

**PROYECTO RLA/8/022****ESTUDIO HIDROQUIMICO E ISOTOPICO DEL LAGO TITICACA****INFORME FINAL**

Rubén Rojas Molina  
Marco Paredes Riveros  
Julio Campos

Instituto Peruano de Energía Nuclear – Lima, Perú  
Proyecto Especial Lago Titicaca – Puno, Perú  
Autoridad Autónoma Binacional del lago Titicaca – La Paz, Bolivia

**1. INTRODUCCION:**

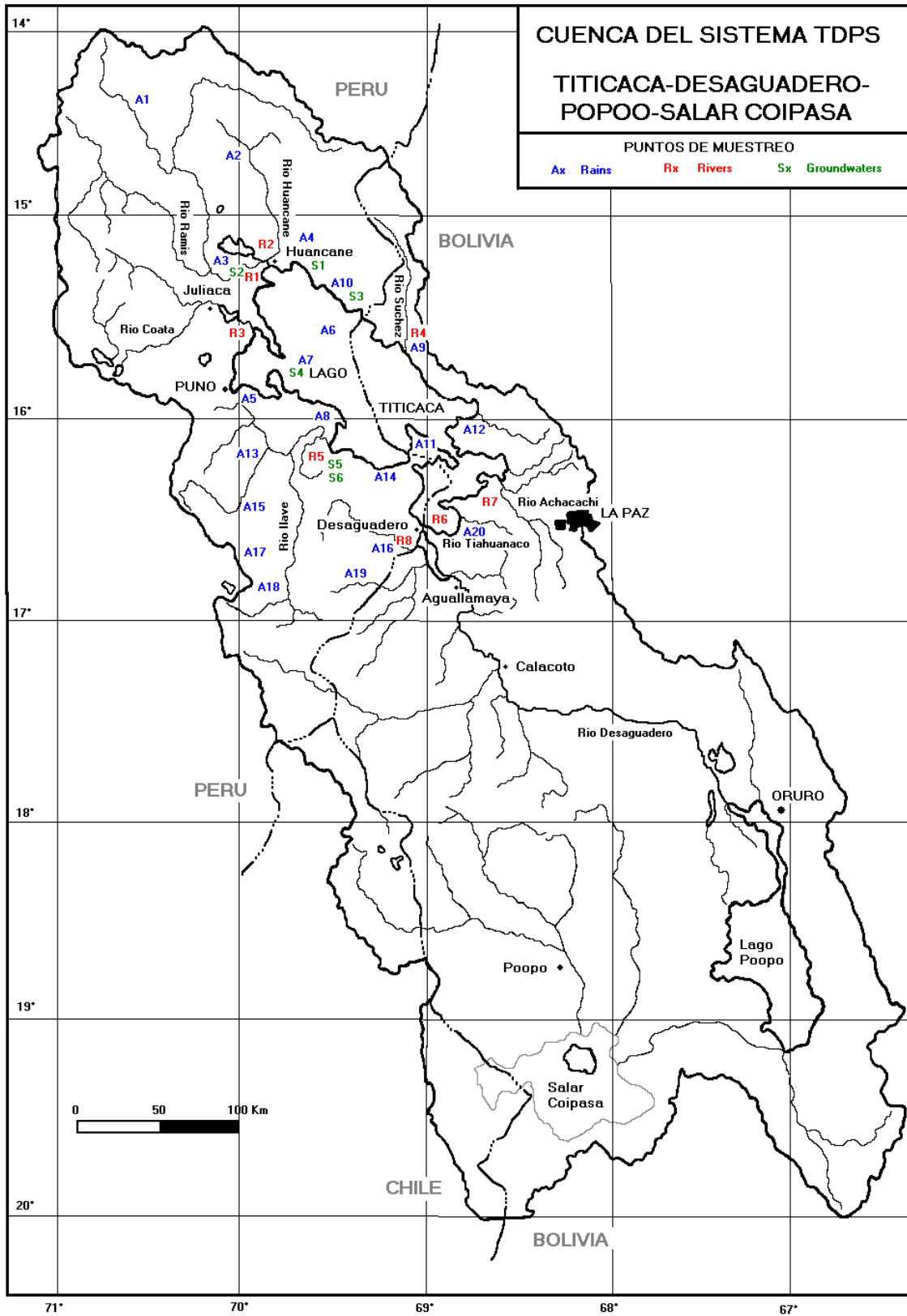
El lago Titicaca se encuentra en el extremo SE del Perú y NO de Bolivia, y esta ubicado entre la cordilleras Occidental y Oriental de los Andes, y forma parte del denominado sistema TDPS (Titicaca, Desaguadero, Poo Poo y salar Coipasa), cuenca endorreica que tiene un área 144,000 Km<sup>2</sup> donde vive una población del orden de 1.2 millones de habitantes dedicados principalmente a la agricultura, ganadería y el comercio. Por su forma y sus características químicas e isotópicas, el Titicaca se puede dividir en dos partes, el lago Mayor ubicado al NO del estrecho de Tiquina y el lago Menor ubicado al SE del mismo estrecho.

La cota media del espejo de agua del Titicaca es de 3,808.5 metros sobre el nivel del mar (msnm) y para esta cota la superficie del total lago es de 7,940 km<sup>2</sup> ; las superficies del lago Mayor y Menor son 6.64 km<sup>2</sup> y 1.3 km<sup>2</sup> respectivamente, y los volúmenes de agua almacenados son: 9.24 E11 m<sup>3</sup> para todo el lago, y 9.10 E11 m<sup>3</sup> y 0.14 E11 m<sup>3</sup> para los lagos Mayor y Menor respectivamente. El clima de la cuenca es semiárido con un rango de precipitaciones anuales que fluctúa entre un promedio de 867 mm/año en las islas del Norte y de 403 mm/año en las islas del sur.

Con el fin de controlar y velar por la conservación y uso adecuado de los múltiples recursos del sistema, que son fundamentalmente hídrico e hidrobiológico, sin alterar negativamente la ecología de la región, los gobiernos del Perú y Bolivia solicitaron la cooperación de la Comunidad Económica Europea (CEE) para llevar a cabo los estudios correspondientes, y se constituyeron como entidades contrapartes la Autoridad Autónoma Binacional del lago Titicaca (ALT) y el Proyecto Especial lago Titicaca (PELT).

Como resultado de estos estudios, la CEE elaboró un Plan Director global binacional de protección-prevención de inundaciones y aprovechamiento de los recursos del sistema TDPS, donde entre otras recomendaciones para el perfeccionamiento del referido Plan Director, propuso efectuar campañas de seguimiento de isótopos en lago Titicaca.

En 1997, el Instituto Peruano de Energía Nuclear y el Proyecto Especial lago Titicaca suscribieron un convenio de Cooperación Técnica y solicitaron la cooperación del Organismo Internacional de Energía Atómica para llevar a cabo el Estudio isotópico e hidroquímico del lago Titicaca, solicitud que fue aprobada en 1998 como el Proyecto RLA/8/022, iniciando sus actividades ese mismo año. El presente informe es el resumen de las actividades efectuadas y los resultados obtenidos en el marco del Proyecto en referencia.



MAPA 01

## 2. CARACTERISTICAS DE LA REGION:

### 2.1 TOPOGRAFIA:

La cuenca del Titicaca esta delimitado por cadenas de montañas de la cordillera de los Andes, cuyas cumbres alcanzan hasta los 6,542 msnm en el sector boliviano, la cuenca esta constituido por una serie de llanuras aisladas por cerros y colinas de diversa altitud, las pendientes de los terrenos son suaves en la zona oriental y escarpadas en la zona oriental.

### 2.2 HIDROGRAFIA:

Las cuencas hidrográficas del Titicaca se muestran en el Mapa 01, donde se puede apreciar que el lago es alimentado por 4 ríos principales: Huancane, llave, Ramis y Coata ubicados en territorio peruano, y 3 ríos menores: Suchez, Tiahuanaco y Achacachi, ubicados en territorio boliviano. El río Desaguadero ubicado en la frontera peruano-boliviana drena las aguas del lago y desemboca en el lago Popoo, y desde 1998 este drenaje ya es regulado en las compuertas del dique construido sobre este río.

Las superficies de las cuencas son:

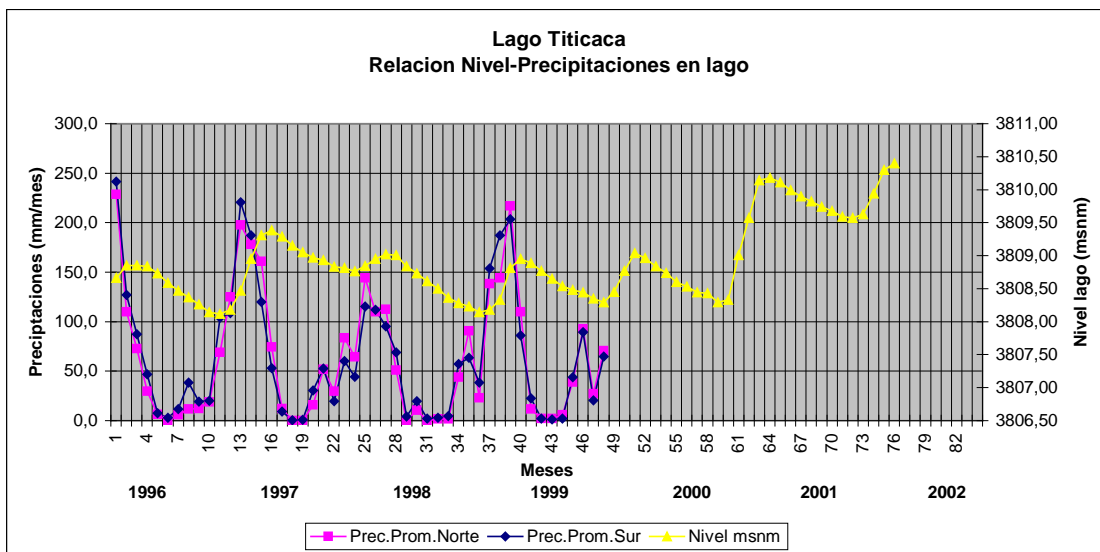
Cuenca	Area (Km2)	Caudal Promedio (m3/seg)
Huancane	3,540	20.0
llave	7,705	38.5
Ramis	14,700	75.6
Coata	4,550	41.5
Suchez	2,825	11.0
Tiahuanaco	s/i	0.4
Achacachi	s/i	5.5
Otros	s/i	
Total	48,000	

### 2.3 HIDROLOGIA:

#### PRECIPITACIONES:

Las precipitaciones son estacionales y típicas de la región altiplánica del Perú y Bolivia: Tres a cuatro meses de lluvias seguido de siete a ocho meses de estiaje, según los valores registrados en las estaciones pluviométricas ubicadas alrededor del lago, la intensidad de las precipitaciones se incrementa en las zonas centrales del lago. Los valores de precipitaciones agrupadas en zonas norte y sur de la cuenca se muestran en las Tablas T.1 del Anexo, los valores en rojo fueron estimados en base a estaciones cercanas. La Tabla T.2 que es un resumen de T.1 donde se muestra los valores máximo, mínimo y promedio en las seis zonas en las que se ha dividido la cuenca.

En el Gráfico G.1 se muestra las variaciones mensuales de precipitaciones (incompletas) y de niveles del lago durante el periodo 1996 – 2001.



**Gráfico G.1**

**Tabla T.2**

	Máximo mm/año	Mínimo mm/año	Promedio mm/año
Cuenca Norte	834	451	636
Cuenca Central	1037	471	717
Cuenca Sur	1151	432	687
Islas Norte	1252	469	867
Islas Centro	421	382	403
Islas Sur	1151	743	816

**ESCORRENTIA:**

Los caudales de escorrentía de los años 1997, 1998 y 1999 se muestran en la Tabla T.3 y donde se puede apreciar que varían espacial y temporalmente en función del régimen de lluvias de la zona. Lamentablemente no se cuenta con valores de escorrentía de los ríos bolivianos en los que ha asumido valores promedios para todo el año.

Tabla T.3

**ESCORRENTIA SUPERFICIAL**

#	suma Q rios		Ramis	Huancane	Coata	Ilave	Suchez	Escoma	Tiahuanaco	Achacachi
Dias	m3/seg		m3/seg	m3/seg	m3/seg	m3/seg	m3/seg	m3/seg	m3/seg	m3/seg
31	493,5	Ene-97	168,423	64,603	136,539	106,967	11,00		0,44	5,56
28	933,7	feb	356,414	77,442	244,194	238,66	11,00		0,44	5,56
31	624,4	mar	289,611	111,591	122,211	84,032	11,00		0,44	5,56
30	307,7	abr	146,99	43,137	52,088	48,52	11,00		0,44	5,56
31	114,8	may	50,218	10,872	19,455	17,294	11,00		0,44	5,56
30	68,2	jun	23,643	5,926	10,19	11,454	11,00		0,44	5,56
31	53,2	jul	15,174	4,103	7,392	9,517	11,00		0,44	5,56
31	37,0	ago	13,203	3,134	1,797	1,842	11,00		0,44	5,56
30	37,1	set	11,562	2,78	4,577	1,148	11,00		0,44	5,56
31	36,3	oct	13,493	0,419	4,291	1,102	11,00		0,44	5,56
30	68,1	nov	41,478	0,928	7,176	1,473	11,00		0,44	5,56
31	72,9	dic	48,329	0,449	5,092	2,001	11,00		0,44	5,56
31	170,2	Ene-98	84,978	9,134	32,296	26,817	11,00		0,44	5,56
28	299,5	feb	166,856	22,067	64,848	28,69	11,00		0,44	5,56
31	243,1	mar	141,941	30,835	36,607	16,714	11,00		0,44	5,56
30	152,8	abr	87,364	24,464	15,883	8,114	11,00		0,44	5,56
31	54,0	may	23,138	5,269	4,555	4,029	11,00		0,44	5,56
30	38,4	jun	11,846	3,114	1,898	4,565	11,00		0,44	5,56
31	36,2	jul	10,536	2,699	1,574	4,406	11,00		0,44	5,56
31	32,2	ago	9,041	2,159	0,729	3,29	11,00		0,44	5,56
30	31,4	set	7,953	1,887	1,768	2,789	11,00		0,44	5,56
31	42,1	oct	10,617	2,066	9,571	2,798	11,00		0,44	5,56
30	60,4	nov	21,257	3,852	13,562	4,776	11,00		0,44	5,56
31	80,5	dic	34,545	6,537	18,504	3,932	11,00		0,44	5,56
31	117,0	Ene-99	68,354	13,484	12,567	5,641	11,00		0,44	5,56
28	270,4	feb	156,611	21,332	59,618	15,8	11,00		0,44	5,56
31	471,7	mar	236,367	56,645	120,372	41,3	11,00		0,44	5,56
30	361,7	abr	171,67	27,052	90,836	55,1	11,00		0,44	5,56
31	129,7	may	67,734	11,078	20,494	13,415	11,00		0,44	5,56
30	56,8	jun	22,64	4,016	4,874	8,275	11,00		0,44	5,56
31	43,3	jul	15,18	2,53	1,756	6,809	11,00		0,44	5,56
31	36,7	ago	10,694	2,173	1,206	5,63	11,00		0,44	5,56
30	42,6	set	9,45	2,618	9,529	3,995	11,00		0,44	5,56
31	69,1	oct	16,307	4,223	25,119	6,485	11,00		0,44	5,56
30	57,9	nov	12,436	3,832	21,326	3,276	11,00		0,44	5,56
31	66,3	dic	19,412	5,25	20,18	4,422	11,00		0,44	5,56

**2.4 EVAPORACION:**

Las tasas de evaporación a orillas del lago y en la cuenca del Titicaca son relativamente altas para la temperatura promedio de la zona (8.2°C en el aire y de 13.0°C en la superficie del agua), lo cual se puede explicar entre otros factores por la baja presión atmosférica y baja humedad relativa registrada en la zona, producto de la elevada altitud a la que se encuentra (3,800 msnm). La presión atmosférica a orillas del lago es de 64 Kpa, que es el 63% de la presión atmosférica a nivel del mar.

La humedad relativa del aire medida en las estaciones de Capachica, Ilave, Huancane, Desaguadero, Yunguyo y Moho, fue de 64% para el año 1997 y de 51% para el año 1998. El valor promedio anual para toda la cuenca en los años 80 según el reporte del Plan Director del sistema Titicaca, Desaguadero, Po Poo, Salares (TDPS) fue de 39.1 % .

Los valores promedios de evaporación anual registrados en tanques de evaporación tipo Colorado A fluctúan entre 1200 mm y 1700 mm a orillas del lago, valores que aumentan en dirección al sur. Los meses en los que se registra las mayores tasas de evaporación son Junio y Julio. Sin embargo, cabe señalar que estas tasas podrían ser mayores debido a que los tanques evaporímetros no pueden registrar toda la evaporación en el lago porque algunos días del año el agua de estos tanques se llega a congelar, pero las aguas del lago Titicaca nunca llegan al punto de congelación, razón por la cual, uno de los objetivos de este estudio fue determinar la evaporación del lago utilizando técnicas isotópicas.

A continuación se resume los valores de parámetros meteorológicos medios mensuales y anuales recopilados para el periodo 19964-1979 (\*)

**Tabla T.4**

Parameter	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	An.
mean air temperature $T_{AIR}$ [°C]	10.0	9.8	9.3	8.4	6.7	5.3	5.1	6.4	7.9	9.4	10.1	10.2	8.2
mean surface water temperature, $T_{WAT}$ [°C]	13.9	14.3	14.4	13.9	13.0	12.0	11.5	11.3	11.8	12.9	13.4	13.9	13.0
partial pressure of water vapour 1m above the surface [mb]	7.5	7.9	7.7	6.5	4.9	4.0	4.0	4.6	5.4	5.5	5.9	6.8	5.9
saturation vapour pressure at the water temperature [mb]	15.9	16.3	16.4	15.9	15.0	14.1	13.6	13.4	13.8	14.1	15.3	15.9	15.1
relative humidity normalized to water temperature [ % ]	47.2	48.4	46.9	40.9	32.6	28.4	29.4	34.4	39.1	39.1	38.5	42.8	39.1

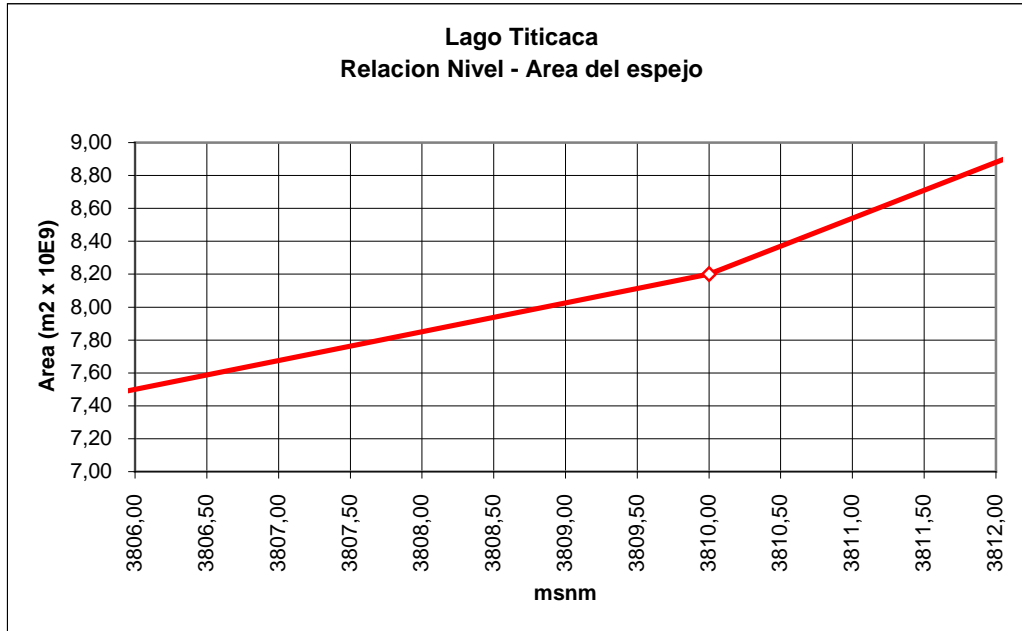
(\*) Isotope and Hydrochemical Study of Lake Titicaca – Data assesment report  
R. Gonfiantini, K.Rosanski

## 2.5 EVAPOTRANSPIRACION:

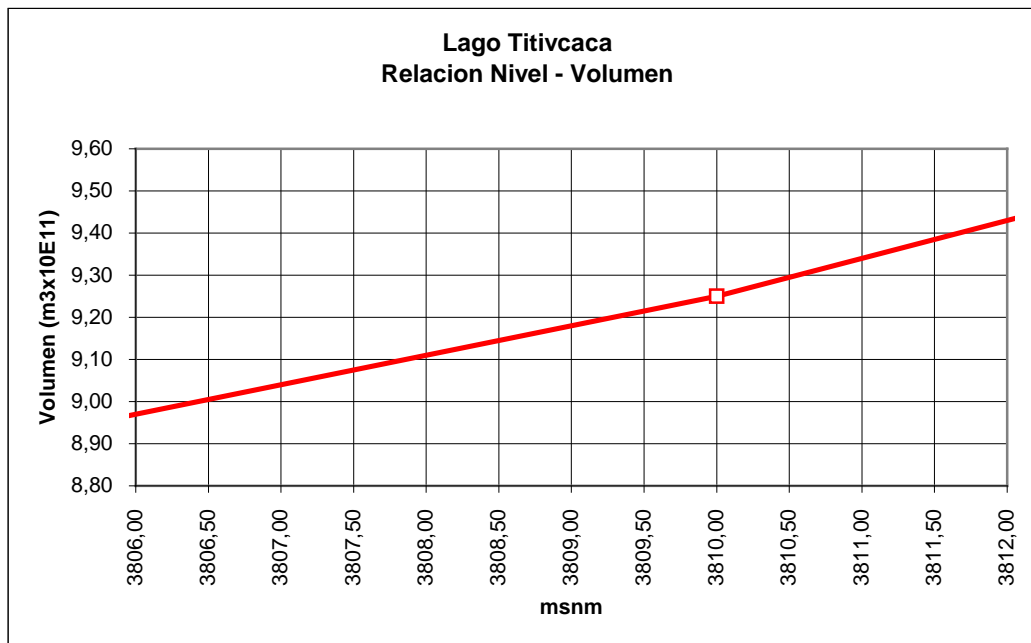
La superficie cubierta por vegetación donde se produce la evapotranspiración abarca casi toda la cuenca, donde se puede diferenciar dos zonas: La cuenca propiamente dicha cubierta en su mayor parte por el “ichu”, una gramínea típica de la zona y cultivos varios para consumo humano, y una franja de tierra temporal que se forma a orillas del lago en los meses de estiaje cuando el nivel del lago se encuentra bajo, franja utilizada como área de cultivo, el mismo que desaparece en los periodos de lluvia cuando se eleva el nivel del lago. En esta franja que tiene un área estimada de 10E8 m<sup>2</sup> se estima se produce la mayor tasa de evapotranspiración de la zona. La evapotranspiración potencial de la zona estimada por la formula de Pennam varia entre 1000 a 1500 mm/año.

## 2.6 RELACION NIVEL-AREA-VOLUMEN DEL LAGO

Se muestra en los gráficos G.2, G.3 y G4, en base a datos del Plan Director del sistema Titicaca, Desaguadero, Po Poo, Coipasa elaborado con la cooperación de la CCE



**Gráfico G.2**



**Gráfico G.3**

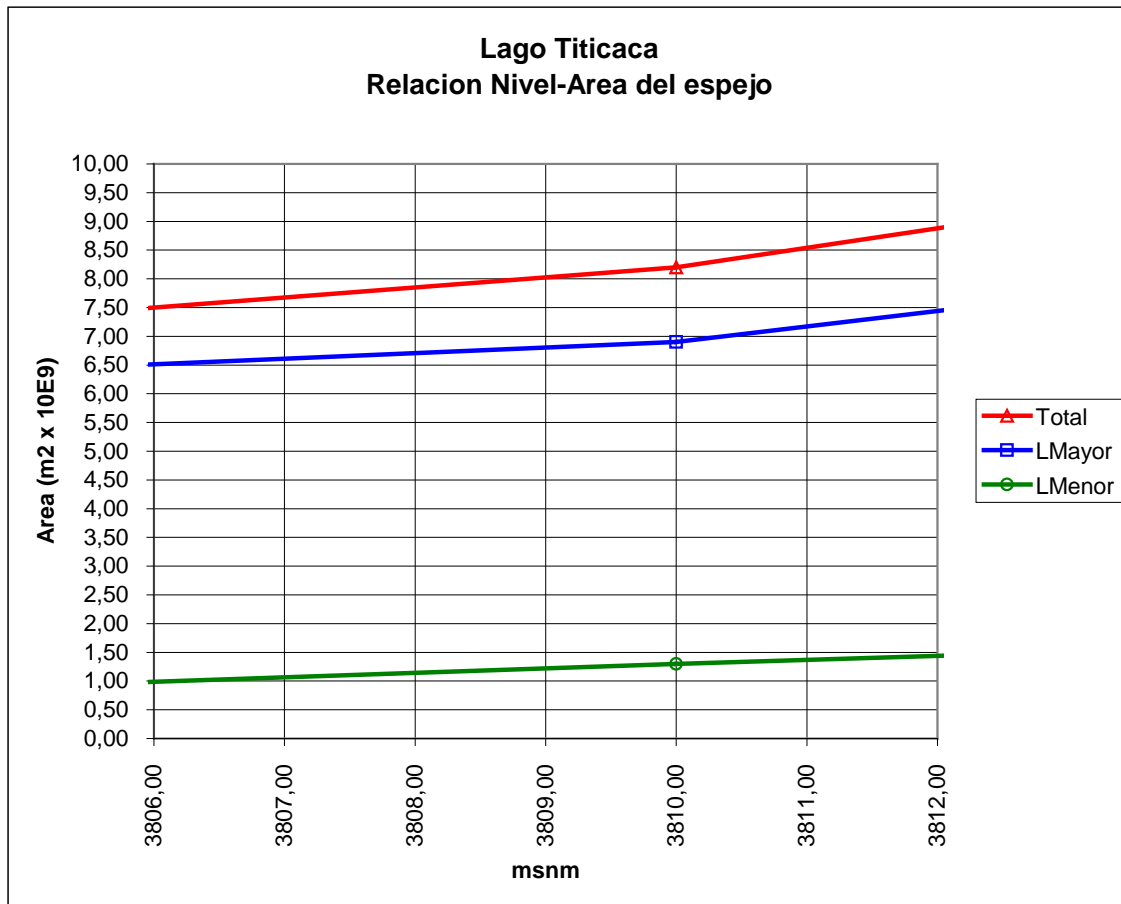


Gráfico G.4

## 2.8 GEOLOGIA REGIONAL:

El lago Titicaca se encuentra entre las cordilleras occidental y oriental de los Andes conformado una cuenca endorreica dentro del cual la escorrentía de las lluvias formo un gran lago que según estudios anteriores comprendía inicialmente los lagos Titicaca, Po Poo y el salar Coipasa. El basamento del lago esta constituido por rocas del Mesozoico y Paleozoico, las mismas que afloran en diversos zonas de la cuenca y se encuentran erosionadas, plegados y fracturadas por la intensa actividad volcánica de la zona.

El Paleozoico inferior constituido principalmente por lutitas arenosas intercaladas por cuarzitas y areniscas tienen un espesor comprendido entre 1,500 a 2,500 metros y aflora en un sector del norte de la cuenca cerca a las cordilleras Real y Apolobamba de Bolivia, así como en las regiones de Lampa y Ayaviri del Perú. El paleozoico superior constituido por areniscas, lutitas y cuarzitas de 1,500 metros de espesor se encuentra al norte y noroeste del lago a lo largo del flanco sur de la cordillera Oriental de los Andes

El Mesozoico inferior y medio no se encuentran en la zona. Los afloramientos del Jurásico marino conocidos como el grupo Lagunillas se encuentran en Puno sobre los cuales descansan lutitas y magras bituminosas y areniscas. Las formaciones Sipin y Muni que afloran al sur del lago se atribuyen al Jurásico superior. En el Sur este del lago cerca de la serranía de Tiawanacu afloran las formaciones Lohamann y Branisa.

Las formaciones del Terciario que se encuentran en la zona son las formaciones Tiawanacu, Coniri y Kollu-Kollu de Bolivia que se correlaciona con la formación Puno y están



constituidas por conglomerados, areniscas y lutitas rojas. Hacia el oeste, los niveles vulcano-sedimentarios están constituidos por andesitas, basaltos, tobas e ignimbritas que Newell (1946) describió como el grupo Tacaza.

Los depósitos glaciares, fluvio-glaciales y lacustres del cuaternario se encuentran en los valles de la cuenca, asimismo, se encuentran terrazas lacustres a una altura de 3,815 msnm que representan el nivel de un lago anterior al Titicaca. Los sedimentos del holoceno y recientes son los que se encuentran actualmente en el fondo del lago.

### 3.0 TRABAJOS EFECTUADOS

#### 3.1 RECOPIACION DE LA INFORMACION HIDROLOGICA

Los resultados se encuentran en la Tabla T.1 del Anexo y los puntos de muestreo fueron:

##### AGUAS ATMOSFERICA (PRECIPITACIONES)

Código	Ubicación	Nombre
A1	Norte	Nuñoa
A2	Norte	Palla Centro
A3	Norte	Yanarico
A4	Norte	Piata
A5	Norte	Llachahui
A6	Norte	Isla Soto
A7	Norte	Isla Taquile
A8	Norte	Caritamaya, Camicachi
A9	Norte	Suchez
A10	Norte	Vilque Chico
A11	Sur	Copacabana
A12	Sur	Guaqui
A13	Sur	Huacullani
A14	Sur	Pomata
A15	Sur	Huapaca
A16	Sur	Cutijira
A17	Sur	Llinqui
A18	Sur	Aguallamaya
A19	Sur	Chichillapi
A20	Sur	Tiahuanaco

#### 3.2 MUESTREO Y ANALISIS QUIMICO E ISOTOPICO DE AGUAS DE LA CUENCA DEL LAGO TITICACA

Durante el periodo 1997 a 2001 se obtuvieron mas de 200 muestras para análisis químicos y un total de 1040 para análisis isotópicos de aguas del lago, ríos, lluvias, pozos y manantiales en diversos puntos comprendidos en una red de muestreo que se muestra en el Mapa 02 y cuyos resultados se muestran en las Tablas T.5, T.6 y T.7 del Anexo. Los resultados de los análisis isotópicos de O18, H2 y H3 de estas masas de agua se muestran en los gráficos G.5, G.6, G.7, G.8.y G.9

También se obtuvieron 25 muestras de la humedad atmosférica tanto sobre el lago como en el continente, cuyos resultados se muestran en los gráficos G.10a y G.10b

Los puntos de muestreo fueron:

## AGUAS DEL LAGO

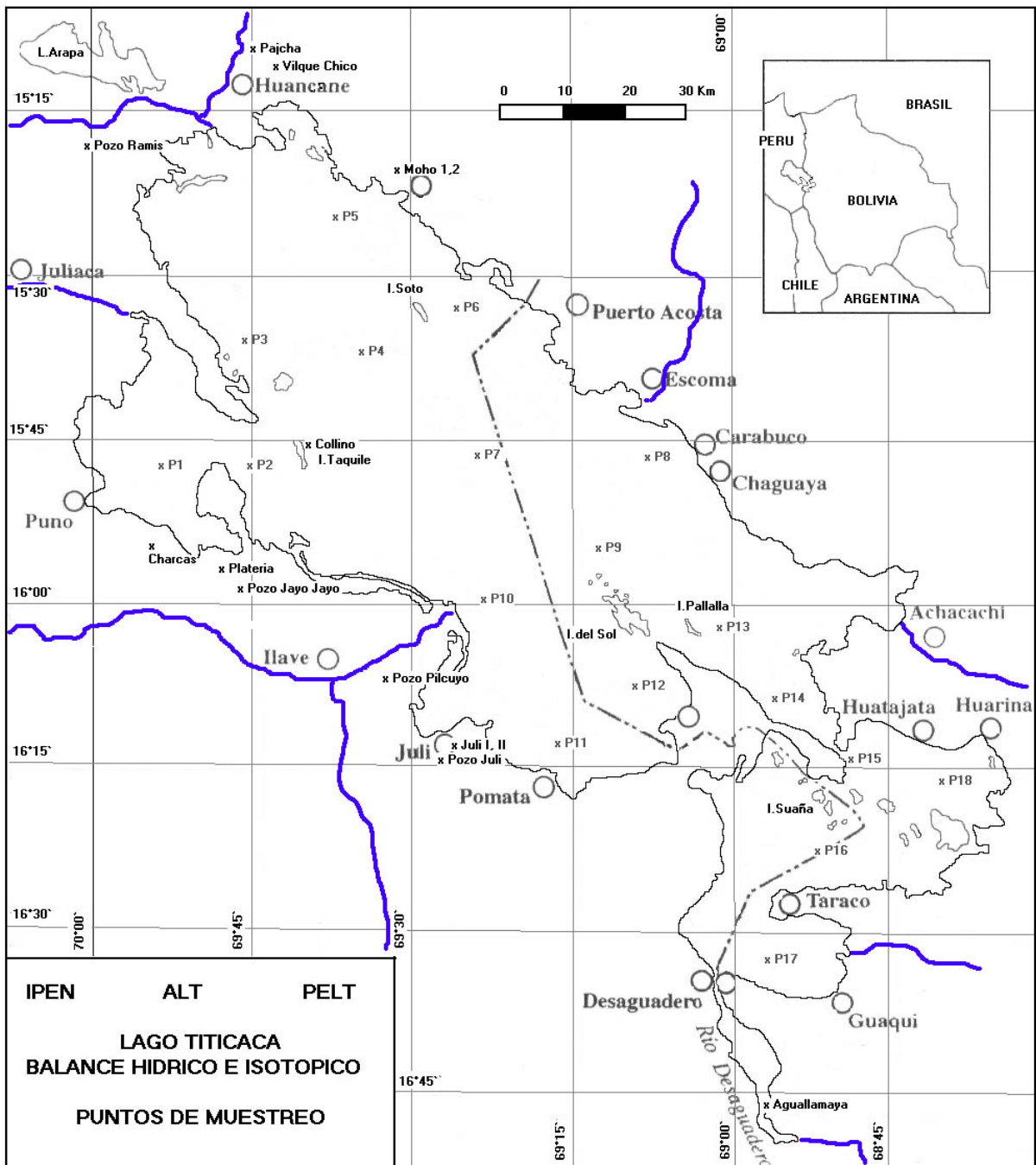
Código	Ubicación	Nombre
P1 al P18	Lago	No asignado

## AGUAS SUPERFICIALES

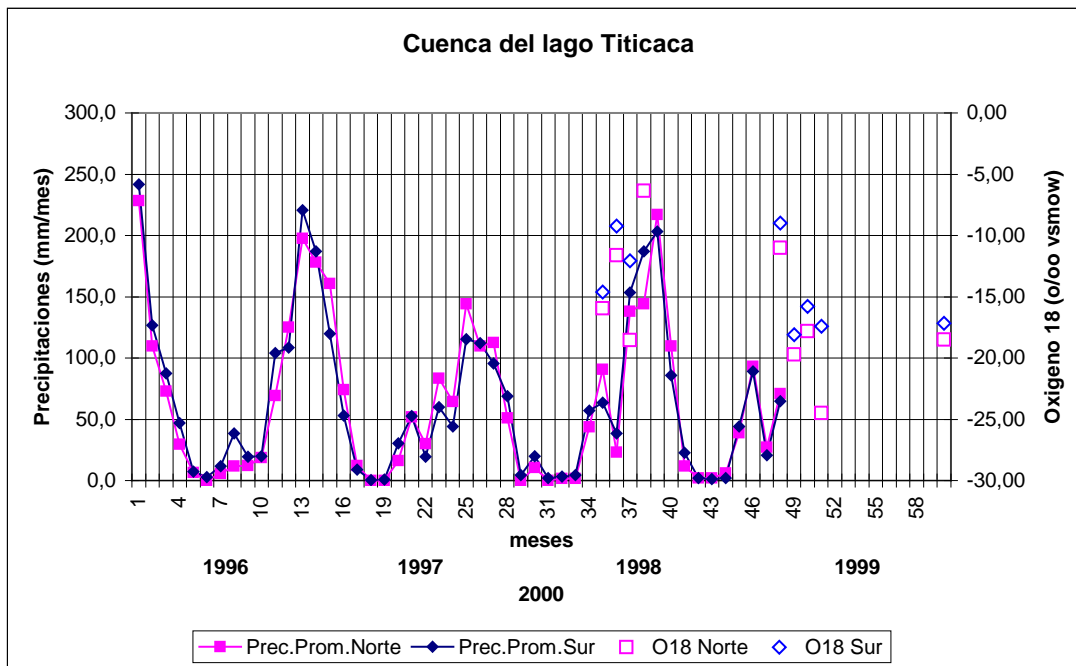
Código	Ubicación	Nombre
R1	Norte	Rio Ramis
R2	Norte	Rio Huancane
R3	Norte	Rio Coata
R4	Norte	Rio Suchez
R5	Sur	Rio llave
R6	Sur	Rio Desaguadero
R7	Sur	Rio Achacachi
R8	Sur	Rio Cutijira

## AGUAS SUBTERRANEAS

Código	Ubicación	Nombre
S1	Norte	Manantial Huancane
S2	Norte	Pozo Ramis
S3	Norte	Manantial Vilque Chico
S4	Norte	Manantial Charcas, Jayu Jayu
S5	Sur	Pozo Juli
S6	Sur	Pozo Pilcuyo



MAPA 02

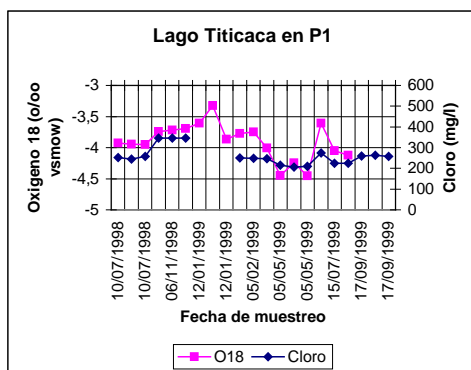


**Grafico G.5**

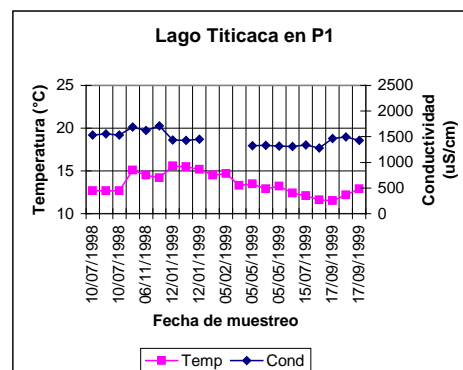
Precipitaciones acumuladas mensuales en estaciones alrededor del lago agrupadas según su ubicación y resultados de análisis isotópicos

**PARAMETROS ISOTOPICOS Y QUIMICOS DEL LAGO Y CUENCA DEL TITICACA**

Las muestras fueron obtenidas de 18 puntos del lago Titicaca y a diversas profundidades, también se obtuvieron muestras de aguas de pozos y manantiales, lluvias y de la humedad atmosférica durante el periodo 1996 al 2002.



**Gráfico G.6.1**



**Grafico G.6.2**

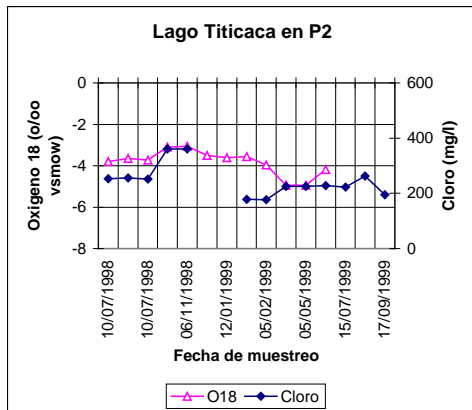


Gráfico G.6.3

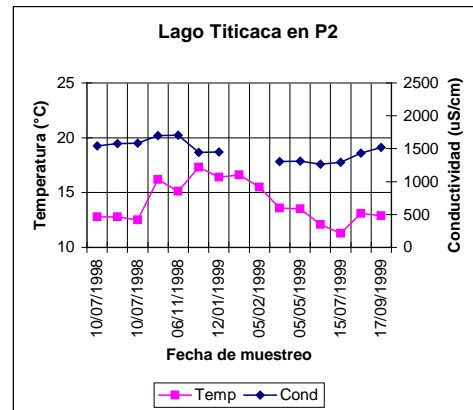


Gráfico G.6.4

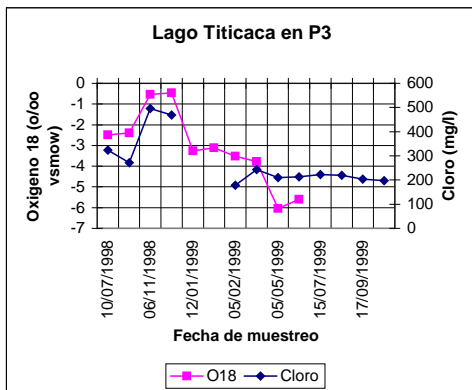


Gráfico G.6.5

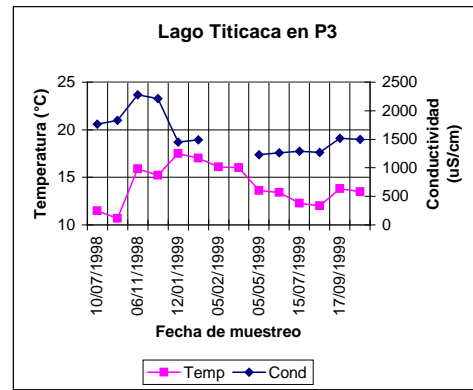


Gráfico G.6.6

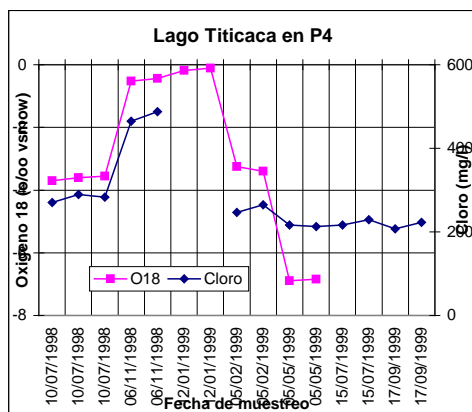


Gráfico G.6.7

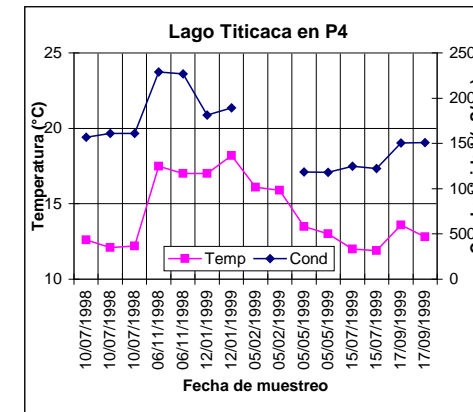


Gráfico G.6.8

## PARAMETROS ISOTOPICOS DE AGUAS DEL LAGO EN FUNCION DE LA PROFUNDIDAD Y FECHA DE MUESTREO

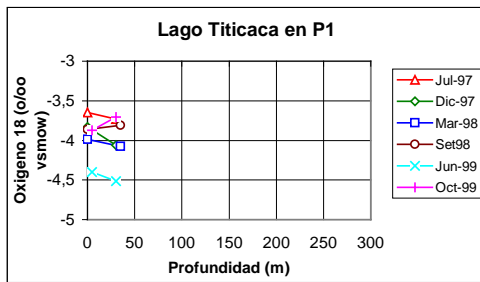


Gráfico G.6.10

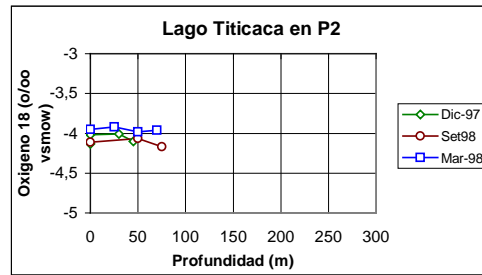


Gráfico G.6.11

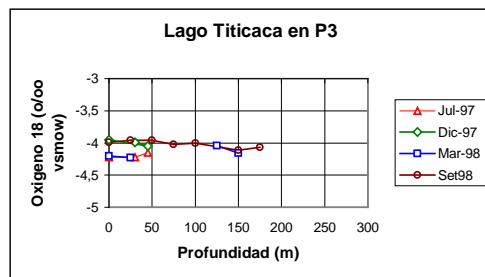


Gráfico G.6.12

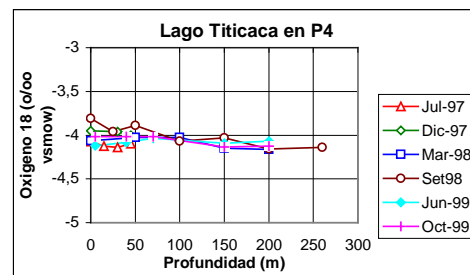


Gráfico G.6.13

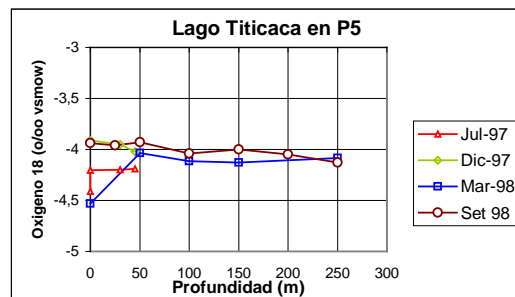


Gráfico G.6.14

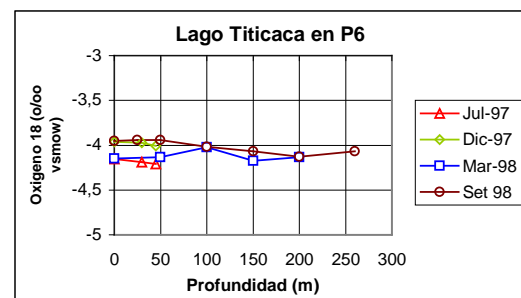


Gráfico G.6.15

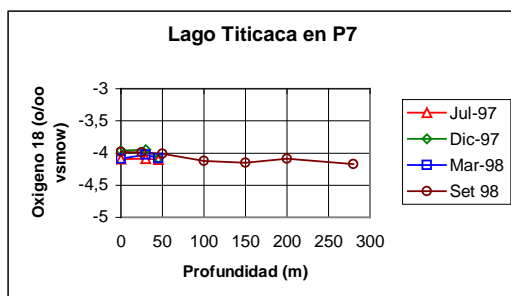


Gráfico G.6.16

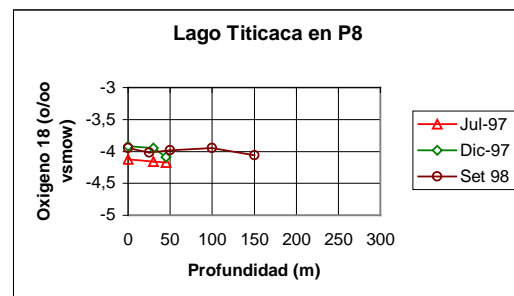


Gráfico G.6.17

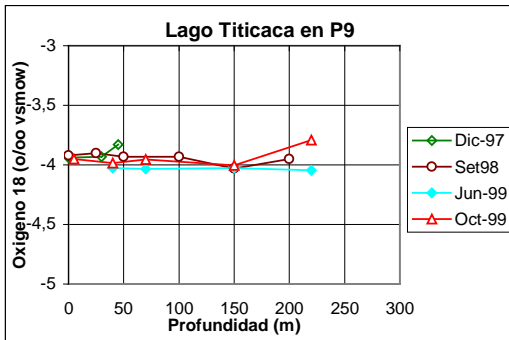


Gráfico G.6.18

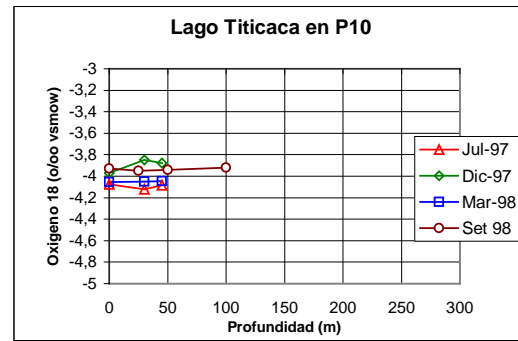


Gráfico G.6.19

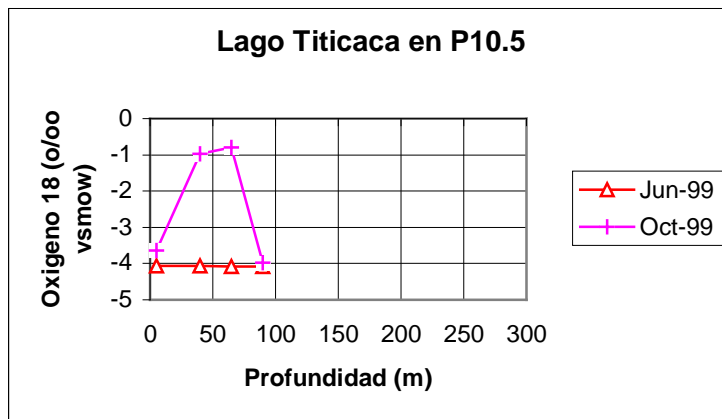


Gráfico G.6.20

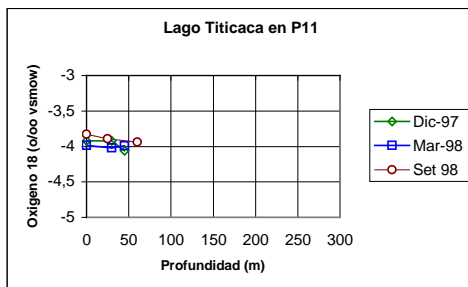


Gráfico G.6.21

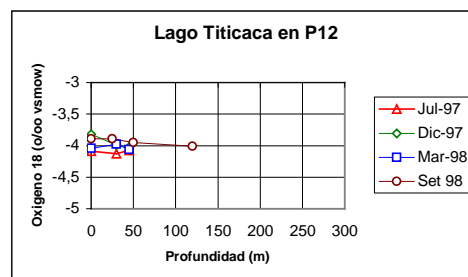
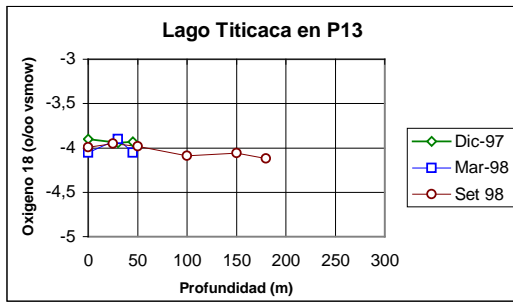
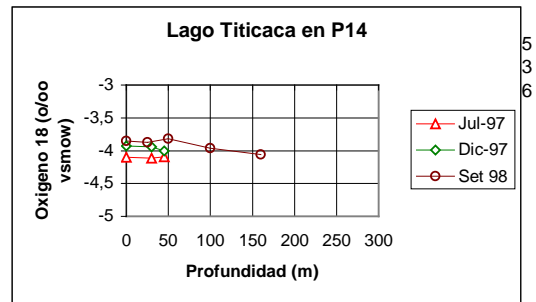


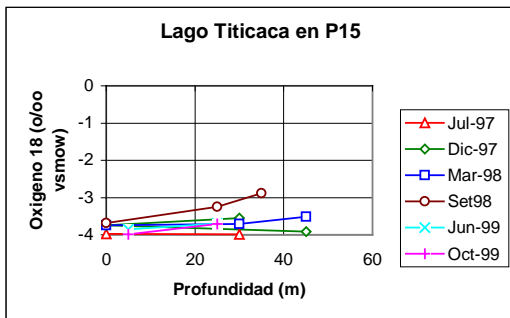
Gráfico G.6.21



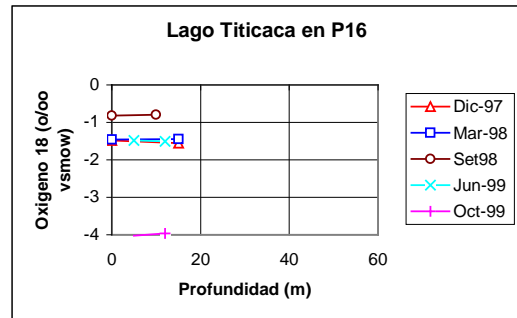
**Gráfico G.6.22**



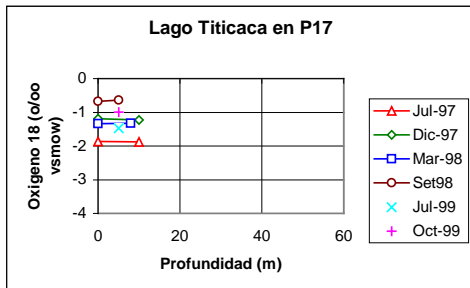
**Gráfico G.6.23**



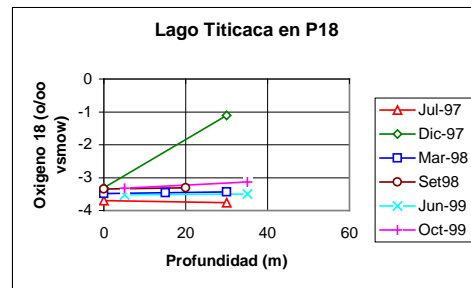
**Gráfico G.6.24**



**Gráfico G.6.25**



**Gráfico G.6.26**



**Gráfico G.6.27**



## PARAMETROS ISOTOPICOS Y QUIMICOS DE AGUAS DE RIOS DE LA CUENCA

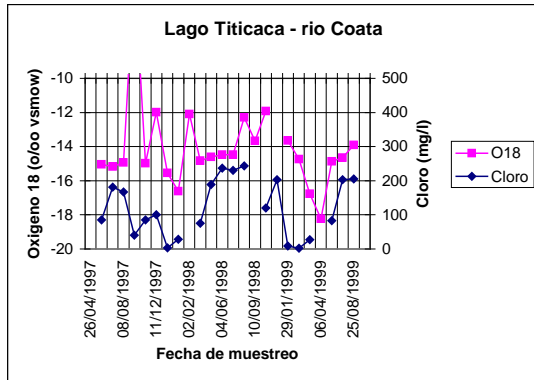


Gráfico G.7.1

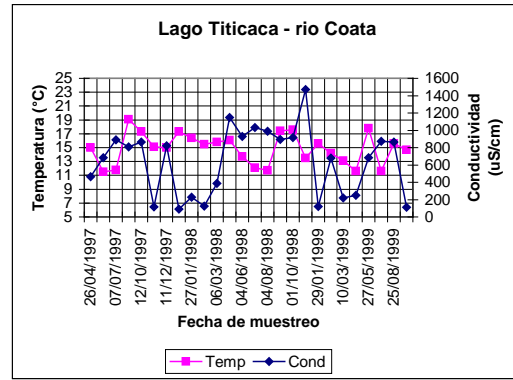


Gráfico G.7.2

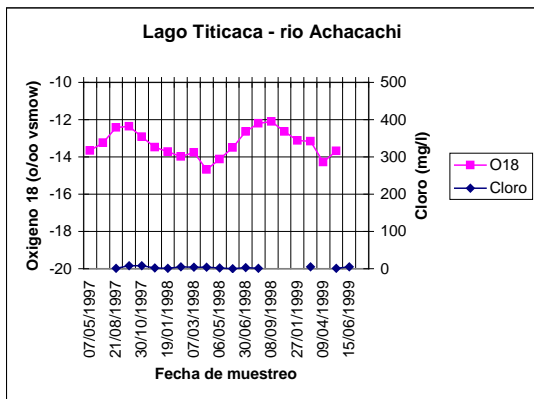


Gráfico G.7.3

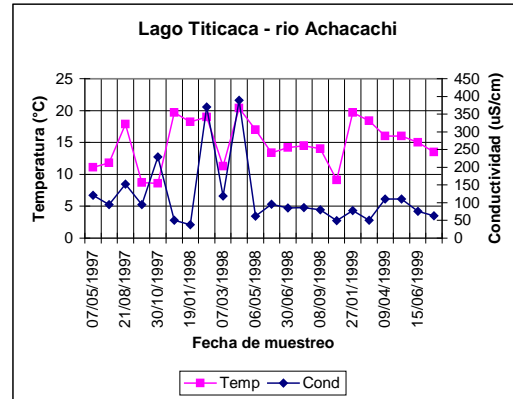


Gráfico G.7.4

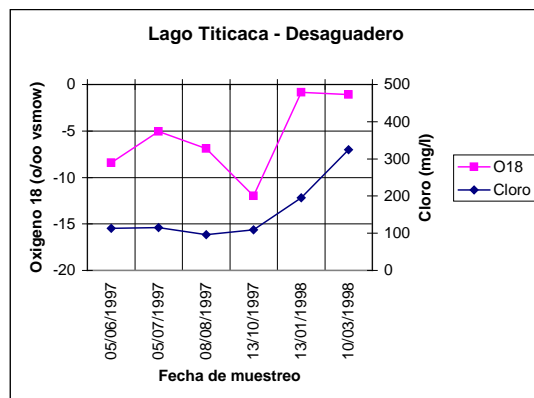


Gráfico G.7.5

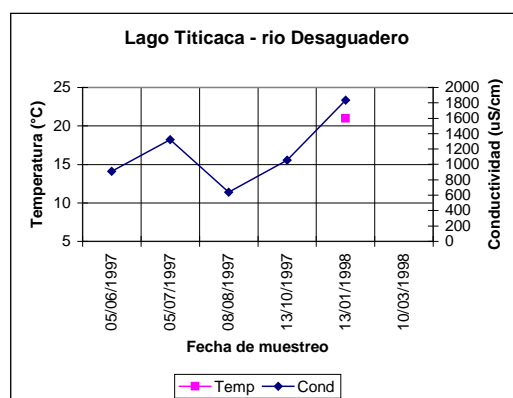
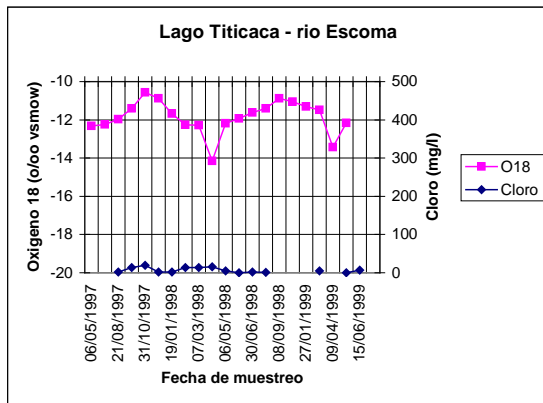
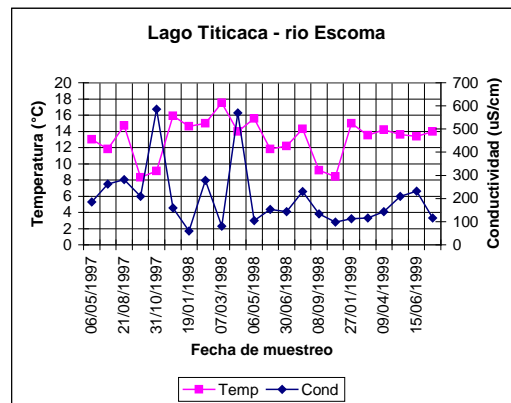


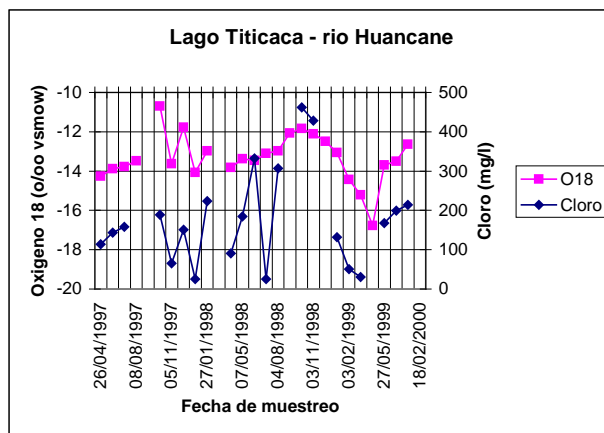
Gráfico G.7.6



**Gráfico G.7.7**

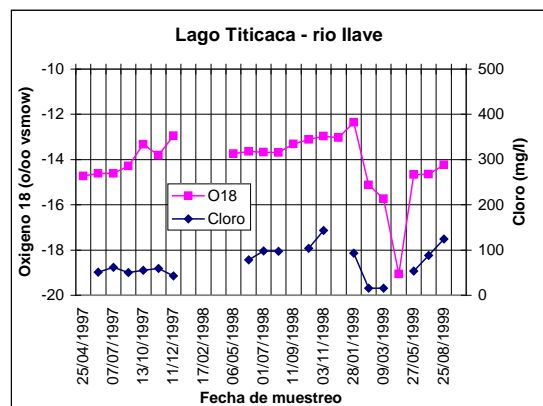


**Gráfico G.7.8**

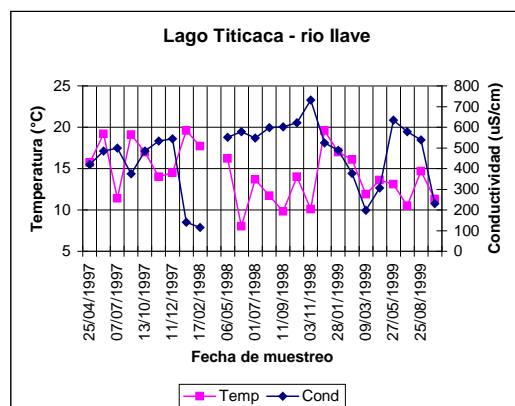


**Gráfico G.7.9**

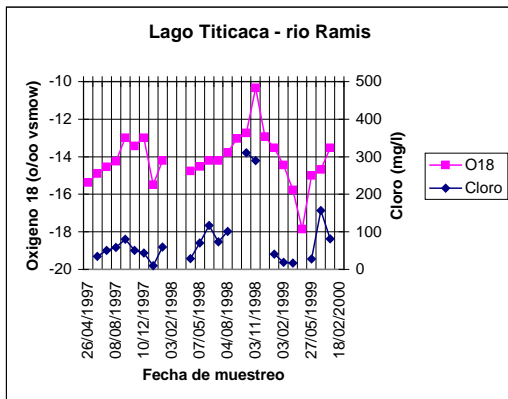
**Gráfico G.7.10**



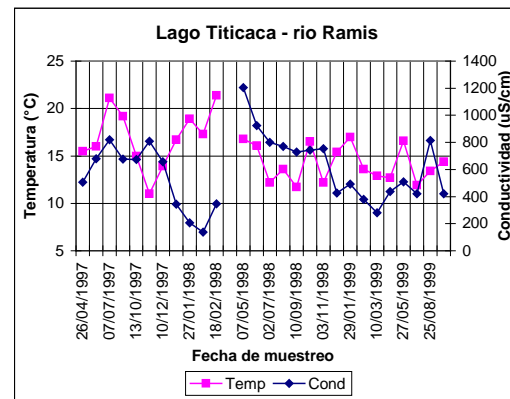
**Gráfico G.7.11**



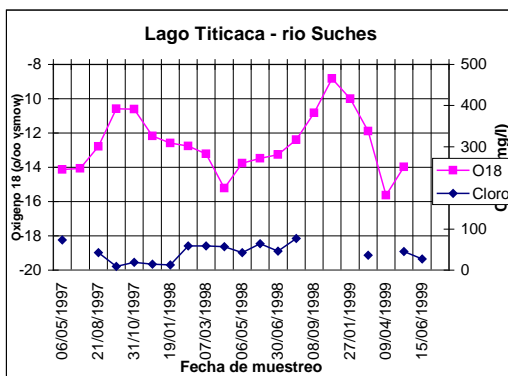
**Gráfico G.7.12**



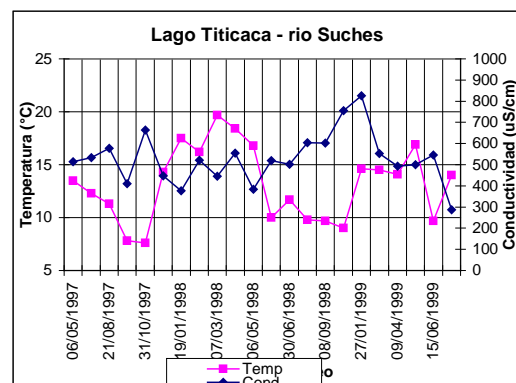
**Gráfico G.7.13**



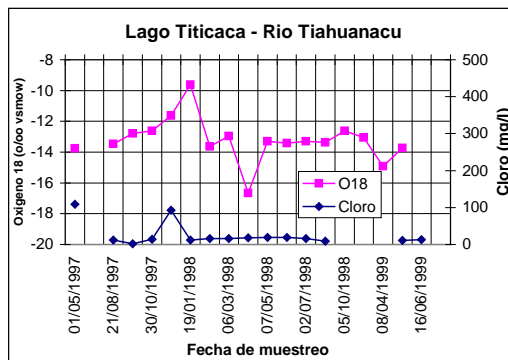
**Gráfico G.7.14**



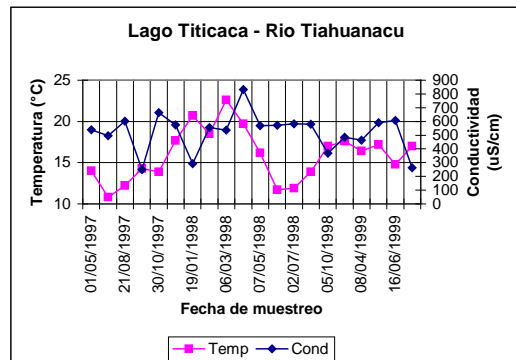
**Gráfico G.7.15**



**Gráfico G.7.16**



**Gráfico G.7.17**



**Gráfico G.7.18**

## PARAMETROS ISOTOPICOS Y QUIMICOS DE AGUAS DE MANANTIALES Y POZOS DE LA CUENCA

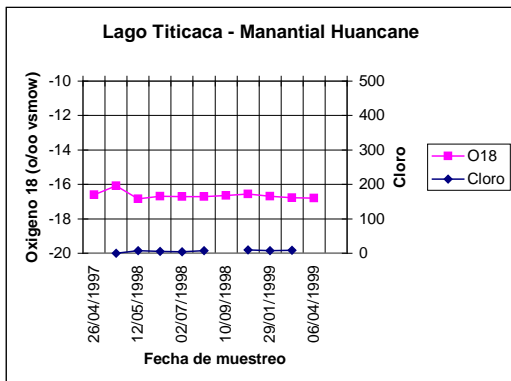


Gráfico G.8.1

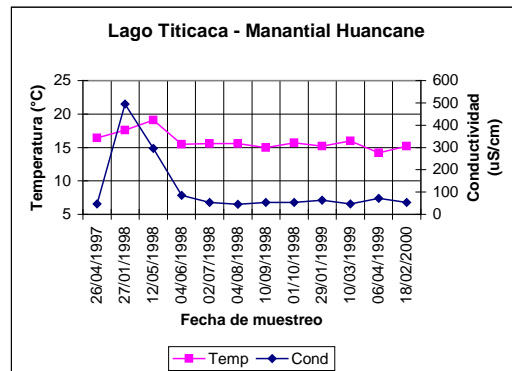


Gráfico G.8.2

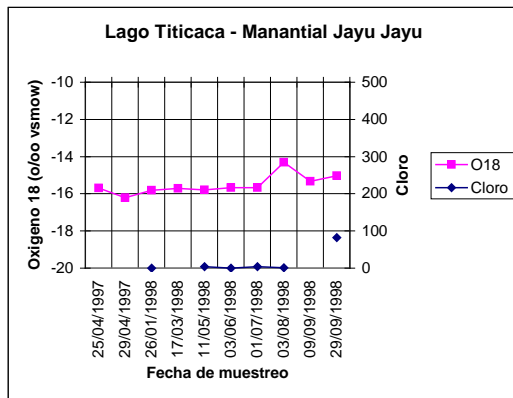


Gráfico G.8.3

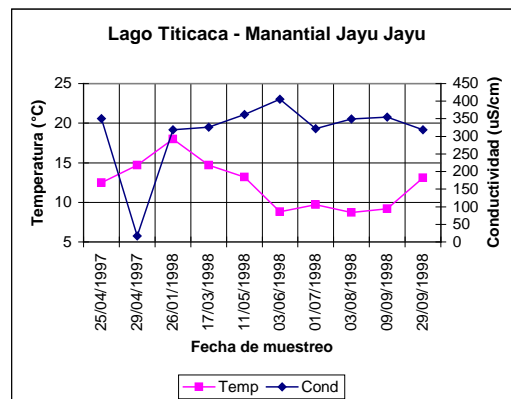


Gráfico G.8.4

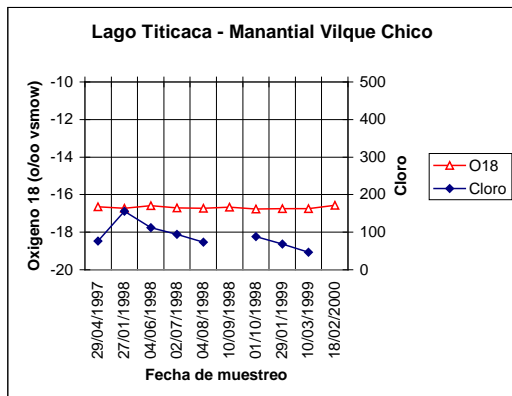


Gráfico G.8.5

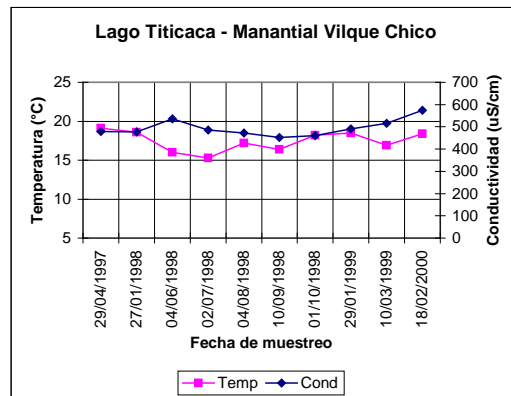
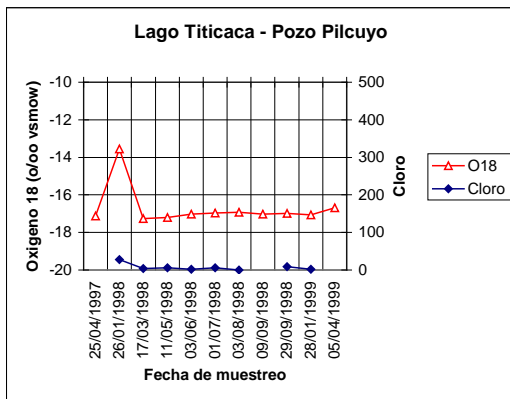
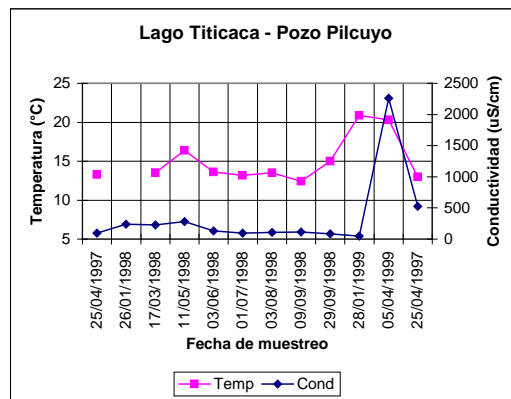


Gráfico G.8.6



**Gráfico G.8.7**



**Gráfico G.8.8**

**Gráfico G.8.9**

**Gráfico G.8.10**

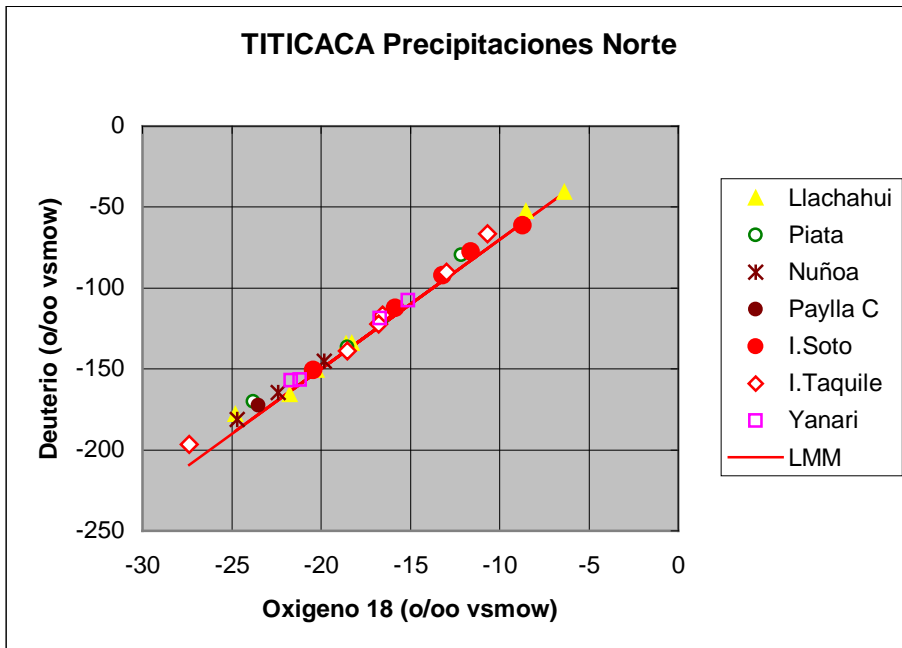
**Tabla T.12**

**RESUMEN DE PARAMETROS HIDROLOGICOS**

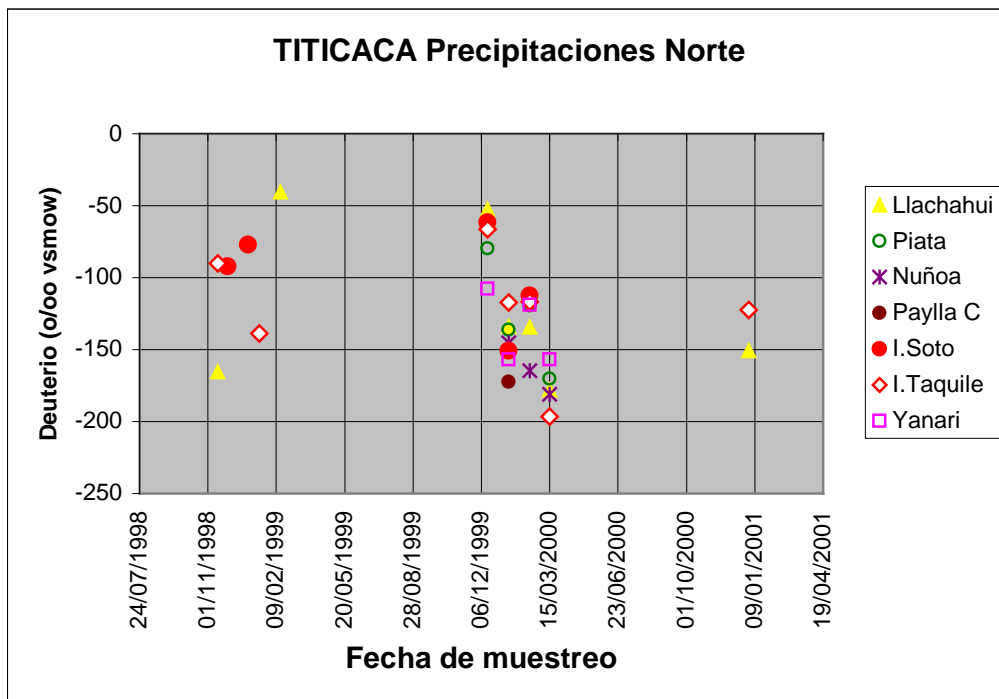
Zonas	Precipitaciones promedio		δO18 promedio			
	En cuenca	En islas	En precipit.	En manant.	En pozos	En prec. islas
	1990-1999	1990-1999	1998-2000	1997-1999	1997-1999	1999-2000
	mm	mm	o/oo	o/oo	o/oo	o/oo
<b>Norte</b>	845	912	-18,5	-16,7	-16,1	-15,8
<b>Sur</b>	658	579	-16,8	-16,2	-16,1	-13,6

Zonas	Precipitaciones promedio		
	1997	1998	1999
	mm	mm	mm
Cuenca Norte	897,9	516.3	791.9
Cuenca Sur	745.5	559.2	788.4
Islas Norte	922	620	1073
Islas Sur	841	637	737

**PARAMETROS ISOTOPICOS DE PRECIPITACIONES EN ESTACIONES PLUVIOMETRICAS DE LA CUENCA**



**Gráfico G.9.1**



**Gráfico G.9.2**

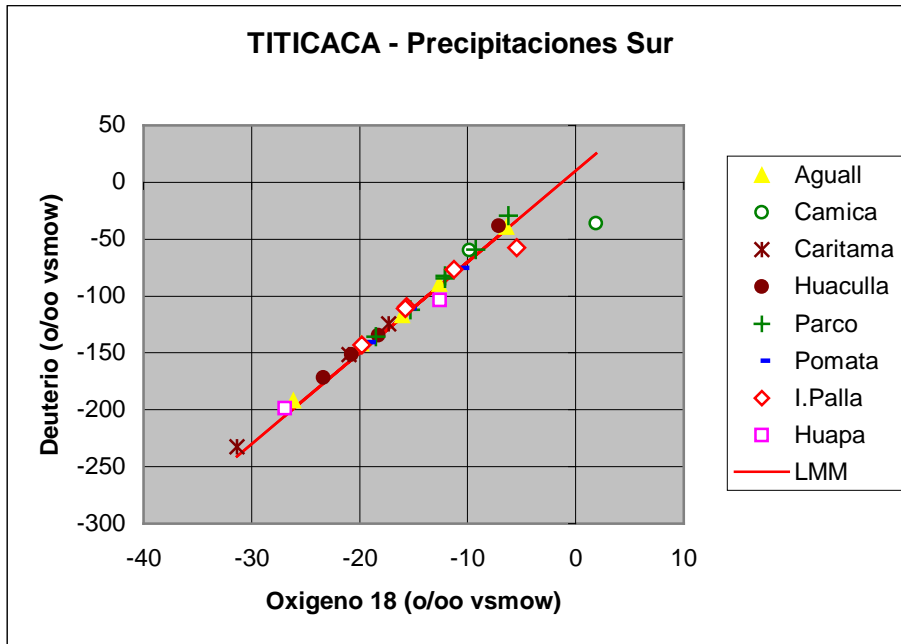


Gráfico G.9.3

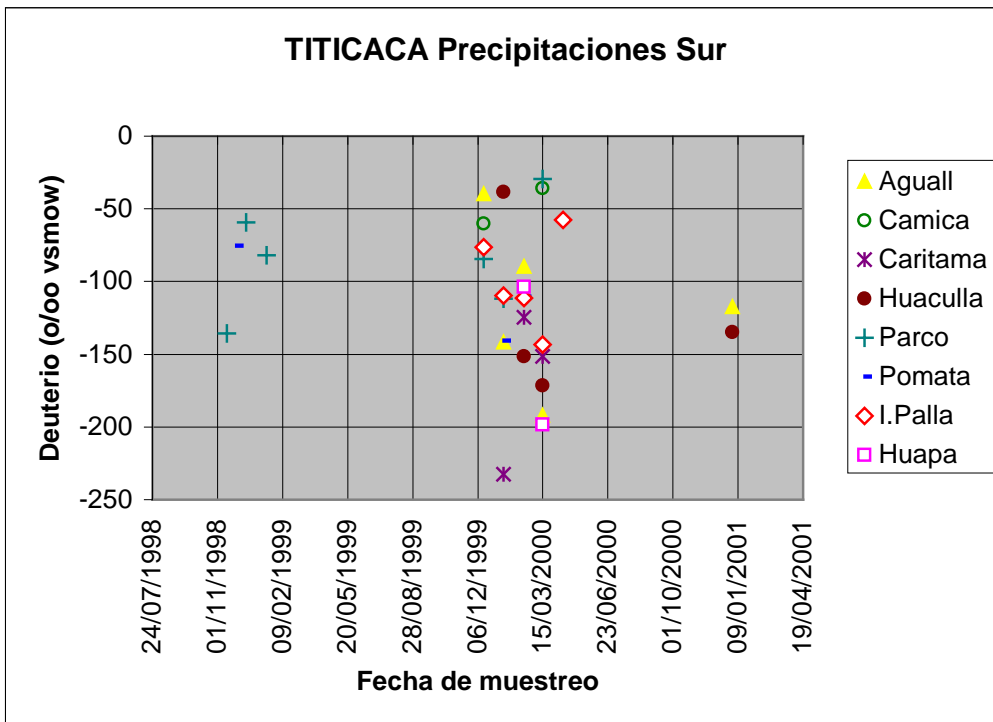


Gráfico G.9.4



## GRADIENTE DE ALTITUD

No fue posible determinar la gradiente de altitud de las precipitaciones de la cuenca del Titicaca porque no se cuenta con registros de estaciones con grandes diferencias de nivel, existe una gran dispersión de valores, y la mayoría se encuentra ubicada al nivel del espejo de agua del lago (3,810 msnm), además es posible que esta gradiente se encuentre distorsionada por una posible recirculación de masas de agua producto de la contribución de las masas de agua evaporadas del lago en las precipitaciones de la cuenca, habida cuenta de la alta tasa de evaporación registrada en la zona.

Los valores medios de concentración “ $\delta$ ” de Oxígeno 18 de agua de lluvias registradas durante los años 1997-1999 fueron: -18.5 y -16.8 o/oo vsmow en las zonas Norte y Sur de la cuenca respectivamente, y de -15.9 y -14.5 o/oo vsmow en las islas Norte y Sur respectivamente, valores que muestran que las lluvias en las islas (que se encuentran en el centro del lago) tienen una mayor concentración en Oxígeno 18 respecto a aguas de lluvias en la periferia y el continente, lo cual puede tener su origen en las aguas evaporadas con altas concentraciones de Oxígeno 18 (por el fraccionamiento isotópico) provenientes del lago Titicaca que por su ubicación y altitud esta sometido a tasas de evaporación bastantes elevadas, al que se puede añadir el incremento de la concentración isotópica de aguas de lluvia en las islas por la mayor temperatura del aire sobre la superficie del lago y consecuentemente sobre las islas, debido al efecto termorregulador del agua del lago, lo cual sugiere la existencia de un proceso de recirculación de agua del lago.

El Gráfico G.9.5 - Gradiente isotópica de altitud de aguas del eje costa-sierra central del Perú para precipitaciones del año 1995, muestra un valor medio de  $\delta O_{18}$  de -15.9 o/oo vsmow para una altitud de 3,810 msnm (igual a la altitud media del lago Titicaca), lo cual revela que las aguas de lluvia de la cuenca del Titicaca están ligeramente mas concentradas en  $O_{18}$  que las del eje costa-sierra central, caracterizado por la ausencia de lagos de dimensiones comparables a la del Titicaca, lo cual sugiere nuevamente un proceso de recirculación de aguas evaporadas en la cuenca de este lago.

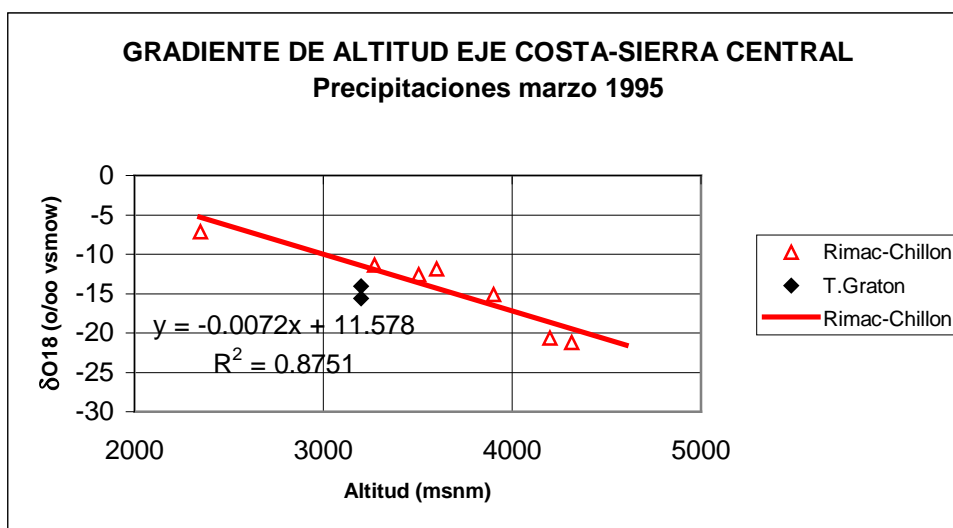


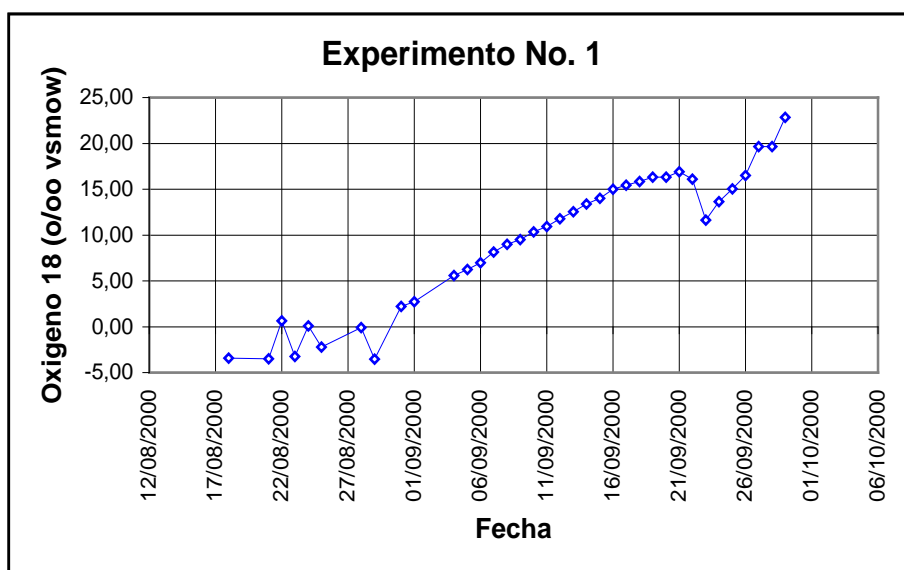
Gráfico G.9.5

### 3.3 EXPERIMENTOS DE EVAPORACION EN TANQUES TIPO COLORADO A

En Agosto y Setiembre del año 2000, se llevaron a cabo dos experimentos de determinación de la evolución en el tiempo de las concentraciones isotópicas de Oxígeno 18 y Deuterio de aguas sometidas a evaporación en tanques evaporímetros tipo Colorado A (diámetro de 1.20m), los mismos que estuvieron instalados a orillas del lago en la localidad de Chucuito, a 6 Km. Al sur de la ciudad de Puno.

#### EXPERIMENTO No. 1

Consistió en determinar las concentraciones de O18 y H2 en las aguas remanentes de un tanque evaporímetro tipo Colorado A , la masa inicial del tanque provino de aguas del lago Titicaca. Los resultados se muestran en la Tabla T.5 del anexo y el Gráfico G.10a



**Gráfico G.10a**

Efectuando un balance de masas e isotópico de este experimento se puede calcular el  $\delta O_{18}$  de la evaporación:

Balance de masas en el evaporímetro:  $V_o = V_f - E$   
 Balance isotópico en el evaporímetro:  $\delta O_{18}(V_o) = \delta O_{18}(V_f) - \delta O_{18}V(E)$

Donde:  $V_o$  = volumen inicial de agua en el tanque evaporímetro  
 $V_f$  = volumen de agua final en el tanque evaporímetro

Resolviendo las ecuaciones del balance:

$$\delta O_{18}(E) = (V_o \cdot \delta O_{18}(V_o) - V_f \cdot \delta O_{18}(V_f)) / (V_o - V_f)$$

Según los datos del gráfico anterior los primeros y últimos días los resultados obtenidos resultan un tanto extraños que podrían estar originados por la mezcla con aguas del tanque con aguas de lluvias., descartando estos valores y utilizando los valores correspondientes al periodo 01/09/2000 al 21/09/2000, se obtiene.

$$V_o = 0.1707 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned}V_f &= 0.0452 \text{ m}^3 \\E &= 0.1255 \text{ m}^3 \\ \delta^{18}\text{O}(V_o) &= -2.74 \text{ o/oo} \\ \delta^{18}\text{O}(V_f) &= 16.91 \text{ o/oo}\end{aligned}$$

Reemplazando estos valores, la concentración del O18 de la evaporación resulta:

$$\delta^{18}\text{O}(E) = -9.81 \text{ o/oo vs mow}$$

Cabe señalar que este valor si bien corresponde a la evaporación en un tanque ubicado cerca al lago no es comparable a la del lago porque no tiene la misma dinámica del Titicaca, ya que en este ultimo caso el agua tiene aportes permanentes de ríos y de las lluvias que tienen concentraciones isotópicas bastantes menores.

### EXPERIMENTO No. 2

Fue similar al anterior, con la diferencia que para lograr condiciones de mayor similitud a las del lago, el tanque evaporímetro fue colocado concéntricamente dentro de otro tanque de mayor diámetro, llenando el espacio entre ambos con agua del lago, manteniendo el nivel de agua estable durante el tiempo que tomó el experimento. Los resultados se muestran en la Tabla T.5b y en el Gráfico G.10b

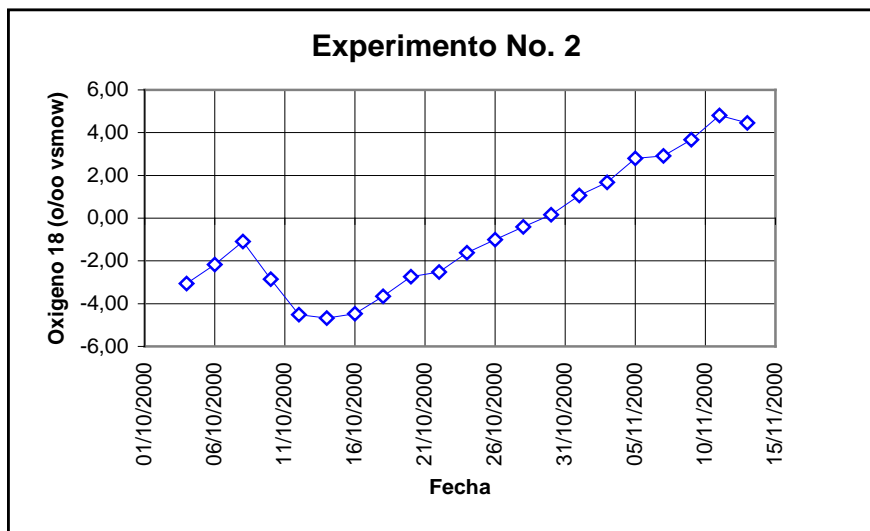


Gráfico G.10b

### 3.4 MUESTREO Y ANALISIS ISOTOPICO DEL VAPOR ATMOSFERICO SOBRE EL LAGO

En una campaña de una semana efectuada en Agosto del año 2001 se obtuvieron 24 muestras de vapor de agua sobre el lago Titicaca, cuyos resultados se muestran en la Tabla T.10 del Anexo y el Gráfico G.11.. El valor promedio del dO18 fue de -22.4 o/oo

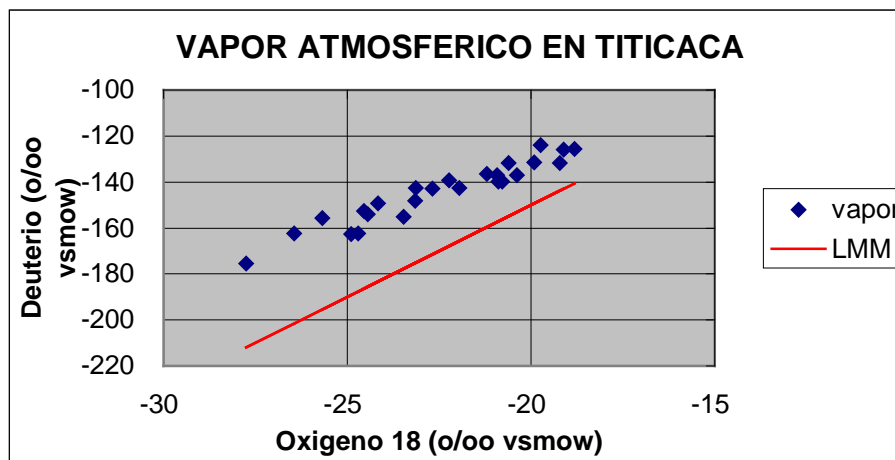


Gráfico G.11

### 3.5 EVAPORACION EN TANQUE EVAPORIMETRO

Los valores disponibles corresponden a tasas de evaporación de la estación de la laguna Arapa, ubicada en el extremo Norte del lago Titicaca, durante los meses de lluvias cuando el nivel del lago se incrementa, ambas masas de agua se unen. Los valores se encuentran en la Tabla T.11 A del Anexo.

### 4.0 BALANCE HIDROLOGICO DEL LAGO

#### 4.1 BALANCE HIDRICO

Los términos del balance de aguas del lago son:

**Aporte de ríos afluentes + Precipitación directa sobre el lago = Evaporación del lago + Descarga por río Desaguadero +- Masa por cambio de nivel del lago**

En esta ecuación, la evaporación del lago constituye la incógnita, el procesamiento de la información existente ha determinado las tasas de evaporación mensual durante los 3 años de los que se dispone de datos. Los cálculos se encuentran en las Tablas T.11<sup>a</sup> y T.11b del Anexo, y el resumen se muestran en la tabla T.13 del Anexo.

Las tasas de evaporación del lago calculadas para los años 1997, 1998 y 1999 fueron de 63%, 160% y 89% respectivamente del total de los ingresos de agua al lago, según se muestra en la Tabla T.13. La alta tasa de evaporación de 160% del año 1998 corresponde a un periodo de sequía en el altiplano originado por la presencia del evento climático del Niño (ENSO) en el que la evaporación fue mayor que los aportes de ríos y lluvias.

#### 4.2 BALANCE ISOTOPICO

Los términos del balance son:

**$\delta O_{18}$  \* masa de ingresos =  $\delta O_{18}$  \* masa de salidas**

Los datos para el balance provienen de la Tabla T.11A y T.11B y del resumen de Parámetros Hidrológicos de la Tabla T.12 del Anexo. Para los cálculos se ha asumido que las precipitaciones de las islas son las representativas del lago. Por otra parte, debido a que no se tiene suficientes datos de  $\delta O_{18}$  en precipitaciones, los valores utilizados en los cálculos son los promedios aritméticos de los años 1998 y 1999, y los del año 1997 se asumieron iguales a los del 1999. Los resultados se muestran en la Tabla T.13

Los valores de  $\delta O_{18}$  del incremento o disminución de la masa del lago por cambios de nivel durante el año, se considera son un valor intermedio entre los correspondientes de aguas del lago y de lluvias y ríos, para los cálculos se considero como una de masas de agua de los ingresos: precipitaciones, ríos con aguas de una fracción del lago, fracción que se estima participe en la mezcla, la misma que se asume como (1 / Tiempo de transito del lago). Los cálculos para las condiciones de 1997 se muestran en la siguiente Tabla.

Masa de agua	Volumen M3 x 10E09	Vol*δO18	δO18 o/oo
Lago	14.44	-58.212	
Preci. Norte	3.716	-42.3621	
Prec. Sur	3.389	-35.2456	
Rios	7.340	-103.127	
R. Desag	-0.631	1.693	
SUMA	28.259	-237.255	-8.40

Los resultados arrojan un valor de  $\delta O18 = -8.4$  o/oo vsmow para la masa de agua evaporada del lago Titicaca del año 1997, y cálculos similares arrojan valores de  $-8.8$  para los años 1998, 1999

La humedad relativa y temperatura del aire medida continuamente durante un periodo de 12 horas aproximadamente del 26 al 27 de Agosto en las estaciones de la isla Taquile ubicado en el norte del lago e isla del Sol ubicado en el sur, se muestra en los gráficos G.12A y G.12B, y sus valores promedios son:

	HR (%)	Tem.(°C)
Taquile	58.5	6.6
Sol	43.2	5.8

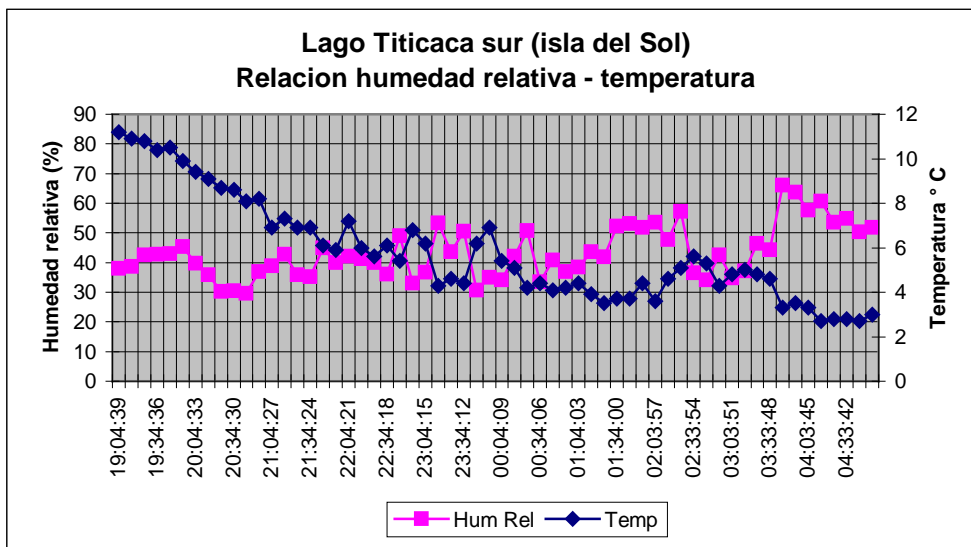


Gráfico G.12a

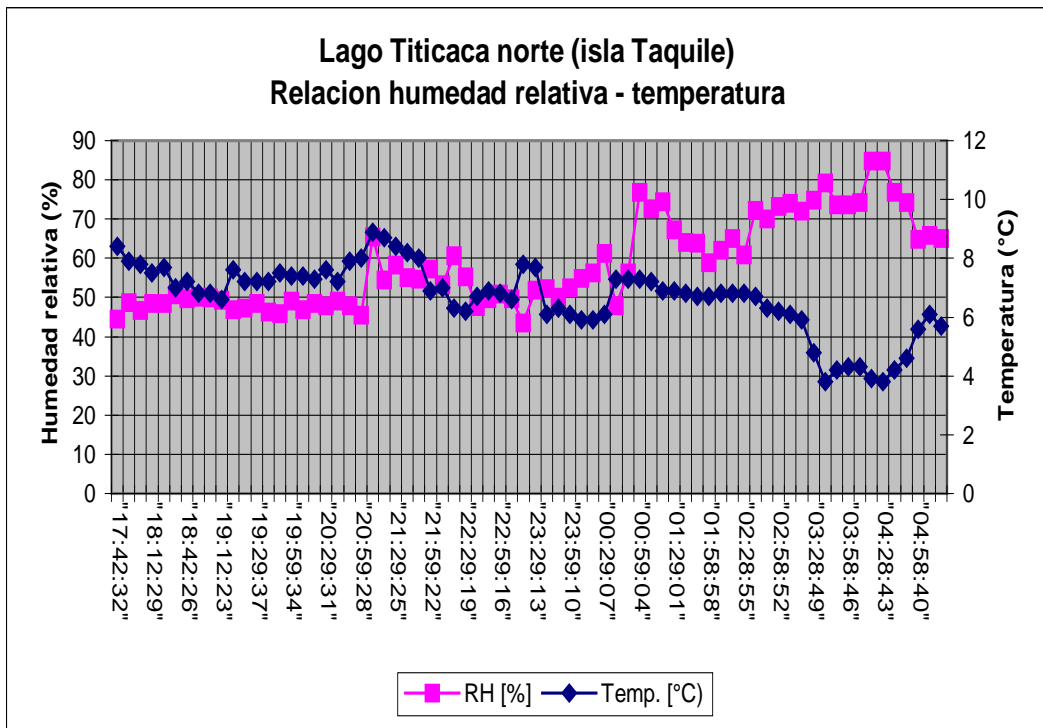


Gráfico G.12b

### 4.3 RELACION ENTRE EL $\delta O18$ DE LA MASA EVAPORADA DEL LAGO Y EL $\delta O18$ DEL VAPOR ATMOSFERICO SEGÚN MODELO DE CRAIG GORDON

La ecuación de Graig Gordon que relaciona estos parámetros es:

$$\delta O18(eva) = (\delta O18(lago)/\alpha(e) + h*\delta O18(v.atm) - \epsilon)/(1-h + \Delta\epsilon)1000$$

Donde:

eva = masa de agua evaporada

lago = masa de agua del lago

h = humedad relativa del aire

v.atm = masa del vapor atmosférico

$\alpha$  = Factor de fraccionamiento isotópico

$\alpha(e)$  = Factor de fraccionamiento en equilibrio a la temperatura del proceso

$\epsilon = (\alpha - 1) * 1000$

$\Delta\epsilon$  = enriquecimiento cinético (Vogt 1971) =  $14.4(1-h)$

Los datos disponibles permiten determinar estas relaciones para los años 1997, 1998 y 1999, cuyos resultados se muestran en las Tablas T.14A, T.14B y T.14C del Anexo

### 4.4 RELACION EVAPORACION DEL LAGO VS INFLOW AL LAGO

La expresión que relaciona estos parámetros es:

$$X = (\delta(l,s) - \delta(i)) * (1 - H + \Delta\epsilon) / (\delta(l,s) + 1) * \Delta\epsilon + \epsilon / (\alpha(e) + H * (\delta(v.atm) - \delta(l,s)))$$

Donde:

$\delta(l,s)$  =  $\delta O18$  (en superficie de lago)

$\delta(i)$  =  $\delta O18$  (ríos y lluvias ponderados)

H = Humedad relativa del aire

$\delta(v.atm)$  =  $\delta O18$ (vapor atmosférico)

Los demás parámetros son los mismos que para el modelo de Craig Gordon

Los resultados obtenidos para los años 1997, 1998 y 1999 se muestran en los siguientes Gráficos.

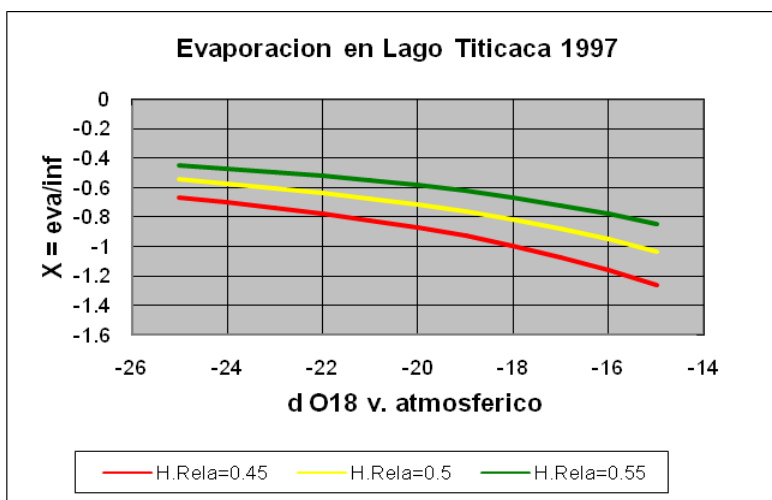


Gráfico G.13

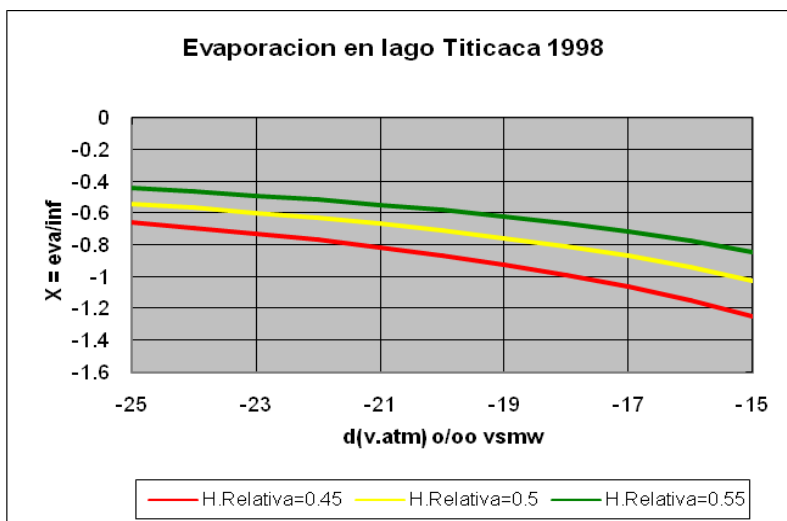


Gráfico G.14



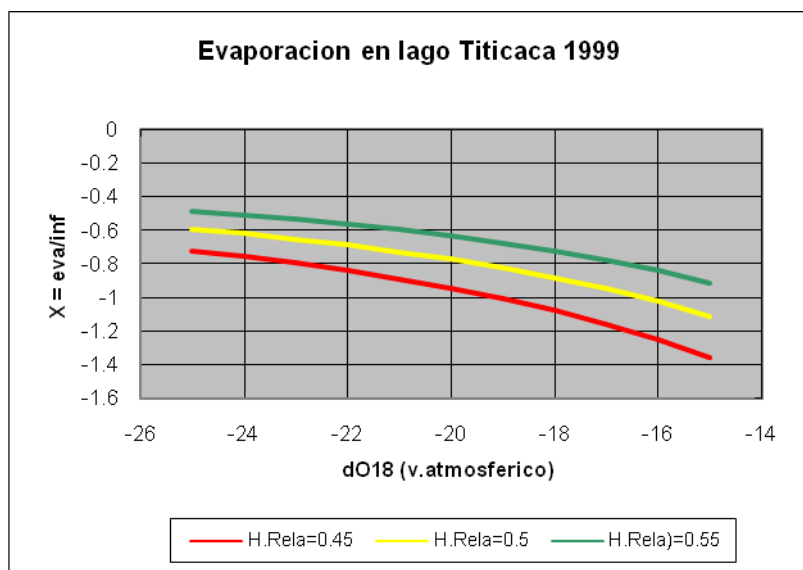


Gráfico G.15

### RESUMEN DE PARAMETROS

	1997	1998	1999
Temp. anual prom (°C):	14	15	14
Humedad relativa:	0.5	0.45	0.5
$\delta O18$ (lago):	-4.03	-3.98	-3.83
$\delta O18$ (eva): (a1)	-15.4	-12	-14.2
inflow (10E9m3)	14.44	8.23	11.73
eva(10E9m3)	9.213	13.224	10.811
X = eva/inf	0.63	1.55	0.86
$\delta O18$ (Inflow. Pond)	-14.84	-13.54	-12.42
$1000\alpha =$	10.1881831	10.1423446	10.0967796
$\alpha =$	1.01024026	1.01019395	1.01014792
$\epsilon =$	0.01024026	0.01019395	0.01014792
$\Delta\epsilon =$	0.00792	0.00792	0.00792
$\alpha(\epsilon) =$	1.00232566	1.00227914	1.0022329

## 5.0 DISCUSION DE RESULTADOS

Los datos de precipitaciones cubren el área de la cuenca pero no lo suficiente del interior del lago, las estaciones de precipitaciones en las islas se encuentran incompletas y el número de muestras analizadas es bastante menor que los de la cuenca, hubo valores faltantes que se completaron con valores de estaciones cercanas del continente.

Los caudales de ríos afluentes al Titicaca se estima son bastante confiables, pero no se cuentan con datos de todos, faltan los de: Suches y Tiahuanacu, afluentes bolivianos cuyos

caudales se asumieron a caudales promedios anuales para fines de cálculo, pero cabe señalar que los caudales de estos ríos bolivianos son bastante menores que los peruanos.

Los caudales del río Desaguadero del año 1977 también fueron asumidos debido a la falta de datos, durante los años 1998 y 1999 los caudales de este río fueron cero debido a los trabajos de construcción del dique y compuerta para la regulación del flujo.

Los datos de niveles del lago Titicaca son de buena calidad y se cuentan con registros diarios con mas de 50 años de antigüedad.

Los datos de humedad relativa en estaciones cercanas a la orilla del lago indican valores de 64% para 1997 y 51% para 1998, mayores a los indicados en los estudios efectuados para el Plan Director del proyecto (40%) efectuado en los años 80. La humedad relativa promedio de un registro de continuo de 12 horas efectuado el año 2001 fue de 45% en el Sur y de 50% en el Norte del lago. Esta dispersión de valores revela que la necesidad de recopilar mayor información, para fines de calculo se asumió el valor de 45% para los años 1997, 1998 y 1999.

Los resultados de análisis isotópicos de aguas de lluvia muestran grandes variaciones espaciales y temporales de concentraciones de Oxígeno 18 y Deuterio, los valores de  $\delta O_{18}$  de precipitaciones en islas representan precipitaciones en zonas centrales del lago, son isotópicamente mas concentradas que los correspondientes de aguas del continente, lo cual revela un componente de aguas isotópicamente mas concentradas en estos isótopos, cuyo origen podría estar en las aguas evaporadas del lago Titicaca que se sabe tiene una tasa de evaporación bastante elevada, lo cual es un indicio de un proceso de recirculación de aguas del lago a través de los procesos de evaporación y precipitación.

Los resultados de los análisis químicos e isotópicos de aguas del lago muestran que estas son bastante homogéneas tanto en superficie como en profundidad ( $\delta O_{18} = - 3.95$  o/oo promedio de los años 1997, 1998 y 1999), no presenta grandes variaciones en el tiempo, lo que significa que las aguas de ríos y lluvias que ingresan al lago se encuentran muy bien mezcladas, excepto en la bahía de Puno donde se nota una mayor variación de concentraciones ( $\delta O_{18} = - 3.7$  a  $-11.6$  o/oo), lo que muestra una dinámica semi independiente del resto del lago, debido posiblemente al ingreso de aguas de desagüe de la ciudad y la presencia de plantas acuáticas (denominadas localmente lenteja de agua) que cubre gran parte de la bahía, además, en el área existe una corriente lacustre de un ancho de 30 a 50 metros aproximadamente (denominadas localmente río Wily) que tiene una mayor concentración isotópica ( $\delta O_{18} = - 3.2$  o/oo como promedio) cuyo origen se desconoce.

Los resultados de aguas de manantiales y pozos de la cuenca, ( $\delta O_{18} = - 16.2$  o/oo como promedio) muestran menores variaciones en el tiempo debido al prolongado tiempo de residencia que caracteriza esta aguas subterráneas, que sin duda provienen de una mezcla de aguas de lluvia locales y los provenientes de lluvias en zonas altas de la cuenca.

Las concentraciones isotópicas de aguas de ríos utilizados en los cálculos del balance, son valores ponderados con los caudales de los ríos afluentes, algunos meses que no registran caudales, se determinaron en base de correlaciones de caudales de ríos cercanos.

Los valores de masas de agua evaporadas durante los años 1997, 1998 y 1999 son bastante confiables porque se basan en un balance de masas donde la información de lluvias, niveles del lago y caudales de los ríos afluentes y el Desaguadero son bastante confiables. Los valores  $\delta$  de concentraciones isotópicas del  $O_{18}$  y  $H_2$  de la masa de agua evaporada se obtuvieron mediante el balance isotópico y de masas de las aguas de ingreso y salida del lago, asimismo, la masa de agua del lago que interviene en el balance es una fracción del volumen

total del lago que se asume igual al total de la masa que ingresa al lago durante el año de estudio.

Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  del vapor atmosférico de la siguiente Tabla 16, corresponden a solo un día del año 2002, y para fines de cálculo se ha asumido este valor para los tres años del balance en el modelo de Graig Gordon, razón por la cual los resultados se deben tomar con bastante reserva.

**Tabla T.16**

**Resumen de los valores estimados y obtenidos**

	1997	1998	1999
INF = OUT (m3x10E9)	14.44	8.24	11.73
Evaporación (m3x10E9/año)	9.14	13.23	10.54
Evaporación (m3/seg)	290	420	334 (promedio anual)
Humedad relativa (%)	45	45	45 (estimado)
Humedad relativa (%)	64	51	(Data del senamhi)
Precipitación (mm/año)	881	628	905
Inflow/Evaporación	0.63	1.60	0.89
δO18 (lago)	-4.03	-3.98	-3.83
δO18 (ríos)	-14.05	-13.64	-15.78
δO18 (manantiales sur)	-16.60	-16.72	-16.28
δO18 (manantiales norte)	-15.83	-15.78	-16.72
δO18 (prec. Norte.)	-11.4	-14.8	-18.9
δO18 (prec. Sur)	-10.4	-12.8	-16.8
δO18 (prec. islas Norte)		-12.6	-15.9
δO18 (prec. islas Sur)			-14.5
δO18 (Total inflow)	-12.96	-13.73	-13.83
δO18 (vapor atm.)	-22.4	-22.4	-22.4 (estimado)
δO18 (eva)	-15.3	-11.9	-14.4 (Del balance Isotópico)
δO18 (eva)			-9.81 (Del experimento tanque evaporímetro)
δO18 (eva)	-10.29	-9.58	-9.07 (Del modelo de Graig Gordon)



Como se puede apreciar, los valores de  $\delta O_{18}$  de las masas de agua evaporada de los años 1997, 1998 y 1999 calculados por el modelo de Graig Gordon, tienen diferencias con los obtenidos por el balance de masas e isotópico, y con los obtenidos en el experimento en el tanque evaporímetro. Estas diferencias se pueden explicar por la complejidad de los procesos termodinámicos de las masas de agua, y por la poca cantidad y calidad de los datos utilizados en los cálculos.

Los valores obtenidos por el modelo de Craig Gordon se basan en valores de  $\delta O_{18}$  del vapor atmosférico de la zona (-22.4 o/oo), valor promedio de registros horarios efectuado durante un día del mes de Agosto del año 2002 a 3 metros de la superficie del lago y en una estación de la orilla del lago, los que no se pueden considerar sean representativos de todo el año y de todo el lago.

Los datos de  $\delta O_{18}$  de aguas de lluvia son insuficientes y los valores utilizados en el balance son promedios aritméticos de datos de estaciones disponibles, no se cuenta con información suficiente de precipitaciones para obtener un valor ponderado de  $\delta O_{18}$  como se debiera.

El año 1998 fue un año de mayor incidencia del evento del Niño 1997-1998, que originó una gran sequía en la cuenca del Titicaca, ese año las pérdidas por evaporación fueron muy grandes, excediendo los ingresos provenientes de ríos y lluvias, lo cual se refleja claramente en la relación ingresos/evaporación determinados por balance de masas del lago, y en la relación  $\delta O_{18}$  del balance isotópico. Los valores de  $\delta O_{18}$  de la masa de agua evaporada del lago obtenidos aplicando el modelo Craig-Gordon arrojan mayores concentraciones isotópicas que los obtenidos por balance de masas, siendo las diferencias de: -5.0, -2.3 y -5.3 o/oo vsmow para los años 1997, 1998 y 1999 respectivamente, diferencias relativamente pequeñas que se podría explicar además de la incertidumbre de algunos datos arriba referidos, por un factor no considerado en el modelo que es la altitud a que está ubicado el lago, lo que determina una menor presión atmosférica (63% de la presión a nivel del mar) que contribuye a incrementar la tasa de evaporación, y el hecho que el proceso de evaporación del lago no ocurre en condiciones de equilibrio termodinámico entre las fases líquida y vapor del agua.

## 6.0 CONCLUSIONES

La información disponible no es suficiente para obtener conclusiones definitivas de la evaporación del lago Titicaca, pero a pesar de estas limitaciones, la cercanía de los valores obtenidos mediante la aplicación de técnicas convencionales e isotópicas muestra que estas constituyen una alternativa independiente muy útil para determinar la evaporación de lagos.

La tasa de evaporación del lago es alta, especialmente durante los periodos de sequía originados por los eventos del Niño. Las tasas de evaporación obtenidas durante el periodo de estudios fueron de: 1,134mm, 1,654mm y 1,319mm para los años 1997, 1998 y 1999 respectivamente, valores que representan el 128%, 263% y 145% de las precipitaciones en la superficie del lago durante los mismos años. La tasa de evaporación de 1654mm/año corresponde al año 1998, año de máxima incidencia del Niño 1997-1998.

La mayor parte del agua del lago se pierde por evaporación, durante los 3 años de estudios se registraron 63 a 89% en años normales y 160% por año en años de sequía causado por los eventos del Niño, pérdidas que expresados en unidades de caudal representan 290, 420 y 334 m<sup>3</sup>/seg. los que en promedio equivalen al caudal total de los ríos de la costa peruana.



Las aguas del lago están horizontal y verticalmente muy bien mezcladas, excepto en la bahía de Puno.

Los resultados muestran indicios de recirculación de aguas del lago Titicaca a través de los procesos de evaporación y precipitaciones.