

## El glaciar 15 del Antisana: investigaciones glaciológicas y su relación con el recurso hídrico

**BOLIVAR CACERES<sup>1</sup>, BERNARD FRANCOU<sup>2</sup>, VINCENT FAVIER<sup>2</sup>,  
GUILLAUME BONTRON<sup>2</sup>, PIERRE TACHKER<sup>2</sup>, RODOLPHE BUCHER<sup>2</sup>,  
JEAN DENIS TAUPIN<sup>2</sup>, MATHIAS VUILLE<sup>3</sup>, LUIS MAISINCHO<sup>1</sup>,  
FANNY DELACHAUX<sup>4</sup>, JEAN PHILIPPE CHAZARIN<sup>4</sup>, ERIC CADIER<sup>4</sup> &  
MARCOS VILLACIS<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> INAMHI, Iñaquito, 700 y Corea, Quito, Ecuador

[bolivarc@inamhi.gov.ec](mailto:bolivarc@inamhi.gov.ec)

<sup>2</sup> IRD, CP 9214, La Paz, Bolivia

<sup>3</sup> Climate System Research Center, Department of Geosciences, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts, USA

<sup>4</sup> IRD, Whymper 442 y Coruña, Quito, Ecuador

**Resumen** Sobre el área de ablación de un glaciar del Antisana, el balance de masa ha sido medido a una escala mensual, proveyendo interesantes detalles acerca del patrón estacional que se encuentra en estos ambientes contrastados. Información no continua acerca de la recesión del hielo se la puede encontrar para las décadas anteriores. Los datos recogidos muestran una aceleración clara en el derretimiento de los glaciares desde comienzos de los ochenta. La situación es particularmente dramática para los glaciares de pequeño tamaño (<1 km<sup>2</sup>) los cuales podrían desaparecer en los próximos cinco años. Durante la década pasada (noventa) las tasas de ablación fueron en promedio altas, llegando a ser más intensas durante la fase cálida de el ENSO (El Niño). Esta situación es analizada en relación con las peculiares condiciones climáticas que han prevalecido en los trópicos durante los últimos 25 años: un incremento en la temperatura sobre la mediana troposfera en alrededor de 1°C, relacionado a un largo período de incremento en la temperatura superficial del mar. Los glaciares tropicales se muestran como claros indicadores del calentamiento global y la variabilidad climática a una escala mundial y regional.

**Palabras claves** glaciares; balance; ablación; ENSO; clima

### Glacier 15, Antisana, Ecuador: its glaciology and relations to water resources

**Abstract** Besides the Lewis glacier in Kenya, Glacier 15 of Antisana, Ecuador (5760–4830 m, 0.28 km<sup>2</sup>) is the only one which provides regular information regarding glacier mass balance near to the Equator (Annual Report of the World Services for the Monitoring of Glaciers, WGMS 2005) to the scientific community. The surface of the glacier had been re-constructed using aerial-photogrammetry from 1956 to 1997. Since 1994, direct measurements have been taken over the terminal zone at the glacier tongue using topography. That process has shown the changes at the glacier limits and has determined the superficial speed at the terminal zone of the tongue (ablation zone). At the ablation zone (<5100 m) a wide net of stakes have been installed in order to measure the evolution of the glacier mass each month since 1995. In addition, holes to measure accumulation have been dug in the ablation zone at the end of the hydrological year (December–January) in order to calculate the net specific annual balance. Glacier 15 has lost an average of 600 mm of water a year since 1995 (11 years). The inter-annual variation is wide: very negative balances were observed in 1995 and 2002, two positive balances in 1999 and 2000, and negative balances for the remaining years. The dynamics of the glacier show a mass balance with very noticeable fluctuations. These variations are well synchronized with the glacier evolution. The variability of the ENSO (El Niño Southern Oscillation) has been an important factor in controlling the mass evolution of the Ecuadorian glaciers and the climate conditions. Those factors caused advances and retreats on the glaciers according to La Niña (cold event) or El Niño (warm event), respectively. This study has shown the relationship between glaciology and availability of hydrological sources.

**Key words** glacier; balance; ablation; ENSO; climate

### INTRODUCCIÓN

El Balance de masa y las corrientes provenientes de los glaciares han tenido un monitoreo continuo desde 1995, sobre el glaciar 15 del Antisana (0°, Cordillera Oriental, Ecuador), debido a que se hace necesario tener un conocimiento sobre la disponibilidad del recurso hídrico en un futuro mediato, la ciudad de Quito que se encuentra en sus cercanías se abastece en gran medida de las aguas provenientes de los deshielos de los casquetes glaciares del Antisana y Cotopaxi.

Mediante este estudio se ha podido establecer que el área cubierta por los glaciares se ha reducido de manera apreciable en los últimos 49 años alcanzando un valor del 22% lo que afecta

de manera significativa el régimen hidrológico del río que sale del glaciar lo que afecta directamente a la disponibilidad futura de este recurso para uso del hombre (Cáceres *et al.*, 2005).

## METODOLOGÍA

Sobre el Glaciar 15 del Antisana se han utilizado tres métodos para realizar el estudio sobre su evolución:

- Restitución fotogramétrica de las fotografías existentes, las cuales corresponden a los años de 1956, 1965, 1993 y 1997 (IGM), las cuales proveen información clara sobre las fluctuaciones ocurridas en el glaciar durante los últimos 49 años (Cáceres, 2003).
- Medidas topográficas directas sobre el campo desde el año de 1996 sobre la zona de ablación.
- Una densa red de medida mediante la utilización de estacas sobre la zona de ablación (debajo de los 5100 m) la cual es visitada mensualmente, pozos de acumulación ubicados sobre esta zona (entre 5100 y 5760 m) con mediciones anuales y medidas de la cantidad de precipitación mensual mediante la utilización de pluviómetros totalizadores ubicados en la zona cercana al glaciar (Cáceres *et al.*, 2005).

Para el cálculo del balance se utilizaron las siguientes relaciones:

$$B = -0.9(H_{m+1} - H_m) + 0.4(N_m - N_{m+1}) \quad (1)$$

$$B = -0.9(H_{m+1} - H_m) + 0.4(N_m + e_{m-1} - e_{m-2}) \quad (2)$$

Donde:

$B$  = balance, equivalente en mm de agua de la cantidad de hielo/nieve perdida por el glaciar en el sitio de cada estaca.

$H$  = emergencia de la baliza respecto a la superficie del hielo en cm.

$N$  = espesor de la capa de nieve.

$e$  = emergencia del extremo de la baliza respecto a la superficie superior en cm.

$m$  = mes dado

$m \pm 1,2$  = mes anterior o posterior.

(1) ecuación para el caso de tener las medidas correctas.

(2) ecuación para el caso de tener errores sobre la medida del espesor del hielo.

## RESULTADOS

Durante los últimos diez años, las longitudes de las dos lenguas en estudio han retrocedido 8 y 11 veces más rápido que durante el período 1956–1993. El área de la cobertura de las dos lenguas se ha reducido tres veces más rápido que durante el período 1956–1993. La longitudes y áreas se han reducido en un porcentaje de 12% y 7% respectivamente. Esta evolución se la puede relacionar con la ocurrencia de balances negativos como se evidencia en la Fig. 1.

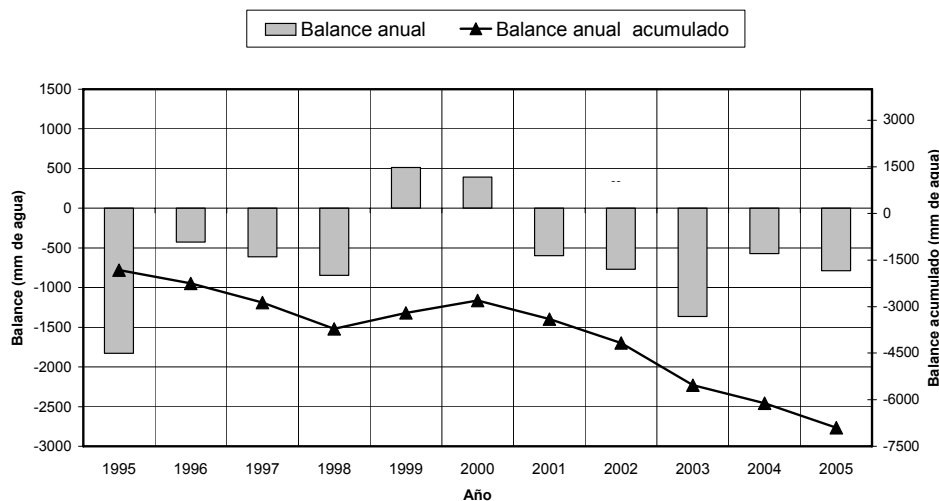
### Evolución del balance de masa sobre el Glaciar 15 del Antisana

El déficit sobre el Glaciar 15 del Antisana como promedio para estos once años de monitoreo alcanza el valor de  $-627$  mm de equivalente agua repartidos sobre toda la superficie del glaciar ( $0.28 \text{ km}^2$ ) como promedio por año, ver Tabla 1 (Cáceres, 2005).

En la Fig. 2 se aprecia la relación que existe entre la ocurrencia del fenómeno ENSO el cual se lo caracterizo utilizando el índice MEI (Wolter *et al.*, 1993) y el balance de masa que se mide sobre la zona de ablación del glaciar (Cáceres, 2005). La sucesión de estos valores de balances negativos y positivos o menos deficitarios coincide con el apareamiento de la fase cálida y fría de el ENSO.

Sobre el Glaciar 15 del Antisana se tiene una pérdida acumulada desde el año de 1995 con un valor de  $35\,903$  mm en equivalente de agua ( $36$  m) calculados en relación con la zona de ablación, considerando que el año hidrológico comienza en enero y termina en diciembre.

**Balance anual y balance acumulado para el glaciar 15 α del Antisana**



**Fig. 1** Evolución del balance de masa sobre el Glaciar 15 a del Antisana.

**Tabla 1** Recapitulación de los datos relacionados al balance neto específico para los once años de monitoreo del Glaciar 15 a.

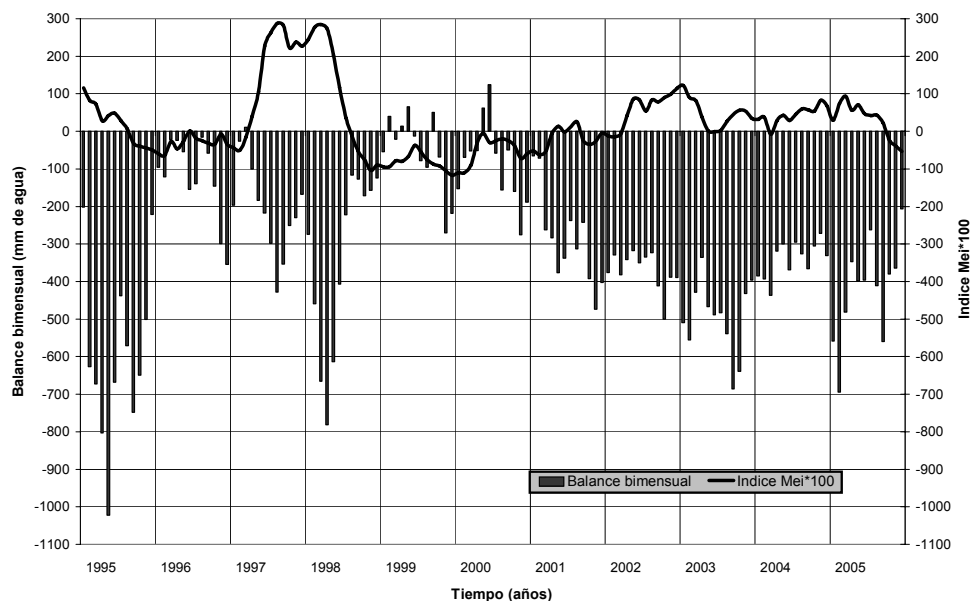
Año (1)	B <sub>n</sub> (2)	ΣB <sub>n</sub> (3)	A (4)	B <sub>ter</sub> (5)	B <sub>sum</sub> (6)	ELA (7)	AAR (8)	Prec. (9)	Term. (10)	ΣTerm. (11)
1995	-1830	-1830	2580	-7624	+654	5245	45	750	-28.20	-28
1996	-428	-2258	1310	-4532	+826	5115	60	882	-40.62	-69
1997	-612	-2870	1597	-6949	+870	5110	62	985	-56.25	-125
1998	-845	-3715	1985	-6048	+675	5100	65	1140	-34.38	-159
1999	+515	-3200	700	-2214	+1080	4960	84	1215	+21.43	-138
<b>2000</b>	<b>+393</b>	<b>-2807</b>	<b>632</b>	<b>-2045</b>	<b>+890</b>	<b>4980</b>	<b>80</b>	<b>1025</b>	<b>+17.80</b>	<b>-120</b>
<b>2001</b>	<b>-598</b>	<b>-3405</b>	<b>1348</b>	<b>-4830</b>	<b>+940</b>	<b>5085</b>	<b>60</b>	<b>750</b>	<b>-11.2</b>	<b>-131</b>
<b>2002</b>	<b>-769</b>	<b>-4174</b>	<b>1870</b>	<b>-4999</b>	<b>+900</b>	<b>5145</b>	<b>50</b>	<b>1101</b>	<b>-19</b>	<b>-150</b>
<b>2003</b>	<b>-1362</b>	<b>-5536</b>	<b>2117</b>	<b>-6633</b>	<b>+810</b>	<b>5225</b>	<b>42</b>	<b>755</b>	<b>-55</b>	<b>-205</b>
<b>2004</b>	<b>-572</b>	<b>-6108</b>	<b>1352</b>	<b>-5420</b>	<b>+957</b>	<b>5145</b>	<b>56</b>	<b>780</b>	<b>-31</b>	<b>-236</b>
<b>2005</b>	<b>-789</b>	<b>-6897</b>	<b>1706</b>	<b>-6580</b>	<b>+878</b>	<b>5220</b>	<b>54</b>	<b>917</b>	<b>-28</b>	<b>-264</b>
<b>Prom</b>	<b>-627</b>	<b>-</b>	<b>1563</b>	<b>-5261</b>	<b>+862</b>	<b>5120</b>	<b>60</b>	<b>936</b>	<b>-24</b>	<b>-</b>

**Leyenda** (1) Año hidrológico (enero–diciembre), (2) Balance neto específico (mm de agua), (3) Balance neto acumulado (mm de agua), (4) Ablación específica:  $A = P - B_n$  (mm de agua), (5) Balance en la parte más baja (4833 m en mm de agua), (6) Balance en la parte más alta (5750 m en mm de agua), (7) Altitud de la línea de equilibrio (ELA), (8) Porcentaje de la área de acumulación (Accumulation Area Ratio (en %)), (9) Precipitación en las cercanías del glaciar:  $P = [P2]$  (en mm de agua), (10) Retroceso del frente ( en metros referidos a la marca precedente), (11) Retroceso acumulado del frente (en metros).

**ANÁLISIS Y CONCLUSIONES**

Los resultados mostrados confirman la dramática recesión reciente de los glaciares en los Andes tropicales y específicamente en el Ecuador. Durante la década pasada el promedio de déficit de balance para los glaciares Tropicales incluyendo el Antisana estuvo en el orden de 600 a 1400 mm equivalentes en agua de pérdida por año. (Francou *et al.*, 2000).

Para el Glaciar 15 del Antisana se ha observado para el período investigado de once años tres largos períodos de ablación, el primero durante el año de 1995, el segundo entre abril de 1997 y mayo de 1998 y un tercero que empieza en el 2001 y se mantiene hasta la actualidad. Entre estos dos se ubican dos períodos de ablación más moderada, uno en 1996 y otro que comienza en abril–mayo de 1998 y continuo hasta el mes de diciembre del 2001 (Cáceres, 2003). Por lo tanto se puede decir que la respuesta de los glaciares a las variaciones de temperatura al Este del Pacífico no experimenta un retraso significativo, se estableció un desfase de tres meses entre la ocurrencia de anomalías de temperatura a nivel del mar (SST) y la respuesta de los glaciares en el Ecuador, este hecho sugiere que existe una relación directa entre el fenómeno ENSO y la fusión de los glaciares ubicados sobre las cordilleras Occidental y Oriental de los Andes Ecuatorianos (Francou *et al.*, 2004).



**Fig. 2** Evolución bimensual del balance en la zona de ablación para el Glaciar 15 a del Antisana para el período 1995–2005 relacionada con la ocurrencia del fenómeno ENSO.

Los resultados obtenidos de la aplicación de los métodos topográficos y aero fotogramétricos son bastante consistentes con una precisión de 8 metros, los levantamientos obtenidos han sido mezclados para obtener el retroceso producido en el glaciar desde el año de 1956 (Cáceres, 2003).

Para los diez años, las lenguas alfa y beta han retrocedido de siete a ocho veces más rápido que durante el período comprendido entre 1956 y 1993, mientras que el área total del glaciar quince ha disminuido tres veces más rápido (Cáceres et al., 2005).

El glaciar es un instrumento que nos permite estudiar la variabilidad del clima sobre una amplia región. Su estudio continuo contribuirá en el futuro para la elaboración de un modelo de la respuesta de los glaciares en el Ecuador frente a los cambios climáticos (Cáceres, 2003; Francou et al., 2004).

Para la cuenca hidrológica del glaciar Los Crespos cercano al glaciar 15 se pudo establecer que el escurrimiento proveniente de la fusión del glaciar corresponde al 26% del caudal total medido en una estación hidrológica cercana, el 74% restante corresponde al escurrimiento superficial de las precipitaciones, a los aportes de agua subterránea del acuífero y a las infiltraciones profundas que se producen bajo el lecho del glaciar, evidenciando la importancia del agua proveniente de la fusión del hielo, al momento se realizan estudios complementarios para definir de manera más precisa estos valores y relacionarlos con la hidrología del páramo cuyo estudio recién se está iniciando (Cáceres et al., 2005).

**Agradecimientos** Este programa de investigación se lo puede desarrollar gracias al aporte del IRD (Francia) y a la colaboración del INAMHI (Ecuador).

## REFERENCIAS

- Cáceres, B. (2003) Comportamiento de un Glaciar de la Cordillera Real del Ecuador en relación con los factores climáticos, cambios geométricos registrados sobre el glaciar en el período 1995–2001. Estudio realizado en el glaciar 15 Alfa (15a) del Antisana. Tesis de Grado, FIGEMPA- Universidad Central del Ecuador, Ecuador.
- Cáceres, B., Maisincho, L., Taupin, J. D., Francou, B., Cadier, E., Delachaux, F., Bucher, R., Villacis, M., Paredes, D., Chazarin, J. P., Garcés, A. & Laval, R. (2005) Glaciares del Ecuador: Antisana y Carihuayrazo. Balance de masa, topografía, meteorología e hidrología. Informe IRD-INAMHI- EMAAPQ, Quito, Ecuador.
- Cáceres, B. (2006) Cálculo de Balance de masa par el Glaciar 15 alfa del Antisana (en prensa).
- Francou, B., Cáceres, B., Ramírez, E. & Mendoza, J. (2000) Glacier evolution in the tropical Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, and Antisana, Ecuador. *Ambio* **29**(7), 416–422.
- Francou, B., Vuille, M., Favier, V. & Cáceres, B. (2004) New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antisana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S. *J. Geophys. Res.* **109**, D1806
- Wolter, K. & Timlin, M. S. (1993) Monitoring ENSO in CADS with a seasonally adjusted principal component index. In: *Proc. 17th Climate Diagnostics Workshop* (Norman, Oklahoma), 52–57. NOAA/N MC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and School of Meteorology, University of Oklahoma, USA.