

ESTADO DE LA RED DE MONITOREO EXISTENTE E IMPACTOS DE LOS EVENTOS ENSO SOBRE EL BALANCE DE MASA DE LOS GLACIARES EN BOLIVIA Y EN EL PERÚ

Bernard Francou, ORSTOM, La Paz, Bolivia
Hubert Sémiond, IFEA, Quito, Ecuador

RESUMEN

Debido a su alta sensibilidad a la variabilidad climática, los glaciares tropicales son buenos indicadores del cambio climático. La aceleración del retroceso de los glaciares en los Andes Centrales desde el principio de los años 1980 y los impactos de esta evolución sobre los recursos hídricos y los riesgos naturales, han justificado la instalación de una red de monitoreo basada sobre algunos glaciares representativos de la cordillera. Esta red consiste actualmente en un transecto de seis glaciares equipados entre el Ecuador y los 16° de latitud Sur. Datos de balance de masa y de balance hidrológico han sido obtenidos en Bolivia desde 1992, mientras que en el Perú, informaciones sobre el balance en la parte baja de dos glaciares de la Cordillera Blanca son disponibles desde el año 1977. Estos datos sirven para estudiar la respuesta de los glaciares a la variabilidad climática a escala anual. En Bolivia y en el Perú (y posiblemente en el Ecuador), la perturbación climática provocada por los eventos ENSO se registra en los balances de masa y se marca por notables valores negativos, particularmente en los glaciares que tienen un rango altimétrico limitado. Esos años, los glaciares alimentan una hidrología abundante, que viene a compensar una tendencia a un déficit pluviométrico, lo cual se observa particularmente en los Andes del Sur del Perú y en Bolivia. Las estaciones meteorológicas de la altura registran una desviación positiva de las temperaturas, lo que es conforme al recalentamiento global de la atmósfera tropical que se observa durante esos eventos.

**Glaciers as reliable indicators of climatic variability in the Tropical Andes
State of existing monitoring network and effects of ENSO events on glacier
mass balance in Bolivia and Peru**

ABSTRACT

The high sensitivity of Tropical glaciers to climatic forcing makes it possible to use them as reliable indicators of climatic changes. The increase in glaciers retreat in the Central Andes since the early 1980s and the resulting impact on water

resources and increased natural hazards associated with glaciers have provided justification to establish monitoring of representative glaciers. The glaciers monitoring network presently consists of a transect of six instrumented glaciers between the Equator and 16 degrees South. Mass and hydrological balance data have been obtained for the glaciers in Bolivia since 1992. In Peru, information about mass balance is available since 1977 in the lower part of two glaciers of the Cordillera Blanca. This information allows us to define more precisely the specific responses of these glaciers to climatic variability at short time scale. In Bolivia and Peru (possibly in Ecuador), the climatic perturbations induced by ENSO events are strongly recorded in glacier mass balances and are marked by significant negative balances particularly on glaciers with narrow elevation range. During these years, glacier runoff is abundant and balances low level precipitation, this being particularly clear in Southern Peru and Bolivia. ENSO events are detected by strong positive temperature anomalies at the meteorological stations of high Andes, situation which reflects global warming of the Tropical atmosphere during these events.

¿PORQUE LOS GLACIARES TROPICALES MUESTRAN UNA SENSIBILIDAD PARTICULAR A LA VARIABILIDAD CLIMATICA ?

Esta especificidad proviene de las características propias del clima tropical, que se resumen en tres principales:

- Las montañas tropicales son caracterizadas por un limitado rango de variación de temperaturas a escala anual ($< 3^{\circ}\text{C}$). En las zonas que tienen suficiente humedad para mantener una cobertura de glaciares, la isoterma 0°C anual se encuentra todo el año a la altura del glaciar. Así que, en la parte inferior del glaciar, la ablación domina la acumulación todos los meses del año. Esto tiene como consecuencia que la *gradiente vertical del balance* (GVH) tiene un valor elevado, siempre superior a 1000 mm 100 a -1.
- El verano corresponde a la temporada de precipitaciones (octubre-marzo en los Andes): el balance neto del glaciar depende fuertemente del flujo de energía que llega al glaciar durante esta temporada; por esta razón, la variabilidad de la nubosidad y de las precipitaciones tienen una gran influencia sobre el balance de masa del año: una nubosidad permite a un fuerte flujo de energía entrar sobre el glaciar, lo que provoca en pocos días una transformación de la nieve en nevisca (densidad 0.4/0.5), una disminución del albedo, los cuales a su vez aceleran brutalmente el derretimiento del hielo.
- El aumento de la temperatura desplaza el límite inferior de las precipitaciones sólidas, de tal modo que la lluvia constituye un aporte importante de calor sensible al glaciar.

Como consecuencia de esas características, los factores que controlan la fusión del hielo pueden producirse todo el año sobre un glaciar tropical, sobre todo en las zonas húmedas donde la isoterma 0°C está al nivel del glaciar, mientras que en las latitudes medias/bajas, la variación en la fusión interviene solo en verano, es a decir durante un periodo de solo 4/5 meses.

Se puede decir en conclusión que el glaciar tropical es un buen indicador del clima: puede registrar la variabilidad climática a escala anual, particularmente un cambio de temperaturas. Es el caso particularmente en las regiones húmedas. Por supuesto, la respuesta del balance de masa a la variabilidad climática se traduce por un cambio notable en la geometría del glaciar (retroceso/avance del frente), sobretodo si la zona de equilibrio (ELA) puede acercarse al límite superior del glaciar, imponiendo en este caso un régimen de ablación sobre toda su superficie.

ESTUDIAR LOS GLACIARES TROPICALES, UNA NECESIDAD PARA APRECIAR, CON UNA ALTA RESOLUCION, LA EVOLUCION CLIMATICA DE UNA ZONA CLAVE DEL PLANETA.

Incrementando por su respuesta una señal climática de pequeña intensidad, el glaciar proporciona un diagnóstico confiable de la variación climática a muy corto plazo, que puede ser un año. La resolución es particularmente alta al nivel del decenio. Así que el glaciar tropical constituye una herramienta ideal para verificar los pronósticos de los modelos del clima basados sobre un reforzamiento del efecto invernadero debido al aumento de la concentración de los gases antropogénicos de la atmósfera. Esta evolución se traduce no solo por un aumento de la temperatura, sino también por un crecimiento de la humedad en la tropósfera tropical, como lo han demostrado Hastenrath y Kruss (1992) a partir de un diagnóstico del Glaciar Lewis (Kenya).

La aceleración del retroceso de los glaciares desde el principio de los años 1980 es una tendencia casi general en las montañas del mundo, según el World Glacier Monitoring Service (IAHS-ICSU, Zurich). Esta evolución puede ser relacionada a un aumento de la temperatura medida al nivel mundial (IPCC, 1992). En el Trópico, el movimiento de retroceso de los glaciares aparece más marcado que en las zonas extratropicales. Por ejemplo, según Hastenrath y Kruss (1992), los glaciares del Kenya han perdido 40% de su superficie entre 1963 y 1987. Cifra comparable a los glaciares de tamaño similar (<1 km²) de la Cordillera Blanca del Perú (fig.1). Aceleración que se nota también en la Cordillera Real de Bolivia, basándose sobre el estudio del Glaciar de Chacaltaya: pérdida de 50 % de la superficie entre 1940 y 1996 (Francou et al., en preparación).

A ESTE RITMO DE RETROCESO, LA DESAPARICION DE LA MITAD DE LOS GLACIARES DE LOS ANDES TROPICALES ES PREVISIBLE EN LOS PROXIMOS DECENIOS, LO QUE VA A AFECTAR LOS RECURSOS HIDRICOS Y ACENTUAR LOS RIEGOS GEODINAMICOS.

Si bien las masas de hielo del Trópico tienen un rol menor a escala mundial, como por ejemplo en el control del nivel de los océanos; localmente tienen un rol importante en los recursos hídricos. Tres capitales, La Paz, Quito, Lima, que concentran más de 10 millones de habitantes, regiones costeras del Pacífico y valles interandinos se abastecen de aguas de origen glaciar. Esta evolución puede ser-

crítica cuando el escurrimiento glaciar atenúa la variabilidad estacional (temporada seca de más de 3 meses, como en el Sur de Perú y en Bolivia) e inter-anual (año secos, como los años ENSO en Bolivia y en el Sur-Perú) (Francou et al., 1995).

En el mismo tiempo, el retroceso acentúa la inestabilidad de las masas de hielo: formación de lagunas de represa natural, avalanchas, vaciados intempestivos de esas lagunas (Ames y Francou, 1995).

LA FORMACION DE UNA RED DE MONITOREO DE GLACIARES A TRAVES DE LOS ANDES CENTRALES SE JUSTIFICA POR MOTIVOS DE INVESTIGACION FUNDAMENTAL Y APLICADA.

Solo existían los siguientes estudios de glaciares: 1) inventarios generales de los glaciares (Norte Perú, Bolivia, Ecuador); 2) programas de monitoreo parcial en la Cordillera Blanca del Perú en relación con los riesgos relacionados directamente (avalanchas) o indirectamente (vaciado de lagunas) con el movimiento de glaciares por parte de Electroperú SA, Huaraz.

En 1991, ORSTOM propuso a varios asociados andinos un programa integrado de monitoreo global de glaciares. El objetivo es instalar, sobre algunos glaciares representativos y presentando directas aplicaciones en el campo de los recursos hídricos (abastecimiento de agua potable, de agua para el riego y energía hidráulica), un equipo estandar que permita estimar a largo plazo el balance de masa y el balance hidrológico. Pero rápidamente se ha sentido la necesidad de completar este equipo con estaciones destinadas a medir sobre el glaciar el balance energético, solo método adecuado para identificar los procesos y abrir la posibilidad de desarrollar modelos de funcionamiento hidrológico tomando en cuenta la variabilidad climática. El primer glaciar equipado fue el Glaciar de Zongo en Bolivia en 1991-93 (fig. 2). Después vinieron otros glaciares, en el Perú (Artesonraju) y en el Ecuador (Antisana) (cuadro I). Así se estructura una red, apoyada sobre contrapartes regionales diversas, agrupando empresas especializadas en el manejo de las aguas (COBEE en Bolivia, EMAAP-Q en el Ecuador, Electroperú en el Perú), universidades (UMSA, Bolivia, EPN, Ecuador) o servicios nacionales (SENAMHI, Bolivia, INAMHI, Ecuador), siendo el objetivo que esta red pueda funcionar con la sola participación de los países andinos.

EJEMPLO DE UNA RESPUESTA DE LOS GLACIARES DEL AREA ANDINA A UNA SEÑAL CLIMATICA DE FUERTE INTENSIDAD Y DE CORTA DURACION: LOS EVENTOS ENSO

Se sabía que los eventos ENSO afectaban la pluviometría al nivel de los altos Andes (Francou y Pizarro, 1985 ; Aceituno, 1988): el déficit pluviométrico afecta particularmente el Sur del Perú y Bolivia, y por supuesto disminuye la acumulación de nieve en la parte alta de los glaciares. Esto se observa en los registros largos obtenidos a partir de las perforaciones (ice cores, Thompson et al. , 1984).

El impacto del ENSO sobre el balance global del glaciar fue demostrado sobre los glaciares del Perú y de Bolivia (Ribstein et al., 1995 ; Francou et al.,

1995). En el Perú, utilizando el modelo lineal de Lliboutry para la determinación de la variabilidad del balance, se pudo observar que la ablación es particularmente fuerte en las zonas bajas de los glaciares durante las fases negativas del ENSO, y al contrario atenuada durante las fases positivas (Francou et al., 1995 (fig. 4). En Bolivia, se ha observado que el escurrimiento del glaciar de Zongo se correlaciona bien, mediante un retraso de 4 a 6 meses, con el índice de Oscilación Sur (SOI Darwin-Tahiti) (fig. 4). Como se ha verificado también que la acumulación es de menor cantidad en esos años, se puede decir que la casi periodicidad del ENSO controla una parte notable de la variabilidad del balance de masa de los glaciares andinos (por lo menos en el Perú y en Bolivia, esperando los primeros resultados en el Ecuador). Por ejemplo, durante la fase negativa de 5 años de duración del ENSO de 1991-1996, los balances de los glaciares de Zongo y de Chacaltaya fueron muy negativos 4 años: perdieron más de dos veces la cantidad de agua que recibieron por las precipitaciones sólidas y la ELA (altitud de la línea de equilibrio) fue 200 a 300 metros más alta que durante los años donde esos glaciares presentan un balance equilibrado, como en 1992-93. Para un pequeño glaciar tal como el Chacaltaya, esta pérdida acumulada de los 5 últimos ciclos podría corresponder a no menos del 10% de su volumen total (Francou et al., en preparación).

Las razones de esta evolución desde el principio de los años podrán ser analizadas a partir de los resultados del balance energético que practicamos desde 1993 sobre el Glaciar de Zongo. Pero, conociendo la sensibilidad de los glaciares tropicales al cambio de temperaturas, combinando estrechamente este parámetro con otros, se puede relacionar esos balances negativos con las variaciones de temperaturas observadas en las estaciones altandinas. Se puede en efecto observar en dos estaciones vecinas de los glaciares, Querococha (4000 m snm) en la Cordillera Blanca y San Calixto-La Paz (3600 m snm) en la Cordillera Real, la clara desviación positiva de las temperaturas máximas y mínimas durante los acontecimientos ENSO (fig. 5). El recalentamiento de la tropósfera es un hecho clásicamente observado en todo el Trópico, particularmente en torno a la cuenca del Pacífico.

CONCLUSIONES

- La sensibilidad extrema de los glaciares tropicales a la variabilidad climática permite observar los cambios climáticos en esta zona.
- Una red de glaciares monitoreados es una necesidad para identificar las principales variables que proceden del cambio climático, particularmente temperaturas, humedad y flujos radiactivos.
- Un monitoreo de glaciares con finalidad climatológica tiene que ser vinculado a objetivos de investigación aplicada para justificar y cubrir los gastos referentes a una vigilancia de largo plazo: recursos hídricos y riesgos naturales relacionados a los glaciares constituyen las mejores oportunidades.
- Existe un interés particular por manejar, paralelamente a esos programas de monitoreo, programas que consisten a aprovechar la presencia de masas de

hielo frío acumuladas en la alta altitud para conocer, analizando los registros conservados, la evolución del clima desde siglos o milenios. Es una manera de apreciar la magnitud de la respuesta de esos glaciares a las grandes oscilaciones del pasado y compararla con su evolución actual (programa de L.G.Thompson en Bolivia, con el cual el ORSTOM colabora).

Cuadro 1
EQUIPO PRESENTE SOBRE LOS GLACIARES DE LOS ANDES
CENTRALES EN 1996

GLACIERS	ABLATION STAKE NETWORK	ACCUMULATION STAKE NETWORK + SNOW PITS	TOPOGRAPHY (STAKES + GLACIER TERMINUS)	LIMNIGRAPHIC STATION	RAIN GAUGES (P) and THERMOGRAPHIC STATION (T)
ZONGO (bo)	X	X	X	X	P-T (XXX)
CHACALTAYA (bo)	X	X	X		P-T (XX)
ARTESONRAJU (pe)	X	X	X	X	P)
YANAMAREY (pe)	X	X	X		P-T
ANTISANA (eq)	X	X	X	X	P-T
COTOPAXI (eq)	X				P-T

(XX) : 20 años

: Balance energético sobre el glaciar

REFERENCIAS

- Aceituno, P. (1988) : On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part 1: Surface climate. *Monthly Weather Review*, 116 : 505-524
- Ames, A, y Francou, B. (1995): Cordillera Blanca. Glaciares en la Historia. *Bull. Inst. Fr. Et. And.*, 24, 1: 37-64
- Francou, B. y Pizarro, L. (1985) : El Niño y la Sequía en los Altos Andes centrales (Perú y Bolivia). *Bull. Inst. Fr. Et. And.*, 14, 1-2 : 1-18.
- Francou, B., Ribstein, P., Sémioud, H. y Rodríguez, A. (1995) : Balances de glaciares y clima en Bolivia y Perú: impactos de los eventos ENSO. *Bull. Inst. Fr. Et. And.*, 24, 3 : 661-670.
- Hastenrath, S. y Kruss, P.D. (1992): The dramatic retreat of Mount Kenya's glaciers between 1963 and 1987 : greenhouse forcing. *Annales de Glaciology*, 16 : 127- 134.
- Ribstein, P., Tiriau, E., Francou, B. y Saravia, R. (1995): Tropical climate and glacier hydrology. A case study in Bolivia. *Journal of Hydrology*, 165 : 221-234.
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, H. y Morales Amao, B. (1984): El Niño-Southern Oscillation events as recorded in the stratigraphy of the Tropical Quelccaya Ice Cap. *Science*, 22: 50-53.

CORDILLERA BLANCA (PERU)
Terminus retreat of 3 glaciers

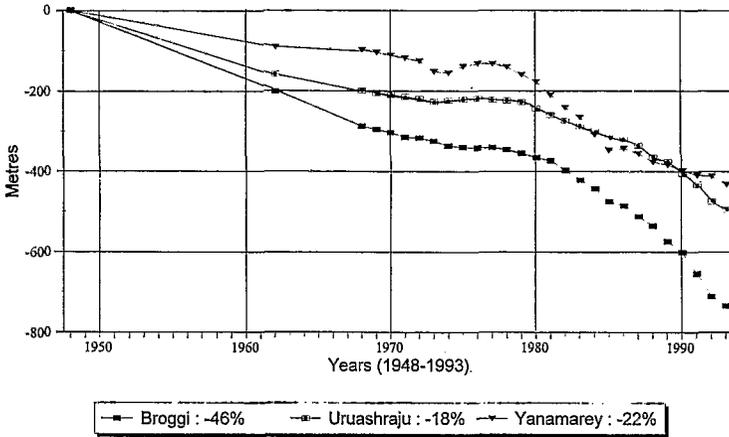


Fig. 1: Retroceso del término de tres glaciares en la Cordillera Blanca en el Perú. Los porcentajes indican el retroceso acumulado desde 1948 (Fuentes: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, Huaraz, Perú)

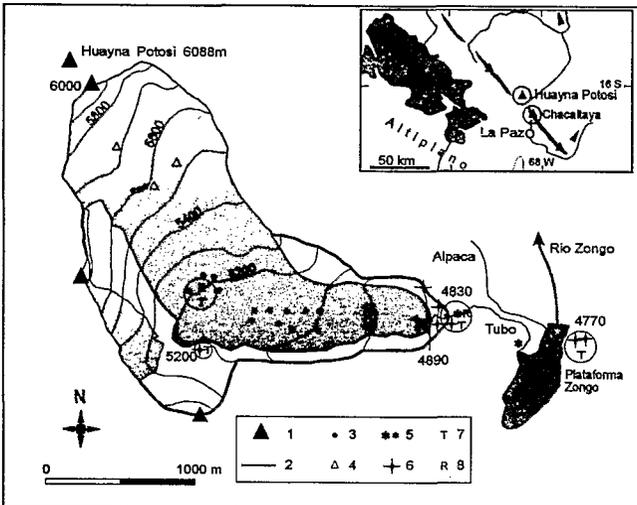


Fig. 2: Ejemplo de monitoreo de glaciar: Glaciar Zongo, Bolivia. 1. Picos más altos, 2. Límite de las cuencas, 3. Balizas de balance, 4. Pozos de acumulación, 5. Estaciones limnimétricas, 6. Pluviómetros, 7. Termógrafos, 8. Radiación global. Las estaciones para estimar el balance energético se encuentran sobre el glaciar a 5 500m, 5 150 m(permanente) y 4 900 m.

YANAMAREY AND URUASHRAJU GLACIERS

BETA-T (1700 m a.s.l.)

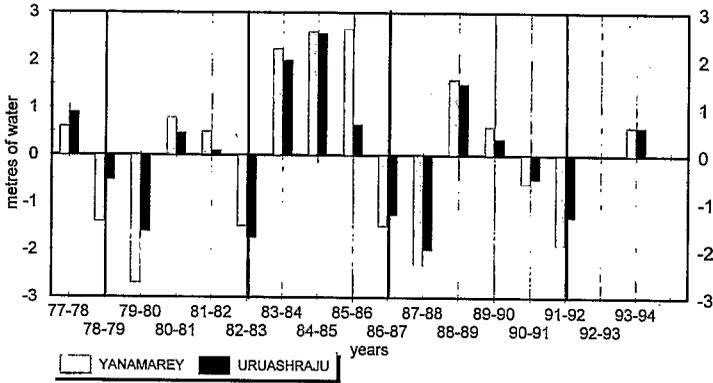


Fig. 3: Variación de balance (t: parámetro de la variación de balance en función del tiempo según el modelo lineal de Liboutry) desde 1977 sobre dos glaciares de la Cordillera Blanca, Uruashraju y Yanamarey. Los valores negativos corresponden a períodos del IOS (Índice de Oscilación Sur) negativos. Los trazos gruesos indican años ENSO

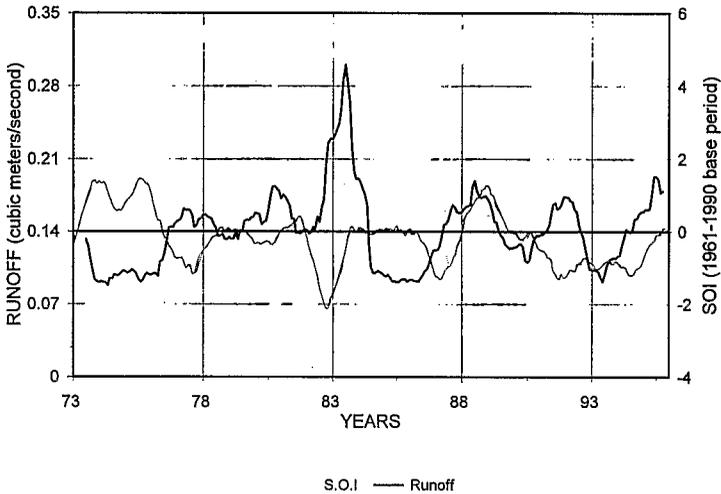


Fig. 4: Esguimiento en el Glaciar de Zorgo y IOS. Promedios móviles de 12 meses en ambos casos

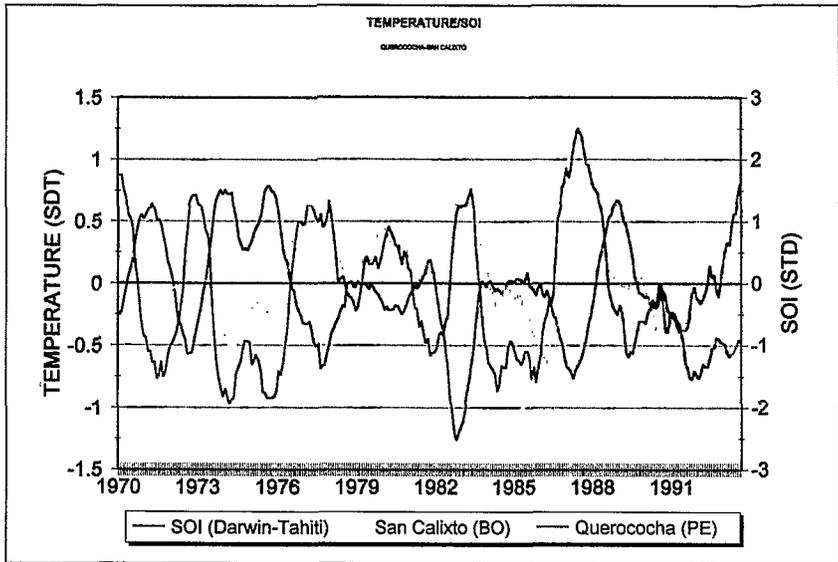


Fig. 5: Promedio de temperaturas en Querococha y San Calixto y IOS (Indice de Oscilación Sur). Promedios móviles de 12 meses en ambos casos.