamiento de información geográfica para el monitoreo del clima con indicadores bioclimáticos

José Luis Soza Santos

Resumen

La expansión de las redes de comunicación y la evolución de las computadoras hacia los dispositivos móviles, ha derivado en nuevas formas de capturar información de antiguos conocimientos que han quedado en el olvido. El propósito de este proyecto es rescatar y posteriormente difundir los saberes locales a través de estas nuevas tecnologías. A través de los dispositivos móviles el conocimiento ya no se limita sólo a los libros, sino a todas las personas que tengan acceso a esta tecnología. Por esta razón se propone la aplicación móvil “*Pachayatiri*” creada para recuperar los saberes locales de las comunidades cercanas al Lago Titicaca para predecir el comportamiento climático. La aplicación recupera información de todos los indicadores locales respecto al clima y se guarda en una base de datos georreferenciada disponible para cualquier usuario a través de su teléfono móvil. Esta aplicación es una propuesta tecnológica para recuperar los saberes locales de los indicadores climáticos.

Palabras clave: Pachayatiri, Saberes locales, aplicación móvil, indicadores climáticos.

Summary

The expansion of communication networks and the evolution of computers to mobile devices have led to new ways of capturing information from old knowledge that has been forgotten. The purpose of this project is to rescue and then disseminate local knowledge through these new technologies. Through mobile

devices Knowledge is no longer limited only to books, but to all people who have access to this technology. For this reason, the mobile application “Pachayatiri” created to recover the local knowledge of the communities near Lake Titicaca to predict climate behavior is proposed. The application retrieves the information of all the indicators in the future and is stored in a georeferenced database available to any user through his mobile phone. This is a technological proposal to recover the local knowledge of climate indicators.

Keywords: Pachayatiri, Local knowledge, mobile application, climate indicators.

Introducción: aplicaciones móviles en el cambio climático

Una aplicación móvil, o app (acortamiento del inglés *application*), es una aplicación informática diseñada para ser ejecutada en teléfonos inteligentes, tabletas y otros dispositivos móviles. Las aplicaciones permiten al usuario efectuar un conjunto de tareas de cualquier tipo - profesional, de ocio, educativas, de acceso a servicios, etc., facilitando las gestiones o actividades a desarrollar.

Existen variadas aplicaciones apoyando la difusión de información relacionada al Cambio Climático, ya que cada vez son más las empresas, instituciones y personas particulares que comprenden lo que está pasando. La creciente recepción a través de las diferentes plataformas digitales hace más fácil compartir estos contenidos, ya que en un gran porcentaje las personas que se encuentran cerca de un dispositivo móvil o una computadora, pueden acceder a esta información. Existen aplicaciones como: *EarthNow*, aplicación de la NASA que nos muestra en tiempo real la temperatura del planeta, la cantidad de dióxido y monóxido de carbono y ozono, esto para entender los cambios a los que está sometido nuestro planeta, o también *Changers CO2 fit*, que nos ayuda a calcular la cantidad de CO2 que emitimos y que nos anima a reducirlo.

Indicador bioclimático

Un bioindicador es un indicador consistente en una especie vegetal o animal; o formado por un grupo de especies (grupo eco-sociológico) o agrupación vegetal cuya presencia (o estado) nos da información sobre ciertas características ecológicas, (físico-químicas, micro-climáticas, biológicas y funcionales), del medio ambiente, o sobre el impacto de ciertas prácticas en el medio. Se utilizan sobre todo para la evaluación ambiental (seguimiento del estado del medio ambiente, o de la eficacia de las medidas compensatorias, o restauradoras).

Saberes ancestrales y el comportamiento del clima

Los antiguos hombres sabios, manifestaban que, si la humanidad se comporta mal, afecta al cosmos, la naturaleza y la familia, pues, desde ese punto de vista, hasta ahora todos nos hemos comportado desagradecidamente con la madre tierra, razón por la cual sufrimos sequías, inundaciones, calor en exceso, lluvias ácidas, etc. (lapatriaenlinea.com, 2015)

Sin embargo, en algunas regiones del altiplano boliviano realizan prácticas de saberes ancestrales, asimismo recomiendan que el cambio del clima de hoy, se puede enfrentar con estos indicadores que no contaminan el medio ambiente.

Frente al cambio climático, es importante tomar en cuenta estas señales del tiempo que ayudan a la humanidad para no alterar la naturaleza. Claro que estos indicadores naturales varían según la región, en el oriente, valle, o en otros lugares altiplánicos hay diferentes señales que avisan el porvenir.

Sin duda, esta práctica de indicadores naturales sirvió de mucha utilidad en el tiempo, pero, con el paso de los años ha ido perdiéndose en distintos lugares, porque muchos originarios migraron a la ciudad, donde a veces se piensa que no se necesitan de estos saberes.

Pero, hace años atrás, los oriundos de las zonas rurales, daban mucha utilidad e importancia a indicadores atmosféricos, el viento, astronómicos como la luna y las estrellas, biológicos, el ave y naturales, que han sido heredados por culturas pasadas, el incaico y otros, para sus cosechas y sembradíos.

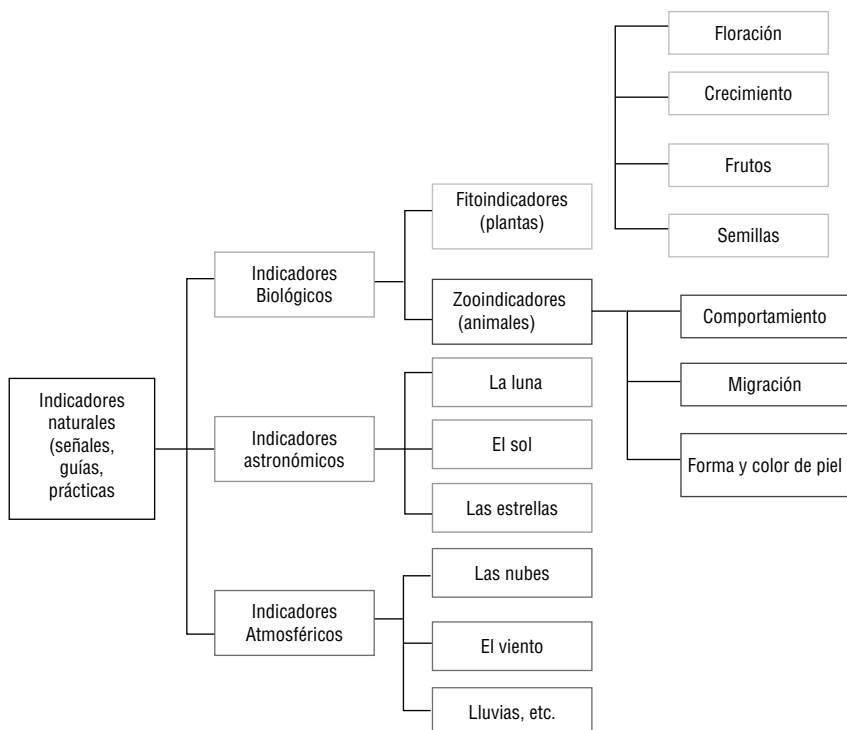
Principios

El principio consiste en observar los efectos biológicos, individualmente o en las poblaciones de diferentes ecosistemas (a escala de la biosfera o a veces de grandes biomas). Estos efectos deben ser medibles vía observación de diversos grados de alteraciones morfológicas, alteraciones de comportamiento, de los tejidos o fisiológicas (crecimiento y reproducción), lo que, en casos extremos, lleva a la muerte de estos individuos o a la desaparición de una población.

El líquen, por ejemplo, es un bioindicador eficaz de la contaminación del aire en un bosque o en una ciudad. Existen otros indicadores para medir los efectos sobre la diversidad biológica.

A continuación podemos ver una clasificación de los indicadores:

Figura 1
Clasificación de los indicadores Bioclimáticos



Fuente: INIAF - FAO, 2013.

Información geográfica

Se denomina información Geográfica (IG), también llamada información geoespacial o información espacial, a aquellos datos espaciales georreferenciados requeridos como partes de operaciones científicas, administrativas o legales. Dichos geodatos poseen una posición implícita (la población de una sección censal, una referencia catastral, una dirección postal, etc) o explícita (coordenadas obtenidas a partir de datos capturados mediante GPS, etc).

En nuestro caso la información a ser capturada de un bioindicador del clima será, el título o nombre del bioindicador, una descripción del mismo, qué es lo que se observa del bioindicador, en que fechas o rangos de fechas se observa, y qué es lo que indica este bioindicador, además se capturara la ubicación de donde se está registrando esta información y una fotografía del bioindicador, dato que es de gran ayuda en la visualización y una mejor comprensión de este.

Aplicación de levantamiento de información para indicadores bioclimáticos

En el marco del proyecto: “Monitoreo Espacial de los efectos del Cambio Climático en el Lago Titicaca con imágenes de satélite”, llevado a cabo en el Instituto de Investigaciones Geográficas-II GEO¹ de la Universidad Mayor de San Andrés, y con Financiación de PIA.ACC², se ha desarrollado una aplicación móvil, denominada APP “*Pachayatiri*”, la cual tiene como objetivo el levantamiento de información geográfica de los indicadores bioclimáticos, y es en esta aplicación donde se almacenara la información, recogida.

La aplicación “*pachayatiri*”

El desarrollo de la aplicación se enfoca en la publicación y captura de los indicadores bioclimáticos. Se ha visto por conveniente contar con varios módulos, en los cuales, en unos mostramos los indicadores bioclimáticos, y en otros registramos la información capturada en campo. A continuación la explicación de estos módulos:

Pantalla principal

Al ingresar a la aplicación, lo primero que veremos es una pequeña introducción al tema desarrollado (figura 2); especialmente para las personas e investigadores que ingresan por primera vez a la aplicación, para que conozcan un poco el contexto del trabajo y la investigación llevada a cabo.

En esta pantalla existe un menú en la parte inferior de fácil acceso a los demás apartados de la aplicación, como ser: de izquierda a derecha, la pestaña de la página principal, la pestaña de las listas por tipo de indicadores bioclimáticos y finalmente la pestaña de crear un nuevo indicador bioclimático.

Listado de indicadores bioclimáticos por tipo

En este apartado se ha catalogado como comentamos en la primera parte de este artículo los indicadores bioclimáticos en tres tipos:

- **Plantas y animales**, estos están compuestos en su mayoría por los animales como las aves, mamíferos y anfibios, además las plantas silvestres propias de la región que se estudia, las cuales se utilizan para predecir el clima y la buena o mala siembra.

1 <http://iigeo.umsa.bo/>

2 <http://www.piaacc.org/>

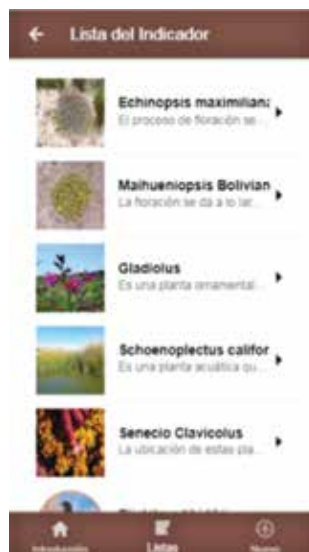
Figura 2
Pantalla principal de la aplicación móvil que nos introduce al tema



Figura 3
Lista de indicadores clasificada por tipo



Figura 4
Lista de indicadores de un tipo en particular

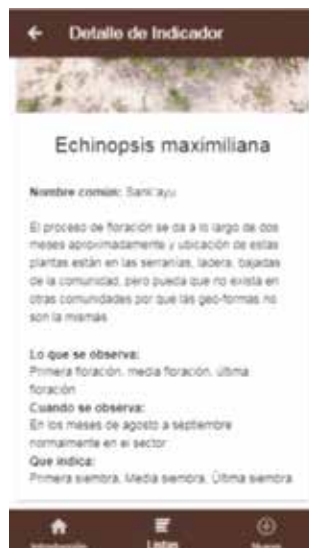


Fuente: Soza, 2018.

Figura 5
Información a detalle de un indicador



Figura 6
Descripción de las características del indicador



Fuente: Soza, 2018.

- **Atmosféricos**, aquí se ven los fenómenos como las tormentas eléctricas o el arco iris para pronosticar el clima, especialmente las lluvias.
- **Astronómicos**, Los campesinos para la predicción climática y sus efectos en las cosechas agrícolas observan el brillo de las constelaciones de estrellas, las fechas de su aparición, sus movimientos, direcciones y su desaparición. Con esas observaciones también predicen si habrán heladas (frecuencias e intensidad)

Para que los usuarios tengan una mejor comprensión de estos, en el listado ponemos también imágenes de estos indicadores (figura 3).

Posteriormente al presionar alguno de los tres tipos de indicadores, se accede al listado del tipo seleccionado, el cual muestra una imagen del indicador, el nombre y un pequeño resumen (figura 4).

Seleccionando alguno de los indicadores y presionándolo, se accede al detalle del mismo, aquí tenemos en profundidad la información del indicador.

Encontramos el nombre del indicador, si tiene un nombre común con el que las personas generalmente se refieren a él, aparecerá en este detalle; posteriormente se verá la descripción. Luego, qué es lo que se observa en el indicador o conducta en el cual nos basamos para posteriormente tener un pronóstico, a continuación tenemos las fechas en los que se observó el indicador, y finalmente que indica o el pronóstico que obtenemos del indicador bioclimático (figura 5 y 6).

Creación de un nuevo indicador bioclimático

En el apartado anterior pudimos observar los indicadores que ya teníamos registrados por parte de los investigadores del proyecto quienes recopilaron en base a indicadores previamente establecidos. Se realizaron varios talleres en la comunidad Cutusuma del Municipio de Batallas recopilando su información de los indicadores bioclimáticos de la zona (Mamani, 2018). En este apartado se podrá registrar información de un nuevo indicador que no se encuentre asentado en la base de datos, esto para enriquecer la información de los indicadores en base a los conocimientos propios de diferentes comunidades gracias a esta aplicación móvil.

Para crear un nuevo registro debemos ingresar a la pestaña “Nuevo” (figura 7), posteriormente podremos llenar el formulario del indicador bioclimático, con tipo de indicador, que nos despliega los tres tipos que comprende y elegir alguno de ellos. A continuación tenemos el título del indicador, la descripción, que es lo que se observa del indicador, cuando o en que fechas se observa, que es lo que nos indica este indicador o el pronóstico. Posteriormente tenemos la ubicación georreferenciada del lugar donde se observa el indicador y finalmente

la posibilidad de la captura de una imagen, la cual nos ayuda en gran medida a registrar, en primer lugar y posteriormente, a mostrar el indicador a los usuarios.

Para obtener la ubicación del lugar donde nos encontramos, debemos presionar el botón de color naranja ubicado en la parte superior derecha, con el símbolo de una flecha, el cual nos desplegará unos botones, elegimos el primero, el cual tiene el símbolo de “Ubicación”, al presionarlo automáticamente cargará la posición en las casillas de longitud y latitud (figura 8).

Para adjuntar una imagen a nuestro formulario, solo debemos presionar el botón color naranja de la parte superior derecha y luego el segundo botón, con el símbolo de una “Cámara”, el cual nos permitirá cargar la imagen desde nuestra galería o desde la cámara del dispositivo móvil (figura 9).

Finalizado este proceso tendremos dos opciones, la de registrar el formulario en el servidor y en la base de datos interna del dispositivo móvil, este solo se habilitará si tenemos una conexión a internet, o la segunda opción que registrará el formulario solamente en la base de datos del celular, para que posteriormente cuando nos encontremos con conexión a internet podamos registrar estos datos en el servidor del IIGEO.

Ya almacenado este registro nuevo, podremos verlo en la lista de indicadores de la aplicación, y tener el detalle del nuevo indicador bioclimático (figura 10).

Figura 7
Formulario para el registro
de un nuevo Indicador
Bioclimático

Figura 8
Georreferenciación
del indicador

Figura 9
Menú de selección
de imágenes

Fuente: Soza, 2018.

Figura 10
Publicación del nuevo
indicador



Fuente: Soza, 2018.

Concluido el desarrollo y la puesta en marcha de la aplicación, podemos constatar que la misma ayuda a la difusión, comprensión y en algunos casos la utilización de los indicadores bioclimáticos, esto es muy importante ya que rescatamos estos saberes ancestrales y además de almacenarlos y publicarlos, los alimentamos de nuevos conocimientos sobre otros indicadores, no solo nosotros, si no los nuevos usuarios de la aplicación.

Resultados

La aplicación móvil “PACHAYATIRI” desarrollada en el IIGEO está disponible en:

<http://www.geovisorumsa.com/pages/app.html>

También está disponible el siguiente código QR:



Bibliografía

Claverias, R.

2007 Conocimientos Campesinos Andinos Sobre los Predictores Climáticos: Elementos para su verificación. Lima-Perú. Pp. 98.

CCE

2001 Comunicación de la comisión al consejo y al parlamento europeo. Tecnología de la información y de la comunicación en el ámbito del desarrollo. El papel de las TIC en la política comunitaria de desarrollo. Bruselas. Consultado en <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/txt/pdf/?uri=celex:52001dc0770&from=es>

INIAF - FAO

2013 Saberes Ancestrales e Indicadores Naturales para la reducción de riesgos de Desastres Agropecuarios. Bolivia-La Paz

lapatriaenlinea.com

2015 Saberes ancestrales y el comportamiento del clima. Consultado en <http://lapatriaenlinea.com/?nota=215121>

Mamani Gómez, W., & Nuñez-Villalba, J.

2018 *Propuesta metodológica para monitoreo de la agricultura familiar en caso de fenómenos climáticos.* UMSA.

Metadatos Raster para el monitoreo espacial del Lago Titicaca

*Tatiana Yamilka Vargas Condori*¹

Resumen

La información raster es usada en fotografías, imágenes satelitales y fotografías aéreas, esta información está organizada en cuadrículas, cada una de estas cuadrículas cuenta con datos diferentes y necesarios para la comprensión de la escena. Es a partir de una correcta organización y una eficaz sistematización que se puede divulgar imágenes satelitales en geovisores. ERDAS APOLLO es un geovisor que ayuda a la recepción y distribución de imágenes. El objetivo principal de este trabajo fue construir una lista de metadatos Raster para el monitoreo espacial del Lago Titicaca. El trabajo consistió en almacenar escenas del sector del Lago Titicaca primeramente, para observar las dinámicas espaciales del Lago Titicaca y las comunidades alrededor del cuerpo de agua y posteriormente promover imágenes utilizadas en Tesis de Grado e investigaciones. El geovisor permite compartir la información raster, de esta manera es posible hacer conocer lo que se realiza en el proyecto de monitoreo espacial del Lago Titicaca desarrollado en el Instituto de Investigaciones Geográficas de la Universidad Mayor de San Andrés.

Palabras clave: Información raster, Geovisor, Monitoreo espacial, Lago Titicaca.

1 Ingeniera Geógrafa, consultora encargada del manejo y administración de información raster y el geovisor ERDAS APOLLO en el Instituto de Investigaciones Geográficas II GEO - UMSA.

Abstract

The raster information is used in photographs, satellite images and aerial photographs, this information is organized in squares, each of these squares has different data and necessary for the understanding of the scene. It is from a correct organization and an efficient systematization that satellite images can be divulged in geovisors. ERDAS APOLLO is a geovisor that helps the reception and distribution of images. The main objective of the project “Raster Metadata for the spatial monitoring of Lake Titicaca” is to store scenes from the Lake Titicaca sector first to observe the spatial dynamics of the lake and the communities around the body of water and subsequently promote images used in the Thesis and investigations. The geovisor allows to share the raster information, in this way it is possible to make known what is done within the Spatial Monitoring of Lake Titicaca on Geographical Research Institute from San Andrés University and promote research.

Keywords: Raster information, geovisor, spatial monitoring, Titicaca Lake.

ERDAS APOLLO como herramienta para la investigación

¿Qué es la información raster?

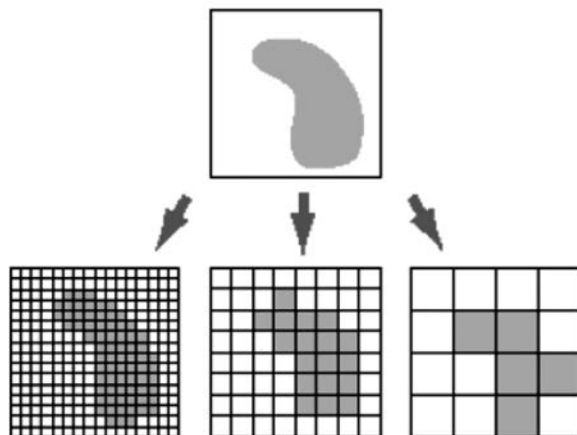
La información raster es representada a través de cuadrículas que contienen información específica. “En los datasets ráster, cada celda, también conocida como píxel, posee un valor. Los valores de celda representan el fenómeno descrito por el dataset ráster, como, por ejemplo, una categoría, magnitud, altura o valor espectral” (ESRI, 2016). Este tipo de información es utilizada en fotografías, imágenes de satélite y también fotografías aéreas.

“El área (o superficie) representada por cada celda contiene el mismo ancho y altura, y es una parte equivalente a toda la superficie representada por el ráster. Por ejemplo, un ráster que represente la elevación puede cubrir un área de 100 kilómetros cuadrados. En el caso en el que hubiera 100 celdas en este ráster, cada celda representaría 1 kilómetro cuadrado con ancho y altura iguales (es decir, 1 km x 1 km)” (ESRI, 2016).

La imagen dependerá de la cantidad de píxeles que esta tenga para su calidad de visualización. Esto significa que mientras más píxeles tenga la imagen tendrá una resolución alta y cuando menos píxeles cubra la imagen se presentara la pérdida de información, limitando la calidad de la imagen (ver figura 1).

Finalmente, “para poder transmitir y compartir la imagen en formato raster o vectorial en una IDE se necesita aplicar protocolos internacionales por medio de los servicios wms, wfs o wcs” (Hernández y Flores, 2012).

Figura 1
Distribución de pixeles en una la imagen satelital



Fuente: ESRI, 2016.

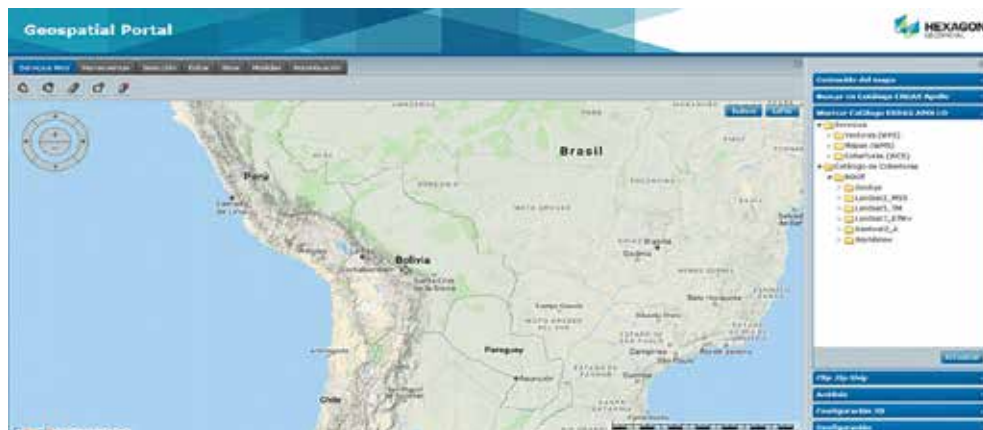
Geovisor ERDAS APOLLO

Los geovisores son parte de las nuevas herramientas tecnológicas del siglo XXI. Su utilidad se concentra en el almacenamiento y la visualización de información geográfica. “Los portales geográficos son la esencia de las Infraestructuras de Datos Espaciales - IDEs que son un conjunto de tecnologías, estándares, políticas y recursos institucionales que operan coordinadamente para adquirir, procesar, almacenar, distribuir información geográfica promover su uso” (Franco, 2016: p 3). En el glosario de la ICDE (Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales) se define Geoportal como “Sitio en internet cuyo objetivo es ofrecer al usuario de forma integrada recursos y servicios basados en información geográfica permitiendo el acceso a través de herramientas tecnológicas apropiadas” (Franco, 2006: p 4).

El geovisor ERDAS APOLLO se encuentra dentro de las herramientas tecnológicas utilizadas por el Instituto de Investigaciones Geográficas - IIGEO, su principal utilidad es la de administrar la información raster obtenida, “esto incluye la organización de datos geoespaciales en una biblioteca centralizada, y la distribución de esos datos desde la nube o en línea” (HexagonGeoespatial, 2015).

Es a partir de este mecanismo que la información raster obtenida a partir de Tesis de grado e investigaciones realizadas por los investigadores, estudiantes y docentes, de geografía en la Universidad Mayor de San Andrés puede ser compartida a todo el mundo. ERDAS APOLLO “habilita flujos de trabajo potentes para describir, diseñar, asegurar, catalogar y publicar datos geoespaciales y no espaciales. Después catalogando los datos, los usuarios finales pueden realizar fácilmente en profundidad búsquedas en el catálogo utilizando poderosos metadatos y herramientas de búsqueda espacial dentro del Portal geoespacial” (HexagonGeoespatial, 2015).

Figura 2
Pantalla principal Geovisor ERDAS APOLLO



Fuente: <http://www.geovisorumsa.com/>, 2018.

Las imágenes satelitales sistematizadas dentro del Geovisor están correctamente catalogadas y pueden ser descargadas gratuitamente. Entre los beneficios ofrecidos por el Geovisor se encuentra el poder obtener las imágenes con todos los procesos necesarios (compilación de bandas, corrección geométrica y corrección atmosférica). El estudiante ahorra el tiempo del tratamiento de la escena, y puede dedicarse por completo a la investigación.

Hay que mencionar que dentro de la información almacenada también se cuenta con escenas compradas, como las RapidEye y Worldview. Por sus características estas imágenes tienen un acceso restringido y no pueden ser distribuidas gratuitamente, para este tipo de situaciones el IIGEO brinda un permiso especial dependiendo del tema de investigación, con esta facilidad es posible la dotación de la escena solicitada.

Proceso de publicación de imágenes satelitales

El proceso de organización de imágenes satelitales para después ser subidas al Geovisor ERDAS APOLLO se rige en el cumplimiento de pasos establecidos. El primer paso es la recolección de información raster, esta información puede ser el resultado de investigaciones en la Universidad Mayor de San Andrés, también pueden ser datos de otros institutos de investigación que estén integradas a la red del IIGEO. Actualmente se cuenta con escenas de Cooperaciones Internacionales como el *L'Institut de recherche pour le développement* (IRD) y el Instituto de Ecología, dependiente de la carrera de Biología.

Como segundo paso está el tratamiento de la imagen satelital, en esta fase se debe culminar con una escena lista para ser utilizada en diversas investigaciones. Por lo tanto, esta escena debe haber pasado por constantes revisiones y filtros que determinen su utilidad. Finalmente, se procede a publicar la imagen en el Geovisor ERDAS APOLLO acción que se realiza a partir del programa de edición y publicación *Data Manager*.

Sistematización de las imágenes satelitales del Lago Titicaca

Para realizar la sistematización de imágenes del Lago Titicaca. Se identificó la zona norte de la Bahía de Cohana, área donde se priorizan las investigaciones de eutrofización², ubicada con el Path y Row (001/071)³. Asimismo, el Path/Row (001/072), lugar donde se ubica la zona sur del lago. Todas estas imágenes fueron obtenidas en primera instancia de la base de datos del IIGEO y posteriormente de las investigaciones en el periodo 2017 - 2018.

Tabla 1
Ejemplo de organización de imágenes satelitales provenientes de tesisistas IIGEO

Núm.	Imagen satelital	Tesista/Investigador	Mes de tratamiento
1	landsat8_oli_28_07_2017_001_069	Arq. Berta Gozalbes	Septiembre
2	landsat8_oli_14_04_2017_001_071	Wilson Mamani	Octubre
3	landsat8_oli_22_01_2016_001_071	Wilson Mamani	Octubre
4	landsat8_oli_26_03_2017_001_071	Wilson Mamani	Octubre
5	landsat8_oli_27_04_2016_001_071	Wilson Mamani	Octubre
6	landsat5_tm_05_11_2010_001_071	Jorge Rocha	Noviembre
7	landsat5_tm_11_04_2010_001_071	Jorge Rocha	Noviembre
8	landsat8_oli_20_09_2017_001_071	Daniel Callisaya	Noviembre
9	landsat8_oli_30_10_2017_002_072	Ing. Javier Núñez	Noviembre

Fuente: Tatiana Vargas, 2018.

Hasta junio de 2018 se logró recuperar 64 imágenes satelitales del sector del Lago Titicaca, es necesario mencionar que también se cuenta con imágenes del Lago Poopó y de la Serranía de Sama.

2 Según Chapa y Guerrero (2001) la *eutrofización* es el exceso de alimento que puede afectar negativamente los procesos químicos y la dinámica de los ecosistemas acuáticos.

3 Para denominar las imágenes se utiliza una grilla mundial en el que se identifica cada imagen de forma unívoca por un *Path* (*franja vertical*) y un *Row* (*fila horizontal*). (Naciones Unidas, encontrado en: <http://www.biesimci.org>).

Tratamiento de las imágenes satelitales

En la mayoría de los casos las imágenes rescatadas se encuentran en estado crudo, es decir, no cuentan con ningún tratamiento técnico, por este motivo es necesario realizar la compilación de bandas en las diferentes imágenes. Y, posteriormente una georeferenciación que culmina con la obtención de una correcta proyección que se adecua a Google Earth. De igual forma se efectúa la corrección atmosférica, y en las imágenes Landsat 8 se concluye con la fusión de bandas, mejorando la resolución de la escena desde 30m a 15m.

Para identificar los procesos realizados con las imágenes satelitales del sector del Lago Titicaca, se desarrolló una designación de códigos que identifica los tratamientos realizados. En la siguiente tabla se señalan los códigos de identificación.

Tabla 2
Códigos de identificación

A1	Imagen compilada
A2	Imagen georeferenciada
A3	Imagen Corregida atmosféricamente
A4	Imagen fusionada
A5	Imagen con indicador de NDVI

Fuente: Tatiana Vargas, 2018

Como se observa en la tabla anterior la codificación mejora el entendimiento de los procesos realizados en las imágenes satelitales.

Alternadamente con el tratamiento de imágenes satelitales se crearon los metadatos con las características de las escenas. Dentro de la tabla elaborada para el llenado de metadatos se menciona la siguiente información.

Tabla 3
Información del metadato

Nombre de la imagen	Estado
Path y Row	Localización de archivo
Fecha de origen y fecha de actualización	Palabras clave
Formato de presentación	Encuadre geográfico
Fuente de información	Información del Sistema de Referencia Espacial
Descripción	Información y calidad de datos
Autor del Metadato	Contacto de Información

Fuente: Tatiana Vargas, 2018.

Todos estos datos son presentados en formato de texto, Word. Esta es una forma de organización para tener un orden al momento de subir imágenes al ERDAS APOLLO.

Figura 3
Planilla del metadato

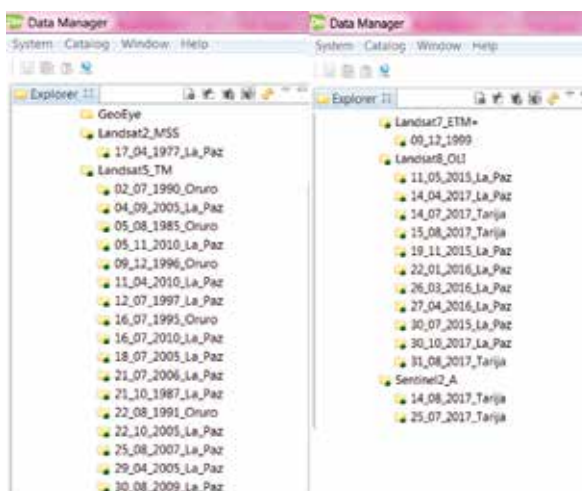
[illegible]

Fuente: Tatiana Vargas, 2018.

Publicación de imágenes al geovisor ERDAS APOLLO

Para la publicación de imágenes se utilizó el programa DATA MANAGER que tiene como finalidad facilitar todo el proceso de edición, esto significa que dentro del software es posible determinar todas las características que mostrará la imagen una vez publicada en el geovisor ERDAS APOLLO.

Figura 4
Imágenes almacenadas en el software Data Manager

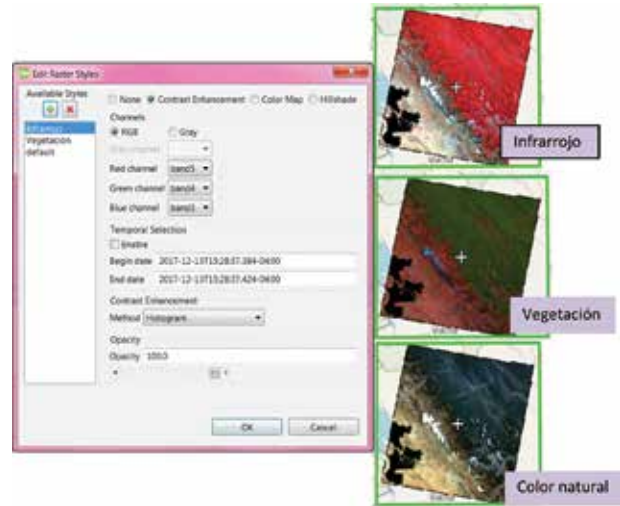


Fuente: Data Manager, 2018

En la figura se detalla la existencia de los grupos de imágenes satelitales subidos al Data Manager, hasta la fecha se cuenta con imágenes Landsat2 MSS, Landsat5 TM, Landsat7 TM y Landsat8 OLI.

Con la ayuda del Data Manager se puede editar la imagen satelital, también es posible otórgale diversos estilos a las escenas, como color natural, infrarrojo y vegetación. A través de Data Manager se es posible hacer una revisión en crudo de cómo visualiza la imagen el usuario básico del geovisor ERDAS APOLLO.

Figura 5
Edición de estilo en Data Manager



Fuente: Data Manager, 2018.

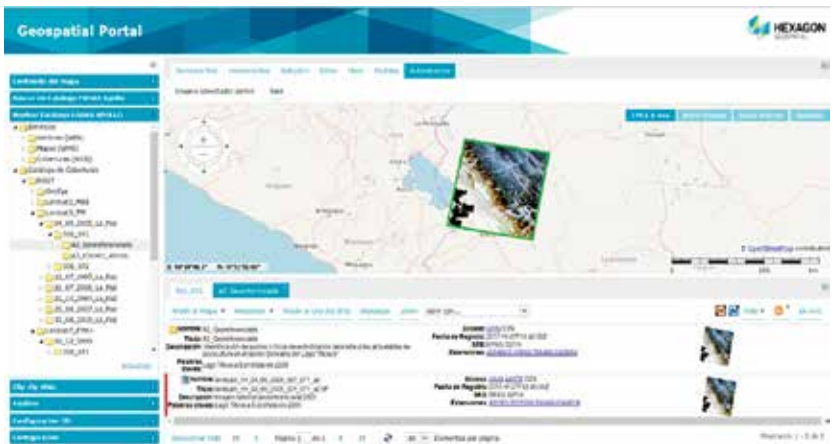
Figura 6
Edición metadato en Data Manager



Fuente: Data Manager, 2018.

Una vez finalizado el preprocesamiento en el software DATA MANAGER es posible la visualización en el geovisor ERDAS APOLLO. Todas las imágenes tratadas se encuentran a disposición de los usuarios.

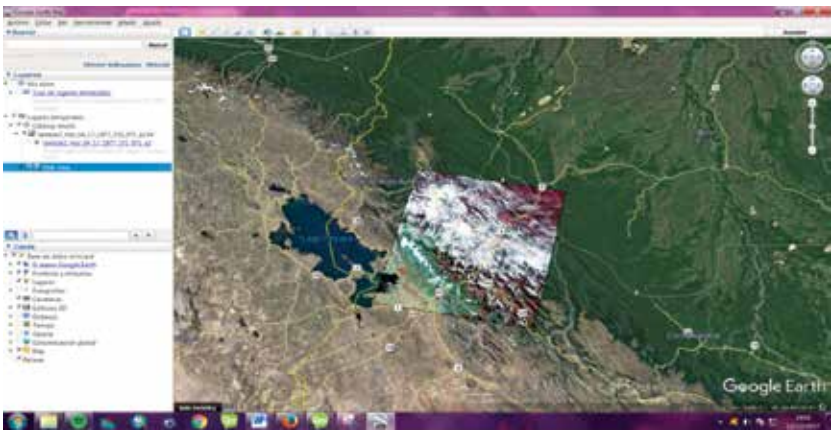
Figura 7
Imágenes satelitales en ERDAS APOLLO



Fuente: ERDAS APOLLO, 2018.

Todas las imágenes publicadas pueden ser visualizadas y descargadas en formato “kml” de Google Earth. También puede descargarse una carpeta “rar” donde se encuentran todos los archivos de una imagen satelital.

Figura 8
Visualización de imagen en Google Earth



Fuente: Google Earth, 2018.

El proceso de publicación se difunde a través de dos videos que se desarrollaron durante el mes de diciembre de 2017. El primer video se titula “Publicación de imágenes satelitales ERDAS APOLLO” y su principal finalidad es el de mostrar el proceso de publicación de imágenes satelitales, empezando desde el almacenamiento en los servidores QNAP2 y ERDAS, la edición en el software DATA MANAGER y la publicación en ERDAS APOLLO.

El segundo video tiene el nombre de “Uso público del geovisor ERDAS APOLLO” y muestra detalladamente las herramientas del ERDAS APOLLO, enseñando de una manera didáctica la forma de visualizar, y descargar la imagen satelital. También es posible observar la cantidad de escenas subidas hasta la fecha.

Figura 9
Video “Publicación de imágenes satelitales ERDAS APOLLO”



Fuente: Tatiana Vargas, 2018.

Figura 10
Video “Uso público del geovisor ERDAS APOLLO”



Fuente: Tatiana Vargas, 2018

Los videos pueden ser vistos desde la plataforma YouTube. Ambos videos son útiles para las personas que trabajen subiendo imágenes satelitales en calidad de administradores o usuarios comunes.

Monitoreo temporal del Lago Titicaca

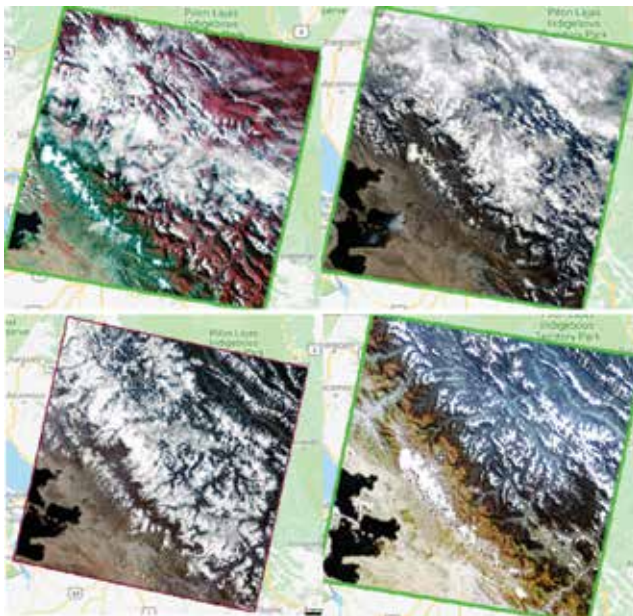
La acción del monitoreo se realiza haciendo una comparación entre imágenes de diferentes meses o años. La finalidad principal es la de observar cambios existentes en el periodo de tiempo determinado. “El monitoreo espacial con imágenes de satélite es cada vez más común en diferentes tipos de investigaciones científicas. El Cambio Climático, los desastres naturales, monitoreo espacial de desastres y riesgos, las deforestaciones, el crecimiento de las ciudades, la reducción de los glaciares e incluso los campamentos de migración de personas o las guerras civiles en áreas urbanas son posibles de monitorear” (Núñez, 2017: p 14).

A través del almacenamiento de imágenes en diferentes fechas es posible realizar un monitoreo temporal del Lago Titicaca. Contar con la observación continua del lago es muy importante para comprender las dinámicas del espejo de agua, de la vegetación y de la urbanización de zonas alrededor del Titicaca.

La imagen más antigua con la que cuenta el geovisor ERDAS APOLLO es la del año 1977 y la más nueva es del 2018. Las escenas se actualizan mediante investigaciones realizadas en el IIGEO, esto significa que hay un proceso de renovación constante.

La información almacenada permite realizar comparaciones de manera rápida y sin necesidad de contar con un conocimiento previo de software sofisticados. Esta es una de las grandes ventajas con las que cuenta el geovisor ERDAS APOLLO.

Figura 11
Monitoreo Temporal del Lago Titicaca



Fuente: Tatiana Vargas, 2018.

Estudio temporal del Lago Poopó y de la Serranía de Sama

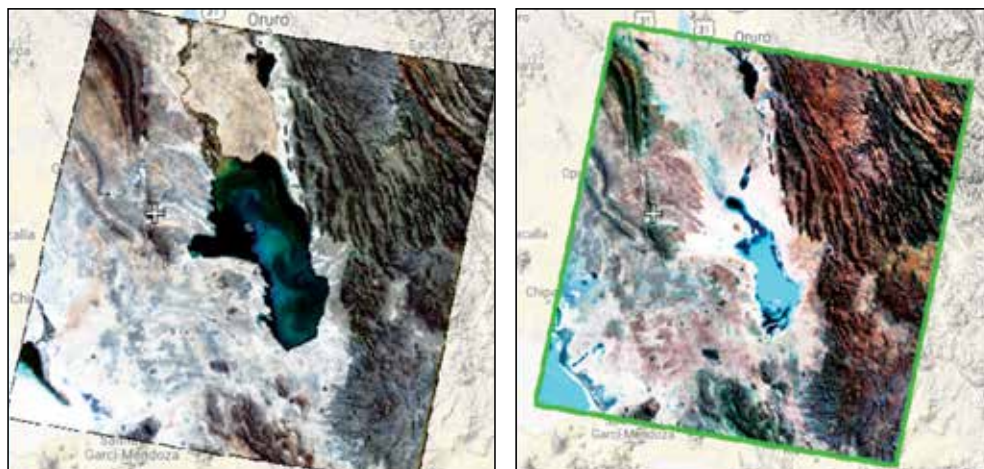
El Lago Poopó

La situación de sequía extrema ocurrida en el Lago Poopó en diciembre de 2015 ha generado la necesidad de realizar el estudio temporal del Lago Poopó, que al igual que el Lago Titicaca es de importancia para el país.

Con el objetivo de observar las dinámicas del espejo de agua se han sistematizado imágenes satelitales de la zona del Lago Poopó desde el año 1985, el proceso de almacenamiento se encuentra en continuidad y se espera cubrir con escenas actuales.

Los resultados han sido óptimos pues es posible contar con imágenes de los dos lagos más importantes de Bolivia.

Figura 12
Monitoreo temporal Lago Poopó



Fuente: Tatiana Vargas, 2018.

En la primera imagen se puede observar el espejo de agua del Lago Poopó en 1985 año donde ocurría la mayor inundación en esta zona, la comparación se concentra al observar el Lago Poopó en una de sus disminuciones máximas, el año 1995 época donde la sequía consumía el líquido de este cuerpo de agua.

Serranía de Sama

Para realizar el monitoreo de la Serranía de Sama en el departamento de Tarija se seleccionaron tres imágenes satelitales LANDSAT8, la primera imagen del 14

de julio donde se puede apreciar la zona sin afectación. La segunda imagen del 15 de agosto mostrando los efectos producidos por el incendio. Finalmente se seleccionó una imagen del 31 de agosto, evidenciando con la imagen que los efectos son aun visibles semanas después del gran incendio.

Posteriormente, se seleccionaron dos imágenes SENTINEL que también son de fechas muy cercanas al desastre, la primera imagen del 14 de agosto y la segunda del 25 de agosto. La última imagen muestra el estado de la serranía después de tres días de apagar el fuego.

Figura 13
Monitoreo espacial Serranía de Sama



Fuente: Tatiana Vargas, 2018.

Conclusiones

El geovisor ERDAS APOLLO está logrando consolidarse como una herramienta que permite a cualquier usuario hacer investigaciones en base a información satelital raster. El Instituto de Investigaciones Geográficas - IIGEO está constantemente trabajando para actualizar las imágenes de sectores como el Lago Titicaca, Lago Poopó, Serranía de Sama y La Amazonia.

El objetivo de ser una herramienta que facilite los procesos investigativos está siendo cumplida, muchos investigadores son conscientes de las facilidades que les brinda el geovisor y han optado por este para realizar sus análisis.

La acción de monitoreo es exitosa a partir de la sistematización de imágenes satelitales obtenidas a partir de Investigaciones realizadas en la carrera de Geografía y el Instituto de Investigaciones Geográficas.

Bibliografía

Chuvieco, E.

2002 *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio.* España: Ed. Ariel, España.

De la Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R., Rodrigues, M. (Eds.)

2015 *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación: 777-786.* Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza AGE.

Franco, Rodolfo

2017 *Geoportales y visores geográficos en Colombia.* Bogota, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal.

Hexagon Geoespatial

2015 *ERDAS APOLLO Managing and serving geospatial information.*

López, Andrea y RodríguezKatherine

2017 *GeoCC Mosquera: Geovisor para la divulgación de la información de Cambio Climático en el municipio de Mosquera.* Bogota, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Núñez, Javier (Editor)

2017 *Monitoreo espacial de desastres y riesgos a través de imágenes de satélite - medyratis.* La Paz, Bolivia: Plural Editores.

Plataforma de colaboración binacional para el monitoreo espacial de los efectos del cambio climático en el Lago Titicaca

Javier Nuñez-Villalba & Mario Polar

Resumen

El Lago Titicaca, con una altura promedio de 4000 metros sobre el nivel del mar, forma un oasis en pleno altiplano localizado entre Perú y Bolivia. Ambos países comparten sus hermosos paisajes, pero también sus diversos problemas. Existen dos tipos de problemas, la contaminación ocasionada por la actividad humana y la degradación de su ecosistema como efecto del Cambio Climático. La contaminación se genera por la ocupación urbana no planificada, los residuos sólidos por línea de playa, el deficiente tratamiento de aguas residuales, la minería informal, entre otros. Los efectos del Cambio Climático se traducen en la reducción del espejo de agua que afecta a los lugares someros en época seca (invierno) provocando blooms espontáneos o inundaciones en época húmeda (verano). Por esta razón, es necesario contar con una plataforma binacional que permita monitorear el Lago Titicaca. Los datos oficiales de ambos países, Perú y Bolivia, se pueden almacenar en una plataforma de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE). Esta IDE binacional debe seguir el estándar de información geográfica para homogenizar los datos con indicadores descriptivos que permita mostrar las diversas formas de ocupación humana, como presión al ecosistema limnológico, y los cambios espaciales en tiempo real. Los datos binacionales permitirán identificar las zonas con mayor vulnerabilidad. En este sentido se realizó un primer ejercicio entre el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y el Instituto de Investigaciones Geográficas de la UMSA¹ como parte del proyecto de Monitoreo de los Efectos del Cambio Climático con imágenes de satélite en el Lago Titicaca del PIA-ACC.² Este primer

1 Universidad Mayor de San Andrés.

2 Proyecto de Investigación Aplicada para la Adaptación al Cambio Climático.

ejercicio tiene la intención de proponer la publicación del primer Atlas binacional del Lago Titicaca con la información geográfica generada entre ambos países. Además de establecer las bases para consolidar una plataforma de monitoreo.

Palabras clave: Lago Titicaca, monitoreo espacial, IDEs, vulnerabilidad, plataforma binacional, Perú, Bolivia.

Summary

Lake Titicaca, with an average height of 4000 meters above sea level, is an oasis in the highlands located between Peru and Bolivia. Both countries share their beautiful landscapes, but also their various problems. There are two types of problems, the pollution caused by human activity and the degradation of the ecosystem as an effect of Climate Change. Pollution is generated by unplanned urban occupation, solid waste by the beach, poor wastewater treatment, informal mining, among others. The effects of climate change are reflected in the reduction of the water mirror that affects shallow places in dry season (winter) causing spontaneous blooms or floods in humid season (summer). For this reason, it is necessary to have a bi-national platform to monitor Lake Titicaca. The official data of both countries, Peru and Bolivia, can be stored in a platform of Spatial Data Infrastructure (IDE). This bi-national IDE must follow the geographic information standard to homogenize the data with descriptive indicators that show the different forms of human occupation, such as pressure on the limnological ecosystem, and spatial changes in real time. Binational data will identify the most vulnerable areas. In this sense, a first exercise was carried out between the Institute of the Sea of Peru (IMARPE) and the Geographic Research Institute of the UMSA as part of the project of "Monitoring the Effects of Climate Change with satellite images in the Lake Titicaca" of the PIA - ACC. This first exercise intends to propose the publication of the first binational Atlas of Lake Titicaca with the geographic information generated between both countries. In addition to establishing the bases to consolidate a monitoring platform.

Keywords: Titicaca Lake, spatial monitoring, IDEs, vulnerability, binational platform, Peru, Bolivia.

Introducción

En la actualidad existen muchas formas de integrar datos a través de formatos como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), las imágenes de satélite, o las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE). Estas herramientas permiten monitorear los procesos humanos y naturales. Su construcción se basa en el procesamiento de datos validados según el objeto de estudio.

El objetivo en este caso es el monitoreo del Lago Titicaca, el lago navegable más alto del mundo, localizado en el altiplano suramericano a 4000 metros sobre el nivel del mar entre Perú y Bolivia. Sus condiciones geográficas hacen que la región del lago se convierta en un oasis en pleno altiplano árido y seco. En el lado peruano, el Lago Titicaca forma parte de la jurisdicción del Departamento de Puno, mientras que en Bolivia es parte del Departamento de La Paz. Asimismo, el Lago en su conjunto forma parte del sistema hídrico TDPS por sus siglas que comprenden el Lago Titicaca, el Río Desaguadero, el Lago Poopó y el Salar de Coipasa.

Los impresionantes paisajes del Lago Titicaca que comparten ambos países, Perú y Bolivia, se vuelven vulnerables por la presencia de asentamientos humanos no planificados, la actividad minera, la presencia de residuos sólidos y líquidos, la pesca indiscriminada y las plantas de tratamiento de aguas residuales que descargan al interior del Titicaca. Estas actividades se las denomina, para este estudio, como contaminantes.

Por otro lado, existen otros elementos que elevan la vulnerabilidad del lago como los efectos del Cambio Climático. Un ejemplo es la reducción del espejo de agua en época seca del invierno que tarda en recuperarse. Una consecuencia de esta reducción es el caso de Patapatani que en la cartografía anterior a los años 90 todavía se la consideraba como una isla (Nuñez-Villalba, 2018). Sin embargo, ahora es evidente que forma una península, accesible por un camino vehicular. Las áreas de inundación se han convertido en lugares aptos para el cultivo (Ver figura 1). El descenso del nivel del agua en esta región del lago, el Lago Menor del Titicaca, se ha reducido a un promedio de profundidad de 1 metro en toda el área de Bahía Cohana comprobado por sondeos realizados el año 2018 (ver figura 2).

El lago en esta zona de Bahía Cohana, con aguas cada vez más someras, ocasiona que la luz del sol llegue hasta el fondo lo que genera un exceso de plancton y bacterias. Esta proliferación llega a tal extremo que consumen tal cantidad de oxígeno que generan eutrofización. En las imágenes de satélite es fácil de identificar la vegetación que prolifera en esta zona producto de este fenómeno. Este suceso se explica mejor en los capítulos 4, 5 y 6 de este libro.

El estudio ha identificado dos tipos de problemas, la contaminación ocasionada por la actividad humana y la degradación de su ecosistema como efecto del Cambio Climático. Por esta razón, surge la iniciativa de desarrollar una plataforma de colaboración binacional para el monitoreo del Lago Titicaca a través de la construcción de una Infraestructura de Datos Espaciales - IDE³. Esta plataforma

3 Una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) es un sistema integrado por un conjunto de recursos (catálogos, servidores, programas, aplicaciones, páginas web,...) que permite el acceso y la gestión de conjuntos de datos y servicios geográficos (descritos a través de sus metadatos), disponibles en Internet, que cumple una serie de normas, estándares y especificaciones que regulan y garantizan la interoperabilidad de la información geográfica. Así mismo es necesario establecer

Figura 1
Imágenes de satélite Landsat entre los años 1977 y 2017
de la antes Isla Patapani y ahora Península

Isla Patapatani Imagen Landsat MSS
 en color infrarrojo del 17 de abril de 1977

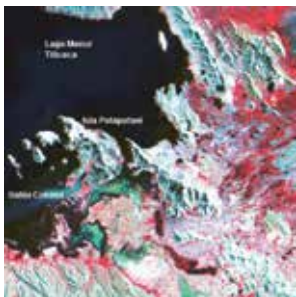


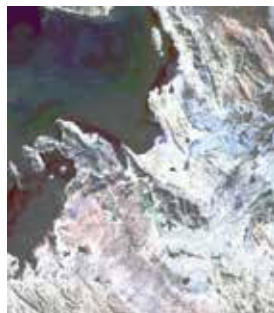
Imagen Landsat en color verdadero
 del 30 de diciembre de 1987.



Imagen Landsat en color verdadero
 del 30 de diciembre de 1997



Imagen de satélite Landsat 8 OLI en colores
 verdaderos del 4 de agosto de 2017



Elaboración propia en base a imágenes de satélite Landsat almacenadas en el geovisorumsa.com.

Figura 2
Datos obtenidos de batimetría con la sonda Garmin Striker 4cv del área de Bahía Cohana



Izquierda, fotografía de la sonda Garmin que muestra los 0.7 metros de profundidad. Derecha, localización del punto de la muestra en la Bahía de Cohana, Lago Titicaca.

permitirá unificar y estandarizar la información geográfica entre Perú y Bolivia. Las variables a considerar serán socioeconómicas y físico-naturales. Para su construcción se considera los datos oficiales de ambos países articulando diferentes instituciones académicas y administrativas.

Cada país tiene su propia IDE, en el caso de Bolivia es GeoBolivia⁴ y en Perú es GeoIDEP⁵ y ambas instituciones dependen del gobierno. La diferencia de estas instituciones con la plataforma que se propone es la temática y la temporalidad. La intención, en el futuro, es que la plataforma sea de monitoreo permanente orientada a vigilar las condiciones del Lago Titicaca. Otro elemento importante es que los datos deben ser aporte de las instituciones como las universidades o los centros de investigación. Las instituciones identificadas que ya pueden aportar con información son IMARPE del Perú, Autoridad del Lago Titicaca - ALTG, el IRD de Francia, y el IIGEO de Bolivia.

En este sentido se realizó un ejercicio de integración de datos de población, cuencas, usos del suelo y riesgos. En este punto es importante destacar que las unidades político administrativas entre Perú y Bolivia son diferentes por lo que se intentó buscar una equivalencia. Por ejemplo, el Departamento de Puno (Perú) se divide en 109 distritos que serían su equivalente territorial a los 87 municipios en el Departamento de La Paz (Bolivia).

Población

Es importante destacar que el Perú se divide en 24 Departamentos, 194 provincias y 1829 distritos. El Departamento de Puno ocupa el quinto lugar en número de habitantes a nivel nacional. Puno está compuesto por 13 provincias, seis de ellas se encuentran alrededor del lago, (Moho, Huancané, Puno, El Collao, Yunguyo y Chucuito). Sin embargo la Provincia de San Román, cuyos límites no colindan al lago, se considera de especial interés porque concentra la mayor cantidad de habitantes a nivel del Departamento en el Distrito de Juliaca.

Los resultados del último censo poblacional del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) del Perú registraron, para el año 2007, un incremento de habitantes en áreas urbanas. El año 1993 la población urbana contaba con el 39,2% y su incremento fue de 49,7%, predominando las provincias de San Román (Juliaca) y Puno (capital del Departamento).

Según los Censos Nacionales de Población y Vivienda realizados por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) de los años 1981, 1993, 2007

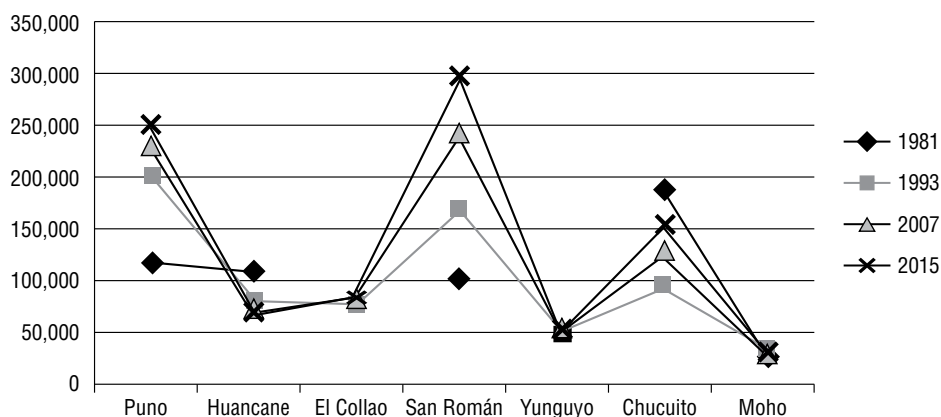
un marco legal que asegure que los datos producidos por las instituciones serán compartidos por toda la administración y que promueva su uso entre los ciudadanos (IDEE, 2013).

4 <http://geo.gob.bo>

5 <http://www.geoidep.gob.pe/>

y una proyección al año 2015, muestran que la provincia de San Román (Juliaca) cuenta con una mayor población comparada a las demás provincias. En los últimos años supero a la propia capital de Provincia de Puno. La provincia de Yunguyo y Moho mantienen una población estática. Asimismo la provincia de Huancané, según los últimos censos, está decreciendo (Ver Figura 3).

Figura 3
Comparación de población en las Provincias de Puno
entre los años 1981, 1993, 2007 y 2015



Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).

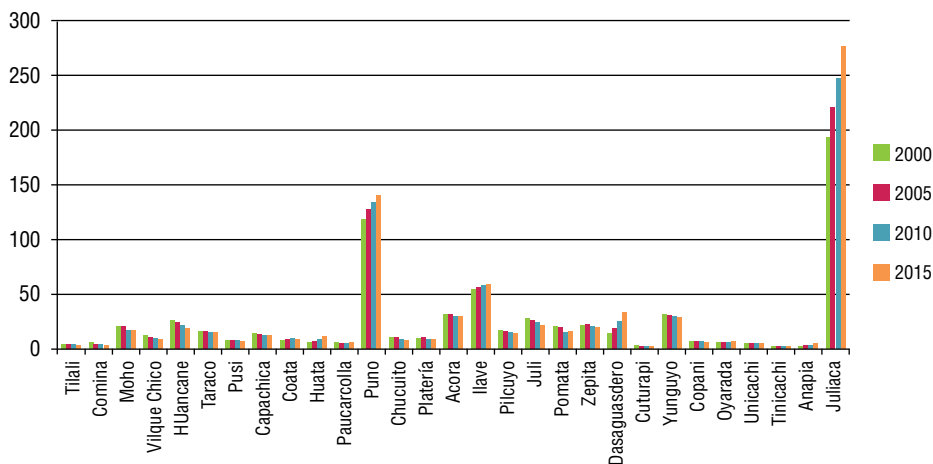
El Departamento de Puno está compuesto por 109 distritos, 28 de ellos se encuentran localizados al borde circunlacustre: Tilali, Conima, Moho, Vilque Chico, Huancané, Taraco, Pusi, Capachica, Coata, Huata, Paucarcolla, Puno, Chucuito, Platería, Acora, Ilave, Pilcuyo, Juli, Pomata, Zepita, Desaguadero, Cuturapi, Yunguyo, Copani, Oyarada, Unicachi, Tinicachi, Anapia. En el caso de Juliaca no está al borde del lago, pero es importante por la cantidad de población que concentra.

En la figura N° 4 se puede observar que la mayoría de los distritos que limitan con el Lago tuvieron un decrecimiento poblacional, si se compara los datos de los años 2000 al 2015, con excepción de los distritos de Juliaca, Puno, Ilave y Desaguadero que tuvieron un elevado crecimiento poblacional.

En el caso boliviano, el país se divide en 9 Departamentos, 112 provincias y 339 municipios (GeoBolivia, 2018). El Departamento de La Paz, sede de gobierno del país, ocupa el segundo lugar en número de habitantes a nivel nacional. La Paz está compuesto por 20 provincias y 87 municipios de las cuales 5 provincias (Omasuyos, Camacho, Manco Kapac, Los Andes, Ingavi) y 20 municipios (Acoraimes, Carabuco, Tiahuanacu, Huatajata, Desaguadero, Guaqui, Tito Yupanqui, Pucarani, Copacabana, San Pedro de Tiquina, Santiago de Huata, Puerto Pérez, Huarina, Chuca Cocani, Batallas, Puerto Acosta, Escoma, Achacachi, Taraco, San

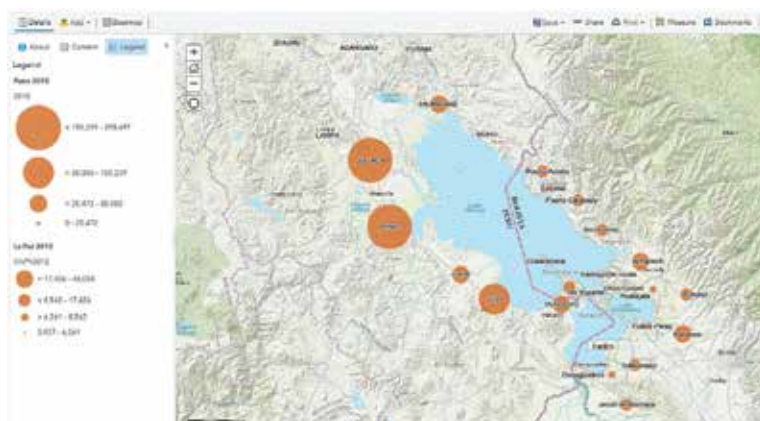
Andrés de Machaca) limitan con el Lago Titicaca (Figura No. 5). Sin embargo, igual que en el caso de Juliaca, el Municipio de El Alto en la Provincia Murillo, cuyos límites no colindan con el lago, se considera de especial interés porque concentra 922.598 habitantes, cerca de un millón, para el 2018 según el INE.

Figura 4
Población en miles de los Distritos del Lago Titicaca
entre los años 2000, 2005, 2010 y 2015



Fuente Instituto Nacional de Estadística e Informática.

Figura 5
Mapa de Población de los Distritos (Perú) y Municipios (Bolivia)
colindantes al Lago Titicaca



Fuente: www.geovisorumsa.com con datos del INE 2012 (Bolivia)⁶ e INEI 2015 (Perú)⁷

6 <https://www.ine.gob.bo/>

7 <https://www.inei.gob.pe/>

Aunque las ciudades de Juliaca y El Alto no colindan directamente con el Lago Titicaca pertenecen a la misma cuenca a través de sus ríos. El principal problema es que las alcantarillas de estas ciudades están conectadas al río Torococha (Juliaca), los ríos Seke y Seco de El Alto llevando toda su contaminación hacia el Lago.

Cuencas hídricas

El Departamento de Puno presenta dos vertientes hidrográficas, una hacia el Atlántico y otra al Titicaca. La cuenca endorreica o cuenca cerrada (Titicaca), está constituida por trece cuencas hidrográficas localizadas en forma circular. En la parte peruana existen cinco cuencas hacia el Lago Titicaca. Las disponibilidades hídricas anuales de las cuencas son: Huancané 23,7 m³ /s; Ramis 88,2 m³ /s; Coata 39,3 m³ /s; Ilave 40,1 m³ /s; Zapatilla 3,2 m³ /s, MINAM (2013).

De las cuencas mencionadas el río Ramis posee un mayor aporte hídrico anual, seguido del río Ilave. El río Zapatilla es el que menos aporte hídrico brinda al lago. La cuenca del río Ramis antes de desembocar al Lago Titicaca se une con el río Huancané.

Las cuencas hidrográficas en la vertiente del Titicaca entre Perú y Bolivia, según la Autoridad Nacional del Agua (2017)⁸, están compuestas por el río Suches, cuya superficie abarca el 40% en Perú y 60% en Bolivia. La unidad hidrográfica 0177 tiene una superficie de 78% en Perú y 22% en Bolivia. La unidad hidrográfica 0157 tiene una superficie de 90% en Perú y 10% en Bolivia. La cuenca hidrográfica 0155 tiene una superficie de 68% en Perú y 32% en Bolivia (ver figura 6).

En el caso de Bolivia, el Departamento de La Paz, presenta dos vertientes hidrográficas, una hacia la cuenca amazónica que desemboca en el océano Atlántico y otra al Lago Titicaca. En la parte boliviana existen 7 cuencas hacia el Lago Titicaca nivel 4 (MMAYA, 2018), las cuencas Suches, Keka, Catari, y las unidades hidrográficas 177, 157, 153, 155 (ver figura 7).

Las cuencas de ambos países a la misma escala ayudan a planificar el territorio, por ejemplo se identifican mejor las fuentes contaminantes de los ríos tributarios que son contaminados en dirección al Lago Titicaca. Ambos países cuentan con sus plataformas de visualización geográfica, en el caso de Perú esta GeoHidro⁹ y en Bolivia GeoSIRH¹⁰, que permiten la consulta rápida de información. Sin embargo, esta información está separada por la jurisdicción de cada país. Pero, a través de los servicios WMS y WFS se puede unir la información de ambos países en un solo conjunto.

8 <http://www.ana.gob.pe/>

9 <http://geo.ana.gob.pe/geohidrov2/>

10 <http://geosirh.riegobolivia.org/>

Figura 6
Cuencas hidrográficas del Lago Titicaca - Perú



Fuente: <https://www.ana.gob.pe/organos-desconcentrados/autoridad-administrativa-del-agua-titicaca> (ANA, 2018).

Riesgos

El Manual de Gestión de Riesgo en los Gobiernos Locales (Díaz Palacios, 2005), menciona que la helada o friaje es un fenómeno de enfriamiento fuera de lo normal, expresado en nevadas, granizadas y temperaturas por debajo de los 20° C. Este fenómeno viene causando impactos en el medio de vida de las comunidades altoandinas que habitan por encima de los 4.000 msnm. Su afectación no es solamente en la región del Altiplano, la Gestión de riesgos en Ancash (Chuquisengo, 2007), indica que también los Departamentos más afectados por este fenómeno son: Puno, Arequipa, Moquegua, Tacna, Cusco, Ayacucho, Huancavelica y Abancay.

Figura 7
Cuencas hidrográficas del Lago Titicaca - Bolivia



Fuente: Elaboración propia en base a datos de GeoSIRH (MMAyA, 2018), OpenStreetMap con datos procesados en qGis.

En el caso boliviano, los riesgos identificados son los mismos que en el lado peruano, las heladas, las sequías, las inundaciones (Quiroga, et al, 2008). Sin embargo, en los últimos años se han identificado nuevos tipos de riesgos como la contaminación de las ciudades que vierten sus aguas al Lago Titicaca. Los efectos del cambio climático que están ocasionando la reducción del nivel del agua en el Lago. Y, los blooms espontáneos que ya se han producido en el Lago Menor del Titicaca el año 2015 que envenenaron a varias especies de fauna acuática (Lazzaro, Acha, 2015).

Fuente: Mosaico de imágenes satelitales Rapid Eye 2 del 11 de abril de 2015 en combinación de bandas 1 en el canal rojo, 5 (Infrarrojo) en el canal verde y 2 en el canal Azul que demuestra el Bloom que afectó al Lago Menor del Titicaca.

Figura 7
Imagen de satélite RapidEye del Bloom que afectó al Lago Menor del Titicaca el año 2015



Conclusiones

Los temas de población, cuencas y riesgos, presentados en este trabajo, son algunos ejemplos de la forma de poder compartir información geográfica entre ambos países, Perú y Bolivia. Ambos países ya cuentan con plataformas nacionales, sin embargo no existe una plataforma conjunta capaz de monitorear los rápidos procesos que están afectando al lago. El Cambio Climático, el crecimiento de las ciudades, la reducción del nivel del agua son procesos que no esperan. La falta de atención en estos aspectos urgentes ocasionará el deterioro del Lago convirtiéndolo, de un lugar atractivo a un lugar repelente. El lago se puede convertir en un pantano receptor de los residuos de las ciudades con millonarias pérdidas en la producción agrícola y acuícola, generando migraciones campo ciudad. Por esta razón, se propone una plataforma binacional de monitoreo sobre los efectos del Cambio Climático. La plataforma debe enlazar los servicios de información geográfica que ya produce cada país de forma estable y directa.

Bibliografía

- Chuquisengo, O.
2007 *Gestión de Riesgos en Ancash*. Lima: Soluciones Prácticas. Retrieved from <https://solucionespracticas.org.pe/Descargar/133/866>
- Díaz Palacios, J.
2005 *Manual de Gestión de Riesgos en gobiernos locales* (ITDG). Lima: Soluciones Prácticas. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd52/riesgo/intro.pdf>
- GeoBolivia
2018 GeoBolivia. Retrieved September 21, 2018, from <https://geo.gob.bo>
- IDEE
2013 Introducción a las IDE. *Infraestructura de Datos Espaciales de España (IDEE)*, 2. <http://doi.org/10.1177/0964663912467814>
- IIGEO/UMSA
2018 GeoVisor UMSA. Retrieved September 21, 2018, from <http://www.geovisorumsa.com/>
- INE
2018 Población de El Alto alcanzó a más de 922 mil habitantes. Revisado el 21/09/2018, de <https://www.ine.gob.bo/index.php/principales-indicadores/item/3118-poblacion-de-el-alto-alcanza-a-mas-de-922-mil-habitantes>

Lazzaro, X., & Acha, D.

2015 Comunicado: Análisis y recomendaciones acerca de la muerte de peces, anfibios y aves ocurrida en la zona Norte del Lago Menor durante el mes de Abr... / L'actualité / Toute l'actualité / Bolivie / IRD - Sites de représentation / IRD - Bolivie. Retrieved January 14, 2017, from <http://www.bolivie.ird.fr/layout/set/print/toute-l-actualite/l-actualite/comunicado-analisis-y-recomendaciones-acerca-de-la-muerte-de-peces-anfibios-y-aves-ocurrida-en-la-zona-norte-del-lago-menor-durante-el-mes-de-abril-2015#note2>

MINAM

2013 *Línea base ambiental de la cuenca del Lago Titicaca*. Lima. Retrieved from <http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/Linea-Base-Ambiental-del-Lago-Titicaca.pdf>

MMayA

2018 GeoSIRH. Retrieved September 21, 2018, from <http://geosirh.riego-bolivia.org/>

Núñez-Villalba, J.

2018 Lake Titicaca monitored by Erdas Apollo. Retrieved from <https://blog.hxgnlive.com/lake-titicaca-monitored-erdas-apollo/>

Quiroga, R., Salamanca, L. A., Espinoza Morales, J., & Torrico, G.

2008 *Atlas de amenazas, vulnerabilidades y riesgos de Bolivia*. (FUNDEPCO & OXFAM, Eds.). La Paz, Bolivia: Plural. Retrieved from <https://drive.google.com/open?id=0BxwC55oSFrCfNGZveThZZ3h5WHc>

SÍNTESIS DE INVESTIGACIÓN

Recuperando los saberes ancestrales de las casas bioclimáticas de adobe y champas con la adaptación al Cambio Climático

Fortunato Condori

Instituto de Investigaciones de Ciencias del Habitat
Universidad Técnica de Oruro

Resumen

En diferentes áreas rurales del departamento de Oruro, las casas o viviendas modernas sin adecuación en la contaminación del medio ambiente, son entregadas como regalos u obsequios, lamentablemente no son bioclimáticas, por la falta del uso de materiales locales, ya que la bioconstrucción son considerados como innecesarias y aisladas. La riqueza de los conocimientos locales de la construcción en la investigación se notó en Llapallapani la realización de las casas medioambientales con el mantenimiento participativo y el uso de los materiales constructivos de sus lugares y continuidad de calidad de vida. Las bases de la organización territorial de casa utilizan la geometría del círculo y cuadrado denominado geometría sagrada “desde la cosmovisión de la vida” (Milena Willka), en el lenguaje aymara, se notó el equilibrio, la casa significa *ch’ama* (fuerza, energía), *janku uta* (casa blanca) *akana* (aquí en este lugar) *Uta* (casa) *Utanaja* (casas); que fueron utilizados.

Elementos clave a considerar

- Las viviendas construidas en barro del adobe o champa, se debe al uso del suelo del lugar de la tierra, generado construcción de casas con características favorables para el mantenimiento del calor en los muros y techos, lograda por la emisión del sol en el día y distribuidas en la noche con el aporte a la condición aislante térmica y acústica en casas.
- Los saberes ancestrales sobre la bioconstrucción existe en Llapallapani, comunidad originaria del altiplano del departamento de Oruro, está en proceso

de exclusión y marginamiento ya que las nuevas construcciones dotadas por el estado son sintéticas y repetitivas sin el concepto bioclimático.

- Se encuentran diferentes proyectos construidas, sin considerar el uso de materiales locales, cambios climáticos, recuperación cultural, logradas por convocatorias del gobierno, ONG e instituciones y proyectos de financiamiento económico.

En las casas con construcciones del medio ambiente son necesarias

Se requiere concientización de la población, municipios, departamento y actores importantes, como bancos, empresas, consultores, arquitectos e ingenieros, para que los actores empiecen a valorar las construcciones del adobe, champa y materiales locales para el uso y divulgación con la adecuación en poblaciones y ciudades.

Los proyectos gubernamentales de casas y viviendas deberían dar el inicio a esta concientización por la revalorización usando materiales locales de construcción con el fortalecimiento de la identidad cultural y valorización de la sabiduría del conocimiento ancestral.

Al nivel educativo, los saberes ancestrales deben ser combinados con los saberes de la arquitectura moderna. La bioconstrucción se debe incluir en los planes curriculares de las escuelas, colegios y universidades. En el marco legal para la revalorización existe la Ley de Educación de Avelino Siñani - Elizardo Pérez N° 070. Ley del Medio Ambiente y sus reglamentos.¹³³³, que indica “el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, a objeto de garantizar la satisfacción de las necesidades de la presente y futuras generaciones

Los conocimientos tradicionales de Llapallapani en las orillas del Lago Poopó

Llapallapani (fig. N° 1) pertenece a los Urus Muratos asentados a 3.700 mts. en los extremos del Lago Poopó, las actividades de pesca ha sido reemplazado con producciones agrícolas a pesar de los cambios climáticos realizaron construcciones de casas con barro, adobe y champas en putukus, huayllachis o morokutas (casas circulares y rectangulares). El Lago Poopó en el año 2016 (fig. N° 2) fue un lago moribundo, sin agua, épocas que empezó el desastre del segundo lago de Bolivia convirtiéndose en tierra salada, paisaje árido y desaparición del agua, denominado cambio climático del fenómeno del niño, con la posibilidad del futuro sin existencia del agua. Increíblemente Llapallapani continúa en el lugar, realizando actividades, ajustándose a los cambios climáticos, con la adaptación de sobrevivencia, notándose existencias de construcciones bioclimáticas con el

uso de la tierra. La comunidad aceptó que el agua del Lago Poopó desaparecería, sin obligación de continuidad en pescados, fue el inicio de otras actividades en cultivación de quinua, papa y otros, en el Lago Poopo, en 2018 no dio resultado positivo de la producción de la quinua, a 1 km del Lago Poopo y 2.918 mts de Llapallapani por la contaminación ambiental.

Figura 1
Llapallapani



Figura 2
Llapallapani y Lago Poopó



La readecuación y adaptación de las construcciones de barro

Debido a la existencia de lugares de temperatura fría del altiplano y cercanía al Lago Poopó, existe conocimientos sobre construcciones del adobe y champas adaptadas al medio ambiente por el aprovechamiento de la energía solar, transferencia y conductividad, logrando confort en la habitabilidad relacionado con la naturaleza con el aprovechamiento y utilización en la construcción de barro y champas.

Gracias a los muros de barro y champas con el aprovechamiento del sol por la radiación solar, logra detener el calor en el día con la acumulación conservación y mantenimiento del calor y en la tarde da lugar al mantenimiento del calor, en la noche se distribuye el calor en todo el ambiente. El promedio necesario del hombre es de 17° C, por eso se acondiciona el consumo energético de manera gratuita en la economía. Una casa o vivienda bioclimática se incluye la conservación del calor, sin necesidad del consumo de energía industrial de calefacciones, es gracias a uso de los conocimientos ancestrales, logrando construir para obtener la protección del calor para el uso familiar, como ejemplo, mostramos en el gráfico (fig. N° 3) de las características de la calidad ambiental que son propias en las casas o viviendas bioclimáticas por los muros de adobe o champa. Los materiales locales no son contaminantes, tiene tolerancia, el mantener el calor en la noche, con la sensación de satisfacción ambiental, con la tolerancia de no necesitar gas u otros mecanismos técnicos de calentamiento. El costo económico en la construcción no se requiere ni un boliviano para la construcción de la casa, porque tienen sus propias tierras y barro o champas, con la ventaja del mantenimiento del calor, por eso cada familia realizaba construyendo.

La readecuación y adaptación

Los muros y techos del adobe y champa, continuará siendo una técnica importante por su manejo de la temperatura: De día recibe el calor y de noche distribuye el mantenimiento de la temperatura agradable por la necesidad del hombre de 17°C. Teniendo las características térmicas más importante en la utilización del contexto del cambio climático con el mantenimiento de la temperatura necesaria de las personas. Se debe recuperar y utilizar el conocimiento con miras al futuro por las crisis climáticas y económicas, si bien son provenientes de lugares cercanos al Lago Poopo, se deben apreciar, aprender y utilizar en pueblos y ciudades en las tecnologías modernas y provenientes de materiales constructivas importadas.

Utilizar materiales locales con el funcionamiento y formalidades son adecuados en el altiplano boliviano, el saber ancestral, es de identidad cultural en la casa bioclimática en el altiplano semiárido y árido. Estos saberes tienen que valorizar las autoridades a nivel nacional, local y la población.

Figura 3
Las construcciones de viviendas
de barro generando muros
y calentamiento solar



Figura 4
Autoridades de la comunidad
Llapallapani mostrando
la construcción con muros de barro



La identidad cultural de las casas o viviendas bioclimáticas

“Nuestras casas siempre han sido calientitas, siempre lo hemos sabido desde muchos años” señala Germán Choquede Llapallapani (fig. N° 4). Las “casas calientes” se debe por el uso de los materiales locales, logrando bioclimática en las zonas altas adecuados a su medio topográfico y configuración geológica, con el significado de continuidad en la cosmovisión local en la construcción con material de tierra *“una cultura no olvida su propia cultura”* (German Choque). La participación del hombre en la construcción de una casa de barro y champa, tiene su identidad con sus propias valoraciones, sin necesidad de participación de profesionales, arquitectos o ingenieros por la falta de utilización de los cambios climáticos en construcciones de casa bioclimática. La valoración de la madre tierra, es la vinculación entre hombre y naturaleza, la construcción es de reciprocidad denominada aynio minka (participación social constructiva) que es practicada como ayuda mutua entre las personas que viven en el lugar, siendo que no es una construcción solitaria, lo denominan comunitaria.

La entrega de casas o viviendas como regalos, son construidas por empresas por contrato, entregando de manera solitaria a cada persona o familia, rompiendo las bases culturales de comunicación, generando diferencias sociales de personas o familias que no recibieron las casas o viviendas gratuitas, se elimina también el mecanismo del ayni o minka. Las bases de casas de

regalos significa el empiezo de la competencia de status social por la inclusión de la modernidad. No implica el aislamiento de la modernidad, más bien es necesario la utilización de mecanismos técnicos en casas bioclimática realizados y logrados en Llapallapani.

Bibliografía

Condori H. F.

2010 *Recuperación de Sistemas Constructivos Tradicionales para la Vivienda Bioclimática del Altiplano boliviano, del Departamento de Oruro.* Oruro, Bolivia:Ediciones: Instituto de Investigaciones-Ciencias del Hábitat. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Técnica de Oruro.

Albó, X. J. y Galindo F.

2012 *Interculturalidad en el desarrollo rural sostenible el caso de Bolivia.* La Paz Bolivia: Ediciones Editores Bolivia.

Sygmunt, B.

2000 *La globalización y la nueva pobreza.* Inglaterra: Ediciones: Universidad de Leeds Inglaterra.

Análisis espacial de datos batimétricos obtenidos con Ecosonda entre Huatajata y Bahía Cohana. Sector Lago menor del Titicaca

Edgar Castro

El Lago Titicaca, la principal cuenca del Sistema Hídrico TDPS (Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó y Salar de Coipasa), además de ser la fuente de recursos hídricos e hidrobiológicos, que asegura la vida productiva de las poblaciones que habitan en riberas del lago, tiene una influencia notoria en las condiciones climáticas para las actividades agropecuarias y que ha favorecido el desarrollo de civilizaciones de gran riqueza cultural que en su época de florecimiento se extendió por todo el continente.

Durante las últimas décadas en el Lago Titicaca se han desarrollado procesos naturales y antrópicos causados por el crecimiento poblacional y el efecto del Cambio Climático, estos procesos han generado modificaciones importantes en las características físicas y naturales de este cuerpo de agua. El levantamiento batimétrico más importante del Lago Titicaca se realizó entre los años 1976 y 1978, posteriormente se realizó el estudio de Batimetría y Topografía en el Plan Director Global del Sistema TDPS en el año 1993, donde se realizó la batimetría del Lago y la definición de su espejo de agua a diferentes cotas a partir de imágenes de satélite, para determinar la relación cota - superficie - volumen. Actualmente no se cuenta con información batimétrica actualizada debido a los altos costos económicos que conlleva un estudio de estas características, señalando también que, al ser una cuenca binacional, está sujeta a las decisiones bilaterales de Perú y Bolivia.

En Topografía se entiende por batimetría el levantamiento del relieve de superficies subacuáticas, tanto los levantamientos del fondo de mar, como del fondo de cursos de agua, de embalses, etc. Estos trabajos son denominados también topografía hidrográfica, cartografía náutica, etc. (Farjas, M., 2006)

El desarrollo tecnológico de las herramientas geográficas hace que las tareas en un levantamiento batimétrico se reduzcan, nos ofrece equipos con mejor precisión

y con mayor capacidad de toma de datos, disminuyendo tiempos de ejecución, aminorando gastos, permitiendo obtener datos reales de un levantamiento batimétrico para posterior realizar en modelamiento del fondo de un cuerpo de agua, aplicando herramientas de SIG, Cartografía y Teledetección en la representación de los resultados obtenidos.

El presente estudio pretende realizar un barrido del relieve del fondo del Lago Menor del Lago Titicaca con el uso de un ecosonda GPS, herramientas de SIG y Teledetección, reduciendo tiempos de ejecución, aminorando gastos y estableciendo el uso de estas herramientas para este y otros estudios de batimetría donde no se cuente con los recursos necesarios y se requiera de información rápida, confiable y en diferentes entornos.

El tema de trabajo engloba una nueva metodología para la aplicación de herramientas geográficas para el análisis batimétrico de un cuerpo de agua, en este caso la parte sur o Lago Menor del Lago Titicaca.

También es importante señalar que el Lago Menor del Titicaca es bastante somero respecto al Lago Mayor, y es visible que el nivel del espejo de agua se ha reducido durante la última década. La profundidad media es de 9 metros y tiene una profundidad máxima de 40 metros.

En este trabajo se hizo el relevamiento de información con una Sonda GPS Garmin Striker 4CV, en el Lago Menor del Lago Titicaca, levantados en una embarcación entre las riberas de Huatajata y la Bahía Cohana, para determinar la capacidad de estas herramientas en el análisis de información batimétrica.

Estos datos están siendo procesados mediante técnicas y el apoyo de herramientas SIG para determinar la morfología del relieve del fondo actual del Lago Menor, para esta metodología también se pretende la aplicación de Imágenes Satelitales para determinar la calidad de agua, el crecimiento de la vegetación y la acumulación de residuos orgánicos. Finalmente, con los datos obtenidos se podrá disponer de un modelo digital de elevación de profundidad del área de estudio y los resultados obtenidos se contrastarán con la Carta Batimétrica HIDRONAV 650 del Lago Titicaca de 1976.



Sonda GPS Garmin Striker 4CV



Puntos de Sondaje Obtenidos

Protocolo limnológico mediante la aplicación de índices de estado trófico como herramienta en la determinación del nivel de eutrofización en el Lago Menor, sector Huatajata

Verónica del Carpio

Introducción

La presencia de contaminantes provenientes de las actividades antropogénicas que se realizan en los alrededores del Lago Titicaca, son las principales causas de la eutrofización presente en el Lago en forma general y específicamente en el sector de Huatajata.

Las descargas de aguas residuales que tienen origen doméstico e industrial no procesadas son responsables del actual deterioro de los cuerpos de agua, (PNUMA, 2001), ya que son arrojados a los canales de alimentación del Lago, y por su alto contenido de contaminantes alteran la calidad del agua; provocando el aumento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), la presencia de nitratos y fosfatos y por ende el problema de la Eutrofización. Asimismo, el sobreuso de agroquímicos utilizados en los cultivos constituye una de las causas de contaminación de los cuerpos de agua (Richters, 1995; PNUMA, 2001) constituyendo un problema ambiental importante que debido a su persistencia tardan años en degradarse.

Igualmente, la descarga de residuos sólidos y el inadecuado manejo de los mismos incrementan el nivel de materia orgánica en el Lago; este contenido de materia orgánica origina el crecimiento excesivo de algas, lentejas de agua y otras especies invasivas que amenazan ser incontrolables en su desarrollo disminuyendo el oxígeno y alterando su ecosistema acuático.

La cuenca del Lago Menor del Titicaca, no es ajena a la problemática de degradación de los recursos naturales, principalmente referido al uso y manejo de los cuerpos de agua. Así lo han expresado los moradores de la cuenca al priorizar este problema como uno de los principales que afecta ambiental, social y económicamente a la población en general.

Delimitación espacial

El ámbito geográfico donde se desarrollará el presente trabajo será el municipio de Huatajata, ubicado en la provincia Omasuyos del departamento de La Paz. La unidad de análisis viene comprendida por el ámbito de influencia de la Región de Huatajata, correspondiente al Lago Menor o Wiñay Marca.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un protocolo limnológico para determinar el nivel de Eutrofización del Lago Menor en el sector Huatajata como herramienta de gestión de calidad de aguas.

Objetivos Específicos

- Establecer la caracterización general del área de estudio.
- Identificar las actividades antropogénicas que podrían originar la eutrofización del lago en el sector de Huatajata.
- Identificar los índices que permiten determinar el nivel de eutrofia.
- Estimar el estado trófico del Lago Menor sector Huatajata mediante mediciones de las variables físicas y químicas del agua.
- Determinar con que estrategias de control y manejo del proceso de eutrofización cuenta el Municipio de Huatajata.

Metodología

La muestra de estudio se realizará en un área aproximada de 0.82 km² del total del área de la región, en una extensión de 6,25 km., donde se establecerán 4 puntos de muestreo, donde se tomarán 50 metros de distancia hacia el lago, de acuerdo con la figura satelital anexa.

El punto 1, corresponde al límite con el Municipio de Huarina (cerca al Hotel Titikaka), lugar denominado Sankajahuira, para lo cual se tomará contacto con los representantes de la Central Agraria del lugar. El punto 2, está ubicado en cercanías del Hotel “Inca Utama”, Centro Urbano de Huatajata. El punto 3, se encontraría ubicado en la Comunidad de Chilaya Chico, en inmediaciones del Yacht Club Boliviano. Por último, el punto 4, se encuentra en la Comunidad de Chilaya Grande, al límite con el municipio de ChuaCocani. La ubicación de

los puntos de muestreo se realizará mediante un GPS, su respectiva descripción geográfica será presentada en tablas y gráficos.

Se realizará la recolección de muestras de los cuatro puntos establecidos, a dos diferentes profundidades (superficial y un metro), dependiendo de las características de la masa de agua, aplicando las normativas establecidas para el efecto en la Norma Boliviana NB 64002: Calidad del Agua - Muestreo de Efluentes y la NB 512, las que establecen la metodología y procedimientos de muestreo de efluentes.

Se medirán parámetros fisicoquímicos “*in situ*” como temperatura, color, turbidez, además de tomar muestras para el análisis en Laboratorio como fósforo, nitratos. Asimismo se tomarán datos de clorofila “a”, pH y de otros parámetros a considerar en el estudio que serán analizados en gabinete.

Una vez obtenidos los valores para cada caso, estos serán comparados y cotejados con los Límites Máximos Permisibles fijados por el Reglamento de Contaminación Hídrica de la Ley de Medio Ambiente de Bolivia (Anexo A del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley 1333 de Medio Ambiente). Por otro lado, para definir el estado trófico de la masa de agua y tener un dato comparativo con otros sistemas se utilizan índices de estado trófico calculados en base a diferentes parámetros, comparando los datos obtenidos experimentalmente con unos valores fijos propuestos para cada rango. Los índices de estado trófico que se utilizarán para la determinación del nivel trófico del Lago Menor, sector Huatajata, serán el Índice de Calidad del Agua (IQA) y los propuestos por Carlson (Índice de Estado Trófico de Carlson TSI); Vollenweider (Estado Trófico TRIX); OCDE - Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (Clasificación del Grado de Eutrofia) y TSI modificado por Toledo (IETM).



Distribución espacial de las totoras en el Lago Menor del Titicaca. Análisis multitemporal, propuestas de conservación

Jhasmin Duarte Tejerina
Mishel Justiniano Ayllón

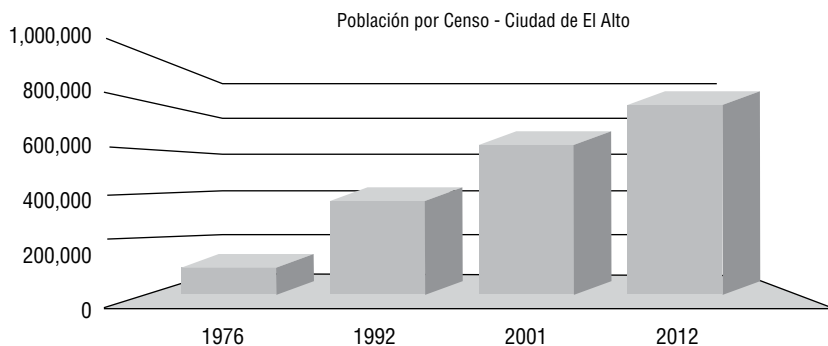
La Totora, es una macrófita de gran importancia para el Lago Titicaca debido a su propiedad purificadora la cual la hace indispensable en ciertas zonas del Lago donde encontramos niveles de clorofila muy elevados, también sirve como forraje.

La problemática en el área de estudio se debe principalmente a los aportes de aguas servidas provenientes de la ciudad de El Alto que vierten sus aguas en el Río Catari el cual desemboca en el Lago, contaminando el ecosistema y afectando a la población del área. Por otro lado el cambio de nivel del lago, es uno de los factores principales que define el comportamiento de la Totora, su crecimiento y distribución. También los cambios climáticos y estacionales que provocan inundaciones o sequías como en años pasados (1983-1986) que provocaron la disminución de la Totora y a su vez la proliferación de especies de plantas flotantes (*Lemmagibba* y *Azolla*) como también vegetación sumergida (*Chara*) que evitan el crecimiento de la Totora quitándole el espacio, aire y luz a la Totora.

El objetivo principal de este trabajo es determinar la superficie en Ha de Totora en el Lago Menor mediante imágenes satelitales Landsat 8 OLI y comparar la superficie actual con estudios de años pasados 8 (Análisis Multitemporal). Así también se clasificara el estado de la vegetación (Totora Joven o en Buen Estado y Totora Senescente o en Mal Estado). Finalmente, se propone la reimplantación de Totora en el Lago Menor como solución para la biorremediación del ecosistema (ver figura 1).

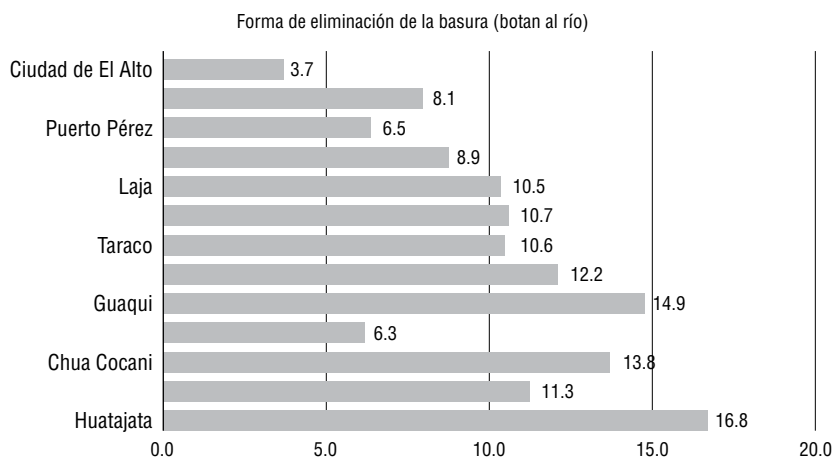
El desarrollo de la ciudad de El Alto se dio en tres olas migratorias. La primera, en 1935, posterior a la Guerra de Chaco; la segunda, en 1952, después de la revolución agraria en Bolivia, y la tercera en 1985, con las relocalizaciones de los mineros durante el Gobierno de Víctor Paz. Posteriormente siguió creciendo exponencialmente convirtiéndose así en la segunda ciudad más poblada de Bolivia con 848.452 habitantes según el censo 2012 (ver figura 2).

Figura 1
Crecimiento poblacional por Censo - Ciudad de El Alto



Fuente: INE 2012, elaboración propia.

Figura 2
Municipios que desechan la basura al río por municipio en porcentaje

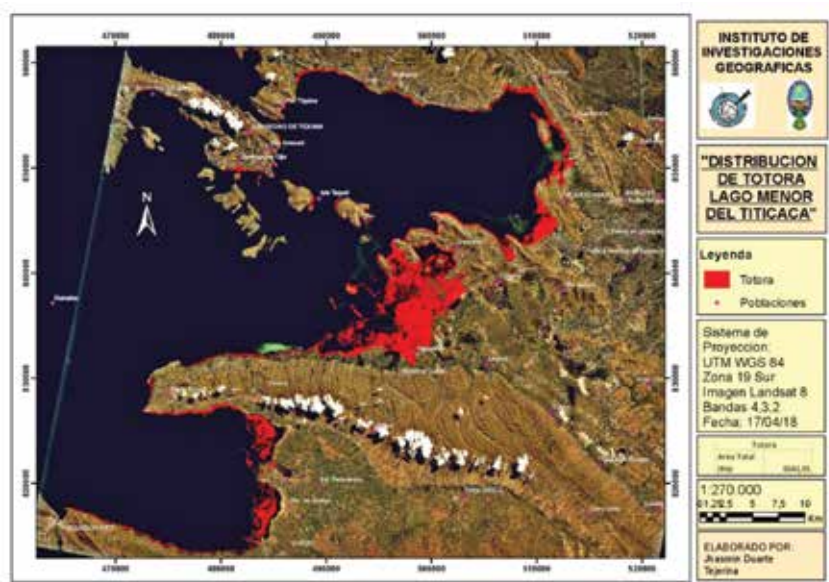


Fuente: INE 2012, elaboración propia.

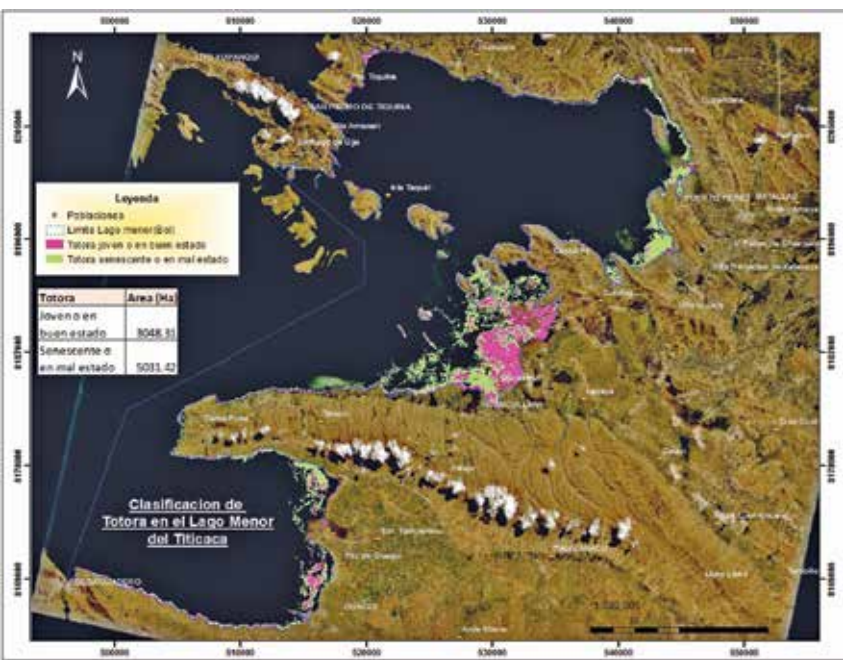
El crecimiento de la ciudad de El Alto ha traído consigo grandes consecuencias. Una de ellas y la más alarmante es la gran cantidad de basura producida y desechada por la población en los ríos Seco, Seke y Pallina, el cual posteriormente se une con el río Catari llevando todos estos desechos al Lago Menor contaminando sus aguas.

En la figura 2 se muestra en porcentaje los municipios que desechan su basura al río. Con un 16.8 % del total de la población del municipio se encuentra Huatajata y con el menor porcentaje ,3.7 % se encuentra la ciudad de El Alto. A pesar de que el porcentaje de población que desecha su basura al río aparenta ser pequeña es importante tomar en cuenta el número de habitantes que existe en cada municipio.

Mapa 1
Distribución de Totora en el Lago Menor del Titicaca



Mapa 2
Clasificación de Totora en el Lago Menor del Titicaca



Monitoreo multitemporal de la calidad de agua mediante el método de estimación de sólidos suspendidos totales en la Bahía de Cohana utilizando sensores remotos

Janina Melissa Espinoza Zegarrundo

Resumen

Los sólidos suspendidos totales son un parámetro fisicoquímico importante para estudiar problemas de erosión y contaminación. Por lo cual el presente proyecto plantea como principal objetivo la realización de un monitoreo multitemporal de la calidad de agua mediante la relación entre reflectancia y concentración de sólidos suspendidos totales SST en la Bahía de Cohana por medio de imágenes satelitales, basados en sistemas de información geográfica como línea base, además de relacionar los datos de calidad de agua obtenidos a través de campañas de monitoreo in situ y el tratamiento de las imágenes satelitales LANDSAT 8 OLI a través de las firmas espectrales obteniendo así un análisis de la situación por la cual atraviesa la Bahía de Cohana, no solo en la actualidad sino en el transcurso de los últimos 10 años.

Palabras clave: sólidos suspendidos totales, calidad de agua, reflectancia

Introducción

El monitoreo de la calidad de agua juega un papel muy importante en la gestión y manejo de recursos hídricos debido a que permite generar acciones preventivas además de establecer el estado por el cual atraviesa el cuerpo de agua monitoreado. Dicho monitoreo puede realizarse de forma tradicional con la recolección de muestras insitu el mismo que implica protocolos además de un costo elevado en el uso y traslado de equipos, muestras, análisis de laboratorio entre otros, o se puede realizar el monitoreo mediante sensores como instrumento complementario en el

monitoreo y generación de cartografías lo cual implica costos comparativamente bajos en un tiempo corto. (Bonasea, 2014).

En dicho caso con el monitoreo se puede analizar problemáticas de origen relacionados a actividades antrópicas, factores regionales, características del lugar de estudio, entre otros que pueden generar variables que afecten de manera negativa al cuerpo de agua tal es el caso de los sólidos suspendidos totales SST, cuyos valores altos pueden impedir el paso de luz afectando así la vida acuática además que los mismos pueden provocar el desarrollo de depósitos de lodos y de condiciones anaerobias cuando se vierten aguas residuales no tratadas (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2003), asimismo actualmente se ha considerado dicho parámetro como uno de los más utilizados en la caracterización de cuerpos de agua e índices de calidad de agua. (Samboni&Carvajal, 2007).

En este sentido la teledetección se ha convertido en una herramienta con la cual se puede llevar a cabo la captura, el tratamiento y análisis de imágenes digitales capturadas desde satélites artificiales generando así información que permite analizar superficies de agua extensas en un periodo de tiempo corto y con bajo costo, convirtiéndose así en una alternativa bastante interesante en el estudio de ecosistemas acuáticos, permitiendo así el beneficio a diferentes disciplinas tal es el caso la ingeniería ambiental ya que estas herramientas sirven como instrumento complementario en el monitoreo de la calidad del agua y generación de cartografías que puedan dar una respuesta rápida y verídica en la gestión de los recursos hídricos . (Estruch, 2010).

Planteamiento del problema

A raíz del evento extremo denominado “Bloom” originado a comienzos del 2015 causado por la proliferación de micro algas de fitoplancton, donde se pudo evidenciar la elevada mortalidad de peces y ranas a consecuencia de la reducción de oxígeno del agua y producto de la contaminación orgánica (Lazzaro et al. 2016), es necesario realizar un monitoreo de la de la calidad de agua a los efluentes previos al Lago Titicaca este es el caso de la Cuenca Katari, ya que las aguas del mismo atraviesan la Bahía de Cohana para finalmente llegar al Lago Menor previamente a ver atravesado dos centros periurbanos de gran magnitud como se la ciudad de El Alto y Viacha.

Viendo así la importancia del mismo es necesario una herramienta que permita monitorear el estado de la calidad de agua del mismo buscando así un instrumento económico y efectivo que pueda detectar de manera oportuna las variaciones que se pueda llegar a sufrir la Bahía de Cohana, además de tener una referencia cartográfica de los cambios del mismo por medio del análisis de imágenes satelitales de años anteriores, lo que representa una alternativa económica y práctica frente a métodos de monitoreo convencional.

Área de estudio

La Bahía de Cohana queda ubicada en el Lago Menor en el departamento de La Paz, al finalizar la cuenca Katari, tiene una superficie de 8300 kilómetros cuadrados (Adriazola, 2015), dicha zona presenta gran cantidad de totorales además de ser también una de las regiones con mayor cría de ganado. Esta es una de las zonas más afectadas por la contaminación de dos centros periurbanos Viacha y El Alto cuyos efluentes atraviesan la cuenca Katari para desembocar finalmente en la Bahía de Cohana.

Metodología

Para cumplir con los objetivos planteados, se dividió la metodología se llevaron a cabo las siguientes fases; primeramente se realizó el reconocimiento del área de estudio para la planificación del trabajo de campo en la Bahía de Cohana, se seleccionaron 8 puntos principales, donde se tomaron muestras de agua para posteriormente ser analizadas en el laboratorio, el parámetro fisicoquímico a analizar fue el de sólidos suspendidos totales además que en cada punto se tomaron las firmas espectrales con el espectoradiómetro HandHeld 2 lo cual nos permite tener las firmas espectrales en los puntos de muestreo, las campañas de muestro se llevaron a cabo los días del paso del satélite para los datos actuales en el caso de los años anteriores se realizó la recolección de datos históricos oficiales del Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego del Ministerio de Medio Ambiente y Agua (VRHR - MMAyA) del monitoreo de la calidad de agua y muestreos realizados además de algunas investigaciones realizadas sobre el área de estudio. Como segunda fase se procedió a la descarga y pre procesamiento de las imágenes LANDSAT 8 OLI, las imágenes fueron corregidas radiométrica y atmosféricamente mediante el software ENVI 5.3, realizando las respectivas correcciones tanto radiométricas como atmosféricas para las imágenes de cada año.

Posteriormente se procedió a la selección de las bandas espectrales para la determinación de sólidos suspendidos totales (SST).

En la siguiente fase se analizó los resultados de concentración de sólidos suspendidos totales SST monitoreados en el campo para buscar así una relación empírica entre SST y reflectancia.

Finalmente con un análisis de correlación estadístico usando la metodología de regresiones múltiples para cada banda hasta obtener un ajuste de datos conveniente.

Una vez realizadas las fases se pretendió generar cartografías, pudiéndose así realizar un análisis de la calidad de agua y de la situación por la cual atraviesa la Bahía de Cohana.

Bibliografía

Adriazola, J.

2015 Análisis del grado de Contaminación del agua en la Bahía de Cohana y su influencia en la calidad de la leche del ganado Bovino. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.

Bonansea, M., Bazán, R., Pagot, M., Pinotti, L., Ledesma, C., & Rodríguez, C.
2014 Utilización de imágenes ASTER y Landsat para el monitoreo de la concentración de clorofila-a en el embalse Los Molinos, Córdoba, Argentina.

(PDF) Contaminación de la Bahía de Cohana, Lago Titicaca (Bolivia)
Desafíos y oportunidades para promover su recuperación. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/322286713_Contaminacion_de_la_Bahia_de_Cohana_Lago_Titicaca_Bolivia_desafios_y_oportunidades_para_promover_su_recuperacion [accessed Sep 10 2018].

Chuvieco Salinero, E.

2008 Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio (No. 528.8 CHU).

Estruch, F.

2010 Análisis de la clorofila a en el agua a partir de una imagen multiespectral Quickbird en la zona costera de Gandía. (tesis de licenciatura). Universidad Politecnica de Valencia. Gandía, España.

Samboni Ruiz, N. E., Carvajal Escobar, Y., & Escobar, J. C.

2007 Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. Ingeniería e investigación, 27(3).

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D.

2003 Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Mc-Graw-Hill Professional.

Autores

**Javier Nuñez Villalba**

Director del Instituto de Investigaciones Geográficas - IIGEO
Universidad Mayor de San Andrés - UMSA
janunez@umsa.bo

Ingeniero Geógrafo de la UMSA con Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica de la Universidad de Alcalá de Henares (España).

**Fortunato Condori Huanca**

Director del Instituto de Investigaciones y Ciencias del Habitat - Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Universidad Técnica de Oruro - UTO
yalacf@gmail.com

Arquitecto con Maestría en Urbanismo y Planificación de la Universidad Técnica de Oruro - Bolivia.

**Xavier Lazzaro**

BOREA - Unidad mixta de investigación 'Biología de los Organismos y Ecosistemas Acuáticos', IRD - Instituto francés de Investigación para el Desarrollo, París, Francia @ IIGEO/UMSA, La Paz, Bolivia
xavier.lazzaro@ird.fr

PhD en Ecología Acuática de Ohio State University - OSU (USA)

**Gonzalo Pusari Callisaya**

Secretario de Relaciones
Comunidad Yumani - Isla del Sol
Central Agraria Sampaya
Provincia Manco Kapac

Gerente propietario
Agencia de viajes y turismo "Las Islas Tours"
Pionero en turismo de la Isla del Sol, Lago Titicaca

**Carlos Peñaranda Argandoña**

Licenciado en Antropología
Universidad Mayor de San Andrés - UMSA
cpasucre@hotmail.com

Docente de varias universidades, consultor en temáticas antropológicas y autor de publicaciones en antropología histórica y antropología jurídica. Cursando la Maestría Internacional en Gestión Cultural - Universidad Andina Simón Bolívar.

**Lic. Claudia Adriana Piza Paz**

Licenciada en Biología

Universidad Mayor de San Andrés - UMSA

Actualmente “Maestría en Biología” - UMSA

Especialidad en trabajo: Análisis de calidad de agua en ecosistemas acuáticos y análisis y diseño estadístico.

piza.paz@gmail.com

**Tatiana Yamilka Vargas Condori**

Ingeniera Geógrafa

Escuela Militar de Ingeniería - EMI

yamilka.geo@gmail.com

Cursando la Maestría de Geopolítica de los Recursos Naturales de la Universidad Mayor de San Andrés - UMSA.

**José Luis Soza**

Licenciado en Informática

Universidad Mayor de San Andrés - UMSA

jsozasantos@gmail.com

**Zulma Yhoana Pusari Ramos**

Ingeniera Geógrafa

Universidad Mayor de San Andrés - UMSA

geo.yhoana@gmail.com

**Mario Polar**

Licenciado en Geografía

Universidad Nacional Mayor de San Marcos - UNMSM (Perú)

mariopolargeo@gmail.com

Investigador del Instituto del Mar del Perú - IMARPE



Inez Ana Villca Calle

Tesista Ingeniería Geográfica
Universidad Mayor de San Andrés - UMSA
yinezita44@gmail.com



Daniel Callisaya

Tesista Ingeniería Agronómica
Universidad Mayor de San Andrés - UMSA
de3dan@gmail.com



Wilson Mamani Gomez

Ingeniería Geográfica
Universidad Mayor de San Andrés - UMSA
wil.mggeoterra@gmail.com

Edgar Castro

Ingeniería Geográfica
Universidad Mayor de San Andrés - UMSA
Autoridad de Lago Titicaca - ALT

Verónica del Carpio

Ingeniería del Medio Ambiente
Universidad Loyola

Jhasmin Duarte y Mishel Justiniano

Ingeniería Geográfica
Universidad Mayor de San Andrés - UMSA

Janina Espinoza

Ingeniería Ambiental
Universidad Católica Boliviana “San Pablo”

Fotografía del taller Huatajata
septiembre 2018.



Fotografía Lago Menor del Titica-
ca de Izquierda a derecha: Daniel
Callisaya, Inez Villca, Jhasmin
Duarte, Janina Espinoza, Edgar
Castro, Jhovana Ticona, Catari,
Xavier Lazzaro.

Fotografía: Isla del Sol, 2018.



Serie: observación de la tierra

El Lago Titicaca, con una altura promedio de 3809 metros sobre el nivel del mar, forma un oasis en pleno Altiplano localizado entre la Cordillera de Los Andes de Perú y Bolivia. Ambos países comparten sus hermosos paisajes, pero también sus diversos problemas: La contaminación de su ecosistema ocasionada por las actividades humanas y las perturbaciones como efecto del Cambio Climático. La contaminación se genera por la ocupación urbana no planificada, los residuos sólidos por línea de playa, el deficiente tratamiento de aguas residuales, la minería informal, entre otros. Los efectos del Cambio Climático se traducen en la reducción del espejo de agua que afecta a los lugares someros en época seca (invierno), provocando blooms espontáneos o inundaciones en época húmeda (verano). Por esta razón, se propone monitorear los efectos del Cambio Climático en el Lago Titicaca con imágenes de satélite como una herramienta útil y de fácil acceso. Aún estamos a tiempo de recuperar el Lago Titicaca antes de que se convierta en un pantano de desechos urbanos.



ISBN: 978-99954-1-885-4

