



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Servicio Nacional de
Meteorología e Hidrología
del Perú - SENAMHI

BALANCE ENERGÉTICO NETO DEL GLACIAR QUISOQUIPINA EN LA CORDILLERA VILCANOTA



DICIEMBRE - 2014



DIRECTORIO

Presidenta Ejecutiva del SENAMHI
Ing. Amelia Díaz Pabló

Director Científico
Ing. Esequiel Villegas Paredes

Director General de Hidrología y Recursos Hídricos
Ing. Oscar G. Felipe Obando

RESPONSABLES DE LA ELABORACION

Asesor de la DGH en Glaciología e Hidrología
Dr. Wilson Alfredo Suarez Alayza

COLABORACION

Dirección Regional de Cusco - SENAMHI
Bach. Sandro Arias Loayza

REVISIÓN Y EDICIÓN

Bach. Miriam R. Casaverde Riveros

DICIEMBRE – 2014
LIMA - PERÚ

INDICE

I. INTRODUCCION	1
II. OBJETIVOS	3
III. METODOLOGIA.....	3
3.1. Zona de estudio	3
3.2. Contexto del estudio	4
3.3. Evolución de la cobertura y volumen glaciar	5
3.4. Análisis Climático.....	6
3.4.1 Temperatura y Balance neto energético	6
VI. DATOS DISPONIBLES.....	9
4.1 Imágenes de Satélite	9
4.2. Datos Observados	9
4.3. Reanálisis 1	10
V. RESULTADOS.....	11
5.1. Evolución de la cobertura y volumen glaciar	11
5.2. Análisis de Variables Climáticas	12
VI. CONCLUSIONES	17
VII. PERSPECTIVAS	19
7.1. Agradecimientos	19
VII. BIBLIOGRAFIA	20

LISTA DE FIGURAS

Figura. 1 Ubicación del Glaciar Quisoquipina	4
Figura. 2. (Izquierda) Ensayos de control de inclinación del soporte trípode de la estación climática a ser instalada en el Glaciar Quisoquipina. (Derecha) estación climática instalada en el glaciar Quisoquipina a 5180 metros en la Cordillera Vilcanota.	5
Figura. 3 Balance energético en un glaciar considerando los flujos entrantes y salientes .	8
Figura. 4. Temperatura del aire observada sobre el glaciar Quisoquipina versus el reanálisis 1 (NCEP/NCAR 500hPa) a paso de tiempo diario (superior izquierda), temperatura del aire observada sobre el glaciar Quisoquipina versus el reanálisis a paso de tiempo mensual (superior derecha) y distribución diaria de la temperatura evaluada mes por mes (inferior).	13
Figura. 5. Comparación de energía en onda corta incidente (S_{\downarrow}), corta reflejada (S_{\uparrow}), larga incidente (L_{\downarrow}) y larga emitida (L_{\uparrow}) sobre el glaciar Quisoquipina a paso de tiempo diario.	15
Figura. 6. Balance neto en onda corta (S Net) y onda larga (L Net) sobre el glaciar Quisoquipina (figura superior izquierda), Balance neto en onda corta (S Net) y onda larga (L Net) sobre el glaciar Quisoquipina expresado en porcentaje (figura superior derecha) donde el Balance neto total representa el 100%, balance energético sobre el glaciar Zongo (figura inferior izquierda) y balance energético sobre el glaciar Antizana (figura inferior derecha.), estos dos últimos tomados de Vincent et al. (2005).	16
Figura. 7. Comparación entre el balance neto (Q net) y el albedo sobre el glaciar Quisoquipina a paso de tiempo diario.....	16

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación de sensores instalados y equipos de la estación climática ubicados en el glaciar Quisoquipina.	10
Tabla 2. Lista de imágenes de satélite usadas, áreas y volúmenes calculados y caudal equivalente en función del volumen perdido.	12
Tabla 3. Datos de Temperatura del aire a nivel mensual obtenidos sobre el glaciar Quisoquipina	12
Tabla 4. Componentes del balance energético en los glaciares Quisoquipina, Zongo y Antizana	14

I. INTRODUCCION

El Perú debido a su posición se encuentra íntegramente dentro del cinturón tropical del planeta, y está sensible frente a las fluctuaciones climáticas que se observan en los últimos años. Por ejemplo Vuille et al., 2008; detectaron que la temperatura del aire en los Andes tropicales se ha incrementado con una tasa de 0.1 °C/década desde 1939 y Mark & Helmens, (2005) indica que en la Cordillera Blanca del Perú la temperatura se incrementó con una tasa de 0.35 a 0.39 °C/década entre 1951 a 1999. Considerando que en la región de los Andes se encuentran cerca del 99% de los glaciares tropicales (Kaser, 1999) del planeta y que estos son muy sensibles a las variaciones climáticas (Kaser y Osmaston, 2002) se hace necesario su monitoreo constante para comprender su dinámica.

Estudios llevados a cabo sobre diferentes glaciares de la región tropical de los Andes, (Sicart, 2005), Perú (Juen, Kaser, & Georges, 2007) y Ecuador muestran que el factor dominante durante el proceso de fusión es el balance energético, de donde el residual del balance de la radiación en onda corta y larga, el flujo de calor latente y el flujo en calor sensible; es utilizado para el proceso de fusión.

Actualmente el monitoreo climático y glaciar del Perú se encuentra centrado en la Cordillera Blanca (6 horas en carro al norte de la ciudad de Lima), esto debido a que es la formación glaciar más importante del Perú y cuenta con información climática e hidrológica desde el año de 1941, y diferentes estudios vinculados a los glaciares como por ejemplo (Kaser et al. 2003; Chevallier et al. 2010; Mark & Helmens 2005; Pouyaud et al. 2005; Juen et al. 2007; Suarez et al. 2008; Vuille et al. 2008). En el sur del Perú los conocimientos sobre los glaciares son más limitados. En la Cordillera Vilcanota, el área glaciar más importante de la región sur, estudios recientes han encontrado que en el año de 1962 se tenía 440 km² (Hidrandina S.A, 1989) y en el año 2006 quedaban 297 km² (Salzmann et al., 2013) y para el año 2009 se contaba con 279.4 km² (Autoridad Nacional del Agua, 2012). Además la capa de hielo tropical más grande mundo se encuentra en esta Cordillera y es sitio de una serie de estudios vinculados a la paleoclimatología (Thompson et al., 2006) Considerando que los glaciares son las reservas de agua dulce en la región andina de montaña durante la estación seca (Chevallier et al., 2011) se hace necesario su monitoreo para comprender la dinámica y el proceso de fusión de estos en una región no muy estudiada.

El presente estudio muestra los primeros resultados de monitoreo climático realizado en un entorno glaciar por parte del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) en la región Sur del Perú (Cordillera del Vilcanota). Primero se estudia la evolución de la cobertura espacial del glaciar Quisoquipina mediante imágenes LANDSAT 5. Luego se presenta las primeras características de la temperatura después de dos años de monitoreo, en base de una nueva estación climática ubicada sobre el glaciar a 5180 metros, siendo la segunda más alta del Perú (la más alta se ubica en el nevado Coropuna a 5800 metros) y una de las dos que se tienen por encima de 5000 metros en el SENAMHI. Finalmente, dichos resultados permiten comparar y evaluar la radiación neta de los glaciares realizados en los Andes de Ecuador y Bolivia con los resultados de Radiación Neta encontrados en el glaciar de Quisoquipina.

II. OBJETIVOS

- **Objetivo Principal**
 - Evaluar los primeros datos del balance energético neto del glaciar Quisoquipina.
- **Objetivo Secundario**
 - Evaluar mediante imágenes de satélite la evolución del glaciar Quisoquipina.
 - Evaluar los datos de radiación generados por la estación climática ubicada en el nevado Quisoquipina.
 - Evaluar y comparar los datos de temperatura del glaciar Quisoquipina respecto al reanalysis de la NOAA.

III. METODOLOGIA

3.1. Zona de estudio

El glaciar de Quisoquipina se encuentra en el Sur del Perú, ubicado en la Cordillera de Vilcanota. Sus coordenadas geográficas de su centro es latitud -13.8° y Longitud de -70.74° , y geográficamente se encuentra en la región de Cusco, a 130 km de la ciudad de Cusco, su acceso se hace desde la ciudad de Cusco hasta la comunidad de Phinaya (comunidad habitada más alta del Perú con 4950 metros de altitud), mediante 6 horas de viaje en camioneta, siendo las dos primeras horas por una ruta asfaltada y lo último por una ruta sin asfaltar, desde el pueblo de Phinaya el viaje final dura 1 hora por una ruta carrozable (trocha). Dicho glaciar presenta una altitud máxima de 5500 metros aproximadamente y su frente se ubica a 4950 metros.

La cordillera del Vilcanota en donde se encuentra dicho glaciar es la segunda más extensa del Perú con 177 km^2 (Autoridad Nacional del Agua, 2012), teniendo una importancia económica y social, la primera ya que se almacena el agua proveniente de la fusión glaciar en la laguna de Sibynacocha que posteriormente es utilizado para regular los caudales de la central hidroeléctrica de Machu Picchu durante los periodos de estiaje y a nivel social ya que la presencia de glaciares permite tener zonas permanentes de pastoreo durante todo el año, llegándose a tener más de 15,000 cabezas de alpaca en la región.

En la Figura 01 se muestra la posición del glaciar Quisoquipina dentro de la Cordillera Vilcanota.

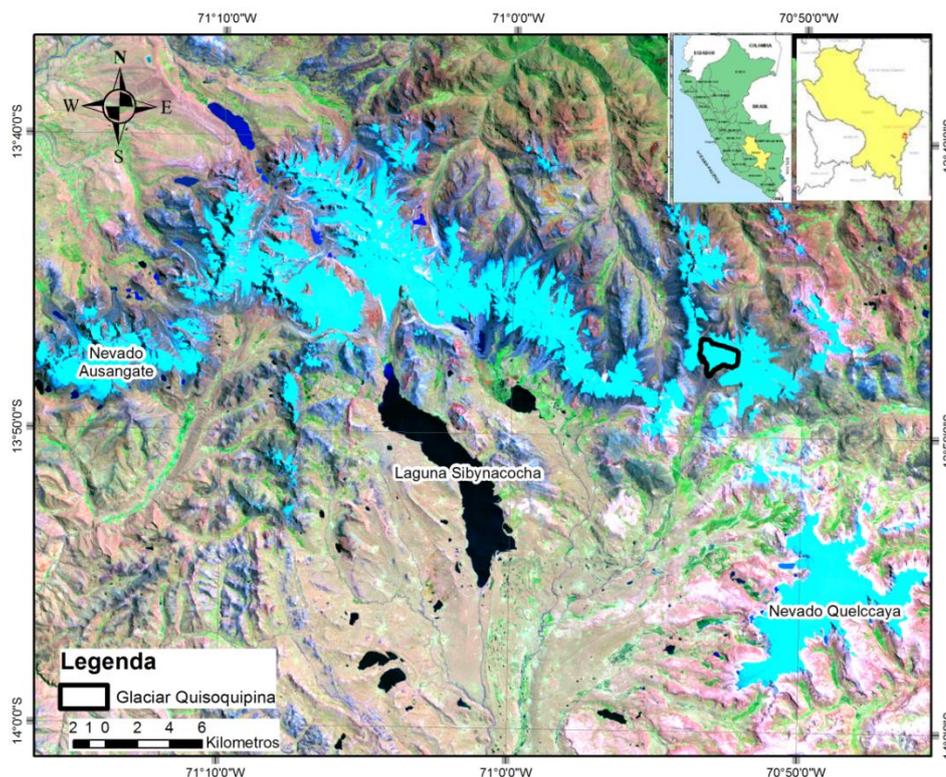


Figura. 1 Ubicación del Glaciar Quisoquipina

3.2. Contexto del estudio

El SENAMHI viene operando oficialmente desde el año 1969, inicialmente contaba con una red de 836 estaciones de las cuales 756 eran meteorológicas y 80 hidrológicas, dicha cifra ha tenido importantes cambios con el pasar de los tiempos debido principalmente a temas económicos y la violencia interna de los años 80'. En la actualidad la red nacional consta de 670 estaciones convencionales de las cuales 137 son hidrológicas, además se tiene 101 estaciones automáticas¹.

Desde el año 2008 en el marco del Proyecto de Adaptación frente al Retroceso Acelerado de los Glaciares Tropicales (PRAA) el SENAMHI se comprometió a operar dos estaciones climáticas de monitoreo del entorno glaciar, las cuales serían compradas por dicho proyecto.

Dichas estaciones fueron entregadas en el año 2010, teniendo un formato clásico (torre vertical anclada al suelo, donde se colocan los sensores climáticos), esto represento una

¹ Se define como estación automática a la que tiene la capacidad de operar autónomamente y puede transmitir la información registrada mediante el uso de un satélite (GOES).

limitación, ya que la instalación de la estación asignada al sur del Perú debía estar ubicada sobre el mismo glaciar. Esto obligo a plantear un nuevo tipo de estación (ver datos observados) El desplazamiento constante del glaciar (propio de su dinámica) ocasionaría que la torre se cayera constantemente o no permitiría tener una buena lectura de los sensores de radiación, por lo que se construyó una trípode con un estabilizador giroscópico que permitiera tener siempre en posición perpendicular respecto al eje terrestre los sensores de radiación. Este mecanismo permitió de manera paralela limitar las visitas a la estación (3 a 4 veces al año) ya que no existía riesgo de inclinación de los sensores. Las pruebas realizadas a la estación duraron aproximadamente 10 días, de donde se observó que el estabilizador podía operar correctamente hasta inclinaciones menores de 45° respecto al eje de la Tierra. En la Figura 02 se muestran los ensayos realizados de la estación conjuntamente con los sensores climáticos como también la estación colocada en su posición final en el glaciar Quisoquipina. Dicha estación fueron transferidas formalmente entre el año 2013 y 2014 y actualmente se encuentra siendo operado en su integridad por el SENAMHI.



Figura. 2. (Izquierda) Ensayos de control de inclinación del soporte trípode de la estación climática a ser instalada en el Glaciar Quisoquipina. (Derecha) estación climática instalada en el glaciar Quisoquipina a 5180 metros en la Cordillera Vilcanota.

3.3. Evolución de la cobertura y volumen glaciar

El estudio de la cobertura glaciar es la manera más simple de analizar la dinámica glaciar, para lo cual existen diferentes herramientas disponibles, como por ejemplo las fotos aéreas (disponibles desde los años 1950), levantamientos topográficos e imágenes de satélite (disponible desde mediados de los años 1970). Los primeros trabajos

utilizando estas herramientas en la zona de estudio fueron realizados por Brecher H. & Thompson G. (1993) que mediante técnicas de fotogrametría cuantifico el retiro del glaciar Qori Kalis, el cual pertenece al campo de hielo Quelccaya ubicado 15 km al sur del Quisoquipina. Posteriormente Salzmann et al. (2013) realizaron la cuantificación de la pérdida de cobertura glaciar de la Cordillera Vilcanota. El uso de herramientas de percepción remota en los glaciares de la región andina no es nuevo, ya ha sido ampliamente usado en trabajos de cuantificación de pérdida de volumen glaciar, áreas e inventarios, los cuales son descritos por Rabatel et al. (2013)

Para separación entre parte glaciar y no glaciar se utilizó el *Normalized Difference Snow Index (NDSI)*, dicho índice ampliamente utilizado en la caracterización de los glaciares en las regiones tropicales ejem: (Salzmann et al. 2013; Burns & Nolin 2014); etc. Dicho índice calculado para imágenes Landsat 5 presenta la siguiente ecuación:

$$NDSI = \frac{B2-B5}{B2+B5} \quad (1)$$

Dónde: B2 y B5 son el número de bandas.

Dicho índice oscila entre un margen de -1 a 1 y Silverio & Jaquet (2005) determinaron en la Cordillera Blanca que los valores superiores a 0.58 son considerados como glaciares puros, y la misma caracterización fue utilizada para el presente estudio.

Para el cálculo del volumen se utilizó la ecuación propuesta por Bahr et al. (1997):

$$V = c A^g \quad (2)$$

Dónde: "V" es el volumen glaciar para el tiempo t, "k" es una constante teórica de 0.0633 km^{3-2y}, "A" es el área glaciar para el tiempo t e "y" es 1.375 (constante calculada por Bahr).

3.4. Análisis Climático

3.4.1 Temperatura y Balance neto energético

Este punto considera la evaluación de la variable temperatura, esto fundamentado en que el principal elemento vinculado al retroceso de los glaciares por el mundo, está

relacionado con el incremento de la temperatura global del planeta durante los últimos años (Marzeion, Cogley, Richter, & Parkes, 2014)

El balance energético sobre el glaciar es evaluado al ser considerado el motor de los procesos de ablación en la región tropical (Kaser et al., 2004) además se compara los resultados respecto al de otros glaciares tropicales.

La ecuación clásica del balance energético ha sido adaptada de Hock (2005)

$$Q_N + Q_H + Q_L + Q_G + Q_R + Q_M = 0 \quad (3)$$

Dónde: Q_N es la radiación neta, Q_H flujo de calor sensible, Q_L es flujo de calor latente (Q_H y Q_L son referidos a los flujos de calor turbulentos), Q_G es el flujo de conductividad en la nieve o hielo, Q_R es el flujo de calor sensible aportado por las precipitaciones y Q_M es la energía consumida durante el derretimiento. Donde la tasa de derretimiento (M) es calculado en función a la energía disponible,

$$M = \frac{Q_M}{\rho_W L_f} \quad (4)$$

Dónde: ρ_W corresponde a la densidad del agua y L_f es el calor latente de fusión. Cuando Q_M es positivo, el glaciar recibe calor que va a aumentar la temperatura (en caso sea negativo) y luego derretirlo (cundo el punto de deshielo ha sido alcanzado).

Considerando que Q_N de la ecuación (3) es:

$$Q_N = S \downarrow + S \uparrow + L \downarrow + L \uparrow \quad (5)$$

Dónde: $S \downarrow$ y $S \uparrow$ representan la radiación en onda corta incidente y reflejada y $L \downarrow$ representa la radiación en onda larga proveniente de la atmosfera y $L \uparrow$ la radiación en onda larga emitida por la superficie. Considerando que el albedo es la relación $S \uparrow / S \downarrow$ la ecuación (3) puede simplificarse a:

$$S \downarrow (1 - \alpha) + L \downarrow + L \uparrow + Q_H + Q_L + Q_G + Q_R + Q_M = 0 \quad (6)$$

Donde α representa el albedo.

En la Figura 03 se muestra los procesos de intercambio energético vinculados a un glaciar.

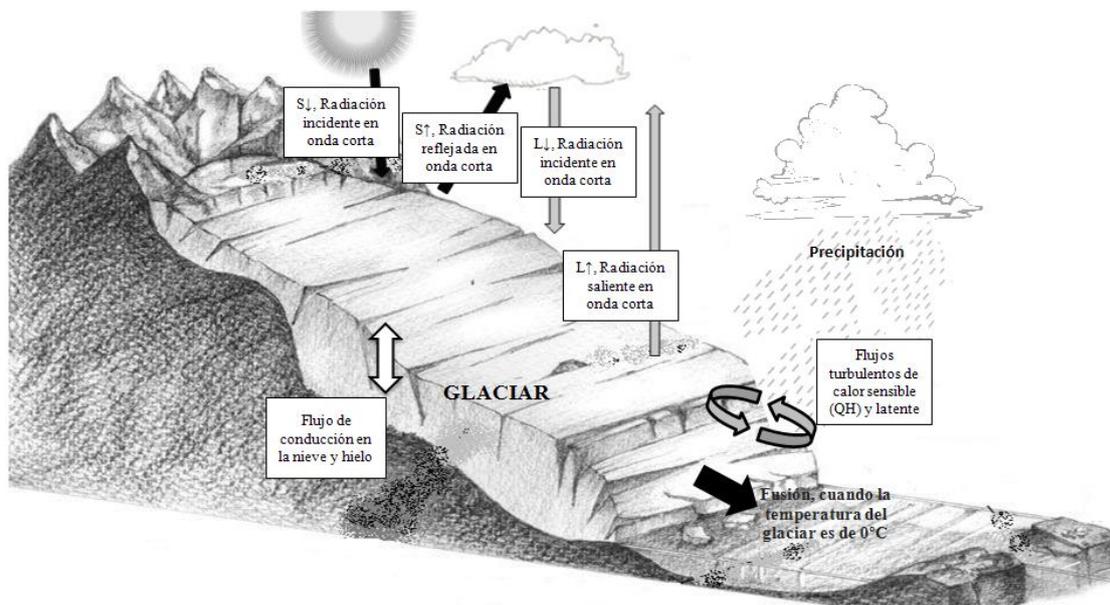


Figura. 3 Balance energético en un glaciar considerando los flujos entrantes y salientes

VI. DATOS DISPONIBLES

4.1 Imágenes de Satélite

Para el presente estudio se utilizaron imágenes Landsat 5 de diferentes años (desde 1990 hasta la actualidad) las cuales tienen una resolución de 30 metros por pixel, dichas imágenes pertenecen al periodo seco (mayo a agosto) para evitar errores de confusión con la cobertura nival, para el proceso de separación.

Dichas imágenes fueron obtenidas del servidor del “USGS Global Visualization Viewer” (GloVis) disponibles de forma gratuita mediante la página web: <http://glovis.usgs.gov>. Las fechas de adquisición de las imágenes son presentadas en la Tabla 2.

4.2. Datos Observados

Los datos utilizados corresponden a los recolectados por la estación climática “Quisoquipina” la cual tiene información a paso de tiempo de 30 minutos, la serie utilizada tiene su inicio el 01 de mayo del 2012 hasta 31 de mayo del 2014, dicha información se encuentra disponible mediante transmisión vía satélite GOES al receptor central en la ciudad de Lima. Los datos registrados por esta estación son, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, altura de nieve, radiación incidente en onda corta y larga, radiación reflejada en onda corta, emitida en onda larga, albedo y presión atmosférica.

Los datos más sensibles son los sensores de radiación y temperatura del aire, dichos sensores no son ventilados y las características de su instalación son presentados en el contexto del estudio. En la Tabla 01 se presentan las características técnicas de los sensores adquiridos. La estación fue instalada en el glaciar Quisoquipina a 5180 metros en julio del año 2011 pero por problemas eléctricos comenzó a operar desde el 27 de setiembre del 2011.

Tabla 1. Relación de sensores instalados y equipos de la estación climática ubicados en el glaciar Quisoquipina.

Item	Sensor	Tipo
1	Datalogger	Cambell CR1000
2	Panel Solar	20W
4	Batería	Bateria 20V, 7AH
5	Sensor de Temperatura y Humedad del Aire	Vaisala HMP45C
6	Sensor de Velocidad y Dirección del Viento	Young, Propeller 05103
7	Sensor de Presión Atmosférica	Vaisala, PTB110
8	Sensor de Radiación (piranometro y Pirgeometro)	Kipp&Zonen, CNR1
9	Sensor de Nivel de Nieve	Campbell, SR50A
10	Receptor GPS	Garmin 16X-HVS
12	Sistema de transmisión GOES	Cambell, TX320
13	Antena GOES	Campbell, 25316

Fuente: Elaboración Propia

4.3. Reanálisis 1

EL *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) y El *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) trabajan juntos para la generación de datos retroactivos desde el año 1948. Para alcanzar este objetivo se utilizan una fuente heterogénea de base de datos. En un primer momento se trabajó para que esta recuperación en el hemisferio norte y un después en el hemisferio sur. El reanálisis 1 utiliza el modelo operativo global espectral (Gama Media Forecasting, MRF) creado por el modelo global del NCEP en 1995. Este utiliza una resolución de 28 niveles de presión (1.000 hPa a 10 hPa) y 62 cuadrículas resolución horizontal (192 por 94 longitudes latitudes o malla de 1.9 ° x 1.9 ° equivalente a 210 km de resolución). El Análisis del patrón de variación (interpolación) es de 3 dimensiones (3DVAR). Este esquema se llama "Spectral interpolación estadística", desarrollado por el NCEP.. Los datos de temperatura del aire a 500 hPa están disponibles desde 1948 hasta el presente, Los datos de temperatura del aire están disponibles a una resolución de malla de 2,5 x 2,5. El modelo del sistema físico se explica mejor por (Kalnay et al., 1996).

V. RESULTADOS

5.1. Evolución de la cobertura y volumen glaciar

En la tabla 2 se muestra las áreas de cobertura glaciar obtenidos mediante el NDSI, donde se observa que para el año 1990 la cobertura del glaciar Quisoquipina correspondía a 3.66 km² y para el año 2010 se tenía 3.26 km², lo que representa una pérdida de 0.4 km² (10.9 %). En el caso del volumen, este fue determinado en 0.38 km³ para el año 1990 y para el año 2010 se tenía 0.32 km³, lo que representa 0.6 km³ (14.7%). Cabe mencionar que las estimaciones de volumen son aproximadas y normalmente tienen un margen de error de unos $\pm 30\%$. En particular, los coeficientes en la ecuación de Bahr et al (1997) deben ser ajustados a las condiciones de la región, además de que hay que considerar ciertas limitaciones conceptuales en relacionar volumen con área. Frey et al. (2014) ofrece una comparación de diferentes métodos de cálculo de volumen y encuentran que la ecuación de Bahr et al. (1997) sobreestima el volumen comparado con modelos que están basados en el cálculo del espesor de hielo.

En base de las estimación de volumen se pudo determinar una aproximación del caudal máximo equivalente (multiplicación del volumen por la densidad del agua, 0.9 gr/cm³) para cada periodo del que se cuentan los volúmenes. De los caudales equivalentes se observa que para el periodo comprendido entre el año 1995 y 2000 este llego a 116.8 l/s y para el periodo comprendido entre 2005 y 2010 a 95.5 l/s. Posiblemente el importante aporte comprendido entre 1995 y el año 2000 este fuertemente influenciado por el fenómeno El Niño de 1998, fenómeno en el cual las temperaturas en la región aumentan acelerando la fusión de los glaciares (Francou et al. 2004; Francou et al. 2003; Wagnon et al. 2001). Este cálculo considera el máximo que puede aportar el glaciar, pero no es disponible necesariamente ya que parte de la masa se pierde por sublimación o infiltración antes que salga del frente glaciar.

Tabla 2. Lista de imágenes de satélite usadas, áreas y volúmenes calculados y caudal equivalente en función del volumen perdido.

Satélite	Fecha	Área Perdida (km ²)	Perdida (%)	Volumen Perdida (km ³)	Perdida (%)	Volumen perdido (km ³)	Nº días	Caudal equivalente (l/s)
Landsat 5	18-Abr-90	3.66	0	0.38	0			
Landsat 5	22-Ago-95	3.60	1.6	0.37	2.2	0.0085	1952	45.2
Landsat 5	31-May-00	3.46	5.5	0.35	7.4	0.0196	1744	116.8
Landsat 5	29-May-05	3.39	7.4	0.34	10.0	0.0097	1824	55.2
Landsat 5	16-Sep-10	3.26	10.9	0.32	14.7	0.0178	1936	95.5

Fuente: Elaboración Propia

5.2. Análisis de Variables Climáticas

El análisis climático se hace importante debido a que esta región del Perú (incluso considerando la altitud) no ha sido muy evaluada, considerándose que no existen muchos datos climáticos dentro de la cordillera y algunos pocos existentes se encuentran en el valle del río Urubamba (dicho río nace en la cordillera Vilcanota) y sobre el nevado Quelcaya, el análisis se hace respecto a la información de la estación climática ubicada sobre el nevado Quisoquipina (ver datos disponibles). Respecto a los datos de temperatura del aire se cuenta con información desde setiembre del año 2011 hasta la actualidad, pero evaluándose desde mayo 2012 hasta abril del 2014 (mayo 2012-abril 2013; mayo 2013-abril 2014), se observa que en promedio la temperatura para el año 2013-14 fue mayor registrándose -0.66 °C en promedio y para el año 2012-13 fue de -0.71 °C, siendo el mes de noviembre el más cálido con 0.7 y 0.5°C respectivamente, por el contrario los meses más frío corresponden al mes de julio donde la temperatura para el año 2013-14 registro -2.8 °C en promedio y para el año 2012-13 fue de -2.5 °C, en la Tabla 3 se presentan estos resultados.

Tabla 3. Datos de Temperatura del aire a nivel mensual obtenidos sobre el glaciar Quisoquipina

	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	Promedio
	°C												
2012-13	-1.10	-2.40	-2.50	-2.20	-1.60	-0.50	0.70	0.10	0.00	0.40	0.70	-0.10	-0.71
2013-14	-0.70	-2.20	-2.80	-2.00	-1.30	-0.30	0.50	0.20	0.20	0.40	0.30	-0.20	-0.66

Fuente: Elaboración Propia

El análisis de distribución de la temperatura nivel diario (ver Figura 4) muestra que entre las 5:00 am y 7:00 am se tienen las temperaturas bajas del día siendo las frías para los meses de julio de los dos años, además que entre las 10:00am y 12:00am se registran las temperaturas más altas del día llegando a estar próximas a los 4°C, especialmente en el mes de noviembre para los dos años en estudio, pero también se observa que las temperaturas máximas para los meses más fríos sobrepasan ligeramente los 0°C y estas se ubican entre las 11:00 am a 1:00 pm. La comparación de los datos a nivel diario (calculados en base al registro medio tomado cada 30 minutos) con datos del reanálisis 1 de la NOAA a 500 hPa (5574 metros aproximadamente) muestra un coeficiente de determinación de 0.47 y a nivel mensual de 0.79, lo que significa que estos datos bajo una corrección pueden ser utilizados para la reconstitución de series más largas de temperatura.

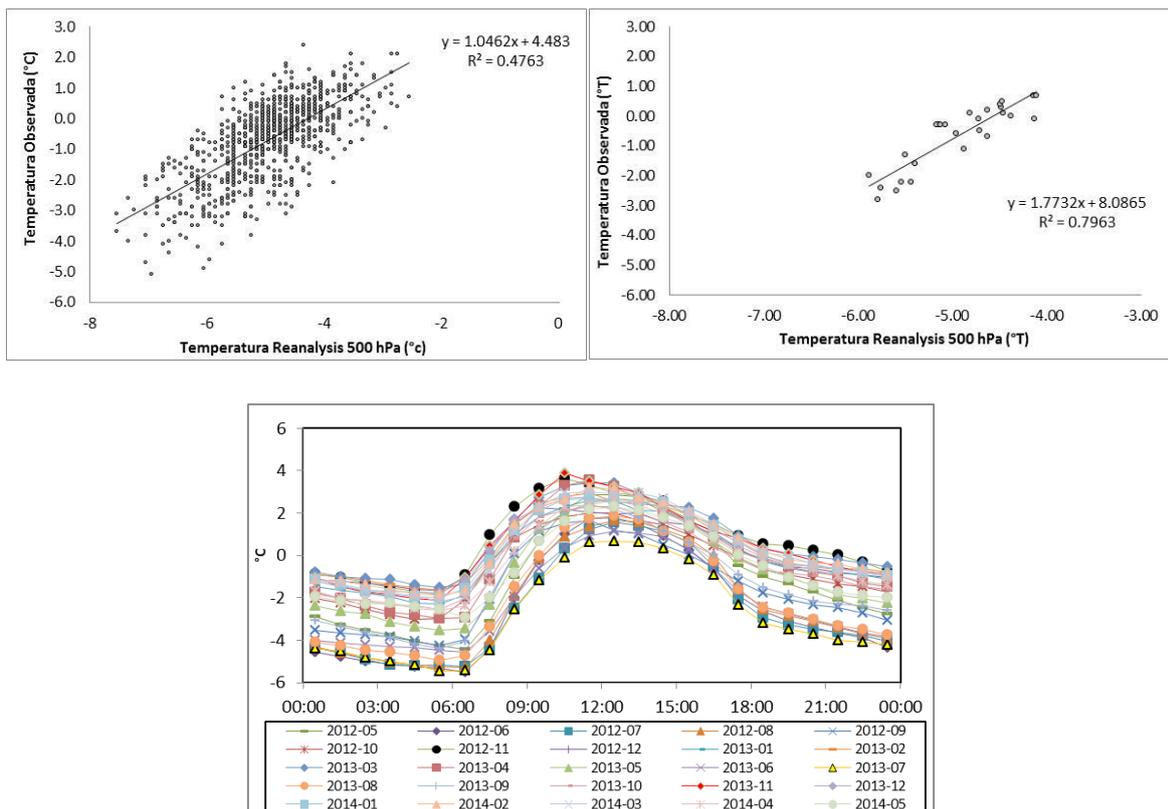


Figura. 4. Temperatura del aire observada sobre el glaciar Quisoquipina versus el reanálisis 1 (NCEP/NCAR 500hPa) a paso de tiempo diario (superior izquierda), temperatura del aire observada sobre el glaciar Quisoquipina versus el reanálisis a paso de tiempo mensual (superior derecha) y distribución diaria de la temperatura evaluada mes por mes (inferior).

Respecto al balance energético solo fue calculado los componentes del balance neto Q_n para posteriormente ser comparado con los resultados obtenidos por el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) de los glaciares Zongo y Antizana (Vincent et al., 2005) ubicados también en la región tropical y andina del planeta. Se consideró los mismos periodos de tiempo que los utilizados en la evaluación de la temperatura del aire, De la Tabla 4 se observa que la radiación incidente en onda corta (S_{\downarrow}) oscila entre 192 a 183 w/m^2 respectivamente y la reflejada (S_{\uparrow}) entre 114 a 118 w/m^2 , respecto a la radiación en onda larga (infrarroja) la incidente (L_{\downarrow}) fluctúa entre 277 w/m^2 y la emitida (L_{\uparrow}) entre 315 a 313 w/m^2 , dando un total de entre 66 a 79 w/m^2 para la balance neto en onda corta (S Net) y -37 a -34 w/m^2 para el balance neto en onda larga (L net), dicho valores al ser comparados con los datos de glaciar Zongo (glaciar en la Cordillera Real de Bolivia, aproximadamente a 350 kilómetros al sur del glaciar Quisoquipina) presentan cierta similitud, tanto para la S y L Net. Cuando se compara respecto al glaciar de Antizana (Ubicado en Ecuador, aproximadamente a 1700 kilómetros al norte del glaciar Quisoquipina) se observa que el S Net está en 123 w/m^2 es un valor mas alejado de los valores del Quisoquipina, pero la L Net si presenta un valor próximo al calculado al Quisoquipina. Respecto al Q sensible y Q Latente, estos no han sido medidos para el glaciar de Quisoquipina pero al observar que el balance neto del Zongo es muy parecido al Quisoquipina, posiblemente este tenga valores muy próximos, es importante destacar que los flujos turbulentos dependen del viento, temperatura del aire y humedad relativa, por tanto si ante la hipótesis que estas variables son similares entre el Zongo y Quisoquipina se puede asumir que Q sensible y Q Latente también. Sobre la Figura 5 se muestra los datos de los componentes del balance neto.

Tabla 4. Componentes del balance energético en los glaciares Quisoquipina, Zongo y Antizana

Glaciar	Latitud	Altitud (m)	Periodo	S_{\downarrow}	S_{\uparrow}	L_{\downarrow}	L_{\uparrow}	S Net	L Net	Q sensible	Q Latente	Referencia
									(W/m2)			
Quisoquipina	13°48'S	5180	2012-13	192	114	277	315	79	-37			
Quisoquipina	13°48'S	5180	2013-14	183	118	279	313	66	-34			
Zongo	16°S	5050	1999-00					72	-45	21	-31	Vincent et all, 2004
Antizana	0°28'S	4890	2002-03					123	-39	21	-27	Vincent et all, 2004

Fuente: Elaboración Propia

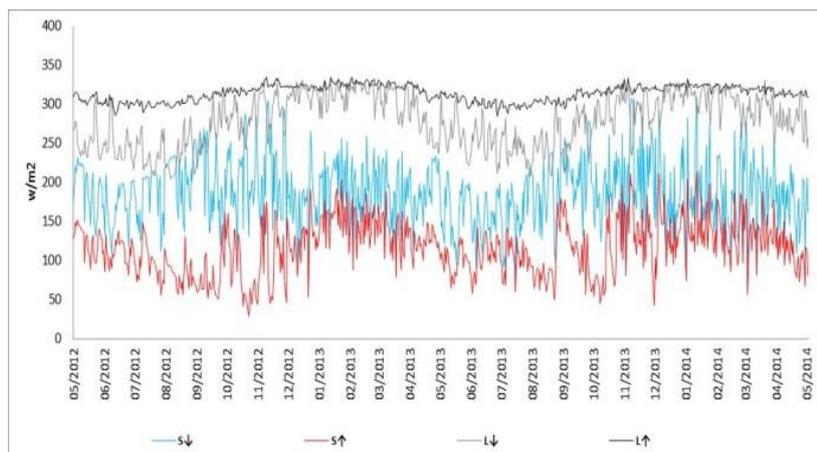


Figura. 5. Comparación de energía en onda corta incidente (S_{\downarrow}), corta reflejada (S_{\uparrow}), larga incidente (L_{\downarrow}) y larga emitida (L_{\uparrow}) sobre el glaciar Quisoquipina a paso de tiempo diario.

Un análisis a nivel mensual muestra que al igual que en el glaciar Zongo y Antizana, el Q_n y específicamente S_{Net} es dominante en los procesos de intercambio energético glaciar – atmosfera, siendo este mayor durante los meses de verano del hemisferio sur, Los flujos turbulentos de calor sensible (H) y calor latente (LE) son presentados para el Zongo y Antizana ; al evaluar en términos porcentuales sobre el glaciar Quisoquipina el flujo energético del balance neto, se observa que este es controlado principalmente por el S_{Net} , siendo más importante en los meses de noviembre a febrero (controlan entre el 60 a 80% del flujo energético de la radiación neta.

Al comparar en la Figura 7 el balance neto (Q_{net}) respecto al albedo se observa la fuerte dependencia de este último respecto al primero, considerando que el albedo está vinculado a la precipitación solida (nieve específicamente), se puede deducir el importante rol de este en la fusión del glaciar. De esta misma figura se observa que entre los meses de setiembre a diciembre el balance neto diario es más importante lo que significa que durante estos periodos el glaciar presenta su mayor ablación.

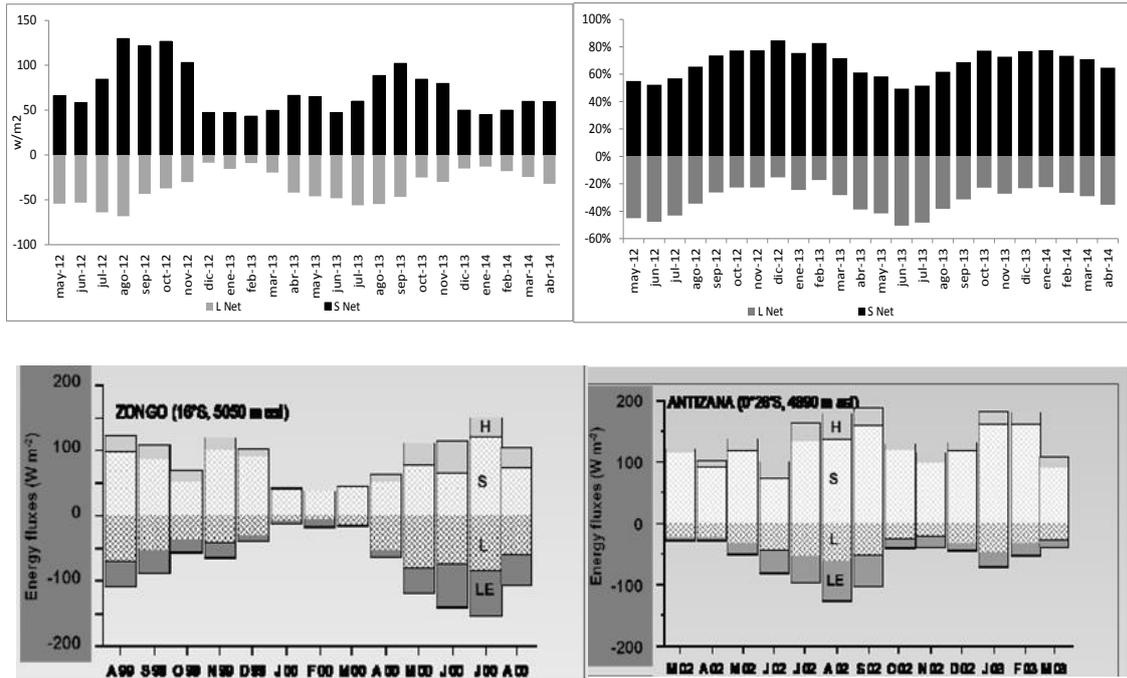


Figura. 6. Balance neto en onda corta (S Net) y onda larga (L Net) sobre el glaciar Quisoquipina (figura superior izquierda), Balance neto en onda corta (S Net) y onda larga (L Net) sobre el glaciar Quisoquipina expresado en porcentaje (figura superior derecha) donde el Balance neto total representa el 100%, balance energético sobre el glaciar Zongo (figura inferior izquierda) y balance energético sobre el glaciar Antizana (figura inferior derecha.), estos dos últimos tomados de Vincent et al. (2005),

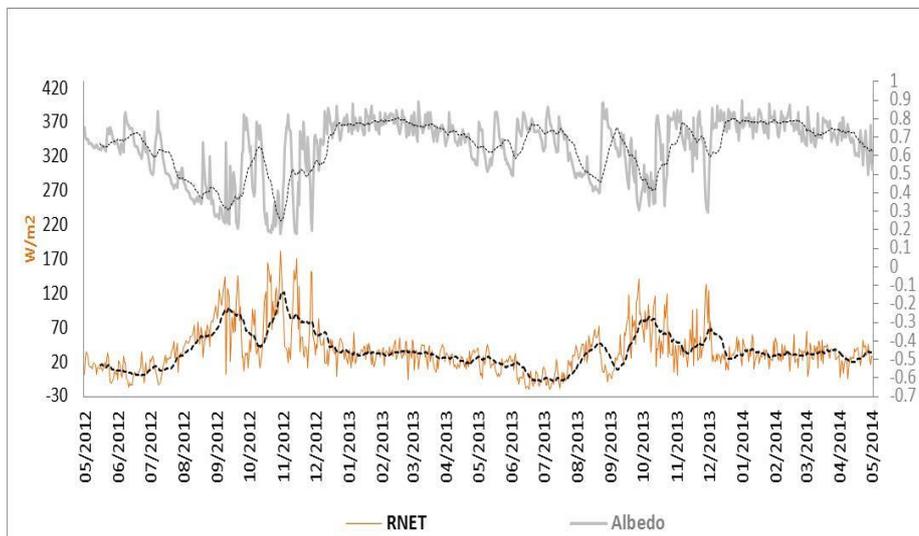


Figura. 7. Comparación entre el balance neto (Q net) y el albedo sobre el glaciar Quisoquipina a paso de tiempo diario.

VI. CONCLUSIONES

La evaluación del glaciar Quisoquipina muestra que al igual que otros glaciares tropicales del planeta está reduciendo su superficie, habiendo perdido 0.44 km² entre el año 1990 al 2010, esto representa en términos de equivalentes de agua entre 44 a 117 l/s que ha aportado (principalmente escorrentía superficial e infiltración). El estudio climático durante dos años mediante datos obtenidos sobre el glaciar Quisoquipina muestran que la radiación neta (evaluando solamente onda corta y larga) tiene un comportamiento similar al del glaciar Zongo (Cordillera Real) donde el factor dominante del balance neto de radiación es la energía en onda corta (balance en onda corta) el cual está fuertemente ligado al albedo, y por ende el rol importante que tiene la nieve en los procesos de ablación glaciar (a mayor albedo se da menor intercambio energético entre el glaciar y la atmosfera lo que se traduce en una menor tasa de ablación). Se puede concluir y confirmar que tanto la energía en onda corta y la precipitación solida son factores determinantes en la fusión de los glaciares ubicados en la parte sur de la región tropical del hemisferio sur. Aparentemente se deduce que el mayor aporte hídrico glaciar (por fusión) debería darse en los meses de setiembre a noviembre, debe entenderse que en los meses de enero a marzo puede tenerse mayores caudales en cuencas glaciares debido no solo al aporte del glaciar (sigue siendo menor al de setiembre- noviembre) sino también al de la precipitación liquida (en setiembre a noviembre recién está comenzando el periodo de lluvias).

La medición de datos meteorológicos en glaciares en el Perú representa un gran desafío, por un lado por las condiciones a esas alturas (temperaturas bajas, vientos fuertes, superficie variable), por otro lado por el difícil acceso. Los dos años de mediciones en el glaciar Quisoquipina nos entregan información valiosa para mejorar el conocimiento sobre mediciones meteorológicas en esas condiciones. Para futuros estudios habría que considerar algunos puntos importantes en respecto a la instalación de las estaciones meteorológicas, los instrumentos y al análisis de datos.

En primer lugar, en Quisoquipina, la temperatura del aire se mide con un instrumento no ventilado. Sin embargo, Georges y Kaser (2002) mostraron para la Cordillera Blanca que la diferencia entre mediciones de temperatura ventilada y no ventilada puede alcanzar 1.3 K en el día, debido a la radiación alta y bajos vientos. Para futuros estudios habría que considerar si el viento es suficiente para ventilar es instrumento suficientemente (constantemente sobre 3.5 m/s) y, si no es el caso, instalar un instrumento ventilado. Sin

un instrumento ventilado al lado de la estación, es difícil validar los datos medidos con un instrumento no ventilado y estimar la sobreestimación de la temperatura del aire.

Por otro lado, mediciones de radiación también tienen sus dificultades. El instrumento tiene que estar en dirección horizontal, lo que tratamos de cumplir con el método usado el estabilizador giroscópico. Por otro lado, un chequeo simple nos indica, si las mediciones de onda larga emitida son plausibles usando la fórmula de Stefan-Boltzmann. Como la superficie de hielo/nieve no puede superar los 0°C, podemos estimar la onda larga que corresponde a aquella. Concluimos que las mediciones no deben superar un valor de 316 Wm⁻². Si la medición supera este límite, hay una indicación que el instrumento no está horizontal o que habría que recalibrarlo.

VII. PERSPECTIVAS

Los primeros estudios del balance energético en base de la nueva estación meteorológica en el glaciar Quisoquipina representa un paso fundamental para un monitoreo y estudios más masivos en esta región que tiene importancia estratégica en términos de reservas de agua para la región de Cusco. Actualmente el SENAMHI está trabajando conjuntamente con la UNSAAC en el estudio del glaciar Quisoquipina, esperándose que para el verano del 2015 se comience a controlar los caudales generados por este glaciar, al igual que iniciar conjuntamente con la Autoridad Nacional del Agua (ANA) estudios de balance de masa que permitan a posteriormente implementar un modelo hidrológico, mediante el cual se podrá conocer los caudales futuros como también entender más los procesos de ablación que se tiene en la Cordillera Vilcanota.

7.1. Agradecimientos

Se a la Dirección Regional del SENAMHI en Cusco por mantener operativa la estación como también al proyecto PRAA financiado por el Banco Mundial e implementado por la Comunidad Andina (CAN), proyecto PACC y Helvetas Swiss Intercooperation, Proyecto Glaciares y CARE Perú, ambos proyectos financiados por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperacion (COSUDE), Universidad de Zurich (Cristian Huggel y Simone Schauwecker) , Meteodat (Mario Rohrer), IRD (Thomas Condom) de Francia, UNSAAC (Nicolás Macedo y Nilton Montoya) por apoyar este trabajo desde el año 2010.

VII. BIBLIOGRAFIA

- Autoridad Nacional del Agua. (2012). *Inventario de glaciares de las cordilleras vilcanota / carabaya* (Primera.). Huaraz - Perú.
- Bahr, D. B., Meier, M. F., & Peckham, S. D. (1997). The physical basis of glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B9), 20355–20362. doi:10.1029/97JB01696
- Brecher H., H., & Thompson G., L. (1993). Measurement of the retreat of Qori Kalis glacier in the tropical Andes of Peru by terrestrial photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59, 1017–1022.
- Burns, P., & Nolin, A. (2014). Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment*, 140, 165–178. doi:10.1016/j.rse.2013.08.026
- Chevallier, P., Pouyaud, B., Suarez, W., & Condom, T. (2011). Climate change threats to environment in the tropical Andes: Glaciers and water resources. *Regional Environmental Change*, 11(SUPPL. 1), 179–187.
- Francou, B., Vuille, M., Favier, V., & Cáceres, B. (2004). New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D18), D18106. doi:10.1029/2003JD004484
- Francou, B., Vuille, M., Wagnon, P., Mendoza, J., & Sicart, J.-E. (2003). Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D5), 4154. doi:10.1029/2002JD002959
- Frey, H., Machguth, H., Huss, M., Huggel, C., Bajracharya, S., Bolch, T., ... Stoffel, M. (2014). Estimating the volume of glaciers in the Himalayan–Karakoram region using different methods. *The Cryosphere*, 8(6), 2313–2333. doi:10.5194/tc-8-2313-2014
- Hidrandina S.A. (1989). *Inventario de Glaciares del Perú. 2da Parte*. Lima - Perú: CONCYTEC.

- Hock, R. (2005). Glacier melt: a review of processes and their modelling. *Progress in Physical Geography*, 29(3), 362–391.
- Juen, I., Kaser, G., & Georges, C. (2007). Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú). *Global and Planetary Change*, 59(1-4), 37–48. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.038
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., ... Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437–471. doi:10.1175/1520
- Kaser, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22(1–4), 93–103. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8181(99)00028-4
- Kaser, G., Fountain, A., & Jansson, P. (2003). *A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers by mountain glaciers* (IHP-VI., Vol. 2003). Paris.
- Kaser, G., Georges, C., Juen, I., Mölg, T., Wagnon, P., & Francou, B. (2004). The behavior of modern low-latitude glaciers. *Past Global Changes News*, 12(1), 150–017.
- Mark, B. G., & Helmens, K. F. (2005). Reconstruction of glacier equilibrium-line altitudes for the Last Glacial Maximum on the High Plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia: climatic and topographic implications. *Journal of Quaternary Science*, 20(7-8), 789–800. doi:10.1002/jqs.974
- Marzeion, B., Cogley, J. G., Richter, K., & Parkes, D. (2014). Attribution of global glacier mass loss to anthropogenic and natural causes. *Sciences*, 345(6199), 919 – 921.
- Pouyaud, B., Zapata, M., Yerren, J., Gomez, J., Rosas, G., Suarez, W., & Ribstein, P. (2005). On the future of the water resources from glacier melting in the Cordillera Blanca, Peru. *Hydrological Sciences*, 50(6), 999–1022. doi:10.1623/hysj.2005.50.6.999
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., ... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere*, 7(1), 81–102.

- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P., & Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *The Cryosphere*, 7(1), 103–118. doi:10.5194/tc-7-103-2013
- Sicart, J. E. (2005). Atmospheric controls of the heat balance of Zongo Glacier (16°S, Bolivia). *Journal of Geophysical Research*, 110(D12), D12106. doi:10.1029/2004JD005732
- Silverio, W., & Jaquet, J. M. (2005). Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95, 342–350. doi:10.1016/j.rse.2004.12.012
- Suarez, W., Chevallier, P., Pouyaud, B., & Lopez, P. (2008). Modelling the water balance in the glacierized Parón Lake basin (White Cordillera , Peru). *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 266–277. doi:10.1623/hysj.53.1.266
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Brecher, H., Davis, M., León, B., Les, D., ... Mountain, K. (2006). Abrupt tropical climate change: Past and present. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(28), 10536–10543. doi:10.1073/pnas.0603900103
- Vincent, C., Ribstein, P., Favier, V., Wagnon, P., Francou, B., Le Meur, E., & Six, D. (2005). Glacier fluctuations in the Alps and in the tropical Andes. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(1–2), 97–106. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2004.08.010
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., & Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4), 79–96. doi:10.1016/j.earscirev.2008.04.002
- Wagnon, P., Ribstein, P., Francou, B., & Sicart, J. E. (2001). Anomalous heat and mass budget of Glaciar Zongo, Bolivia, during the 1997/98 El Niño year. *Journal of Glaciology*.