

## BALANCES DE GLACIARES Y CLIMA EN BOLIVIA Y PERÚ: IMPACTO DE LOS EVENTOS ENSO

*Bernard Francou \**, *Pierre Ribstein \**, *Hubert Sémiond \**,  
*César Portocarrero \*\**, *Abel Rodríguez \*\**

### Resumen

La reconstrucción del balance hidrológico a partir de datos hidrométricos del glaciar de Zongo (Cordillera Real de Bolivia), así como la 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 series de 15-20 años de balance de masa. Analizando paralelamente los datos recogidos en estaciones meteorológicas cercanas, se puede evidenciar el rol de las temperaturas en la determinación de estos 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 estas series 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 acentuar 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.

**Palabras claves:** *Glaciares, balance de masa, temperaturas, fenómeno ENSO, Andes tropicales.*

### BILANS GLACIAIRES ET CLIMAT EN BOLIVIE ET AU PÉROU : IMPACT DES ÉVÉNEMENTS ENSO

### Résumé

À partir d'une reconstruction faite pour le glacier de Zongo (Cordillère Royale, Bolivie) avec des données hydrologiques et de l'application du modèle linéaire (Lliboutry) sur les données des glaciers Yanamarey et Uruashraju (Cordillère Blanche, Pérou), on a pu disposer de séries de 15-20 ans de bilans de masse. En analysant parallèlement les données recueillies aux stations météorologiques proches, on met en évidence le rôle des températures dans la détermination de ces bilans. La variabilité des températures dépend de façon étroite des phénomènes ENSO (El Niño Southern Oscillation) : pendant ces épisodes, les températures maximales et minimales augmentent sensiblement, ce qui affecte le terme ablation du bilan de masse. On vérifie sur ces séries de 20 ans que toutes les années ENSO sont associées à des bilans négatifs. Pendant la plupart des épisodes ENSO se produit au sud du Pérou et en Bolivie une réduction des précipitations, ce qui contribue à accentuer l'effet ENSO sur les bilans. Ces événements ont une grande influence sur l'évolution actuelle des glaciers andins, caractérisée par un recul rapide.

**Mots-clés :** *Glaciers, bilan de masse, températures, phénomène ENSO, Andes tropicales.*

\* Mission ORSTOM, CP 9214 La Paz, Bolivia.

\*\* Oficina de Recursos Hídricos, Electroperú, Av. Confraternidad Internacional, 195, Huaraz, Perú.

## GLACIER BALANCE AND CLIMATE IN BOLIVIA AND PERU: EFFECTS OF ENSO EVENTS

### Abstract

Mass balance of Zongo Glacier (Cordillera Real, Bolivia) was reconstructed by using hydrological data. Moreover, 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, these 15-20 yr time series of glacier balances allow us to point out temperature as the principal factor controlling 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 tendency 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.

**Key words:** *Glaciers, mass balance, temperatures, ENSO events, Tropical Andes.*

### INTRODUCCIÓN

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 (Hastenrath & Ames, 1995; Portocarrero, 1995; Ames & Francou, 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 (Francou *et al.*, 1995). Para conocer las razones de esta evolución, es necesario analizar la relación clima / glaciar. En este campo, existen dos métodos: 1) la modelación del balance del glaciar a partir de la medición en tiempo real de los diferentes componentes del balance energético: el enfoque físico se realiza actualmente 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, y presenta paralelamente una serie de balances del Glaciar de Zongo reconstruidos a partir de datos hidrológicos. Además, se toman en cuenta los datos de balance de masa recogidos directamente en 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.

### 1. GLACIARES ESTUDIADOS Y MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DEL BALANCE

En la 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 a partir de un glaciar, se puede utilizar el modelo lineal aplicado por Lliboutry (1974) sobre los glaciares de los Alpes. Es así como el balance  $b_{\mu}$  en el año  $\mu$ , en el lugar  $\mu$ , se descompone en 3 términos aditivos :

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

$\alpha_j$  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) cualquiera que sea el año en la zona de ablación;  $\beta_t$  es el balance en función del tiempo centrado sobre el período de medición T: es el desfase de la curva hacia los balances positivos o negativos según los años;  $\epsilon_{jt}$  es un residuo aleatorio centrado. Prácticamente, el procedimiento ha sido el siguiente (Fig. 1): 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 óptimo, eliminando si es necesario las balizas que están 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  $\beta_t$  representa este valor centrado sobre la serie del período 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 (4 000 m), ubicada en la cuenca del Glaciar Yanamarey, cuya confiabilidad ha sido comprobada con otras estaciones cercanas (Cahuish, Huaraz). En la Cordillera Real, se han utilizado los volúmenes de agua escurridos por el río saliendo del glaciar de Zongo como criterio de la intensidad de la ablación y del valor del balance (Ribstein *et al.*, 1995). El procedimiento es el siguiente: 1) tres lecturas de nivel de aguas han sido efectuadas diariamente desde hace 20 años (1973-1993) en la parte canalizada del río saliendo del glaciar que se vierte en el lago Zongo; dos argumentos permiten relacionar este dato con el balance del glaciar: i) la buena correlación existente entre los caudales y aquellos medidos en la estación limnigráfica entre 1991 y 1993 ( $r=0,89$ ,  $n=600$ ); ii) 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); 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 ( $r=0,85$ ,  $n=226$ ).

## 2. VARIABILIDAD DE LOS BALANCES Y EVENTOS ENSO

En la Cordillera Blanca, los balances ( $\beta_t$ ) de los dos glaciares Uruashraju y Yanamarey son bien correlacionados ( $r=0,89$ ,  $n=16$ ), siendo los dos glaciares cercanos y con la misma exposición. Así se los puede procesar juntos. De los 16 años, se notan 4 períodos de balances muy negativos (Fig. 2), 1978-1980, 1982-1983, 1987-1988 y 1990-1992 y dentro de estos 4 períodos, 3 incluyen un fenómeno ENSO: 1982-1983, 1987-1988 y 1991-1992. Se nota también que durante 1979-1980, año no considerado como año ENSO, el SOI (Southern Oscillation Index) 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 1979-1980 (Fig. 3). Señalamos que el evento ENSO 1982-1983 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 período ENSO?

## 3. TEMPERATURAS Y PRECIPITACIONES EN PERÍODO ENSO

En la Cordillera Blanca las temperaturas de Querococha muestran claramente una desviación positiva durante la fase negativa del SOI (Fig. 4a). La situación opuesta (fase

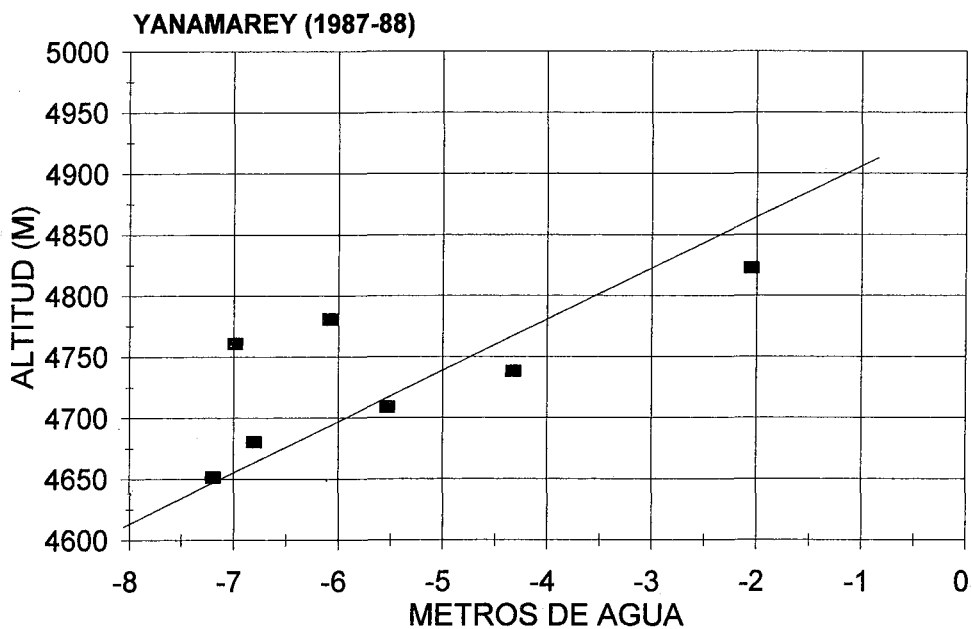
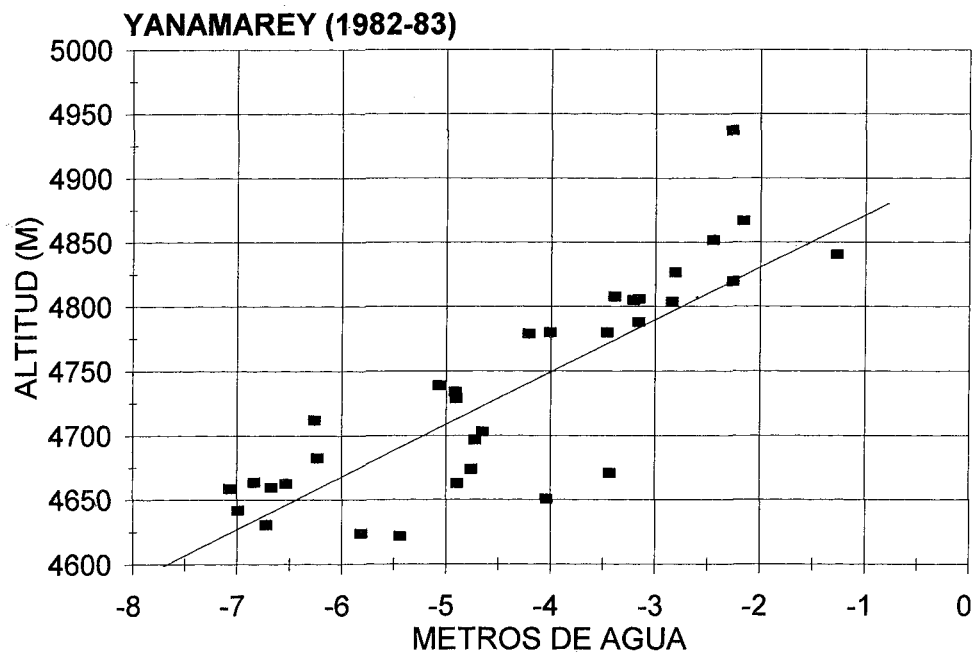


Fig. 1 - Glaciar de Yanamarey. Balance en función de la altitud: 1982-1983 y 1987-1988. Se ha aplicado en 1987-1988 el coeficiente determinado los otros años:  $2,25 \text{ m } 100 \text{ m}^{-1}$ .

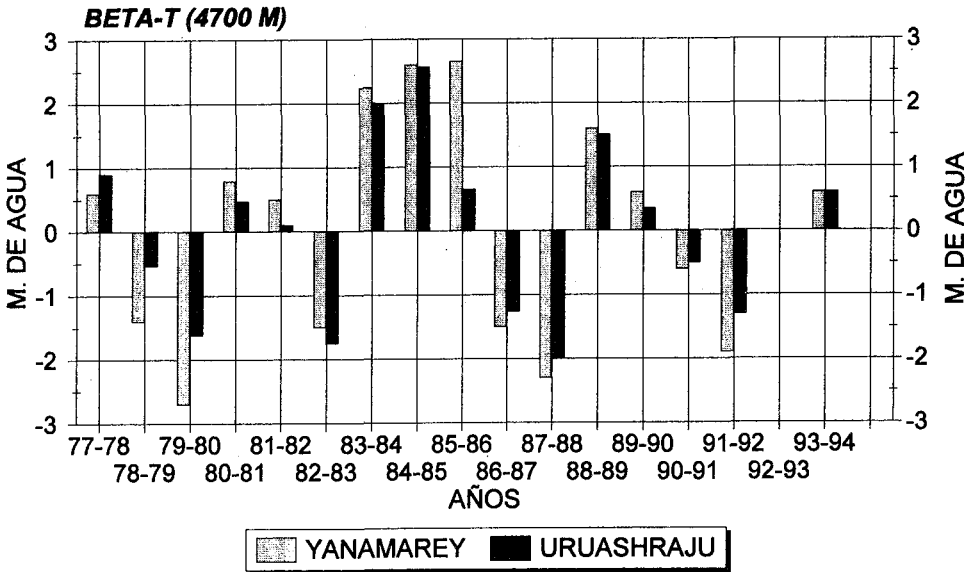


Fig. 2 - Valor del  $\beta_1$  a 4 700 m de 1977 a 1994 en Yanamarey y Uruashraju. El SOI fue negativo en: 1979-1980, 1982-1983, 1986-1988 y 1991-1992 (valores en la Fig. 3).

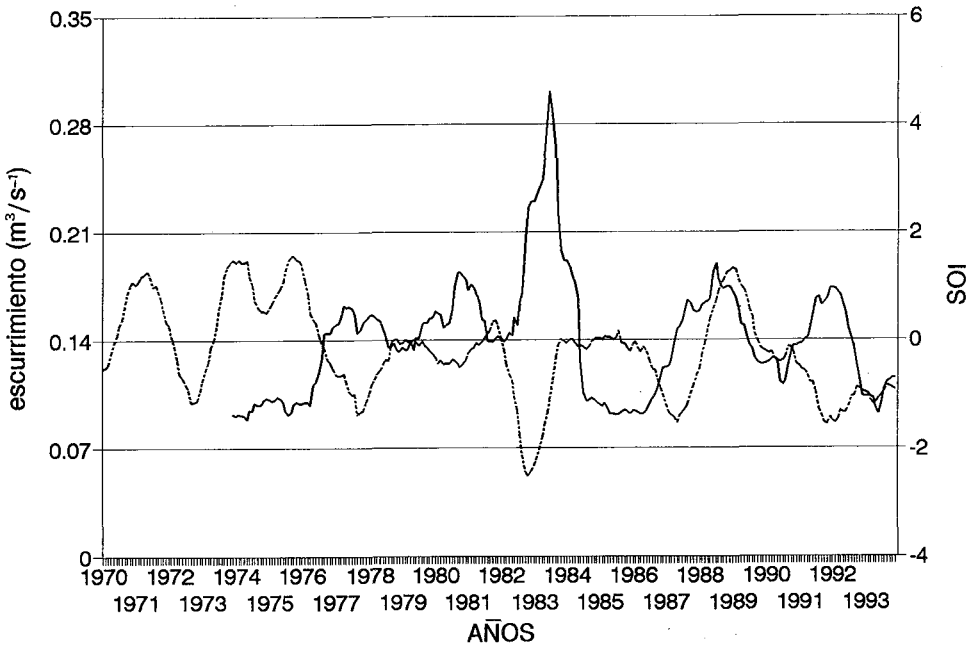


Fig. 3 - Volúmenes de agua escurridos por el río del Glaciar de Zongo (trazo continuo) e Índice de Oscilación Sur (SOI). Cada curva representa un promedio móvil calculado sobre 12 meses. El SOI representa la diferencia de presión al nivel del mar entre Tahiti y Darwin en valores normalizados.

positiva/temperaturas frías) se observa igualmente. De tal modo que aunque se trate 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, ya que ciertos años son deficitarios (1991-1992) mientras otros muestran un excedente (1992-1993) (Fig. 4b). En la Cordillera Real, las temperaturas de la estación de La Paz-San Calixto (LPSC) muestran la misma clara desviación positiva en período ENSO (Fig. 5a), 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 (Fig. 5b), pero esto no es sistemático y puede aparecer con un desfase de unos 6 meses. En período ENSO se nota una clara disminución del número de días de precipitaciones. El déficit de precipitaciones en período ENSO sobre el Altiplano peruano-boliviano es un hecho ya mencionado (Franco & Pizarro, 1985; Ronchail, 1995) que afecta sobre todo los meses de verano, época en que se registra normalmente el máximo de lluvias (diciembre-marzo): según Thompson *et al.* (1984), esto se nota sistemáticamente por un déficit de acumulación en el Nevado Quelccaya a 5 600 m.s.n.m. Lo que evidenciamos aquí es la subida de las temperaturas que afecta directamente la ablación.

#### 4. TEMPERATURAS Y PRECIPITACIONES EN EL BALANCE DE LOS GLACIARES

La comparación de años tipo permite observaciones interesantes (cuadro). Es así como los años 1982-1983 (ENSO) y 1983-1984 muestran en la Cordillera Blanca que con un exceso de precipitación igual ocurren balances muy contrastados. Por el contrario, un año seco puede tener un balance poco negativo si las temperaturas son frías (1984-1985). Sin embargo, muchas veces se ven balances fuertemente negativos que ocurren con años netamente deficitarios en precipitaciones y con temperaturas elevadas (1979-1980 y 1991-1992, este último fue un año ENSO). Bajando 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 en los glaciares de Zongo y de Chacaltaya durante el ENSO 1991-1992 donde las precipitaciones se concentraron sobre 4 meses en lugar de los 6-7 meses normales: resultó un

Años	Bal. Uruash (1)	Bal. Yana (2)	Prec (3)	Tmax (4)	Tmin (5)
1979-80	-6.72 m	-6.30 m	- 162 mm	0.77°C	- 0.15°C
1982-83	- 6.85 m	- 5.10 m	+ 288 mm	0.07°C	1.54°C
1983-84	- 3.10 m	- 1.36 m	+ 300 mm	- 1.47°C	- 0.52°C
1984-85	-2.54 m	- 1.00 m	- 43.7 mm	- 1.57°C	- 0.38°C
1991-92	-6.40 m	- 5.50 m	- 298 mm	0.60°C	- 0.33°C

- (1) Balance en Uruashraju a 4 700 m snm
- (2) Balance en Yanamarey a 4 700 m snm
- (3) Precipitaciones en Querococha (dev/promedio)
- (4) Temperatura máxima (dev/promedio)
- (5) Temperatura mínima (dev/promedio)

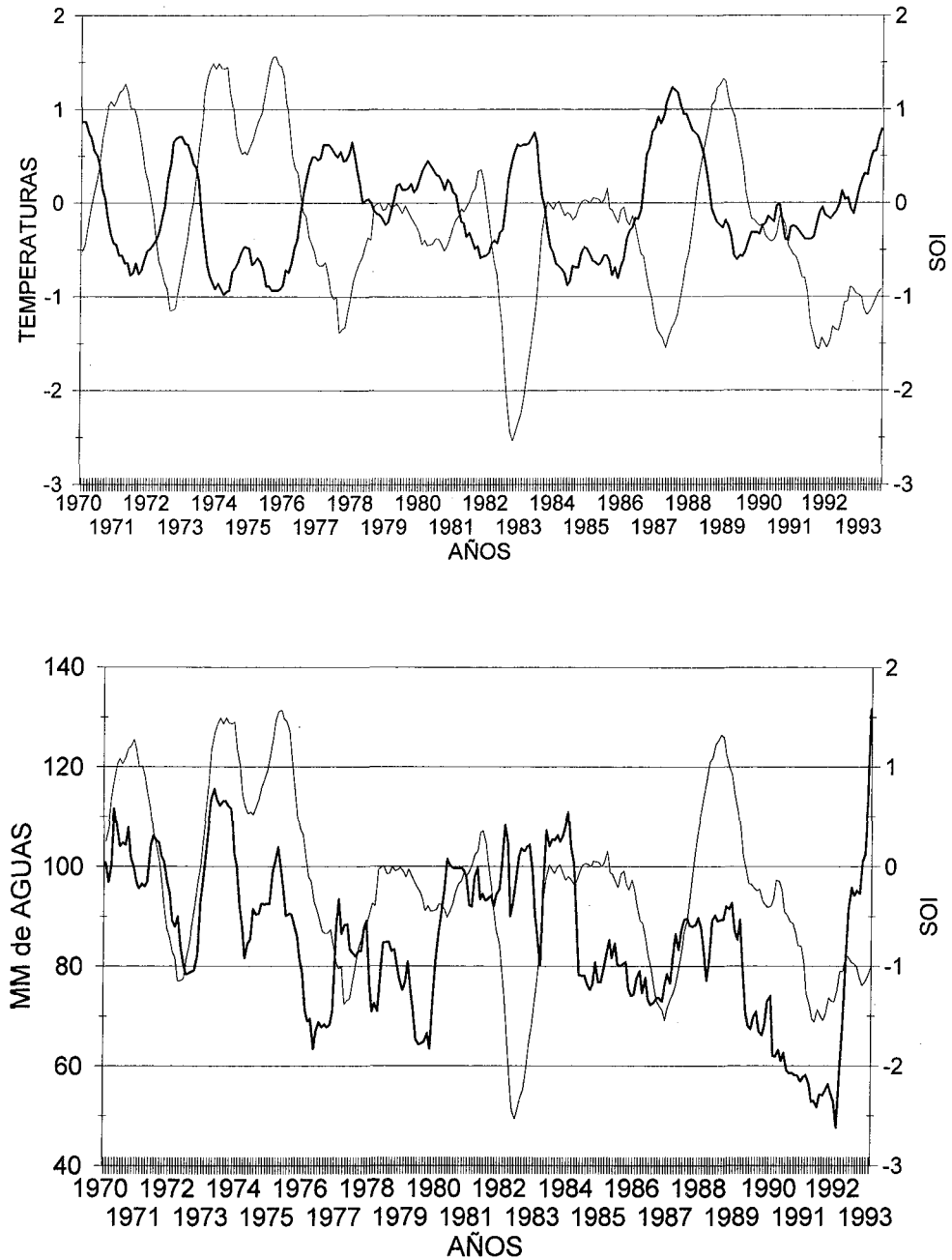


Fig. 4 - Estación de Querococha (Cordillera Blanca): (a) promedio de temperatura mensual en valores normalizados (trazo grueso), (b) total mensual de precipitaciones (trazo grueso) e Índice de Oscilación Sur (SOI) (trazos delgados). Promedios móviles calculados sobre 12 meses para todos los valores.

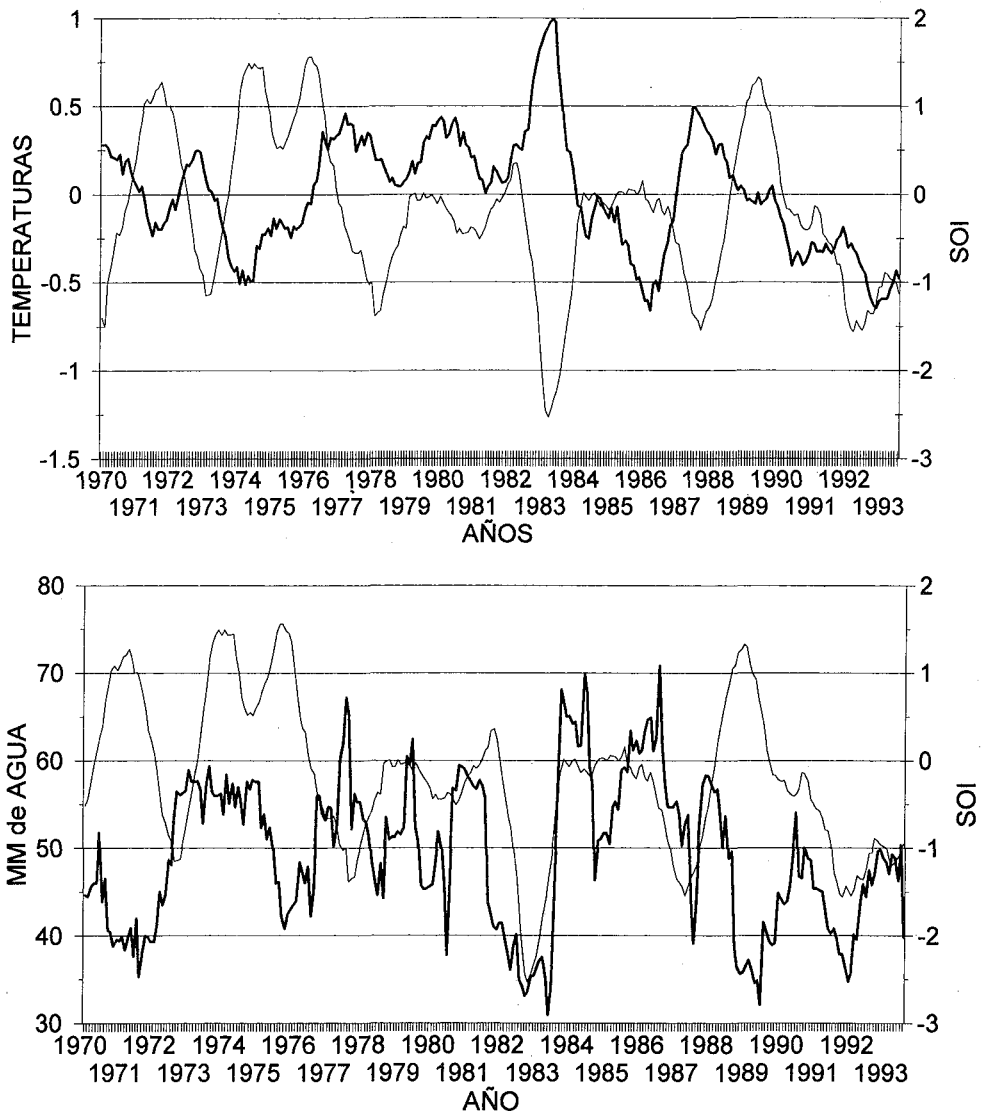


Fig. 5 - Estación de La Paz San Calixto (Bolivia): (a) promedio mensual de temperatura en valores normalizados (trazo grueso), (b) total mensual de precipitaciones (trazo grueso) e Índice de Oscilación Sur (SOI) (trazos delgados). Promedios móviles calculados sobre 12 meses para todos los valores.

balance de masa muy negativo con un total de precipitaciones anual poco diferente del promedio de 1 000 mm (Fig. 6). Así, un balance glaciar negativo es asociado en primer lugar a una temperatura de alto nivel. El rol de las precipitaciones es complejo y merece una evaluación a nivel mensual.

Utilizando las series disponibles en Bolivia y en el Perú, se pudo demostrar la correlación existente con las temperaturas:



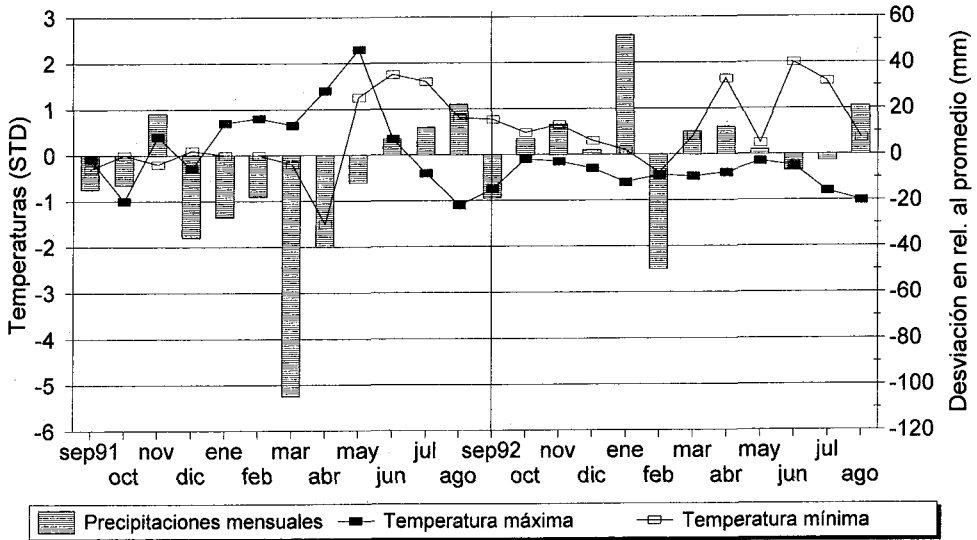


Fig. 6 - Temperaturas máximas y mínimas mensuales normalizadas de septiembre 1991 a agosto 1993 en Chacaltaya (serie 1953-1993), y desviación al promedio mensual de las precipitaciones en la Plataforma de Zongo (serie 1972-1993).

1) en el glaciar de Zongo, de 20 años, las temperaturas y escurrimiento están correctamente correlacionados (Ribstein *et al.*, 1995);

2) en la Cordillera Blanca, se ha calculado una correlación entre los balances  $b_i$  (y) de Uruashraju, las temperaturas máximas ( $T_x$ ), mínimas ( $T_n$ ) y las precipitaciones de Querococha durante el período 1977-1992 (el dato de 1992-1993, dudoso, no ha sido utilizado). La ecuación se escribe :

$$y = 25,273 - 1,959T_x - 2,192T_n \quad (2) \quad \text{con } r = 0,83, \quad n = 15$$

Las temperaturas solas explican 70% de la varianza (68% para Yanamarey), siendo las precipitaciones totales de poca importancia. Una red de balizas más densa y de mejor distribución sobre los glaciares en el período 1988-1993 hubiera mejorado esta correlación, que disminuye sensiblemente durante estos últimos años. Son resultados que confirman las observaciones hechas primero por Lliboutry *et al.* (1977), y por Kaser *et al.* (1990) en Cordillera Blanca sobre datos de pocos años.

### 5. CONCLUSIONES

1. Reconstruyendo los balances a partir de medidas hidrológicas en el glaciar de Zongo y utilizando el modelo lineal sobre los datos de los glaciares Uruashraju y Yanamarey, se dispone de series 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 aumentan durante la fase negativa del ENSO y explican la fuerte ablación medida durante esos acontecimientos. En el glaciar de Zongo, se ha notado una elevación de 200 m de la línea de equilibrio en período ENSO (1991-1992), en relación a

un año con balance equilibrado (1992-1993), y ciertos meses, el glaciar se ha encontrado totalmente en ablación del término hasta los 6 000 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, al aumento de la ablación se suma 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 indicadores del clima y de su evolución.

### Referencias citadas

- 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, 81p., Grenoble: Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement, CNRS.
- AMES, A. & FRANCOU, B., 1995 - Cordillera Blanca. Glaciares en la Historia. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 24(1): 37-64.
- FRANCOU, B. & PIZARRO, L., 1985 - El Niño y la Sequía en los Altos Andes centrales (Perú y Bolivia). *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 14(1-2): 1-18.
- FRANCOU, B., RIBSTEIN, P., TIRIAU, E. & 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.
- HASTENRATH, S. & AMES, A., 1995 - Recession of Yanamarey Glacier in Cordillera Blanca, Perú, during the 20th century. *Journal of Glaciology*, 41, 137: 191-196.
- KASER, G., AMES, A. & ZAMORA, M., 1990 - Glacier fluctuation and climate in the Cordillera Blanca, Peru. *Annales 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. & 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.
- PORTOCARRERO, C., 1995 - Retroceso de glaciares en el Perú: consecuencias sobre los recursos hídricos y los riesgos geodinámicos. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 24(3): 697-706, Actes du Séminaire Eaux, Glaciers et Changements Climatiques dans les Andes Tropicales, Ed. Ribstein *et al.*
- 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.
- RIGAUDIÈRE, P., RIBSTEIN, P., FRANCOU, B., POUYAUD, B. & SARAVIA, R., 1995 - Un modèle hydrologique du Glacier de Zongo, 90p., Informe 44, La Paz : ORSTOM.
- RONCHAIL, J., 1995 - Variabilidad de las precipitaciones en Bolivia. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 24(3): 369-378, Actes du Séminaire Eaux, Glaciers et Changements Climatiques dans les Andes Tropicales, Ed. Ribstein *et al.*
- THOMPSON, L.G., MOSLEY-THOMPSON, E. & MORALES ARNAO, B., 1984 - El-Niño Southern Oscillation as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya ice cap, Peru. *Science*, 226: 50-52.