



A-1

***EVOLUCION DEL NIVEL DEL LAGO TITICACA DURANTE
EL SIGLO XX***

***EVOLUTION OF THE TITICACA LAKE LEVEL DURING THE
20TH CENTURY***

Josyane Ronchail, UPMC-LOCEAN, josyane.ronchail@locean-ipsl.upmc.fr

Jhan Carlo Espinoza, IGP

David Labat, IRD-GET

Jacques Callède, IRD-GET

Waldo Lavado, SENAMHI-PERU

RESUMEN:

El nivel del Lago Titicaca ha cambiado significativamente durante el siglo XX. Una diferencia de cinco metros se observa entre los dos extremos, 3806,7 m en 1944 y 3811,6 en 1986. No hay tendencia en el nivel del lago, los cambios se presentan a modo de oscilaciones de baja frecuencia y son caracterizados por una ruptura al inicio de los años setenta con valores más altos después. Esta particularidad es también observada en las lluvias de Bolivia y en algunos grandes ríos sur americanos de regiones tropicales y subtropicales, tal como el Amazonas y el Paraná. La variabilidad del nivel del lago está relacionada con la de los océanos Pacífico y Atlántico extra tropicales y también con el Atlántico tropical Sur. El crecimiento anual del nivel del lago que es la diferencia entre el valor máximo anual en abril y el mínimo en diciembre, presenta contrariamente una variabilidad a alta frecuencia tal como la lluvia en La Paz-San Calixto. Esta variabilidad está asociada con las condiciones térmicas de los océanos tropicales: el crecimiento del nivel del lago es mayor durante eventos La Niña y cuando el océano Atlántico tropical norte es más frío de lo normal. Estas relaciones son significativas, pero sin embargo son bastante débiles.

PALABRAS CLAVE: LLUVIA, TEMPERATURA DE SUPERFICIE DEL MAR, AMERICA DEL SUR, VARIABILIDAD

SUMMARY:

The level of Lake Titicaca changed considerably during the 20th century. A five meters difference is registered between two extremes, 3806, 7 m in 1944 and 3811, 6 in 1986. The absence of trend and low frequency oscillations characterize the changes in the lake level as well as a break point at the beginning of the seventies with increased values afterwards. This last feature is also observed in rainfall and further in the discharge values of tropical and subtropical South American large rivers as the Amazon and the Parana Rivers. The lake level is related to long-term oscillations in the extra tropical Atlantic and Pacific oceans sea surface temperatures. The annual increment of the lake computed between its highest level in April and its lowest level in December, presents on the contrary a high frequency variability related to the rainfall in San Calixto-La Paz. This variability is associated with the heat conditions of the tropical oceans: the level increment is higher during La Niña and when the tropical northern Atlantic is cooler than usual. Though significant, these relations are rather weak.

KEY-WORDS: RAINFALL, SEA SURFACE TEMPERATURE, SOUTH AMERICA, VARIABILITY

A1.1. INTRODUCCIÓN

El Altiplano, extenso llano endorreico caracterizado por una elevación entre 3650 y 3900 metros, está ubicado en los Andes centrales (14°-22° Sur y 66°-71° Oeste), entre las cordilleras orientales y occidentales que culminan a más de 6000 metros de altura. La cordillera Real al Este obstaculiza la llegada de los vientos alisios húmedos desde la cuenca amazónica. El lago Titicaca, uno de los sistemas hidrológicos del Altiplano, ubicado en la parte de sotavento, recibe 680 mm de lluvia por año (Roche *et al.* 1990), mucho menos que el lado oriental de los Andes. Además, la cuenca del lago Titicaca está caracterizada por un gradiente Norte-Sur con lluvias que disminuyen desde 800 mm por año (1300 mm en el lago mismo) hasta 300 mm en el Sur, en la región del lago Poopó (Roche *et al.* 1990, Guyot *et al.* 1990, Roche *et al.* 1992). El abastecimiento del lago se hace con la lluvia (47%) y con el agua de los ríos (53%), principalmente el río Ramis (Roche *et al.* 1992). El lago pierde agua mediante la evapotranspiración (91%) y el desagua en el río Desaguadero (9%). La temperatura media anual en la cuenca del lago comprende entre 7 y 10°C (Roche *et al.* 1992).

La estación de lluvia se produce desde diciembre hasta marzo, con un máximo de lluvia en enero, y proporciona más o menos 70% de las lluvias anuales. El invierno austral, contrariamente, es una estación seca. El ciclo anual de las lluvias en el Altiplano está relacionado con la circulación atmosférica de alto nivel. En verano, vientos del Este favorecen la subida del aire amazónico húmedo hasta el Altiplano y las lluvias resultan también del movimiento hacia sur del Jet subtropical y de la presencia de la Alta de Bolivia (Aceituno & Montecinos 1993, Garreaud 2000, Garreaud *et al.* 2003). El aire húmedo de bajo nivel del Atlántico norte llega hasta el trópico mediante el sistema del moznón sudamericano (SAMS - Zhou & Lau 1998) y está parcialmente reciclado en la cuenca amazónica

A-1 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el Siglo XX

(Vimeux *et al.* 2006). En invierno, vientos de alto nivel del oeste y el fin del monzón explican condiciones secas.

En los Andes centrales, llueve menos durante la estación de lluvia cuando se producen eventos El Niño, es decir cuando anomalías positivas de temperatura de superficie del mar (TSM) son observadas en el Pacífico ecuatorial (Kessler 1971, Francou & Pizarro 1985, Aceituno 1988, Ronchail 1995 y 1998, Aceituno & Garreaud 1995, Lenters & Cook 1999, Vuille 1999, Vuille *et al.* 2000, Garreaud & Aceituno 2001, Francou *et al.* 2003, Lagos *et al.* 2008, Lavado *et al.* 2012, Seiler *et al.* 2013). Vuille *et al.* (2000), Ronchail & Gallaire (2006) y Lagos *et al.* (2008) muestran que las variaciones de las TSM del Pacífico ecuatorial central explican mejor la variabilidad de la lluvia que las TSM del Pacífico ecuatorial Este. Las anomalías negativas de lluvia durante El Niño coinciden con vientos de oeste reforzados en el Altiplano, lo que inhibe la llegada de aire húmedo desde la cuenca amazónica (Garreaud & Aceituno 2001). Sin embargo, Ronchail (1998) y Vuille *et al.* (2000) muestran que esta relación no es necesariamente lineal como se pensaba. En efecto, la relación entre El Niño (respectivamente La Niña) y eventos secos (respectivamente húmedos) en el Altiplano es bastante débil. Más allá, como el signo y la fuerza del viento zonal son bastante independientes del Niño Oscilación Austral (ENSO), no hay una relación sencilla entre ENSO y la lluvia en el Lago Titicaca y en el Altiplano.

El Atlántico tropical, fuente de vapor de agua para varias regiones tropicales de América del Sur, es otro origen de variabilidad interanual de la lluvia en el Altiplano. En este sentido, Melice & Roucou (1998) y Baker *et al.* (2001) muestran que el aumento anual del nivel del Lago Titicaca está correlacionado negativamente con las TSM del Atlántico tropical norte, es decir que es más fuerte cuando las TSM están más frías de lo normal. Hastenrath *et al.* (2004) revelan que las lluvias son más abundantes cuando los alisios son más fuertes de lo normal y cuando la zona de convergencia intertropical (ZCIT) se encuentra desplazada hacia sur, lo que corresponde a un gradiente norte - sur disminuido de la TSM del Atlántico, con anomalías frías/calientes en el Norte/Sur. Adicionalmente, y en adecuación con lo precedente, lluvias inferiores a lo normal son descritas en los Andes tropicales de Perú cuando las TSM del Atlántico norte tropical son más calientes de lo normal (Espinoza *et al.* 2011, Lavado *et al.* 2012).

La Oscilación Décadal del Pacífico (PDO) es descrita como una variabilidad a largo plazo parecida a El Niño. Durante su fase positiva, anomalías positivas (negativas) de la TSM se observan en el Pacífico tropical (extra tropical) (Zhang *et al.* 1997). Garreaud *et al.* (2008) muestran que anomalías negativas de lluvia se producen en América del Sur tropical durante la fase positiva de la PDO. Por otro lado, Seiler *et al.* (2013) revela que no existe relación entre PDO y lluvia en los Andes de Bolivia.

A-1 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el Siglo XX

Una apreciación más profundizada de la variabilidad actual del nivel del lago Titicaca es muy importante ya que las orillas del lago son densamente pobladas y cultivadas (Montes de Oca 2005). Por esta razón, este trabajo tiene el objetivo de analizar la variabilidad del nivel del lago para poner en evidencia eventuales tendencias y rupturas, y de relacionar esta variabilidad con la lluvia y con la hidrológica sudamericana. Finalmente, nuestro objetivo es relacionar la variabilidad del nivel del lago con indicadores oceánicos que podrían ser predictores de la hidrológica del lago Titicaca.

A1.2. DATOS Y METODOS

En este trabajo se emplea los datos mensuales del nivel del Lago Titicaca en Puno, disponibles para el periodo 1914-2009, tomando como referencia 3800 m de altitud. Estos datos tal como los datos de lluvia de la estación de La Paz-San Calixto proceden de los Servicios Nacionales de Hidrología y Meteorología respectivamente de Perú y Bolivia. Los valores de caudales de ríos sudamericanos provienen del Global Runoff Data Center y del Observatorio sobre la hidrogeodinámica de la cuenca amazónica (ORE-HYBAM, www.ore-hybam.org).

Para explicar la variabilidad del nivel del lago diversos índices climáticos regionales son utilizados: TSM mensuales (1915–2009) en el Atlántico tropical norte (TNA, 4–24°N, 58–14 °O) y sur (TSA, 0–20 °S, 30–0°O) calculados a partir de los datos de SST v3b (Smith et al., 2008). Se calcula también la diferencia entre TNA y TSA para obtener el gradiente de TSM en el Atlántico tropical. También son considerados el Atlantic Meridional Mode (AMM) que representa la variabilidad meridional del Atlántico y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) que representa la variabilidad a largo plazo del Atlántico norte. En la región Pacífico, se utilizan dos índices que sintetizan la variabilidad del Pacífico ecuatorial central (Índice C) y oriental (índice E-ENSO), los cuales, por construcción, son independientes (Takahashi et al., 2011, <http://www.met.igp.gob.pe/datos/EC.txt>). La PDO también es considerada. AMO, AMM y PDO provienen del Climatic Prediction Centre of the National Oceanic and Atmospheric Administration (CPC-NOAA, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/>). Este centro proporciona también datos globales mensuales de TSM, disponibles con una resolución de 2x2 grados de latitud-longitud (Reynolds & Smith 1994). Esos datos fueron obtenidos del centro de datos de la NOAA.

Métodos clásicos como la correlación de Pearson y análisis en composiciones fueron utilizados en este trabajo para medir las relaciones entre las series hidrológicas y los índices oceánicos. Tests de Buishand, Pettitt y de Lee y Heghinian que permiten la detección de cambios en las series temporales fueron también aplicados, así como el test de Student para comparar promedios.

A1.3. VARIABILIDAD DEL NIVEL DEL LAGO

A1.3.1. NIVEL DEL LAGO

Las variaciones del nivel del lago (LEV) durante el periodo 1915-2009 son relevantes (Figure A1-1). El rango de variación del nivel del lago es de aproximadamente 5 metros, desde 3806,7 m en 1944 hasta 3811,6 en 1986. La estación de lluvia de 1985-86 fue desastrosa y debido a un nivel muy alto del lago y a un número muy elevado de personas afectadas, el gobierno peruano decidió un plan de emergencia y llama a la ayuda internacional (Sztorch *et al.* 1989). Por el contrario, niveles muy bajos durante los años cuarenta han sido atribuidos a ocurrencias repetidas de eventos El Niño entre 1936 y 1943 (Martin *et al.* 1993).

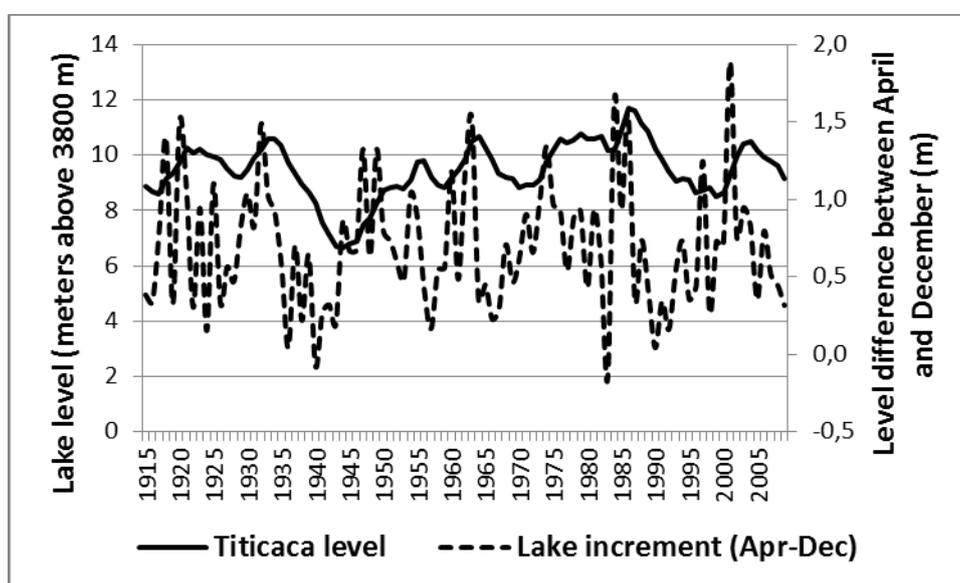


Figura A1-1: Nivel anual (LEV) del lago Titicaca (metros sobre 3800 m) y diferencia anual entre los niveles de abril y de diciembre del año anterior (DIF-LEV, metros)

No hay tendencia en la serie de los niveles del lago Titicaca pero un examen visual muestra una variabilidad caracterizada por fluctuaciones de baja frecuencia, con varios picos durante el siglo, que necesitan análisis adecuados. La fluctuación más fuerte se observó durante el periodo 1933-1944 cuando el nivel del lago bajó 5 metros muy rápidamente. Otra disminución importante fue observada en el intervalo 1986-1997, con una disminución de 4,5 m.

El nivel promedio del lago es de 3809,4 m. Una ruptura en la serie centenaria se produjo en 1973 con un incremento significativo ($p=0.01$) del promedio de 0,8 metros después de esta fecha.

A1.3.2. INCREMENTO ANUAL DEL NIVEL DEL LAGO

Carmouze & Aquize (1981) muestran que las fluctuaciones anuales del nivel del lago Titicaca

A-1 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el Siglo XX

corresponden a las diferencias, a nivel anual, entre los flujos hidrológicos que entran en el lago y los que salen. Así, las variaciones del nivel del lago representan más precisamente las diferencias entre las entradas de agua por la lluvia y los ríos y las salidas debidas a la evapotranspiración y, al final, las fluctuaciones climáticas en la región. Por eso fueron calculadas las diferencias de nivel del lago entre Abril y Diciembre (DIF-LEV) que representan un índice de la actividad de la estación de lluvia. Estos dos meses han sido elegidos porque corresponden a los extremos del ciclo anual del nivel del lago que muestra un desfase de tres meses en comparación al ciclo anual de las lluvias (Figure A1-2). En efecto, los niveles máximos del lago son observados en Abril, mientras que las lluvias son máximas en Enero y los niveles mínimos ocurren Diciembre, cinco meses después del mínimo de lluvia de Junio-Julio.

DIF-LEV muestra una variabilidad de alta frecuencia, con valores negativos cuando hubo ausencia de acumulación como durante El Niño de 1982-83 (-0,15 m) hasta incrementos sustanciales como por ejemplo en 2001-02 (+1,89 m), siendo el valor promedio 0,69 m. Un desfase de tiempo muy claro aparece entre años de fuerte (o débil) DIF-LEV y de elevado (o bajo) LEV. Por ejemplo, los niveles muy bajos de los años cuarenta son consecuencia de valores débiles consecutivos durante diez años del incremento anual. Lo mismo puede ser observado al inicio del siglo XXI. Contrariamente, niveles elevados siguen repetidos valores fuertes de DIF-LEV. Mientras que la correlación entre el nivel del lago y el incremento anual es muy baja, las correlaciones con desfases son significativas cuando DIF-LEV antecede a LEV en 2 ó 3 años (0,39 y 0,40 respectivamente, significativo al 99%).

No hay ruptura en la serie centenaria de incremento anual de nivel del lago.

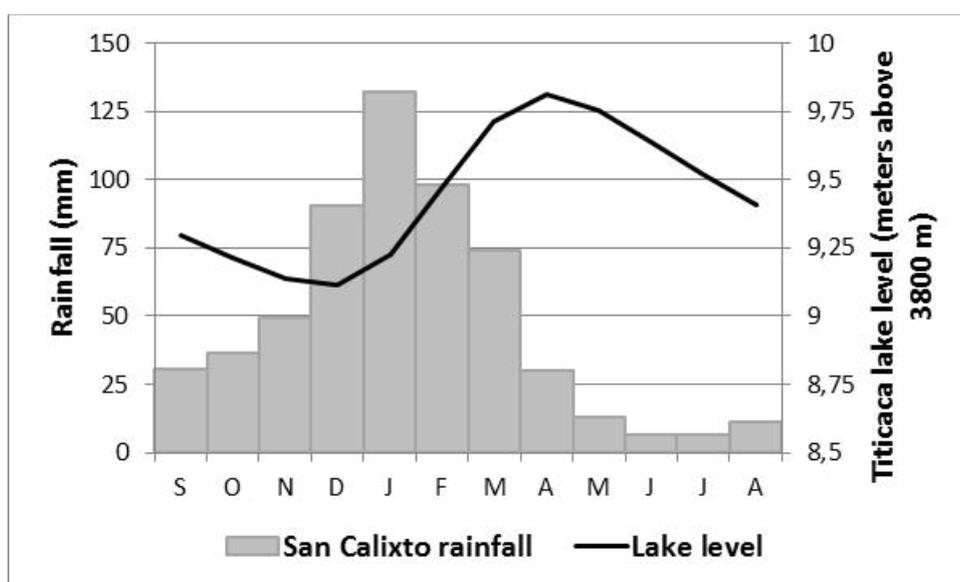


Figura A1-2: Valores mensuales del nivel del lago Titicaca (1915-2009) sobre 3800 metros y lluvia en San Calixto-La Paz (1918-2005).

A1.3.3. RELACIONES CON LA LLUVIA EN LA PAZ

La estación meteorológica de San Calixto-La Paz (16,3°S; 68,1°O) ubicada a unos cien kilómetros del lago es una de las pocas estaciones en el Altiplano con una serie larga de datos (1918-2004). La correlación entre las lluvias anuales y DIF-LEV resulta significativa ($r=0,56$, $p<0,001$). Las correlaciones entre los datos mensuales de enero, febrero y marzo, en el centro de la estación de lluvia, también son significativas. Este resultado confirma que DIF-LEV representa el clima anual. Por el contrario, el nivel del lago no está correlacionado con las lluvias anuales.

Para evitar los sesgos debido a la linealidad de la correlación de Pearson, se realizaron análisis en composiciones para comparar i) las lluvias durante años de alto nivel del lago (> 10 m) y años de bajo nivel (< 9 m), y ii) años con un importante incremento del nivel del lago (valor promedio de DIF-LEV más una desviación estándar, i.e. 1,1 m) con años de poca acumulación (valor promedio de DIF-LEV menos una desviación estándar, i.e. 1,1 m). Las diferencias son evaluadas utilizando el test de Student.

Como esperado, las lluvias son significativamente menores cuando el nivel del lago (Tabla A1-1) y DIF-LEV (Tabla A1-2) tienen valores bajos. Sin embargo, las diferencias de lluvia son mucho más importantes cuando se comparan fuertes y débiles DIF-LEV que cuando se comparan elevados y bajos niveles del lago.

Tabla A1-1: Valores promedios del nivel (m) del Lago Titicaca, de su incremento entre abril y diciembre (m), de la lluvia en San Calixto- La Paz (mm), de los caudales en ríos sudamericanos ($m^3.s^{-1}$) y de índices océano-atmosféricos, durante episodios de nivel por debajo de 9 m y por encima de 10 m. Los valores en negrita son significativos con 95% probabilidad. Ob = Óbidos; CB = Ciudad Bolívar; PP = Puerto Pilcomayo; T = Timbúes; PI = Paso de los Indios; PL = Paso de los Libres.

	Promedio durante LEV < 9m	Promedio durante LEV > 10 m	Probabilidad (Student)
Titicaca nivel	8,28	10,53	0,00
Titicaca DIF-LEV	0,62	0,76	0,17
San Calixto lluvia	543	604	0,01
Amazonas Ob	161308	168723	0,03
Orinoco CB	31448	31850	0,66
Paraguay PP	3147	4178	0,00
Paraná T	14526	16780	0,01
Neuquén PI	297	347	0,10
Uruguay PL	3977	4318	0,45
PDO	-0,08	0,31	0,06
index E	-0,18	-0,23	0,77
index C	-0,53	-0,35	0,40
AMO	0,04	-0,08	0,00
AMM	0,86	-0,27	0,05
TNA	0,09	-0,09	0,47
TSA	-0,27	0,28	0,02
TNA-TSA	0,36	-0,37	0,00

A-1 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el Siglo XX

Para terminar, se nota que, tal como el nivel del lago, las lluvias en La Paz-San Calixto presentan una ruptura en 1972, con un aumento de las lluvias anuales de 9% después de esta fecha. Este resultado es consistente con la identificación de una ruptura en las lluvias de Bolivia al inicio de los años setenta (Ronchail 1997).

Tabla A1-2: Valores promedios del nivel (m) del lago Titicaca, de su incremento entre Abril y Diciembre del año anterior (m), de la lluvia en San Calixto- La Paz (mm), de los caudales en ríos sudamericanos ($m^3 \cdot s^{-1}$) y de índices océano-atmosféricos, durante episodios de incremento anual del nivel del lago por debajo del promedio menos una desviación estándar (0,3m) y por encima del promedio más una desviación estándar (1,1m). Los valores en negrita son significativos con 95% de probabilidad. Ob representa Óbidos; CB, Ciudad Bolívar; PP, Puerto Pilcomayo; T, Timbúes; PI, Paso de los Indios; PL, Paso de los Libres.

	DIF-LEV > promedio más una desviación estándar	DIF-LEV < promedio menos una desviación estándar	Probabilidad (Student)
Titicaca nivel	9,56	9,10	0,28
Titicaca DIF-LEV	1,41	0,13	0,00
San Calixto lluvia	655	473	0,00
Amazonas Ob	160833	166333	0,33
Orinoco CB	31633	29622	0,17
Paraguay PP	4091	3609	0,45
Paraná T	17124	16177	0,46
Neuquén PI	375	312	0,27
Uruguay PL	4654	4646	0,99
PDO	-0,21	0,56	0,03
ENSO index E	-0,35	0,24	0,13
ENSO index C	-0,67	0,07	0,01
AMO	-0,03	0,02	0,42
AMM	-0,44	-0,23	0,78
TNA	-0,49	0,11	0,10
TSA	-0,15	0,03	0,63
TNA-TSA	-0,35	0,08	0,26

A1.3.4. RELACIONES CON LOS CAUDALES DE RÍOS SUR AMERICANOS

Para comparar la variabilidad del lago Titicaca con la variabilidad hidrológica en Sudamérica, fueron realizados, como antes, análisis de correlación y composiciones entre LEV y DIF-LEV y los caudales anuales de algunos grandes ríos. El nivel del lago (LEV) está correlacionado positivamente ($p=0,01$) con los caudales del río Paraguay en Puerto Pilcomayo y del río Paraná en Timbúes. Adicionalmente, el análisis en composiciones de los niveles muestra que los caudales del río Amazonas en Óbidos son menores cuando el nivel del lago es bajo. Una característica común al lago y a los ríos es una ruptura en los años setenta, en 1971 en el río Amazonas, 1973 en el río Paraná, 1977 en el río Paraguay,

como ya lo mostraron Callède *et al.* (2004), Garcia & Mechoso (2005) y Collischon *et al.* (2001). Este resultado sugiere que la variabilidad del nivel del lago hace parte de una variación del clima de gran escala y a baja frecuencia en América del Sur. Contrariamente, el incremento anual del nivel del lago (DIF-LEV) no está asociado con los caudales de ríos Sudamericanos.

A1.4. INDICES OCEANO-ATMOSFERICOS Y NIVEL DEL LAGO TITICACA

La Figure A1-3 muestra la correlación (1915-2009) entre el nivel anual del lago y las TSM global, promediadas durante el ciclo anual septiembre-agosto. El nivel del lago está significativamente y negativamente correlacionado con la TSM de los océanos del hemisferio norte, a media y alta latitud, y positivamente correlacionado con las TSM tropicales y, en particular, con las TSM del Atlántico Sur. Esto significa que niveles altos del lago son asociados con temperaturas más altas de lo normal en el Atlántico sur y más bajas de lo normal en los océanos Atlántico y Pacífico norte. Esos resultados son confirmados cuando se comparan los valores de diferentes índices océano-atmosféricos durante episodios más bajos que 3809m del nivel del lago y más altos que 3810m (Tabla A1-1). La AMO, que representa la variabilidad del Atlántico norte, es muy diferente entre los dos casos. El Atlántico norte es más frío cuando el nivel del lago es alto. Además, la TSM del Atlántico sur es más elevada cuando el nivel del lago es alto y, en consecuencia, los índices TNA-TSA y AMM que representan el gradiente meridional de TSM en el Atlántico, es bajo. La asociación a baja frecuencia entre el dipolo meridional del Atlántico y la variabilidad a largo plazo de las lluvias en Bolivia ya ha sido descrita por Ronchail (1997). Esos resultados son también coherentes con los de Folland *et al.* (1986) y Baines & Folland (2007) que relatan cambios globales en el océano y la atmósfera al final de los años sesenta.

La Figure A1-4 muestra la correlación entre DIF-LEV e la TSM global. La variabilidad del incremento anual del nivel del lago está relacionado con las TSM tropicales, en el Pacífico y en el Atlántico norte. Fuertes DIF-LEV se producen cuando el Pacífico ecuatorial está frío (eventos La Niña y PDO negativa), tal como el Atlántico norte. Esas relaciones son relativamente débiles ($r \sim -0.30$ para Índice C), pero son confirmadas cuando se comparan los índices C, PDO y TNA durante eventos de alto y bajo incremento de nivel del lago (Tabla 2).

Esos resultados son consistentes con descubrimientos previos sobre las relaciones entre lluvias en los Andes tropicales y ENSO y las TSM del Atlántico tropical norte. Lo cual ha sido también observado en las lluvias y los caudales de la parte Oeste de la cuenca amazónica (Espinoza *et al.* 2013).

A-1 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el Siglo XX

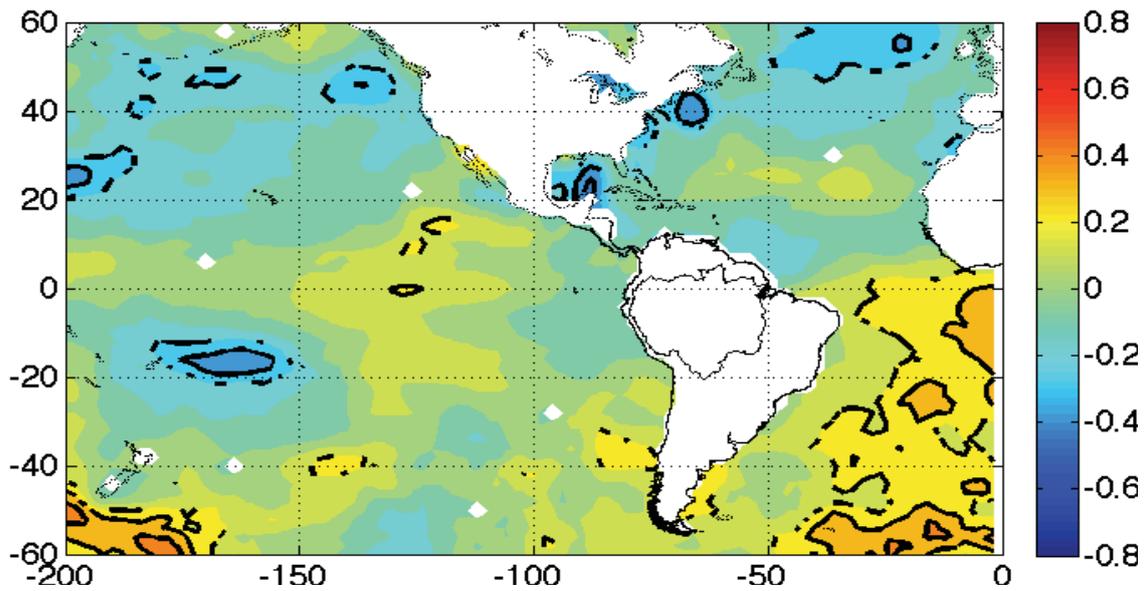


Figura A1-3: Correlaciones entre el nivel anual del lago Titicaca y la temperatura anual (septiembre-agosto) de la superficie del mar. 1915-2009. Las líneas negras muestran las zonas con correlaciones significativas con una probabilidad de 90%.

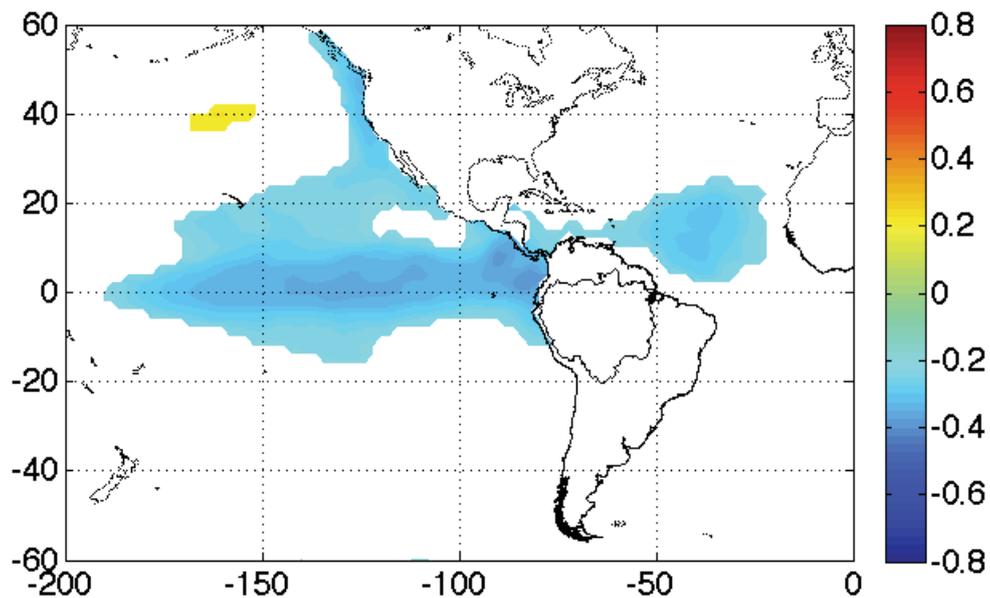


Figura A1-4: Correlaciones entre la diferencia de nivel del lago Titicaca entre abril y diciembre del año anterior y la temperatura anual (septiembre-agosto) de la superficie del mar. 1915-2009. Son solamente representados los valores de correlaciones significativos con una probabilidad de 95%.

A1.5. CONCLUSION

En este trabajo se analiza la evolución del nivel del lago Titicaca desde 1915 hasta 2009. Es un primer enfoque que necesita más investigaciones, especialmente sobre los ciclos que parecen en las series hidrológicas y sobre los procesos atmosféricos que vinculan océanos y la hidrológica continental.

Durante el siglo pasado, el nivel del lago Titicaca no presentó tendencia, sino oscilaciones de largo plazo con valores muy bajos en los años cuarenta y muy altos durante los años ochenta. Casi cinco metros diferencian esos dos periodos, lo que es muy importante cuando se considera la densidad de la población que vive cerca del lago.

La ocurrencia de una ruptura en la serie temporal del nivel del lago al inicio de los años setenta con un incremento después, es otra particularidad del Titicaca. Esto es también observado en las lluvias de Bolivia y en los caudales de varios ríos Sudamericanos. Periodos con altos niveles son caracterizados por temperaturas de superficie del mar frías en las latitudes medias y altas del Atlántico norte y condiciones opuestas en el Atlántico Sur.

El nivel del lago resulta de incrementos anuales, diferencias entre los niveles extremos del lago en abril (nivel máximo) y en diciembre (nivel mínimo). El incremento anual está relacionado con las lluvias en La Paz-San Calixto y, ambos, con la variabilidad a alta frecuencia de las TSM de los océanos tropicales. El incremento del lago es elevado durante los eventos La Nina y cuando el Atlántico tropical norte está frío. Sin embargo, estas relaciones son bastante débiles.

A1.6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aceituno 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the south American sector. Part I : surface climate. *Mon. Weather Rev.* 116: 505-524.
- Aceituno, P., Montecinos, A. 1993. Circulation anomalies associated with dry and wet periods in the South American Altiplano. *Proc. Fourth Int. Conf. on Southern Hemisphere Meteorology*, Hobart, Australia. *Am. Meteor. Soc.*, pp. 330-331.
- Aceituno, P. and Garreaud, R 1995. Impacto de los fenomenos El Niño y La Niña en regimenes fluviometricos andinos. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingenieria Hidraulica*, 10: 33-43,
- Baines P. and Folland C. K. 2007. Evidence for a Rapid Global Climate Shift across the Late 1960s. *J. of Climate*, 20: 2721-2744
- Baker P.A., Seltzer G.O., Fritz S.C., Dunbar R.B., Grove, M.J., Tapia, P.M., Cross, S.L., Rowe, H.D., Broda, J.P. 2001 The history of South American tropical precipitation for the past 25000 years, *Science*, 291: 640-643.
- Callède J., Guyot J.L., Ronchail J., L'Hôte Y., Niel H., de Oliveira E. 2004. Evolution du débit de l'Amazone à Obidos de 1902 à 1999. *Hydrological Sciences*, 49: 85-97.
- Carmouze, J.P., Aquize J.E. 1981. La régulation hydrique du Lac Titicaca et l'hydrologie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 14(4): 311-328.
- Collischon W., C.E.M. Tucci et R.T. Clarke 2001. Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climat change? *J. Hydrol.* 245 : 218-238.
- Espinoza J.C., Ronchail J., Guyot J.L., Junquas C., Vauchel P., Lavado W.S., Drapeau G., Pombosa R. 2011. Climate variability and extremes drought in the upper Solimões River (Western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L13406, doi:10.1029/2011GL047862.
- Espinoza J.C., Ronchail J., Frappart F., Lavado W., Santini W., Guyot J.L. 2013. The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970 – 2012 period: A focus on the 2012 flood. *Journal of Hydrometeorology*. doi: 10.1175/JHM-D-12-0100.1.
- Folland C.K., Palmer T.N. and Parker D.E. 1986. Sahel rainfall and woldwide sea temperature, 1901-1985. *Nature*, 320: 602-607.

A-1 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el Siglo XX

- Francou B., Pizarro, L. 1985. El Niño y la sequía en los altos Andes centrales (Perú y Bolivia). *Bull. Inst. Français d'Etudes Andines*, 14: 1-18.
- Francou B, Vuille M, Wagnon P, Mendoza J, Sicart JE. 2003. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, 16 °S. *Journal of Geophysical Research* 108: D5, 4154, DOI: 10.1029/2002JD002959.
- García N. O. and Mechoso C. R. 2005. Variability in the discharge of South American rivers and in climate. *Hydrol. Sci. J.*, 50(3) : 459-478. DOI: 10.1623/hysj.50.3.459.65030
- Garreaud R.D., 2000. Intraseasonal variability of moisture and rainfall over the South American Altiplano, *Monthly Weather Review*, 128: 3337-3346.
- Garreaud R.D., Aceituno, P. 2001. Interannual rainfall variability over the South American Altiplano. *Journal of Climate*, 14:2779-2789.
- Garreaud, R.D., Vuille M., Compagnucci R., Marengo J. 2008 Present-day South American climate, *Paleogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* doi:10.1016/j.palaeo.2007.10.032
- Guyot J.L, Roche M.A., Noriega L., Calle H. , Quintanilla J. 1990. Salinities and sediment transport in the Bolivian highlands. *J. of Hydrology*, 113: 147-162.
- Hastenrath S., Polzin D., Francou B. 2004. Circulation Variability Reflected in Ice Core and Lake Records of the Southern Tropical Andes, *Climatic Change*, 64: 361-375.
- Kessler, A. 1971. ¿Será posible pronosticar las variaciones de nivel de las aguas del lago Titicaca ? *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima*, 90: 5-10.
- Lavado C., W.S., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J.C. and Guyot, J.L. 2012. Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas watersheds. *Hydrological Sciences Journal*, 57 (4): 1–18.
- Lagos P., Silva Y., Nickl E. and Mosquera K. 2008. El Niño –related precipitation variability in Peru. *Adv. Geosc.*, 14: 231-237.
- Lenters, J.D., Cook K.H. 1999. Summertime precipitation variability over South America: role of the large-scale circulation. *Mon. Weather Rev.*, 127: 409-431.
- Martin L., Fournier, M., Mourguiart P., Siffedine A. , Turq, B, Absy M.L., Flexor, J-M. 1993. Southern oscillation signal in South American paleoclimatic data of the last 7000 years. *Quaternary Research*, 39: 338-346.
- Melice J. L., Roucou P. 1998. Decadal time scale variability recorded in the Quelccaya summit ice core d18O isotopic ratio series and its relation with the sea surface temperature. *Climate dynamics*, 14: 117-132.
- Montes de Oca I. 2005. *Enciclopedia geográfica de Bolivia*. Editora Atenea S.R.L. La Paz, 871p.
- Roche M.A., Aliaga A., Campos J., Pena J., Cortes J., Rocha N. 1990. Hétérogénéité des précipitations sur la Cordillère des Andes Boliviennes (Heterogeneity of rainfall on the Bolivian Andean Cordillera). *Hydrology in Mountainous Regions – I-Hydrological Measurements; the Water Cycle*, IAHS Publishers: Wallingford UK, 193: 381–388.
- Roche M.A. , Bourges J., Cortes J., Mattos R. 1992. Climatology and hydrology of the lake Titicaca, in Dejoux, C. and A. Iltis (editors) 1992 *Lake Titicaca: A Synthesis of Limnological Knowledge*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 68: 63-88.
- Ronchail J. 1995. Variabilidad interannual de las precipitaciones en Bolivia. *Bull. Inst. Français d'Etudes Andines*, 24: 369-378.
- Ronchail J. 1997. Interdecadal variability of rainfall in Bolivia and sea surface temperatures: Preprints P1.33 for the Fifth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, April, 7-12, 1997, Pretoria, South Africa, 6. Published by the American Meteorological Society, Boston, Mass.
- Ronchail J. 1998. Variabilité pluviométrique en Bolivie lors des phases extrêmes de l'Oscillation Australe du Pacifique (1950-1993). *Bull. Inst. Français d'Etudes Andines*, 27: 687-698.
- Ronchail J and R. Gallaire 2006. ENSO and rainfall along the Zongo valley (Bolivia), from the Altiplano to the Amazon basin. *International Journal of Climatology*, 26: 1223-1236.
- Sztorch, L., Gicquel, V. and Desenclos, J. C. 1989. The Relief Operation in Puno District, Peru, after the 1986 Floods of Lake Titicaca. *Disasters*, 13: 33–43. doi: 10.1111/j.1467-7717.1989.tb00693.x
- Seiler, C., R. W. A. Hutjes, P. Kabat 2013: Climate Variability and Trends in Bolivia. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52:

130–146. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0105.1>

- Smith, T.M., R.W. Reynolds, T.C. Peterson, and J Lawrimore 2008: Improvements to NOAA's Historical Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis (1880-2006). *Journal of Climate*, 21: 2283-2296. DOI: 10.1175/2007JCLI2100.1
- Takahashi, K., A. Montecinos, K. Goubanova y B. Dewitte. 2011. ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño, *Geophysical Research Letters*. 38, L10704, doi:10.1029/2011GL047364
- Vimeux, F., Gallaire, R., Bony, S., Hoffman G., Chiang, J.C.H. 2006. What are the climate controls on the dD in precipitation in the Zongo valley (Bolivia)? Implications for the Illimani ice core interpretation. *Earth and Planetary Sciences letters*, 240: 205-20.
- Vuille, M. 1999. Atmospheric circulation over the Bolivian Altiplano during dry and wet periods and extreme phases of the Southern Oscillation, *International Journal of Climatology*, 19: 1579-1600.
- Vuille M., Bradley, R.S., Keimig F. 2000. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research*, 105: 12447-12460.
- Vuille M, Bradley R.S., Healy R., Werner M., Hardy M.D.R. 2003. Modeling d18O in precipitation over the tropical Americas: 2. Simulation of the stable isotope signal in Andean ice cores. *Journal of geophysical research*, 108, NO. D6, 4175, doi:10.1029/2001JD002039.
- Zhang, Y., J.M. Wallace, D.S. Battisti, 1997: ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *Journal of Climate*, 10: 1004-1020
- Zhou J, Lau KM. 1998. Does a monsoon climate exist over South America? *Journal of Climate* 11: 1020–1040.

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

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

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

Convenio UICN-IRD N°303117/00

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



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

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

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

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



Con el auspicio de:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE

Con la colaboración de:



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



UMSS – Universidad
Mayor de San Simón,
Cochabamba, Bolivia

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

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

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

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

Revisión: Philippe Vauchel¹, Bernard Francou¹, Jorge Molina², François Marie Gibon¹; ¹ IRD, ² UMSA

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

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

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

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

ISBN nº 978-99974-41-84-3

IMPRESO EN BOLIVIA