

COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR EL BALANCE DE MASA DEL GLACIAR DE ZONGO, BOLIVIA (16° S, 68° O)

COMPARISON OF METHODS TO ESTIMATE THE GLACIER MASS BALANCE OF ZONGO GLACIER, BOLIVIA (S 16°, W 68°)

Álvaro Soruco¹, Christian Vincent², Bernard Francou³, Antoine Rabatel²

¹Universidad Mayor de San Andrés - UMSA, Instituto de Investigaciones Geológicas y del Medio Ambiente (IGEMA), La Paz, Bolivia.

²UJF-Grenoble 1/CNRS, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE), Grenoble, France.

³IRD / UJF-Grenoble 1/CNRS / Grenoble-INP, Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), Grenoble, France.

E-mail : alvaro.soruco@gmail.com

RESUMEN

La serie más larga y continua de mediciones de balance de masa en la Zona Intertropical de Sud América corresponden al glaciar de Zongo, Bolivia. Las mediciones fueron iniciadas en 1991, empleando tanto el método glaciológico como el hidrológico. Los resultados muestran discrepancias en los balances de masa obtenidos por ambos métodos. Con el objetivo de verificar estos balances de masa, se realizó un nuevo balance de masa mediante el método fotogramétrico, que fue comparado con los métodos glaciológico e hidrológico ya existentes. Los resultados de esta comparación entre balances de masa obtenidos con el método hidrológico y fotogramétrico son equivalentes, mientras que la comparación de los resultados obtenidos entre estos y el método glaciológico, están en desacuerdo. Esta diferencia, se atribuye a la imposibilidad de realizar mediciones adecuadas con el método glaciológico en las zonas de difícil acceso del glaciar de Zongo, las cuales son simplemente interpoladas en la estimación del balance de masa neto específico. Los resultados muestran, en general, que el glaciar Zongo ha estado muy cercano a un estado de equilibrio entre 1956 y 1963; ganó masa entre 1963 y 1975 de manera significativa (3.86 m eq. agua) y a partir de 1975, los balances de masa son negativos. Por otra parte, se han extendido las observaciones del balance de masa del glaciar de Zongo para los últimos 50 años (1956-2006).

Palabras claves: Glaciares Tropicales, Balance de masa, Glaciar de Zongo.

ABSTRACT

The longest and most continuous series of measurements of mass balance in the Intertropical Zone correspond to Zongo glacier, Bolivia. Measurements, which were initiated in 1991, were taken using both the hydrological and glaciological methods. Comparison of these results show discrepancies in the mass balances obtained. In order to verify the mass balances derived from both methods, a new mass balance was performed using the photogrammetric method, results of which were compared with the existing glaciological and hydrological methods. This comparison showed that the hydrological and photogrammetric methods are equivalent. However, these results disagree with the glaciological method. This difference is attributed to a lack of measurements using the glaciological method in areas of difficult access on Zongo glacier. In these areas, the glaciological method simply used interpolation to estimate the specific net mass balance. The final results of this three-method comparison show that the Zongo glacier maintained very close to a steady state of mass balance between 1956 and 1963 and then gained significant mass between 1963 and 1975 (3.86 m eq. aqua). After 1975, mass balances have been almost negative. Moreover, this research extended the range of mass balance observations on Zongo glacier to cover the past 50 years (1956-2006).

Keywords: Tropical Glaciers Mass Balance, Zongo Glacier.

INTRODUCCIÓN

El balance de masa del glaciar de Zongo es medido mensualmente empleando el método glaciológico (desde 1991) y el método hidrológico (desde 1974). En la aplicación de estos métodos, se han observado importantes

diferencias (Francou et al., 1995; Sicart et al., 2007), que de acuerdo con (Francou et al., 1995) se deben al rol de la sublimación del hielo, la cual no es considerada en el cálculo del balance de masa obtenido mediante el método hidrológico. Por el contrario, Sicart et al. (2007) estima que el valor de la sublimación es demasiado reducido para poder explicar tales diferencias y concluye que estas diferencias provienen de la medición de las precipitaciones (deficiencia de los pluviómetros en la recolección de precipitaciones sólidas), así como a la ausencia de mediciones de precipitación a gran altitud (>5300 m).

En ambos casos, los dos métodos no permiten determinar el balance de masa en forma precisa en la zona de acumulación del glaciar Zongo. Con el método glaciológico, la acumulación del glaciar de Zongo es obtenida simplemente llevando a cabo 2 o 3 pozos/perforaciones de nieve/hielo. Con el método hidrológico, no se disponen de mediciones de la precipitación por encima de los 5300 m.

Con el fin de comparar y de determinar el balance de masa en forma independiente de los métodos antes mencionados, nosotros hemos utilizado la fotogrametría aérea, método que ha sido ampliamente utilizado en la verificación/validación de series de balance de masa (Ribstein et al., 1999; Vincent, 2002; Bauder et al., 2007; Thibert et al., 2008).

Gracias a la aplicación de este método, hemos podido extender las series de mediciones a los últimos 50 años (1956-2006), dado que en Bolivia hay varios vuelos fotogramétricos desde la década del '50, constituyéndose de esta manera, en la serie de balance de masa más larga de la Cordillera de los Andes. Su aplicación ha permitido comparar los balances de masa del glaciar de Zongo obtenidos mediante el método glaciológico (1991-2006), mediante el método hidrológico (1974-2006) y mediante el método fotogramétrico (1956-2006).

LOCALIZACION Y CARACTERISTICAS

El glaciar de Zongo está localizado en el macizo del Huayna Potosí (Cordillera Real – Bolivia, 16° S – 68° O), a 30 km al norte de la ciudad de La Paz, entre la cuenca árida Altiplánica al Oeste y la cuenca húmeda Amazónica al Este (Figura 1).

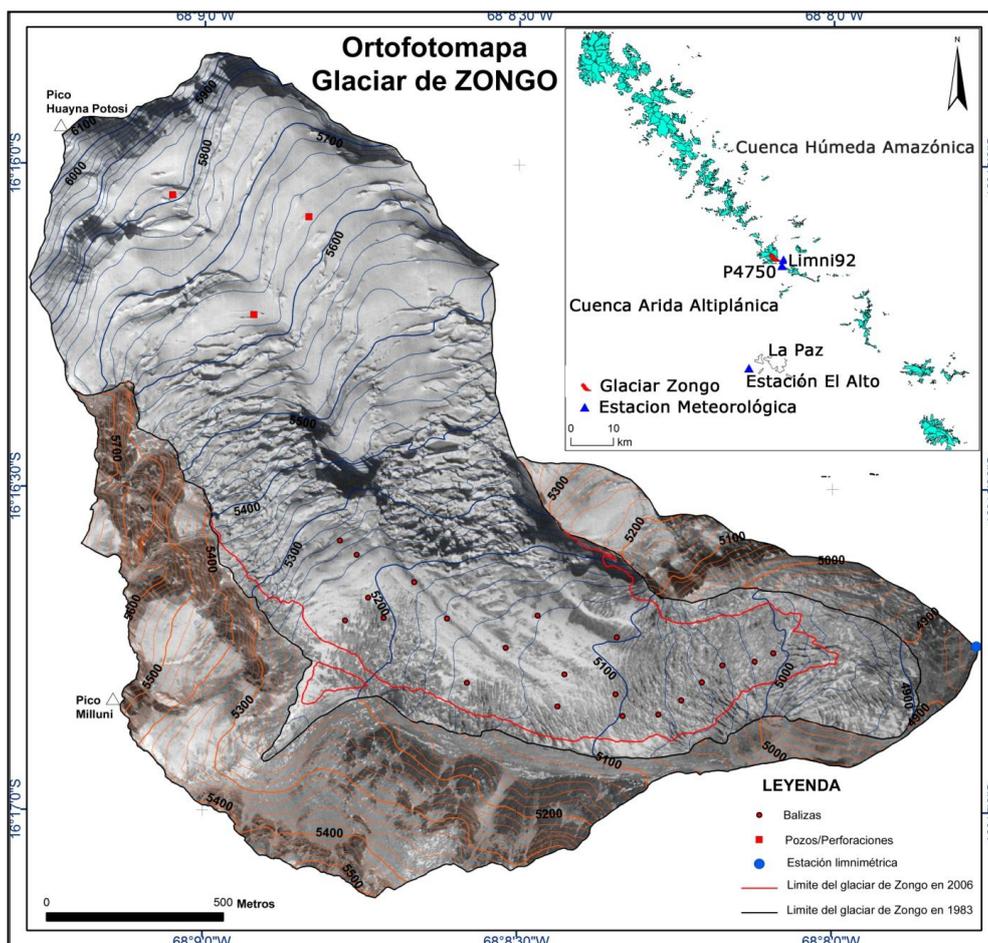


Figura 1. Localización del glaciar de ZONGO, Cordillera Real, La Paz–Bolivia (Ortofotomapa, vuelo IGM de 1983, Esc. 1:47000).

Figure 1. ZONGO Glacier location, Cordillera Real, La Paz - Bolivia (Orthophotomap constructed from the IGM 1983 flight, scale 1:47000)

El glaciar de Zongo es considerado como templado (Francou et al., 1995) y cubre un área de 1.96 km² situado sobre una cuenca hidrológica de 3.3 km². Aproximadamente su longitud corresponde a 3000 m y su ancho a 750 m. El glaciar fluye entre los 6100 m a los 4900 m s.n.m. La velocidad promedio del glaciar es de 20 m/año entre 4900 y 5200 m s.n.m.

La mayor cantidad de precipitaciones provienen de la cuenca Amazónica. Las condiciones meteorológicas generales en el cinturón intertropical han sido ampliamente analizadas por (Kaser et al., 1996; Kaser, 2001), quienes han distinguido dos regiones: (i) los trópicos internos, sin una estacionalidad marcada en las precipitaciones y (ii) los trópicos externos, con una marcada estacionalidad en las precipitaciones. Estas diferencias climatológicas tienen un fuerte impacto en los balances de masa superficiales de los glaciares de estas regiones. En los trópicos internos, tanto la acumulación como la ablación se producen a lo largo de todo el año hidrológico. En los trópicos externos, la acumulación y la ablación se producen fundamentalmente durante el verano austral. Durante el invierno austral, la fusión de hielo/nieve es reducida, mientras que la sublimación de hielo/nieve es importante (Kaser, 2001; Favier et al., 2004). El glaciar de Zongo está localizado en los trópicos externos (Wagnon et al., 1999; Favier et al., 2004). La figura 2 presenta los promedios mensuales de las precipitaciones (Pluviómetro P4750 a 4750 m s.n.m) entre 1971 y 2006, las temperaturas (Estación El Alto a 4000 m s.n.m) entre, 1968 y 2006 y los caudales (Estación Limni92 a 4850 m s.n.m) entre 1973 y 2006, todas estas mediciones son realizadas cercanas al glaciar de Zongo (Figura 1).

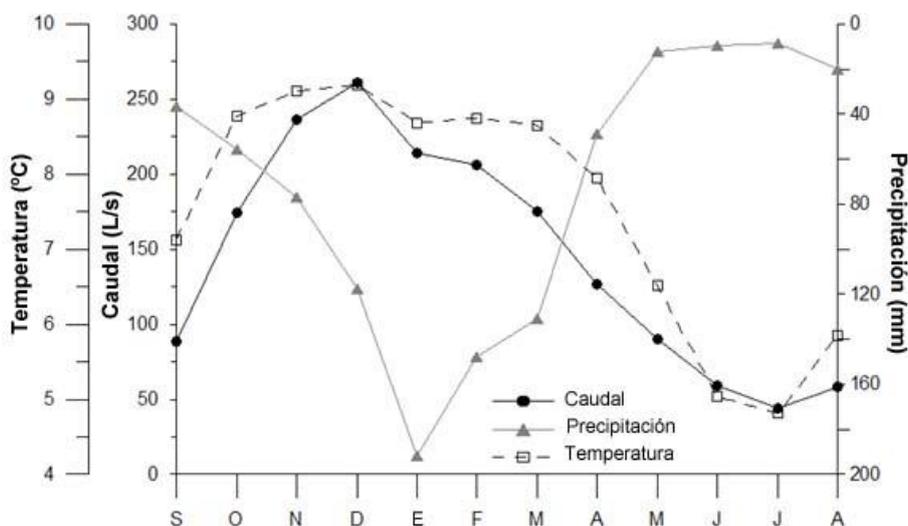


Figura 2. Precipitaciones, temperaturas y caudales promedios mensuales del área de estudio.
Figure 2. Average precipitation, temperature and flow measurement over the study area.

DATOS Y MÉTODOS

De acuerdo a las estaciones húmeda/seca en esta región, el año hidrológico ha sido establecido entre el 1º de Septiembre y el 31 de Agosto del siguiente año (Ribstein et al., 1995).

Método glaciológico

El método glaciológico estima la pérdida o ganancia de masa de un glaciar en un periodo de tiempo determinado a partir de mediciones de campo, balizas en la zona de ablación y pozos/perforaciones de nieve/hielo en la zona de acumulación. El balance de masa específico es obtenido empleando el método glaciológico tradicional (Paterson, 1994) (Ecuación 1):

$$\beta n_{glaciológico} = \int_{S_c} b_n dS + \int_{S_a} b_n dS + \quad (1)$$

Dónde:

- S = superficie del glaciar en m²
- S_c = superficie de la zona de acumulación del glaciar en m²
- S_a = superficie de la zona de ablación del glaciar en m²

Balances de masa anuales han sido obtenidos con este método, utilizando 14 balizas medidas mensualmente y 3 pozos/perforaciones de nieve/hielo medidos anualmente, estas mediciones pueden ser descargadas de internet (<http://glaciog.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/SiteWebAndes/index.htm>).

Las incertidumbres en la estimación del balance de masa por el método glaciológico han sido estimadas en ± 0.4 m eq. agua por año (Sicart et al., 2007).

Método hidrológico

El segundo método empleado en la determinación del balance de masa del glaciar de Zongo constituye el método hidrológico, el cual es obtenido a partir de la medición de la precipitación (P) (P en metros por año) y la medición del caudal (D) de fusión del glaciar (D en l/s) utilizando la ecuación de continuidad (Ecuación 2):

$$\beta n_{hidrol\ ógico} = P - 1/S_g [D - (S - S_g)C_e P] \quad (2)$$

Donde:

S_g = superficie del glaciar en m²

S = superficie de la cuenca hidrológica en m², y

C_e = coeficiente de escurrimiento de la superficie no cubierta por hielo

Las incertidumbres del método hidrológico sobre el glaciar de Zongo han sido ampliamente estimadas por (Sicart et al., 2007), quien no incluyó la sublimación, debido a que no existen mediciones regulares adecuadas para estos fines en la superficie del glaciar. Las únicas mediciones de sublimación sobre el glaciar de Zongo han sido efectuadas en periodos muy cortos (Wagnon, 1999; Sicart, 2002). La ablación por sublimación puede ser muy importante en los glaciares tropicales externos en época seca (Favier et al., 2004).

Método geodésico (fotogramétrico)

El tercer método utilizado en la determinación del balance de masa del glaciar de Zongo, corresponde al método cartográfico comúnmente conocido como el método volumétrico o geodésico. El balance de masa volumétrico es calculado a partir de la diferencia entre modelos de topografía superficial de un glaciar en dos o más épocas. Se emplean Modelos Digitales de Elevación (MDE), que pueden ser obtenidos mediante la digitalización de mapas topográficos escaneados, de las restituciones fotogramétricas aéreas, a partir de una estéreo correlación satelital automática, de datos topográficos (GPS o estaciones totales) o mediante datos LiDAR (Light Detection and Ranging, por sus siglas en inglés) aerotransportados o terrestres. Para la determinación del balance de masa volumétrico entre dos MDE, es necesario conocer la topografía superficial del estado inicial del glaciar (Z₁), así como la del estado final (Z₂) y la función de la densidad. Debido a que no se conoce la función de densidad sobre el glaciar de Zongo se debe aplicar la ley de Sorge's (se asume una densidad constante sobre toda la superficie del glaciar, igual a 0.9 g/cm³ correspondiente a la densidad del hielo) (Bader, 1954), como ha sido ampliamente descrita por Thibert et al [2008]. La ecuación para la variación de masa de un glaciar puede escribirse de la siguiente manera (Thibert et al., 2008) (Ecuación 3):

$$\Delta m_{vol} = m_2 - m_1 = \iint_{S1 \cup S2} \left[\int_{Z_1(x,y)}^{Z_2(x,y)} \rho(x,y,z) dz \right] dx dy \quad (3)$$

Donde: Δm_{vol} representa la variación de masa, ρ a la densidad, S1 al estadio inicial y S2 al estadio final. Finalmente el balance de masa neto volumétrico se obtiene dividiendo la variación de masa (Δm_{vol}) por la superficie promedio (S_m) del glaciar entre la dos épocas (Thibert et al., 2008) (Ecuación 4):

$$b_{vol} = \frac{\Delta m_{vol}}{S_m} = \frac{\rho}{S_m} \sum_{i=1}^Q \Delta h_j S_{grid} \quad (4)$$

Donde: Q es el número de pixeles de la grilla, Δh_j es la variación de altura de cada píxel j y S_{grid} es la superficie de cada píxel de la grilla de restitución (grilla de remuestreo de la interpolación).

RESULTADOS

Serie de balance de masa con el método glaciológico

En la serie de balance de masa obtenida mediante el método glaciológico sobre el Glaciar de Zongo, se han constatado dos errores sistemáticos en los cálculos. El primer error concierne la superficie de integración del balance de masa. En efecto, en los cálculos precedentes una superficie constante (estado del glaciar en 1983) ha

sido utilizada en la determinación del balance de masa del glaciar (este error también fue efectuado en la determinación del balance de masa obtenido mediante el método hidrológico). Por lo tanto, los cálculos del balance de masa del glaciar de Zongo han sido efectuados sobre una superficie constante, lo que es contradictorio con nuestras observaciones fotogramétricas (Figura 3). Este error conduce a una sobreestimación del balance de masa en 0.11 m eq. agua por año durante el periodo de 1991 al 2006 (balance promedio -0.34 m eq. agua /año). El segundo error, tiene que ver con la medición de la ablación mediante balizas. En efecto, hasta el año 2000, el espesor de las capas de nieve al pie de las balizas de ablación no era medido, simplemente la emergencia de las balizas era tomada en cuenta. Por lo tanto, otro error sistemático fue constatado, ya que la capa de nieve eventualmente presente al final del año hidrológico (septiembre) era transformada en m eq. agua utilizando la densidad del hielo. Este error, puede conducir a una variación del balance de masa anual equivalente en 0.23 m eq. agua /año sobre el balance de masa anual. Debido a estos 2 problemas, se recalcularon los balances de masa glaciológicos del glaciar de Zongo para los ciclos comprendidos entre 1991 y 2006. El primer error fue corregido tomando en cuenta la disminución de las superficies, obtenida mediante las mediciones fotogramétricas, y considerando una disminución lineal en los tramos altitudinales entre 2 periodos de mediciones fotogramétricas, en otras palabras, a medida que el glaciar pierde masa, el volumen del hielo disminuye en el frente del glaciar y por lo tanto, los rangos altitudinales de interpolación también van cambiando (Figura 3). El segundo error fue corregido considerando que si el balance de masa mensual era positivo de una medición a la sucesiva, una capa de nieve estaba presente sobre la superficie del glaciar, este espesor de nieve fue transformado utilizando una densidad de nieve igual a 0.4 g/cm^3 (densidad de la nieve relativa al agua igual a 400 kg m^{-3}). La Tabla 1 presenta los resultados obtenidos para la serie de balance de masa obtenida mediante el método glaciológico sobre el Glaciar de Zongo.

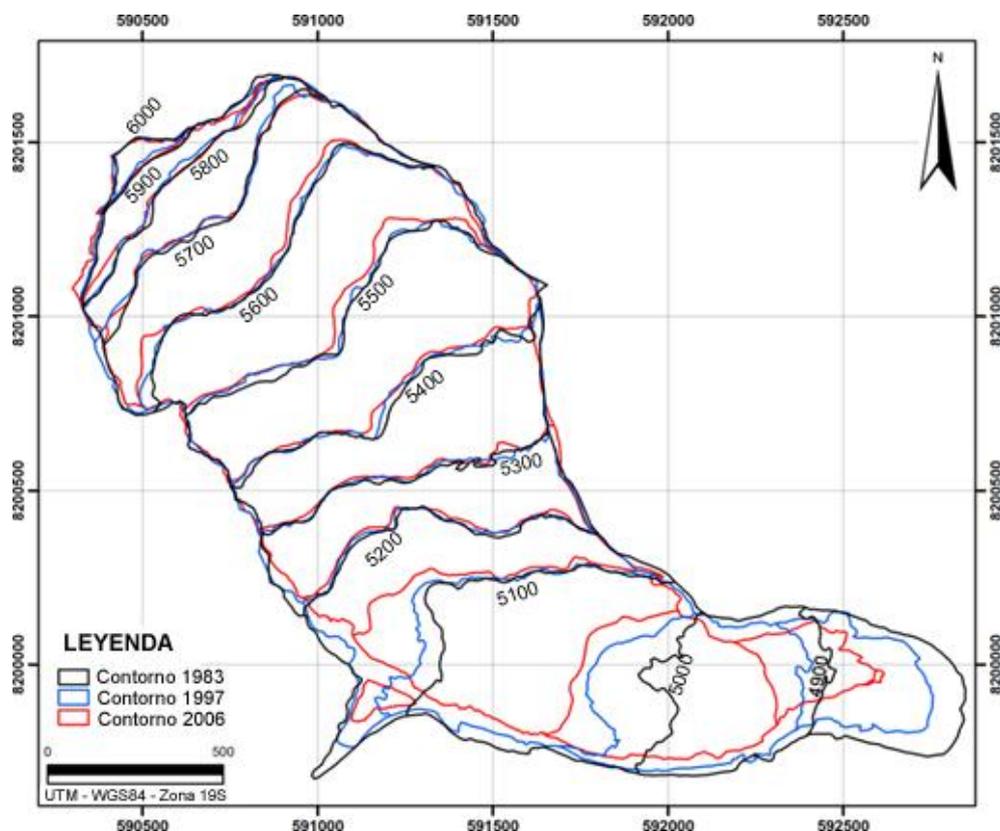


Figura 3. Comparación de la hipsometría del glaciar de Zongo para los años de 1983, 1997 y 2006.
Figure 3. Hypsometry comparison of Zongo glacier for 1983, 1997 and 2006.

Serie de balance de masa con el método hidrológico

En la serie de balance de masa obtenida mediante el método hidrológico sobre el Glaciar de Zongo, nosotros se recalcularon los balances de masa del glaciar de Zongo estimando la sublimación, empleando datos de re-análisis (Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001) y considerando una reducción lineal de la superficie del glaciar (mismo problema identificado para los cálculos empleando el método glaciológico) (Figura 3). La precipitación y los caudales en el glaciar de Zongo han sido medidos en 2 periodos. De 1973 a 1991, la precipitación (pluviómetro

P4750, a 4750 m.s.n.m., a 1km de distancia del frente del glaciar y un área abierta de 314 cm²) y los caudales han sido medidos por la COBEE (Compañía Boliviana de Energía Eléctrica, por sus siglas en español) dos veces al día (a las 07h00 y a las 15h00). Cuando el programa glaciológico se inició en 1991, se instaló una red de 5 pluviómetros totalizadores (área abierta de 2000 cm²) alrededor de la zona de ablación del glaciar (medición mensual). La comparación entre los datos de P4750 y los de la red de los 5 pluviómetros totalizadores muestra que el pluviómetro P4750 subestima en 20% la precipitación alrededor del glaciar (Francou et al., 1995) y en 29% la precipitación sobre el glaciar (Sicart et al., 2007). Mediciones adicionales de la precipitación, obtenidas mediante un pluviómetro Geonor (pluviómetro especial para captar precipitaciones solidas) instalado en el 2003, muestran que el pluviómetro P4750 subestima la precipitación en 37%. Por consiguiente, para estimar el balance de masa hidrológico del glaciar de Zongo, nosotros hemos utilizado los valores de P4750 entre 1973 y 2006 con una corrección positiva de 37% (según comparación con el Geonor). En los cálculos se utilizó el coeficiente de escurrimiento (razón entre los caudales y las precipitaciones en áreas no cubiertas por hielo), $ce = 0.8$ previamente determinado por (Ribstein et al., 1995). Los caudales han sido deducidos de mediciones de escalas hidrométricas realizadas desde 1973 a 1991 por COBEE y mediante una estación automática entre 1991 y 2006. La Tabla 1 presenta los resultados obtenidos para la serie de balance de masa obtenida mediante el método hidrológico sobre el Glaciar de Zongo.

Serie de balance de masa con el método geodésico

En Bolivia, han sido realizados por el Instituto Geográfico Militar (IGM, Bolivia) y el Servicio Nacional de Aerofotogrametría (SNA, Bolivia), seis vuelos Aerofotogramétricos, en los años 1956, 1963, 1975, 1983, 1997 y 2006. Todos los negativos de estas fotografías fueron escaneados utilizando un escáner fotogramétrico (Vexcel UltraScan 5000) con una resolución de 14 μm . En el año 2006, con el objetivo de orientar las fotografías, se llevaron a cabo campañas de estéreo preparación para la medición de puntos de control mediante un GPS Diferencial L1 (ASHTECH - Magellan ProMark 2), con una línea base inferior a los 20 km y con un mínimo de 1 hora de lectura para cada punto de medición. Los pares estereoscópicos de cada vuelo fotogramétrico han sido triangulados utilizando un mínimo de 25 puntos de enlace (Tie points, por sus siglas en ingles) y 10 puntos de control (GCPs por sus siglas en ingles). La restitución fotogramétrica fue llevada a cabo utilizando el software Leica Photogrammetry Suite (LPS), empleando grillas irregulares, cada 20m en regiones planas y cada 5m en regiones con pendientes fuertes. Aproximadamente 10000 puntos fueron medidos para cada vuelo fotogramétrico (área promedio del glaciar entre 1956 y 2006 igual a 2.2 km²). Los MDE fueron construidos utilizando el software Surfer, con una grilla de interpolación de 10x10 m y empleando el algoritmo de mínima curvatura. La substracción entre los diferentes MDE obtenidos de cada vuelo fotogramétrico fue transformada en equivalente agua utilizando la densidad del hielo igual a 900 kg m⁻³. La Tabla 1 presenta los resultados obtenidos para la serie de balance de masa obtenida mediante el método geodésico sobre el Glaciar de Zongo.

ANÁLISIS DE LOS DATOS

Comparación de métodos

Mediante el método geodésico fue posible obtener el balance de masa acumulado del glaciar de Zongo para los últimos 50 años gracias a los resultados de las mediciones fotogramétricas (Tabla 1 y Figura 4).

Durante el primer periodo (1956-1963), los cambios volumétricos son pequeños, mientras que durante el segundo periodo (1963-1975), podemos observar un balance de masa positivo en la parte alta del glaciar. Desde 1975 al 2006 se observa un importante cambio de volumen del glaciar en su zona de ablación. De manera global, desde 1956 al 2006, se puede observar una pérdida de volumen gradual del glaciar en su zona de ablación, y de manera opuesta, casi no se observan cambios en el mismo periodo en la parte alta o de acumulación del glaciar.

La Tabla 1 presenta, los resultados de la serie de balance de masa acumulada obtenida con el método glaciológico (-9.42 m eq. agua), hidrológico (-16.87 m eq. agua) y geodésico (-16.32 m eq. agua), sobre el Glaciar de Zongo. La diferencia entre el balance glaciológico y el hidrológico es igual a 44%, la diferencia entre el glaciológico y geodésico corresponde a 42%, y la diferencia entre el hidrológico y el geodésico corresponde a 3%.

Los balances acumulados entre el método hidrológico y glaciológico discrepan en 7.4 m eq. agua entre 1991-1992 y 2005-2006. Para llevar a cabo este análisis se han calculado los balances de masa específicos centrados (extracción del valor promedio para cada serie), tanto para la serie glaciológica como para la serie hidrológica (Figura 5).

En la Figura 5 se observa, que ambos métodos concuerdan de manera satisfactoria para el conjunto de las observaciones, con la excepción del año hidrológico 1999. El coeficiente de correlación entre estas 2 series corresponde a $r^2=0.80$, lo cual muestra que las mediciones realizadas en el glaciar de Zongo empleando el método hidrológico y el método glaciológico son consistentes y que las correcciones que fueron realizadas con respecto a

las áreas para ambos métodos también son consistentes. Sin embargo, la diferencia entre los valores promedio para la serie del método glaciológico y del método hidrológico continúa. Nosotros suponemos que esta discrepancia proviene de la red de muestreo del balance glaciológico en la zona de ablación y acumulación del glaciar. Podemos concluir que los sitios donde se realizan las mediciones sobre el glaciar no son representativos de la superficie total del glaciar y que la interpolación lineal de Liboutry (1974) que se realiza entre las regiones sin ninguna observación (entre 5250 m y 5550 m), no es válida para determinar el balance de masa específico global del glaciar.

Periodo	Balance de Masa Glaciológico [m eq.agua]	Balance de Masa Glaciológico Acumulado [m eq.agua]	Balance de Masa Hidrológico [m eq.agua]	Balance de Masa Hidrológico Acumulado [m eq.agua]	Balance de Masa Glaciológico CORREGIDO [m eq.agua]	Balance de Masa Glaciológico CORREGIDO Acumulado [m eq.agua]	Periodo	Balance de Masa Fotogramétrico Acumulado [m eq.agua]
1973-74			3.60	3.60				
1974-75			0.76	4.35				
1975-76			0.00	4.35				
1976-77			-1.11	3.24			1956-1963	0.90
1977-78			-0.52	2.72				
1978-79			-0.39	2.33				
1979-80			-1.08	1.25				
1980-81			-1.09	0.16				
1981-82			-0.93	-0.77				
1982-83			-2.29	-3.06			1963-1975	3.86
1983-84			-0.73	-3.78				
1984-85			-0.08	-3.86				
1985-86			2.20	-1.66				
1986-87			-0.48	-2.14				
1987-88			-0.89	-3.02				
1988-89			-1.25	-4.27			1975-1983	-3.45
1989-90			-1.07	-5.34				
1990-91			-0.45	-5.78				
1991-92	-1.17	-6.95	-1.34	-7.13				
1992-93	0.43	-6.52	0.14	-6.99				
1993-94	-0.33	-6.85	-0.08	-7.07				
1994-95	-0.78	-7.63	-0.98	-8.05				
1995-96	-0.56	-8.19	-0.99	-9.04			1983-1997	-8.81
1996-97	0.58	-7.61	0.00	-9.03				
1997-98	-1.79	-9.40	-2.55	-11.58	-2.42	-11.45		
1998-99	-0.26	-9.66	-2.13	-13.71	-0.90	-12.35		
1999-00	0.29	-9.37	-0.45	-14.16	-0.34	-12.69		
2000-01	0.84	-8.53	-0.08	-14.24	0.21	-12.48		
2001-02	0.15	-8.38	-0.73	-14.97	-0.48	-12.97		
2002-03	-0.04	-8.41	-0.09	-15.06	-0.67	-13.64	1997-2006	-16.32
2003-04	-0.20	-8.61	-0.49	-15.55	-0.84	-14.47		
2004-05	-1.06	-9.67	-1.14	-16.69	-1.69	-16.17		
2005-06	0.25	-9.42	-0.18	-16.87	-0.38	-16.55		

Tabla 1. Balance de masa sobre el glaciar de Zongo (m eq. agua) obtenido mediante el método glaciológico (columnas 2 y 3), hidrológico (columnas 4 y 5) y geodésico (columna 9). Las columnas 6 y 7 presentan el balance de masa obtenido mediante el método glaciológico y corregido mediante el método geodésico.

Table 1. Mass balance of Zongo glacier (m w. eq.) obtained from the glaciological method (columns 2 and 3), hydrological method (columns 4 and 5), and geodetic method (column 9) Columns 6 and 7 show the mass balance obtained by the glaciological method and corrected by the geodetic method.

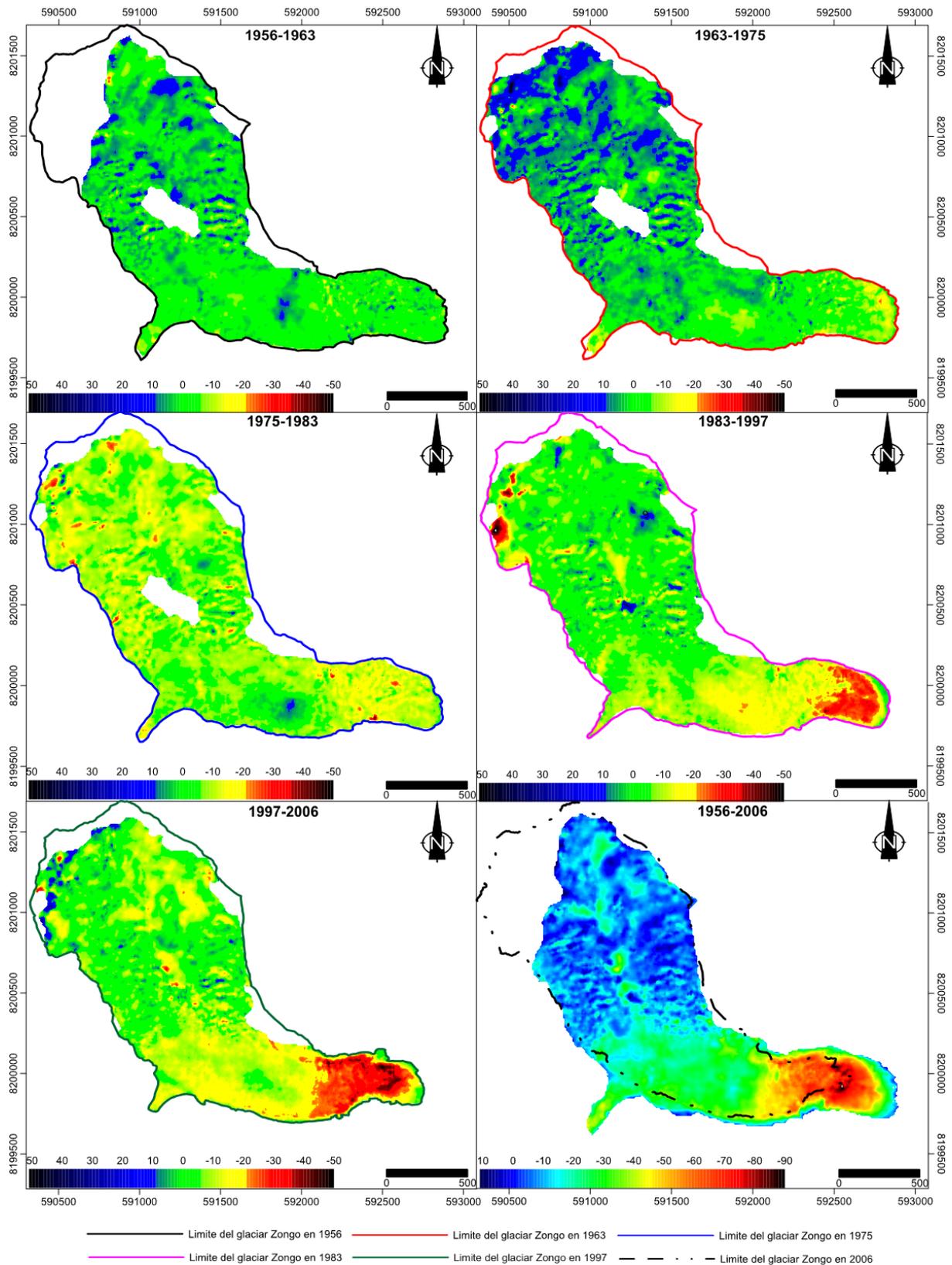


Figura 4. Variaciones de espesor (m de hielo) del glaciar de Zongo durante los periodos 1956-1963, 1963-1975, 1975-1983, 1983-1997, 1997-2006 y 1956-2006. La escala de colores es la misma para cada gráfico con la excepción del último gráfico (1956-2006). Todos los mapas se encuentran en el sistema UTM- WGS84, zona 19 Sur.

Figure 4. Thickness variations (m of ice) on Zongo glacier during the periods 1956-1963, 1963-1975, 1975-1983, 1983-1997, 1997-2006 and 1956-2006. The color scale is the same for each graph with the exception of the last graph (1956-2006). All maps are in UTM-WGS84, Zone 19 South.

Consecuentemente, para determinar el balance de masa específico del glaciar de Zongo empleando el método glaciológico, se debe realizar un ajuste de acuerdo a los valores provenientes de un muestreo total de la superficie del glaciar (método fotogramétrico). En este caso, los valores obtenidos mediante el método glaciológico solamente pueden ser corregidos para el periodo de 1997-2006, porque no hay más vuelos fotogramétricos en el periodo de medición con el método glaciológico. En este sentido se ha adicionado un valor constante de 0.633 m.eq.agua a cada año de la serie glaciológica entre 1997-1998 y 2005-2006 para corregir el balance de masa glaciológico. Este valor fue obtenido en función a la diferencia entre el balance de masa acumulado entre el método glaciológico y fotogramétrico (-5.7 m eq. agua) y dividido entre los periodos de observación (9 años entre 1997 y 2006).

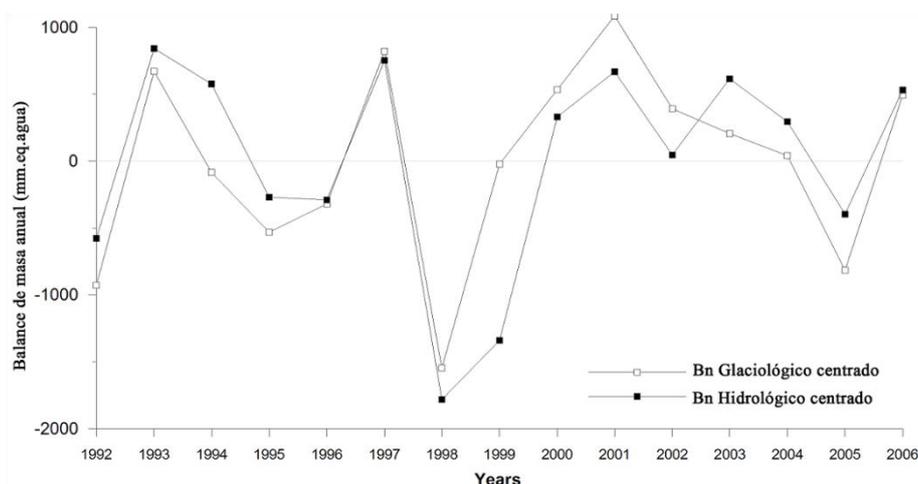


Figura 5. Comparación entre los balances de masa centrados obtenidos mediante el método glaciológico (cuadrados blancos) y el método hidrológico (cuadrados negros).
Figure 5. Comparison of centered mass balances obtained by the glaciological method (white squares) and the hydrological method (black squares).

Los balances de masa acumulados del glaciar de Zongo obtenidos para los últimos 50 años empleando el método fotogramétrico, el método hidrológico y el método glaciológico (datos corregidos empleando las mediciones fotogramétricas) son graficados en la Figura 6. Esta figura revela una excelente concordancia entre el método fotogramétrico y el método hidrológico entre 1975 y 2006. Sin embargo, se muestra importantes discrepancias entre los métodos hidrológico/fotogramétrico con el método glaciológico en el periodo de mediciones comunes (1991-2006 entre los métodos hidrológico y glaciológico; 1997-2006 entre los métodos fotogramétrico y glaciológico) (Tabla 1).

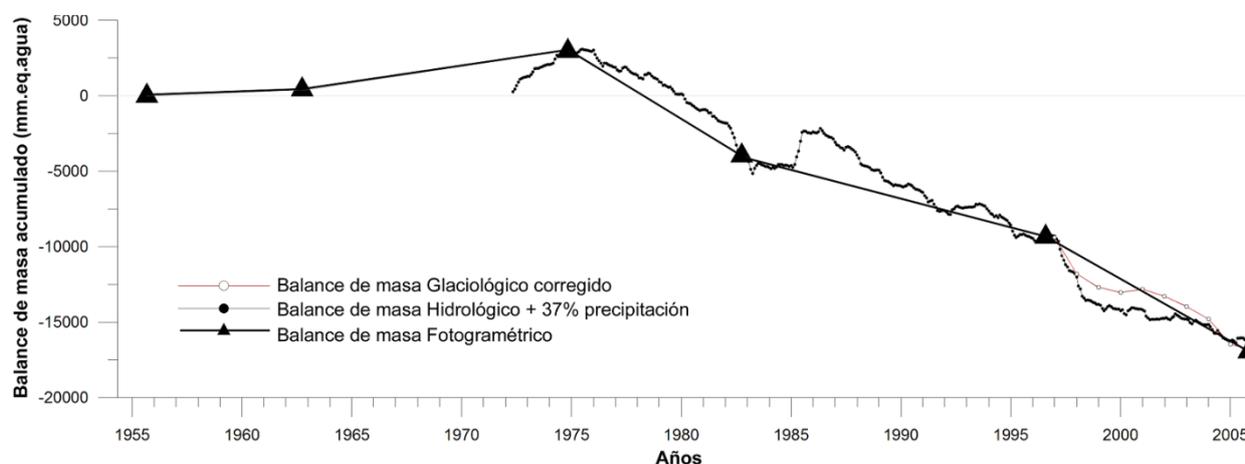


Figura 6. Balances de masa acumulados del glaciar de Zongo (mm.eq.agua) calculados a partir del método geodésico (triángulos negros y línea gris), del método hidrológico (círculos negros y línea negra) y del método glaciológico corregido (círculos blancos y línea roja).
Figure 6. Cumulative mass balance of Zongo glacier (mm.w.eq) calculated from the geodetic method (black triangles and black line), the hydrological method (black circles) and the corrected glaciological method (white circles and red line).

Finalmente se ha llevado a cabo un análisis de los errores de las mediciones fotogramétricas empleando el método de (Thibert et al., 2008) (Tabla 2). El error total obtenido mediante el método fotogramétrico para el periodo comprendido entre 1956 y 2006 corresponde a 1.96 m eq. agua. El error que existe o se comete en la aplicación del método hidrológico es muy difícil de estimar con precisión. Sin embargo (Sicart et al., 2007) llevó a cabo un análisis de sensibilidad de todas las variables comprendidas en el método hidrológico (con excepción de la sublimación, ya que en los estudios precedentes esta no era tomada en cuenta). Sin embargo de una manera simplificada se puede indicar que las incertidumbres del método hidrológico provienen esencialmente de la falta de mediciones de precipitación en la parte alta del glaciar. Por lo tanto, se asume que el error de los valores del balance de masa hidrológico anual corresponden a 0.3 m eq. agua /año, lo cual equivale a un error global de 1.67 m eq. agua durante el periodo de 1975 a 2006. Por lo tanto, la excelente concordancia entre los valores acumulados del método hidrológico y los valores acumulados del método fotogramétrico confirman que los datos obtenidos en el glaciar de Zongo son consistentes. Por consiguiente, realizar evaluaciones de la variabilidad climática y los efectos del cambio climático sobre este glaciar sería conveniente.

	Método Geodésico					
	1956	1963	1975	1983	1997	2006
errores aleatorios						
rugosidad de la superficie para un punto, σ_{rgh} (m)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
error estereoscópico en planimetría, $\sigma_{\text{stereo.xy}}$ (m)	1.58	1.21	2.69	2.04	2.01	1.38
error estereoscópico en altimetría, $\sigma_{\text{stereo.z}}$ (m)	1.65	1.21	3.01	2.89	2.24	3.5
error interno altimétrico, σ_z^i (m)	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03
residuales de la orientación, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ (m)	0.55	0.75	0.92	0.75	0.72	0.45
	0.40	0.67	0.56	0.97	0.71	0.48
	0.78	0.39	0.69	0.65	0.67	0.43
incertidumbre sobre la densidad del hielo, $\sigma_{\rho 1956-2006}$ (kg/m^3)	100	100	100	100	100	100
error altimétrico debido a los residuales de la orientación, $\sigma_{a.o}$ (m)	0.8	0.48	0.75	0.73	0.72	0.47
Error entre los MDE (m)	1956-1963	1963-1975	1975-1983	1983-1997	1997-2006	1956-2006
	0.69	1.06	1.53	1.35	1.66	1.96

Tabla 2. Análisis de los errores del método geodésico empleando la metodología de Thibert et al., (2008).
Table 2. Error analysis method using geodetic methodology Thibert et al., (2008).

CONCLUSIONES

Los resultados de los balances de masa acumulados que se han obtenido sobre este glaciar para los últimos cincuenta años son únicos en esta región del planeta.

Los balances de masa obtenidos mediante el método hidrológico y el método fotogramétrico concuerdan de manera satisfactoria. Sin embargo, se ha podido evidenciar una asimetría importante en los valores obtenidos mediante el método glaciológico y los valores obtenidos con el método hidrológico y el método fotogramétrico. Probablemente esta asimetría proviene del hecho que muchos sectores del glaciar de difícil acceso (entre 5250 m y 5550 m) no pueden ser medidos directamente por el método glaciológico (son simplemente interpolados). Por lo tanto los valores obtenidos mediante el método glaciológico fueron corregidos para el periodo comprendido entre 1997-2006, empleando una constante (variación entre el método glaciológico y geodésico entre 1997 y 2006), igual a 0.63 m eq. agua /año. Los valores centrados entre el balance de masa glaciológico e hidrológico presentan un coeficiente de correlación de $r^2=0.80$. Lo cual demuestra que los tres métodos de monitoreo glaciológico llevados a cabo sobre el glaciar de Zongo son consistentes.

De manera global, el balance de masa del glaciar de Zongo ha estado muy cercano a un estadio de equilibrio entre 1956 y 1963. Entre 1963 y 1975, se observó que el glaciar ganó masa de manera significativa. A partir de 1975, se observó que los balances de masa sobre el glaciar de Zongo fueron negativos.

Agradecimientos: El programa glaciológico GREATICE es patrocinado por el Instituto de Investigaciones para el Desarrollo (IRD-France) y por el programa Francés ORE-GLACIOCLIM (<http://www-igge.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/index.htm>). Nosotros agradecemos la asistencia del IGEMA (Instituto de Geología y del

Medio Ambiente, UMSA-Bolivia) y del IHH (Instituto de Hidráulica e Hidrología, UMSA-Bolivia) y de COBEE (Compañía Boliviana de Energía Eléctrica) en La Paz. Finalmente deseamos agradecer a los revisores anónimos que han mejorado sustancialmente la calidad del artículo.

REFERENCIAS

- Bader, H., (1954). Sorge's Law of densification of snow on high polar glaciers. *Journal of Glaciology*, 2 (15): 319-323.
- Bauder, A., Funk, M., Huss, M., (2007). Ice-volume changes of selected glaciers in the Swiss Alps since the end of the 19th century. *Annals of Glaciology*, 46: 145-149.
- Favier, V., Wagnon, P., Ribstein, P., (2004). Glaciers of the outer and inner tropics: A different behaviour but a common response to climatic forcing. *Geophysical Research Letters*, 31:(L16403).
- Francou, B., Ribstein, P., Saravia, R., Tiriau, E., (1995). Monthly balance and water discharge of an inter-tropical glacier: Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16°S. *Journal of Glaciology*, 41 (137): 61-67.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., Joseph, D., (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77 (3): 437-471.
- Kaser, G. (2001), Glacier-climate interaction at low latitudes, *Journal of Glaciology*, 47 (157): 195-204.
- Kaser, G., Hastenrath, S., Ames, A., (1996), Mass balance profiles on tropical glaciers. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 32: 75-81.
- Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., Dool, H., Jenne, R., Fiorino, M., (2001). The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82 (2): 247-267.
- Paterson, W.S.B., (1994), *The physics of glaciers*, 3 ed., 480 p. Pergamon, New York - USA.
- Ribstein, P., Tiriau, E., Francou, B., Saravia, R., (1995). Tropical climate and glacier hydrology: a case study in Bolivia. *Journal of Hydrology*, 165: 221-234.
- Ribstein, P., Pouyaud, B., Sicart, J.E., Wagnon, P., Ramirez, E., Francou, B., (1999). Variabilité climatique et fonctionnement hydrologique d'un glacier tropical. ed. 279-287 p. XXII Assemblée Général de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale, Birmingham-UK.
- Sicart, J.E. (2002). Contribution à l'étude des flux d'énergie, du bilan de masse et du débit de fonte d'un glacier tropical: Le Zongo, Bolivie, PhD Thesis thesis, 347 p., Université Paris VI-Pierre et Marie Curie, Paris-France.
- Sicart, J.E., Ribstein, P., Francou, B., Pouyaud, B., Condom, T., (2007). Glacier mass balance of tropical Zongo glacier, Bolivia, comparing hydrological and glaciological methods. *Global and Planetary Change*, 59 (1-4): 27-36.
- Thibert, E., Blanc, R., Vincent, C., Eckert, N., (2008). Glaciological and volumetric mass balance measurements an error analysis over 51 years, Glacier de Sarennes, French Alps, *Journal of Glaciology*, 54 (186): 522-532.
- Vincent, C. (2002). Influence of climate change over the 20th Century on four French glacier mass balances. *Journal of Geophysical Research*, 107 (D19).
- Wagnon, P. (1999). Analyse du bilan d'énergie d'un glacier tropical, application à la relation glacier-climat, PhD Thesis thesis, 199 p. Université Joseph Fourier-Grenoble I, Grenoble.
- Wagnon, P., Ribstein, P., Francou, B., Pouyaud, B., (1999). Annual cycle of energy balance of Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia. *Journal of Geophysical Research*, 104 (D4): 3907-3923.

Recibido: 22-7-2013

Aceptado: 6-3-2014