



High Mountains  
Adaptation  
Partnership

Glacial Flooding & Disaster Risk Management  
Knowledge Exchange and Field Training  
July 11-24, 2013 in Huaraz, Peru  
[HighMountains.org/workshop/peru-2013](http://HighMountains.org/workshop/peru-2013)

## Evolution 10 glacial lakes in the Cordillera Blanca and its relation to climate change during the past 4 decades

## Evolución de 10 lagunas glaciares en la Cordillera Blanca y su relación con el cambio climático durante las 4 últimas décadas

**Edwin Loarte & Alejo Cochachin**

Autoridad Nacional del Agua-ANA / Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos - UGRH, Huaraz, Perú.

[eloarte@ana.gob.pe](mailto:eloarte@ana.gob.pe)

[jcochachin@ana.gob.pe](mailto:jcochachin@ana.gob.pe)

### ABSTRACT

In the last four decades the process accelerated glacier retreat has led to the formation and increase the volume of water of lakes in the Cordillera Blanca, on a multi-temporal analysis using remote sensing technology and geographic information systems (GIS) shows the evolution of the surface of the lakes; Tullparaju, Palcacocha, Arhuaycocha, Pacliash, Ocshpalca, Pacliashcocha, 513, Artizon Alto, Quitacocha and Safuna Alta indicate bathymetric evolution morphometric characteristics of the gaps in its development, noting that some even have close to the glacier surface, enabling them to increase their size.

The retreat of glacier fronts monitored by the Unit of Glaciology and Water Resources (UGRH) in the Cordillera Blanca from the years 1948-1975 show an average of 8 m / year from 1976 to 2012 these increased by 18 m / year, this means that either duplicate (UGRH-ANA, technical reports), these processes are related to the increase in temperature that starts from the 1976 (IPCC, 2001). These new ponds today are a risk to the population living downstream, because their dams are formed by accumulation of moraine left by the glacier mechanical process in the past that are unstable and highly permeable formation, some of this group lagoons have been the scene of major catastrophic events in the past and effects that can be activated by an avalanche of ice and rock, sliding dock, or also due to oversaturation of the dam.

**Keywords:** Lakes, Increase Volume, Increase Temperature, remote sensing, Cordillera Blanca.

## **RESUMEN**

En las últimas cuatro décadas el proceso acelerado de retroceso glaciar ha dado origen a la formación y el incremento del volumen de agua de lagunas en la Cordillera Blanca, en un análisis multi-temporal mediante técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) se muestra la evolución de su superficie de las lagunas; Tullparaju, Palcacocha, Arhuaycocha, Pacliash, Ocshpalca, Pacliashcocha, 513, Artizon Alto, Quitacocha y Safuna Alta; estudios batimétricos indican las características morfométricas de evolución de las lagunas en su desarrollo, observándose que algunos aun presentan cercanía hacia la superficie glaciar, dándoles la posibilidad de incrementar sus dimensiones.

El retroceso de los frentes glaciares monitoreados por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) en la Cordillera Blanca desde los años 1948 hasta 1975 muestran un promedio de 8 m/año, a partir de 1976 hasta el 2012 estos se incrementaron en 18 m/año, esto quiere decir que sea duplicado (UGRH-ANA, informes técnicos), estos procesos están relacionados con el incremento de la temperatura que inicia a partir de los 1976 (IPCC, 2001). Estas nuevas lagunas en la actualidad son un riesgo para la población asentada aguas abajo, debido a que sus diques están conformados por acumulación de morrenas dejadas por el proceso mecánico del glaciar en el pasado que son de constitución inestable y muy permeables; algunas de este grupo de lagunas han sido escenario de grandes eventos catastróficos en el pasado y que pueden activarse por efectos de una avalancha de hielo y roca, deslizamiento de dique, o también por sobresaturación del dique.

**Palabras claves:** Lagunas, Incremento de volumen, Incremento de temperatura, teledetección, Cordillera Blanca.

## **INTRODUCCIÓN**

El cambio climático global durante la primera mitad del siglo XX ha tenido un impacto significativo sobre el medio ambiente glacial de alta montaña. Muchos grandes glaciares se están fundiendo rápidamente formando e incrementando el espejo de agua de un gran número de lagunas glaciales, la acumulación de agua sobre las altas montañas están provocando el incremento de amenazas de descargas de grandes volúmenes de agua que provocarían la inundación de los valles río abajo.

En el Perú uno de los mayores impactos del cambio climático es la acelerada fusión de los glaciares, fuente importante de agua para las cuencas de alta montaña. En este aspecto nuestro país es altamente vulnerable, debido que el 71 % de superficie de los glaciares tropicales del mundo se ubican en el Perú (Kaser, 1999) y el 27 % de la superficie glaciar ha desaparecido entre 1970 y el 2003 (Inventario de glaciares Cordillera Blanca, 2010).

El estudio de las reservas hídricas se hace indispensable para proporcionar una adecuada gestión (Zamora, 1983; Zapata, 2002), es así que el monitoreo de las lagunas mediante técnicas de mediciones in situ (trabajos en campo) y complementadas con información a través de imágenes satelitales.

Para analizar la evolución de las lagunas es preciso evaluar su estado en diferentes épocas, permitiendo examinar sus variaciones a lo largo del tiempo. Junto con las batimetrías, uno de los parámetros geométricos más usuales es la medición del espejo de agua, dato que nos permitirá realizar los análisis de la evolución lagunar.

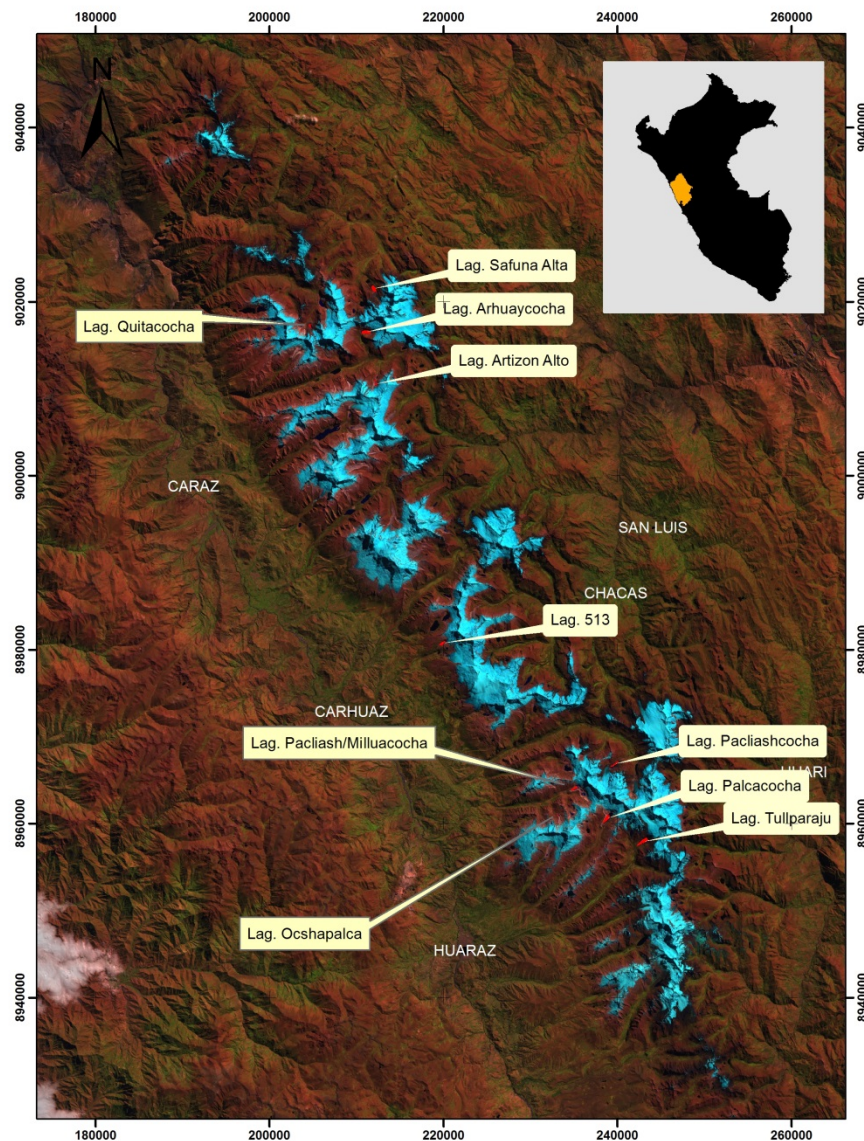
El gran potencial hídrico de sus cuencas hidrográficas y la gran incidencia de desastres asociados a la dinámica de los glaciares y lagunas propiciaron a partir de los años 1940 la investigación glaciológica en el Perú. El primer inventario de lagunas de la Cordillera Blanca fue iniciado por la Comisión de Control de Lagunas de la Cordillera Blanca siendo concluido por ELECTROPERU a través de su Oficina de Glaciología y Seguridad de Lagunas bajo la premisa de determinar el origen y la clasificación de lagunas con fines de seguridad frente a los riesgos de origen glaciar (Zamora, 1983; Zapata, 2002). Desde 1947, diferentes misiones científicas, inspecciones y evaluaciones de campo se realizaron para conocer el comportamiento de los glaciares y lagunas periglaciares, llegando a elaborar los mapas índices y listados correspondientes a los inventarios de lagunas de la Cordillera Blanca de los años 1953, 1965 y 1974 (ELECTROPERU,1974). En cada etapa se fue ampliando el área de estudio y mejorando las técnicas de reconocimiento, llegándose a sistematizar en el año 1992 la información existente a la fecha y a establecer el registro de 627 lagunas mayores a 4,000 m<sup>2</sup> en el ámbito de la Cordillera Blanca. En el año 1980, la Oficina Nacional de Recursos Naturales (ONERN) del Ministerio de Agricultura, llega a identificar aproximadamente 630 lagunas al interior de la cuenca del río Santa (ONER, 1980).

El objetivo de este trabajo es determinar la evolución de 10 lagunas glaciares en la Cordillera Blanca y su relación con el cambio climático durante las 4 últimas décadas.

## METODOLOGÍA

### Ámbito de estudio

La Cordillera Blanca se localiza en los Andes Centrales del continente Suramericano, sus límites están comprendidos entre las coordenadas de 7°41'31" a 10°10'57" Latitud Sur y 76°54'57" a 78°18'1" de Longitud Oeste (Figura 1). Esta región de los Andes en territorio peruano se divide en tres sectores: Norte, Centro y Sur; los glaciares de la Cordillera Blanca se encuentran en el ramal occidental del sector Norte y se prolonga en dirección Noroeste, desde el nevado Rajutuna hasta el nevado Pelagatos, con una longitud lineal aproximada de 210 km. La Cordillera Blanca se ubica entre los departamentos de La Libertad y Ancash, siendo este último el que alberga en casi su totalidad los glaciares. En el 2003, se encontraron 830 lagunas, con superficies mayores iguales a 5000 m<sup>2</sup> (Inventario de lagunas Cordillera Blanca, 2010).



*Figura. 1. Ubicación de la Cordillera Blanca y de las lagunas estudiadas.*

## Fuentes de datos.

### A. Imágenes Satelitales ópticas.

La adquisición de imágenes satelitales Landsat 2, 5 y 8 fueron obtenidas de la: USGS Global Visualization Viewer – GloVis (EEUU). Las imágenes obtenidas corresponden a la temporada seca, desde el mes de Mayo al mes de Agosto durante el periodo 1975-2013 y el path y row correspondieron a 08/066.

Tabla 01. Imágenes satelitales empleadas en el estudio.

<i>código</i>	<i>Fecha</i>	<i>Resolución espacial</i>
<b>LM20080661975216AAA05</b>	04/08/1975	60
<b>LT50080661986132XXX04</b>	12/05/1986	30
<b>LT50080661990191CUB00</b>	10/07/1990	30
<b>LT50080661995221CUB00</b>	09/08/1995	30
<b>LT50080661999216CUB03</b>	04/08/1999	30
<b>LT50080662005184CUB00</b>	03/07/2005	30
<b>LT50080662010230CUB00</b>	18/08/2010	30
<b>LC80080662013142LGN01</b>	22/05/2013	30

### B. Parámetros climáticos.

Los datos de temperatura de reanálisis a diferentes niveles se obtuvieron de European Climate Assessment & Data.

### C. Trabajos de batimetría.

Proporcionados por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, estos datos contemplan los trabajos de batimetría realizadas en estas 10 lagunas.

## Procedimientos empleados

### 1.-Tratamientos y procesamiento de la serie de imágenes satelitales.

El trabajo requirió 8 escenas entre los sensores MSS, TM y OLI de los satélites Landsat 2,5 y 8 (Path 8 y Row 66) . Las imágenes tuvieron un nivel de procesamiento de corrección geométrica en el sistema de coordenadas UTM, zona 18 sur y datum WGS84.

### 2.-Determinación de la superficie de espejo de agua

La digitalización de la superficie de las lagunas fue mediante la aplicación de índices NDWI y la digitalización directa.

## RESULTADOS

### Evolución de la superficie del espejo de agua de las lagunas en estudio

Los resultados del análisis multitemporal de las lagunas, muestra los cambios en las ultimas 4 décadas, esta evolución no es de manera constante, algunas lagunas evolucionaron rápidamente en un par de años mientras otras permanecen una superficie casi constante sin presencia de incrementos acelerados.

**Tabla 02.** Valores superficiales de las lagunas en estudio (m<sup>2</sup>).

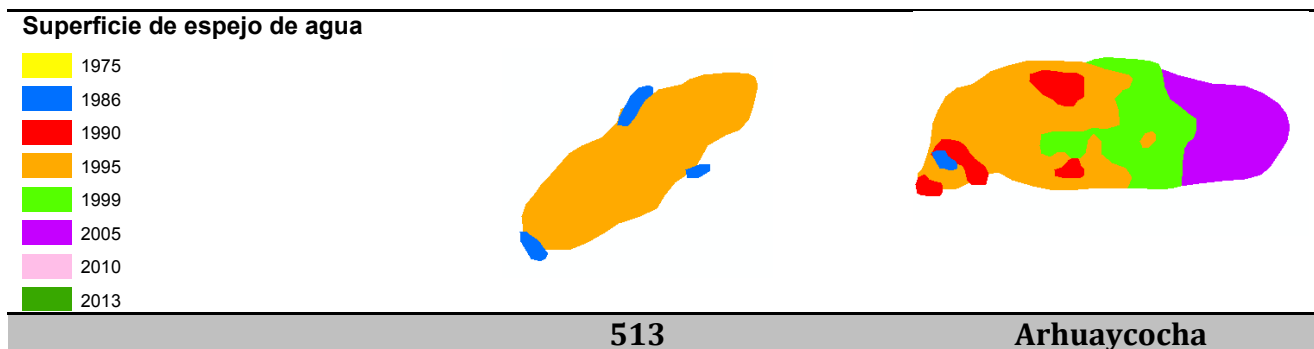
<b>Años</b>	<b>513</b>	<b>Arhuaycocha</b>	<b>Artizón Alto</b>	<b>Ocshapalca</b>	<b>Pacliashcocha</b>
04/08/1975	0	0	0	0	21842
12/05/1986	13008	3091	32984	11585	82701
10/07/1990	4422	33430	40408	13762	104577
09/08/1995	207585	191448	64262	17992	162171
04/08/1999	207585	279199	90100	18796	140319
03/07/2005	207585	405745	137661	33890	193497
18/08/2010	207585	405745	137661	33890	218679
22/05/2013	207585	405745	137661	33890	218679

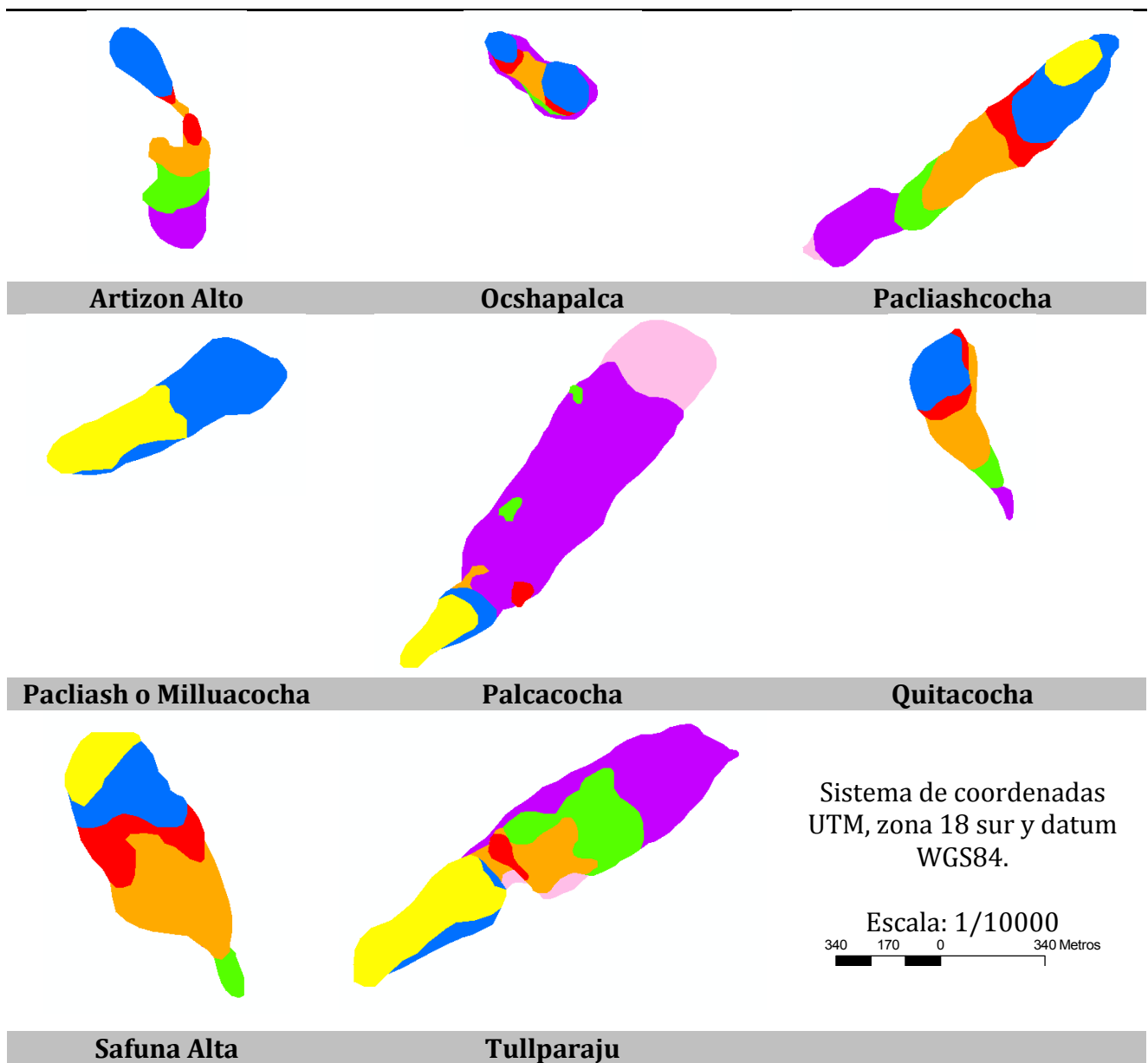
  

<b>Años</b>	<b>Pacliash</b>	<b>Palcacocha</b>	<b>Quitacocha</b>	<b>Safuna alto</b>	<b>Tullparaju</b>
04/08/1975	77141	34227	0	66760	100919
12/05/1986	179633	48126	39399	106205	118702
10/07/1990	179633	53534	52088	161333	128180
09/08/1995	179633	57258	89248	277016	176158
04/08/1999	171965	63773	97209	371560	258846
03/07/2005	171965	358834	102332	306250	395705
18/08/2010	171965	518426	102332	334359	463757
22/05/2013	171965	518426	102332	334359	463757

De los resultados se puede observar que la evolución de las lagunas empieza en la parte frontal, con la formación de un charco de agua que empieza a formarse al encontrar un dique permitiendo el almacenamiento de agua y su crecimiento.

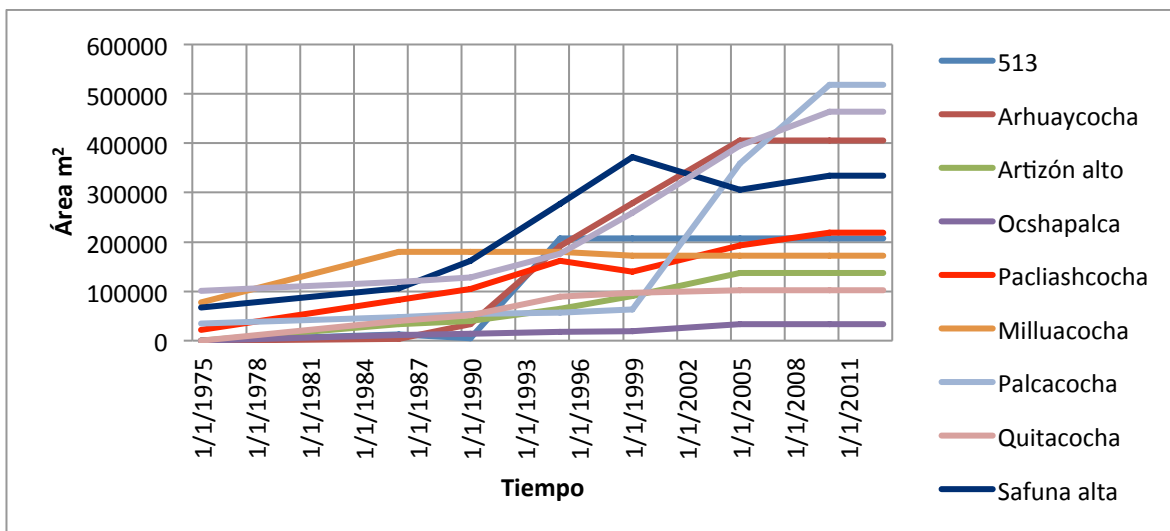
En la Figura. 02, se observa las diferentes formas geométricas que estas lagunas han venido desarrollando, de estas evoluciones podemos resaltar la de Tullparaju y Palcacocha quienes son las más grandes en superficie de espejo de agua y volumen de agua.





**Figura. 2.** Visualización de la evolución geométrica de las lagunas en estudio.

A consecuencia de la acelerada fusión de la cobertura glaciaria, la aparición y el incremento de las lagunas de origen glaciario se están incrementando. Las lagunas analizadas muestran incrementos a través de los años provocando inestabilidad en sus diques, estos cambios están generando el incremento de las amenazas de desborde de movimientos de masa que traerán graves consecuencias sobre las poblaciones ubicadas sobre las zonas bajas de estas cuencas.



**Figura. 3.** Evolución superficial de las lagunas en estudio.

Los valores de los perímetros al igual que las superficies tienen tendencias al incremento. Lagunas que se encuentran en contacto glaciar continúan su incremento provocando el aumento del volumen de agua.

**Tabla 03.** Valores de los perímetros de las lagunas en estudio (m<sup>2</sup>).

<b>Años</b>	<b>513</b>	<b>Arhuaycocha</b>	<b>Artizón alto</b>	<b>Ocshapalca</b>	<b>Pacliashcocha</b>
04/08/1975	0	0	0	0	568
12/05/1986	838	228	727	551	1184
10/07/1990	273	1467	1073	614	1418
09/08/1995	1947	2662	1646	624	1991
04/08/1999	1947	2245	1948	630	2081
03/07/2005	1947	2711	2175	663	2749
18/08/2010	1947	2711	2175	663	2803
22/05/2013	1947	2711	2175	663	2803
<b>Años</b>	<b>Pacliash</b>	<b>Palcacocha</b>	<b>Quitacochoa</b>	<b>Safuna alto</b>	<b>Tullparaju</b>
04/08/1975	1295	809	0	833	1535
12/05/1986	2046	957	777	1332	1527
10/07/1990	2046	1235	863	1887	2003
09/08/1995	2046	1453	1244	2218	2546
04/08/1999	2012	1912	1412	2517	2961
03/07/2005	2012	3111	1650	2179	3620
18/08/2010	2012	3503	1650	2179	3540
22/05/2013	2012	3503	1650	2179	3540

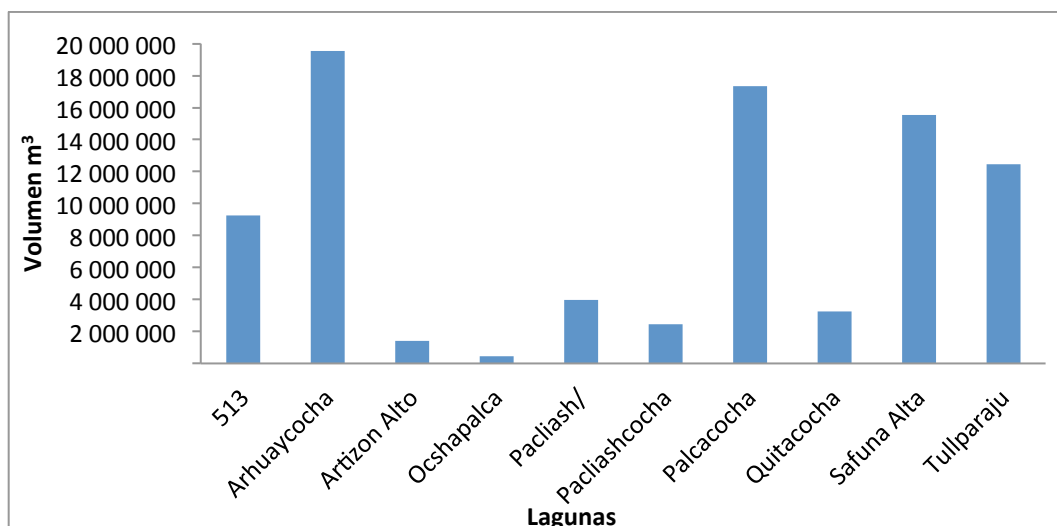


## Análisis volumétrico

De los datos más recientes de batimetría se puede observar que los mayores volúmenes los tienen las lagunas Arhuaycocha y Palcacocha; de estas la laguna Palcacocha se encuentra en la cabecera de la subcuenca Quillcay, la ciudad de Huaraz se encuentra sobre esta cuenca en la parte baja y es de gran vulnerabilidad ante la ocurrencia de un desborde de la laguna Palcacocha.

**Tabla 04.** Datos batimétricos

N°	Nombre	Subcuenca	Provincia	Altitud (msnm)	Características Actuales			Bat. años
					Área (m <sup>2</sup> )	Vol (m <sup>3</sup> )	Prof. (m)	
1	513	Hualcán	Carhuaz	4 431	207585	9250938	83	2011-06
2	Arhuaycocha	Santa Cruz	Huaylas	4 400	405745	19550795	98	2011-11
3	Artizon Alto	Santa Cruz	Huaylas	4 639	137661	1424844	25	2011-12
4	Ocshapalca	Paltay	Huaraz	4 798	33890	435781	40	2006-07
5	Pacliash / Milluacocha	Paltay	Huaraz	4 577	188873	3985344	42	2011-12
6	Pacliashcocha	Marcará	Carhuaz	4 564	218679	2451104	26	2010-06
7	Palcacocha	Quilcayhuanca	Huaraz	4 562	518426	17325207	73	2009-04
8	Quitacocha	Los Cedros	Huaylas	4 724	130407	3231756	57	2011-08
9	Safuna Alta	Quitaracsa	Huaylas	4 360	334359	15524435	84	2010-04
10	Tullparaju	Quilcayhuanca	Huaraz	4 283	463757	12474812	63	2011-10



**Figura. 4.** Volumen almacenado por las lagunas.

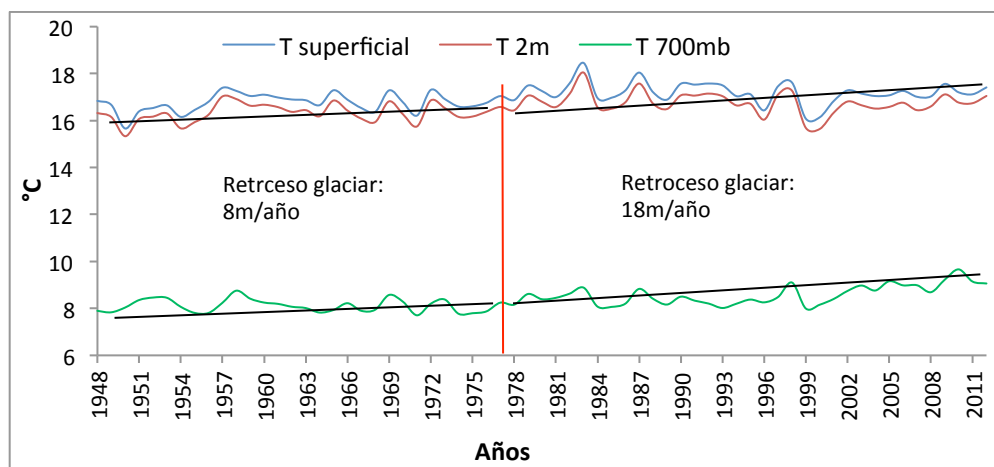
De los procesos de obtención de superficies de las lagunas de las imágenes de satélite se obtuvo los errores respecto a los trabajos de campo (Batimetría), de este análisis se puede observar que las lagunas con menor superficie son las que presentan mayor error y aquellas de gran extensión presentan los menores errores.

**Tabla 05.** Valores de errores obtenidos

Nº	Nombre	Batimetría área (m²)	Imagen satelite (m²)	Error
1	513	207585	187359	9.74%
2	Arhuaycocha	405745	366496	9.67%
3	Artizon Alto	137661	115092	16.39%
4	Ocshapalca	33890	23557	30.49%
5	Pacliash / Milluacocha	188873	171965	8.95%
6	Pacliashcocha	218679	196159	10.30%
7	Palcacocha	518426	440487	15.03%
8	Quitacocha	130407	102332	21.53%
9	Safuna Alta	334359	275136	17.71%
10	Tullparaju	463757	405602	12.54%

### **Cambios de temperatura**

Los nacimientos e incrementos de lagunas de origen glaciar están ligados directamente con la acelerada fusión que vienen teniendo los glaciares, de los análisis y reportes realizados por el IPCC se puede encontrar cambios un salto en la temperatura en el año 1976, esto es corroborado con los datos de mediciones de frente glaciar elaborado por la unidad de Glaciología y Recursos hídricos.



*Figura. 5. Cambios de temperatura.*

## CONCLUSIONES

- Los más grandes volúmenes encontrados son de las lagunas Arhuaycocha y Palcacocha, de estas la que presenta mayor amenaza es la laguna Palcacocha que se encuentra en la cabecera de cuenca de la ciudad de Huaraz.
- La relación inversamente proporcional del nacimiento e incremento de lagunas con la rápida fusión de las masas glaciares están produciendo el incremento de amenazas de desbordes y otros movimientos de masa que producirán graves consecuencias sobre las poblaciones ubicadas sobre las zonas bajas de estas lagunas.
- La tasa de crecimiento de lagunas no es constante sino se presenta de manera heterogénea de acuerdo a las características topográficas y la masa glaciár que ha dado origen a la laguna.
- El tratamiento de imágenes de satélite para complementar los trabajos en situ (Batimetría) son de gran ayuda y debemos tener en cuenta los errores que pueden presentar por la resolución de las imágenes usadas.

## AGRADECIMIENTOS

A la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, quien brindo todo su apoyo para la realización de la presente investigación.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ANA (Autoridad Nacional del Agua, Perú). (2010). Inventario de glaciares Cordillera Blanca.
- ANA (Autoridad Nacional del Agua, Perú). (2010). Inventario de lagunas Cordillera Blanca.
- ELECTROPERU. (1974). Memoria Bienal del Programa de Glaciología y Seguridad de Lagunas. pp 9-12.
- IPCC, 2007. Climate change 2007 synthesis report. In: Pachauri, R.K., Reisinger, A. (Eds.), Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, 104 pp.
- ONERN. (1980). Inventario Nacional de Lagunas y Represamientos. Segunda Aproximación. Lima. 19p. Incluyen mapas sin numeración.
- Kaser, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers, Glob. Planet. Change, 22, pp. 93-103.
- Zamora, M. (1983). Inventario y Seguridad de Lagunas en la Cordillera Blanca. ELECTROPERU. Glaciología y Seguridad de Lagunas.
- Zapata, M. (2002). La dinámica glaciár en lagunas de la Cordillera Blanca. En: Acta Montana IRMS AS CR. Ser. A. Geodynamic. No. 19 (123), pp 37-60.