

BALANCES GLACIARES Y CLIMA EN BOLIVIA Y PERU

Impacto de los eventos ENSO

B. FRANCOU¹, P. RIBSTEIN¹, H. SEMIOND¹ y OFICINA DE RECURSOS HIDRICOS²

Resumen - Una reconstrucción del balance a partir de los datos hidrométricos del Glaciar de Zongo (Cordillera Real de Bolivia), así como una aplicación del modelo lineal" (Lliboutry) sobre los datos de balance de los Glaciares Yanamarey y Uruashraju (Cordillera Blanca del Perú), ofrecen la posibilidad de disponer de una serie de 15-20 años de balance. Analizando paralelamente los datos recogidos en estaciones meteorológicas cercanas, se puede evidenciar el rol de las temperaturas en la determinación de esos balances. La variabilidad de las temperaturas depende de una manera estrecha de los eventos ENSO (*El Niño-Southern Oscillation*): durante estos eventos, las temperaturas máximas y mínimas aumentan sensiblemente y esto afecta el término *ablación* del balance de masa. Se verifica en esta serie de 20 años que todos los años ENSO estén asociados a balances negativos. Durante la mayoría de los eventos ENSO en el sur de Perú y en Bolivia, se produce una reducción de las precipitaciones, lo que contribuye a accentuar el *efecto-ENSO* sobre los balances. Estos acontecimientos tienen una influencia importante sobre la evolución actual de los glaciares andinos, caracterizada por un retroceso rápido.

Abstract - Mass balance of Zongo Glacier (Cordillera Real, Bolivia) was reconstructed by using hydrological data. In another way, the "linear model" (Lliboutry) was applied on the balance measurements from Yanamarey and Uruashraju ablation zone (Cordillera Blanca, Peru). Compared with temperature and precipitation data from reliable meteorological stations, this 15-20-yr time serie of glacier balances allows us to point out temperature as the principal factor controlling the mass balance evolution. Temperature variability strongly depends on ENSO (*El Niño-Southern Oscillation*) events : a clear positive deviation of maxima and minima is generally observed during these events, which strongly increases the ablation. Consequently, a systematical negative mass balance is associated with ENSO events. In Southern Peru and in Bolivia, this tendance is enhanced by a frequent decrease in the precipitation, which modifies the accumulation term at high altitude. So, it is demonstrated that ENSO phenomena closely control the glacier mass balance variability and have a great influence in the rapid glacier retreat observed in this area of Tropical Andes.

INTRODUCCION

A partir del estudio de los glaciares en Bolivia y en Perú, surgen dos observaciones: 1) un retroceso generalizado, que se acelera desde el principio de los años 1980 (Kaser *et al.*, 1990; Ames *et al.*, 1995); 2) una fuerte variación de los balances de masa según los años, como lo han demostrado los resultados alcanzados en el Glaciar de Zongo en Bolivia entre 1991 y 1993 (Francoy *et al.*, 1995). Para conocer las razones de esta evolución, es necesario analizar la relación clima/glaciar.

¹ ORSTOM, CP 9214, La Paz, Bolivie

² Huaraz, Perú

En este campo, existen dos métodos: 1) la modelación del balance del glaciar a partir de la medición en tiempo real de las diferentes componentes del balance energético: el enfoque físico es actualmente realizado en el Glaciar de Zongo (Rigaudière *et al.*,1995); 2) la correlación entre los balances de masa y los parámetros meteorológicos medidos en las estaciones cercanas del glaciar. El éxito de este enfoque estadístico depende de la existencia de series de datos recogidos sobre 15-20 años y de su calidad.

Este estudio utiliza los datos de balance de dos glaciares de la Cordillera Blanca del Perú acumulados durante un poco más de 15 años (Fig. 1), y presenta paralelamente una serie de balances del Glaciar de Zongo reconstruidos a partir de datos hidrológicos (Fig.2). Además, se tomarán en cuenta los datos de balance de masa recogidos directamente sobre este mismo glaciar sobre una base mensual desde 1991. Se insistirá particularmente sobre la importancia de los eventos ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) en la tendencia del balance.

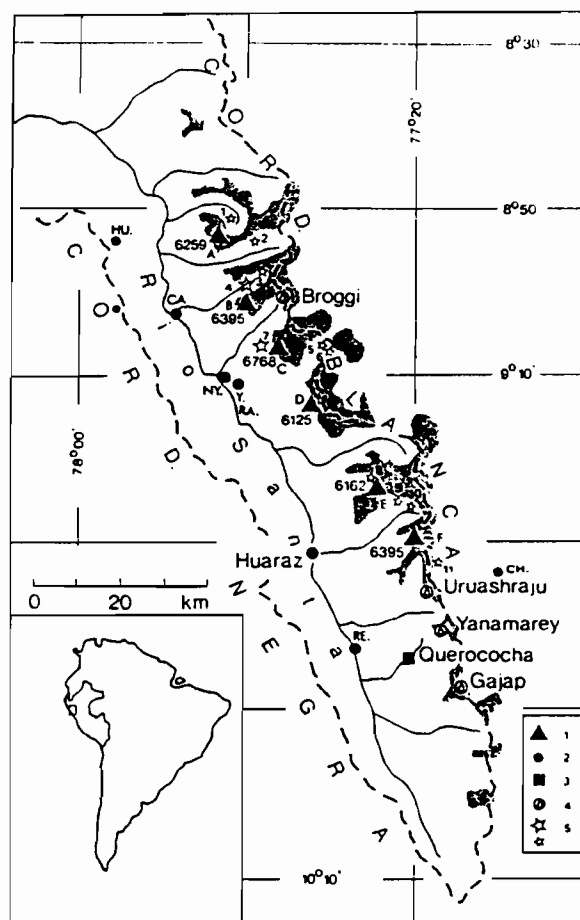


Figura 1: Cordillera Blanca y situación de los glaciares estudiados.

1. Principales picos y altitudes.
2. Ciudades y pueblos
3. Estación meteorológica de referencia ,
4. Glaciares en estudio,
5. Glaciares y lagunas glaciares peligrosos.

GLACIARES ESTUDIADOS Y METODOS DE DETERMINACION DEL BALANCE

En Cordillera Blanca, el Glaciar Yanamarey y el Glaciar Uruashraju son monitoreados para su balance desde 1977 (Ames, 1985). La ausencia de mediciones de acumulación en la parte superior del glaciar, la densidad muy variable según los años del sistema de balizas no permite una estimación del balance de masa. Pero para una aplicación como ésta donde se trata de apreciar la variabilidad climática sobre un glaciar, se puede utilizar el *modelo lineal* aplicado por

Lliboutry (1974) sobre los glaciares de los Alpes. Es así como el balance b_{jt} , en el año t en el lugar j , se descompone en 3 términos aditivos :

$$b_{jt} = \alpha_j + \beta_t + \epsilon_{jt} \quad (1)$$

α_j representa las particularidades del sitio, como la evolución del balance en función de la altitud : sobre los glaciares, esta curva tiene la misma forma (pendiente) cual sea el año en la zona de ablación,

β_t es el balance en función del tiempo centrado sobre el periodo de medición T : es el desfase de la curva hacia los balances positivos o negativos según los años,

ϵ_{jt} es un residuo aleatorio centrado.

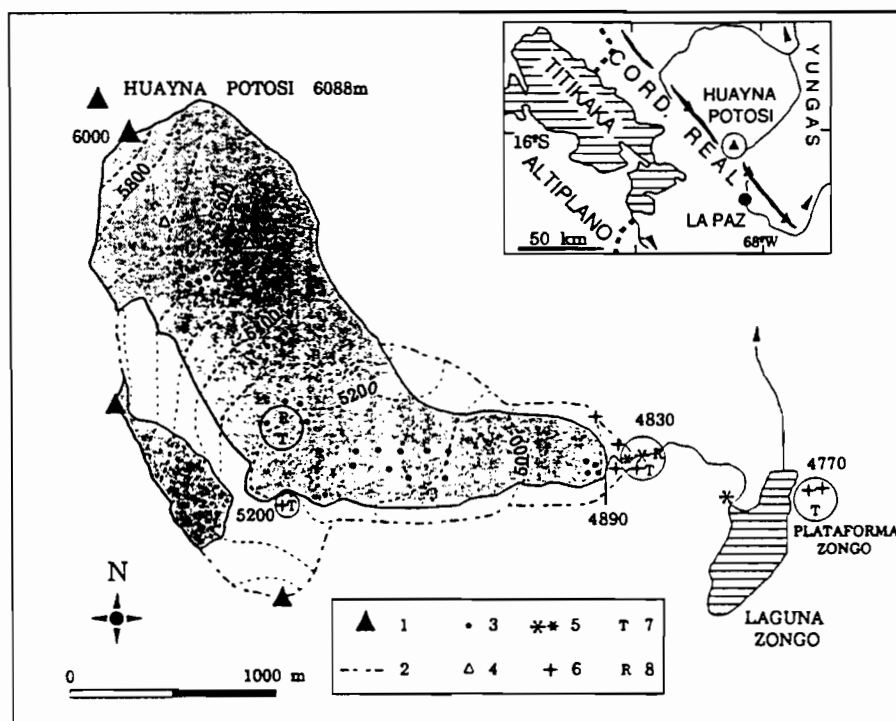


Figura 2: Glaciar de Zongo con el sistema de medición en 1993. 1. Picos 2. Límites de la cuenca 3. Estacas de balance 4. Pozos y grietas de medición del balance 5. Limnógrafo 6. Pluviómetros totalizadores 7. Termógrafos 8. Piranómetros.

Prácticamente, el procedimiento ha sido el siguiente (Fig.3) :

1) se establece la pendiente de la curva balance/altitud en los años donde la red de balizas, entre el término y la línea de equilibrio (ELA) es optimum, eliminando si es necesario las balizas muy descentradas del grupo principal ; 2) se escoge la zona del glaciar más medida durante los años: en los dos glaciares, se trata del rango altitudinal 4650-4750 m ; 3) se aplica la curva en este sector los años donde existen muy pocas mediciones y se anota como valor del balance el punto de intersección de la curva con la altitud 4700 m ; 4) el β_t representa este valor centrado sobre la serie del periodo T ; 5) este parámetro se correlaciona con las variables medidas del clima: se ha utilizado en esta Cordillera las temperaturas y las precipitaciones de la estación de Querococha

(4000 m, fig.1), cuya confiabilidad ha sido comprobada con otras estaciones cercanas (Cahuish, Huaraz).

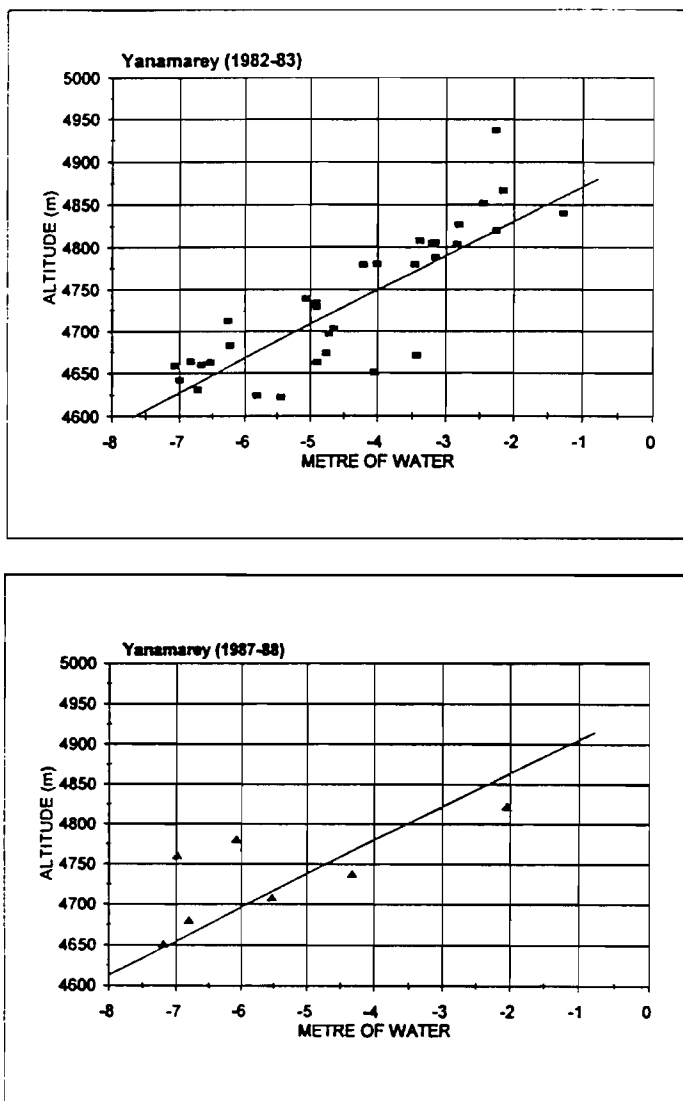


Figura 3. Glaciar de Yanamarey. Balance en función de la altitud : 1982-83 y 1987-88
Coeficiente de actividad: $2.25 \text{ m } 100\text{m}^{-1}$

En la *Cordillera Real*, se ha utilizado la reconstitución del balance del Glaciar de Zongo a partir de los datos hidrológicos (Ribstein *et al.*,1995). El procedimiento es el siguiente : 1) se utilizan los dos aforos diarios efectuados diariamente desde hace 20 años (1973-1993) en la parte canalizada del glaciar, que se vierte en el Lago Zongo. Dos argumentos permiten relacionar este dato con el balance del glaciar : a) la buena correlación existente entre los caudales y aquellos medidos en la estación limnimétrica entre 1991 y 1993 ($r=0.89$, $n=600$); b) la buena concordancia entre balance medido a partir de la red de balizas, y balance estimado a partir de los volúmenes de agua escurridos en la estación (Francou *et al.*,1995): los volúmenes representan la mayor parte de la ablación medida sobre el glaciar, la sublimación siendo de menor importancia. 2) los datos faltantes (unos 15 meses) son reconstituidos con las temperaturas de la estación de La Paz-El Alto bien correlacionados con los caudales ($r=0.85$, $n=226$).

VARIABILIDAD DE LOS BALANCES Y EVENTOS ENSO

En la *Cordillera Blanca*, los balances (β_t) de los dos glaciares Uruashraju y Yanamarey son bien correlacionados ($r=0.89$, $n=16$), como se esperaba, estando los dos glaciares cercanos. Así se los puede procesar juntos. Sobre los 16 años, se notan 4 periodos de balances muy negativos (Fig.4), 1978-80, 1982-83, 1987-88 y 1990-92 y dentro de estos 4 periodos, 3 incluyen un fenómeno ENSO : 1982-83, 1987-88 y 1991-92. Se nota también que durante 1979-80, año no considerado como año ENSO, el SOI ha sido negativo.

En la *Cordillera Real*, los años en que la ablación ha sido mayor corresponden a años ENSO, con la misma observación para 1979-80 (fig.5). Señalamos que el evento ENSO 1982-83 corresponde al año con el máximo de ablación, lo que no era el caso en la Cordillera Blanca. La interrogante que surge es la siguiente: ¿Cuál es la evolución de los parámetros, temperaturas y precipitaciones en periodo ENSO?

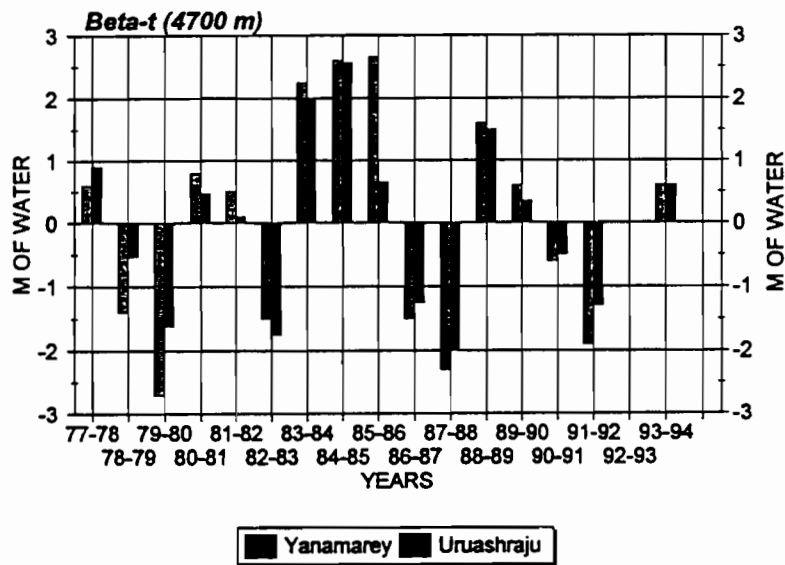


Figura 4: Valor del β_t a 4700 m de 1977 a 1994 en Yanamarey y Uruashraju. El SOI fue negativo en: 79-80, 82-83, 86-88 y 91-92

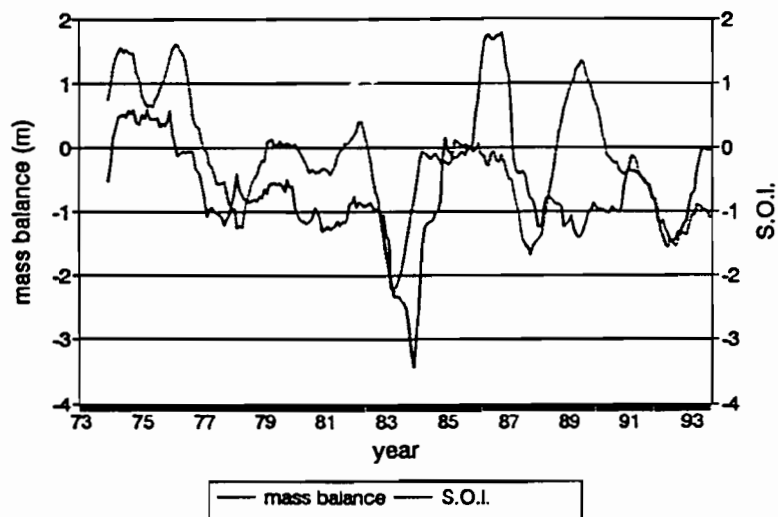


Figura 5: Balance de masa reconstruido a partir de los datos hidrométricos sobre el Glaciar de Zongo (en metros de agua) e Índice de Oscilación Sur (SOI). Cada curva representa un promedio móvil calculado sobre 12 meses.

TEMPERATURAS Y PRECIPITACIONES EN PERIODO ENSO

En la *Cordillera Blanca*, las temperaturas de Querococha muestran claramente una desviación positiva cuando el índice de oscilación sur (SOI) es netamente y durablemente negativo (situación ENSO)(fig.6a). La situación opuesta (anti-ENSO/temperaturas frías) se observa igualmente. De tal modo que aunque se traten de fenómenos no perfectamente sincrónicos y de intensidad proporcional, el coeficiente de correlación entre las dos series puede ser considerado como bastante alto ($r=0.64$, $n=144$). Por el contrario, las precipitaciones no muestran una tendencia clara en relación con los años ENSO, ciertos años siendo deficitarios (1991-92), mientras otros muestran un excedente (1992-93)(fig.6b).

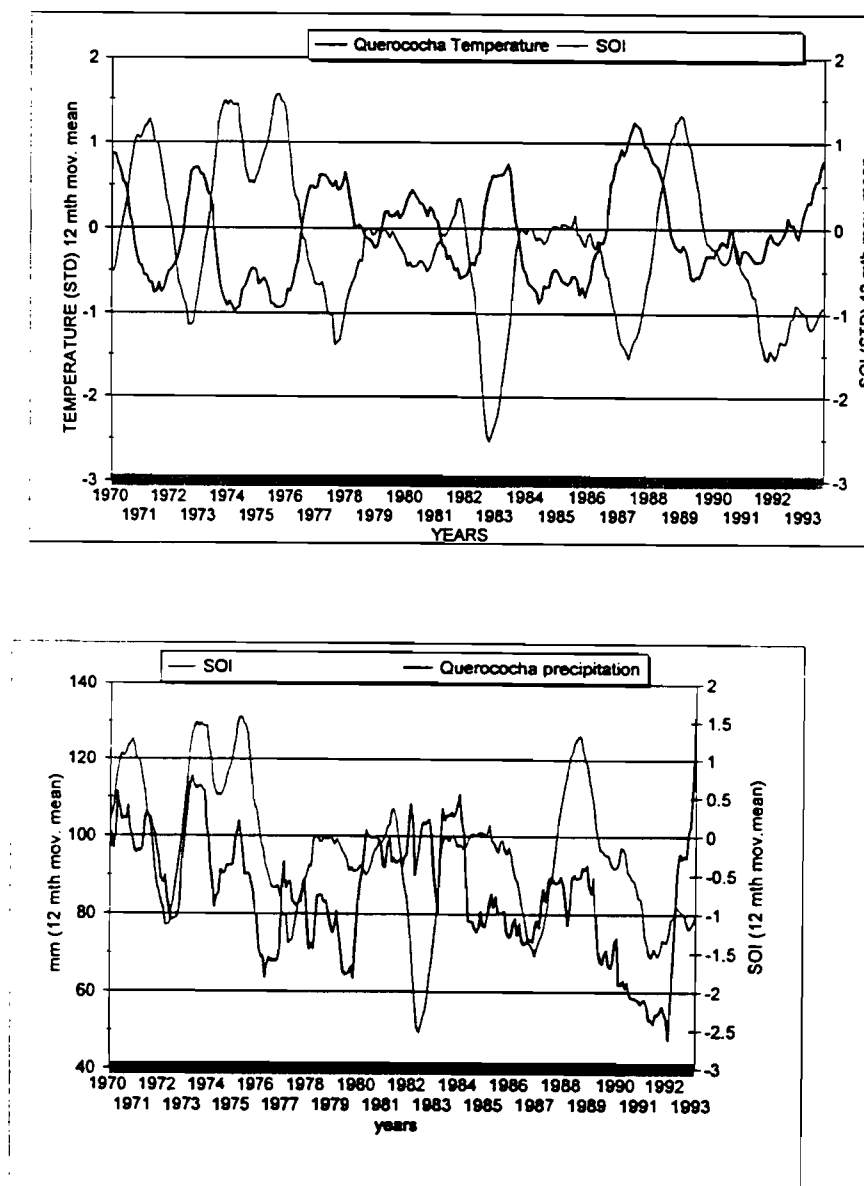


Figura 6: a) Promedio de temperatura mensual en Querococha (Cordillera Blanca) y Índice de Oscilación Sur. Valores mensuales estandarizados (promedio móvil de 12 meses). b) Total mensual de las precipitaciones de Querococha y valor del SOI

En la *Cordillera Real*, las temperaturas de la estación de La Paz-San Calixto (LPSC) muestran la misma clara desviación positiva en periodo ENSO (Fig.7a), tal como las estaciones cercanas de La Paz-El Alto y Chacaltaya no representadas aquí. Las precipitaciones de LPSC son generalmente deficitarias durante esos eventos, pero esto no es sistemático y puede aparecer con un desfase de unos 6 meses (Fig. 7b). La disminución de las precipitaciones en periodo ENSO en el Altiplano peruano-boliviano es un hecho ya mencionado (Francou *et al.*, 1985): se marca por los niveles del Lago Titicaca y se encuentra en el registro obtenido en la zona de acumulación del Nevado Quelccaya sobre varios siglos (Thompson *et al.*, 1984). Lo que evidenciamos aquí es la subida de las temperaturas -máximas y mínimas- que afecta directamente la ablación.

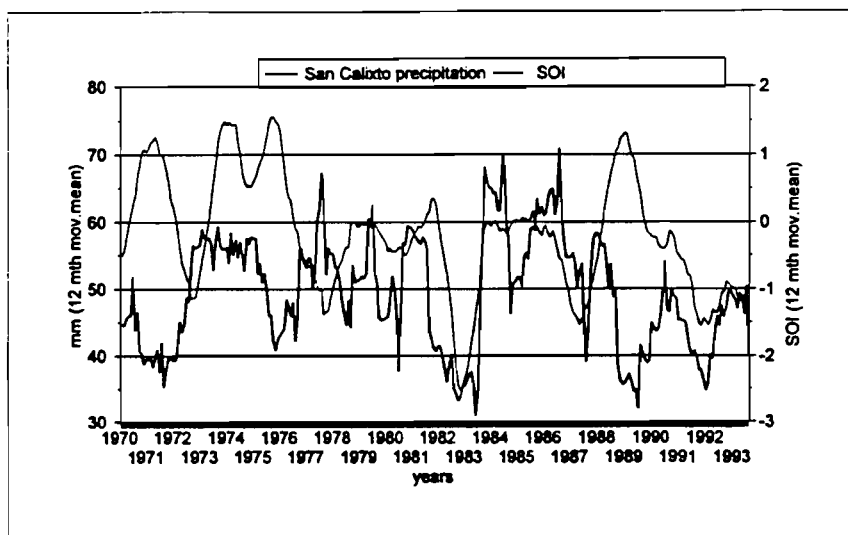
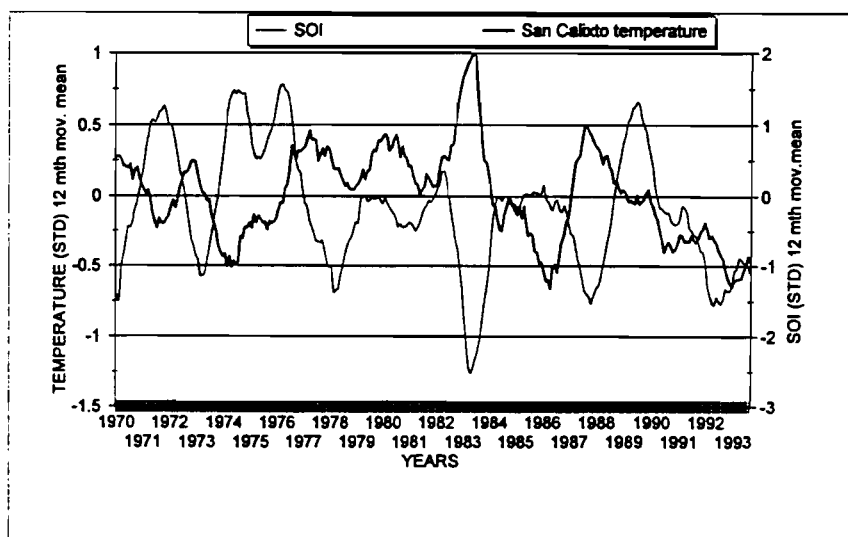


Figura 7: a) Promedio de temperatura mensual en La Paz-San Calixto (Bolivia) y Índice de Oscilación Sur. b) Total mensual de las precipitaciones en la misma estación

TEMPERATURAS Y PRECIPITACIONES EN EL BALANCE DE LOS GLACIARES

Presentaremos primero ejemplos de *años tipo* antes de buscar una fórmula más general.

1) años tipo : a nivel *añual*, la comparación entre 1982-83 (ENSO) y 1983-84 muestra en la Cordillera Blanca que con un exceso de precipitación igual, ocurren balances pasando de lo simple a lo doble (cuadro I) :

Años	Bal. Uruash (1)	Bal. Yana (1)	Prec (2)	Tmax (3)	Tmin (4)
1982-83	- 6.85	- 5.10	+ 288	+ 0.07	+ 1.54
1983-84	- 3.10	1.36	+ 300	- 1.47	- 0.52
1984-85	- 2.54	- 1.00	- 43.7	- 1.57	- 0.38
1979-80	- 6.72	- 6.30	- 162	+ 0.77	- 0.15
1991-92	- 6.40	- 5.50	- 298	+ 0.60	- 0.33

(1) Balance a 4700 m snm, en metros de agua

(2) Precipitaciones en Querococha (dev/promedio), en mm

(3) Temperatura máxima en Querococha (dev/promedio), en grados C

(4) Temperatura mínima en Querococha (dev/promedio), en grados C

Por el contrario, un año deficitario puede tener un balance poco negativo si las temperaturas son frías (1984-85). Sin embargo, se ven muchas veces balances fuertemente negativos que ocurren con años netamente deficitarios en precipitaciones y con temperaturas elevadas (1979-80 y 1991-92, este último siendo un año ENSO).

Para evaluar precisamente el rol respectivo de las temperaturas y de las precipitaciones, hay que desplazar el análisis a nivel mensual.

Al nivel *mensual*, se ha notado que los años con balance negativo (ENSO incluidos) incluyen una parte (un mes o más) de la temporada de precipitaciones deficitaria. Como los meses húmedos corresponden al momento del año donde la radiación está en su nivel máximo encima de la atmósfera, una disminución de la nubosidad provoca un fuerte aumento de la temperatura en la superficie del glaciar. Esto fue observado sobre los glaciares de Zongo y de Chacaltaya durante el ENSO 1991-92 donde las precipitaciones se concentraron sobre 4 meses en lugar de los 6-7 meses normales: resultó un balance de masa muy negativo con un total de precipitaciones anual poco diferente del promedio de 1000 mm (Cuadro 2, fig.8).

Ciclos	Bal. Zongo (1)	Bal. Chacal (1)	Prec (2)	Tmax (3)	Tmin (4)
1991-92	- 1.38	- 1.16	916	0.10	- 0.47
1992-93	+ 0.02	+ 0.23	1060	- 0.50	- 0.77

1) Balance de masa en metros de agua

2) Total de las precipitaciones (pluviómetros del Glaciar de Zongo), en mm

3) Temperatura máxima en La Paz-San Calixto (desv. al promedio), en grados C

4) Temperatura mínima en La Paz-San Calixto (desv. al promedio), en grados C

Así, un balance glaciar negativo es asociado en primer lugar a un aumento de la temperatura. El rol de las precipitaciones es complejo y merece una evaluación a nivel mensual.

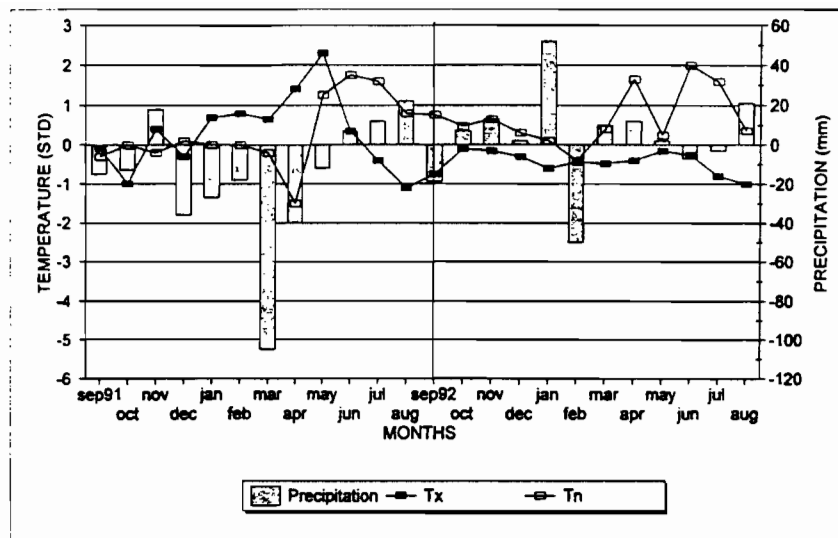


Figura 8: Desviación standard de temperaturas máximas y mínimas mensuales de 1991-93 en Chacaltaya (serie 1953-93), y desviación al promedio mensual de las precipitaciones en la Plataforma de Zongo (serie 1972-93)

2) Una correlación balance/temperatura

En el Glaciar de Zongo, se ha demostrado que temperaturas medidas en la estaciones regionales y escurrimiento podían ser correctamente correlacionadas (Ribstein et al.,1995).

En la Cordillera Blanca, se ha calculado una correlación entre los balances β_1 (y) de Uruashraju, las temperaturas máximas (Tx), mínimas (Tn) y las precipitaciones de Querococha durante el periodo 1977-92 (el dato de 1992-93, dudoso, no ha sido utilizado).

La ecuación se escribe :

$$y = 25.273 - 1.959Tx - 2.192Tn \quad (2)$$

$$\text{con } R^2 = 0.704, n = 15$$

Las temperaturas solas explican 70% de la varianza (68% para Yanamarey), siendo las precipitaciones de poca importancia. Una red de balizas más densa y de mejor distribución sobre los glaciares para el periodo 1988-93 hubiera mejorado esta correlación, que disminuye sensiblemente durante estos últimos años.

Són resultados que confirman las observaciones hechas por Lliboutry *et al.* (1977) y Kaser *et al.* (1990) sobre los glaciares de la Cordillera Blanca.

CONCLUSION.

1. Reconstruyendo los balances a partir de medidas hidrométricas sobre el Glaciar de Zongo y utilizando el modelo lineal sobre los datos de los glaciares Uruashraju y Yanamarey, se dispone de una serie de 15-20 años de datos.
2. El análisis en paralelo de las temperaturas y de las precipitaciones de estaciones cercanas, permite evidenciar el rol de las primeras en el control del balance ;
3. La variabilidad de las temperaturas es estrechamente dependiente de los eventos ENSO: las temperaturas máximas y mínimas aumentan durante estos períodos y explican la fuerte ablación medida durante estos acontecimientos. En el Glaciar de Zongo, se ha notado una elevación de 200 m de la línea de equilibrio en periodo ENSO (1991-92), en relación a un año con balance

equilibrado (1992-93). Ciertos meses, el glaciar se ha encontrado totalmente en ablación del término hasta los 6000 m ;

4. Se esperan balances de masa negativos durante estos eventos, sobre todo si, como ocurre muchas veces en el Sur de Perú y en Bolivia, se suma al aumento de la ablación la disminución de la acumulación en la altura por déficit de precipitaciones.

5. En la evolución actual de los glaciares andinos tropicales, marcada por un retroceso muy rápido, los eventos ENSO tienen sin duda alguna una influencia mayor.

6. La sensibilidad de los glaciares tropicales a las oscilaciones climáticas cortas y particularmente a las temperaturas refuerza su interés como indicador del clima.

REFERENCIAS

Ames, A. (1985). Estudio de mediciones glaciológicas efectuadas en la Cordillera Blanca por Electroperú S.A.: variaciones y balance de masas de los glaciares y su contribución en el caudal de las cuencas. Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement, CNRS, Grenoble, 81p.

Ames, A. y Francou, B. (1995). Cordillera Blanca. Glaciares en la Historia. *Bull. Instituto Francès Estudios Andinos* (en prensa).

Francou B. y Pizarro, L. (1985). El Niño y la Sequía en los Altos Andes centrales (Perú y Bolivia). *Bull. Instituto Francès de Estudios Andinos* (Lima), 14 (1-2), 1-18.

Francou B., Ribstein P., Tiriau E. y Saravia, R. (1995). Monthly balance and water discharge of an inter-tropical glacier : Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16°S. *Journal of Glaciology*, 41, 37, 61-67.

Kaser, G., Ames, A. y Zamora, M. (1990). Glacier fluctuation and climate in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of Glaciology*, 14, 136-140.

Lliboutry, L. (1974). Multivariate statistical approach of glacier annual balances. *Journal of Glaciology*, 13, 69, 371-392.

Lliboutry, L., Morales Arnao, B. y Schneider B. (1977). Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. III. Study of the moraines and mass balance at Safuna. *Journal of Glaciology*, 18, 79, 275-290.

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.

Rigaudière, P., Ribstein, P., Francou, B., Pouyaud, B. y Saravia, R. (1995). Un modèle hydrologique du Glacier de Zongo. Informe N°44, ORSTOM, La Paz, 90p.

Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E. y Morales Arnao, B. (1984). El-Niño Southern Oscillation as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya ice cap, Peru. *Science*, 226, 50-52.