

EL GLACIAR 15 DEL ANTIZANA (Ecuador)

Investigaciones Glaciológicas 1994-1997



El Antizana. Grabado de Edward Whympere

**Hubert Sémiond • Bernard Francou • Edgar Ayabaca
Alfredo de la Cruz • Ramón Chango**



Quito, 1998

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: A*14174 Ex:

A
S
L
E
M

EL GLACIAR 15 DEL ANTIZANA (ECUADOR)

Investigaciones Glaciológicas 1994-1997

MAY 04 1998

ORSTOM
Centre Documentation
Quito

ORSTOM Documentation



020005182

ψ1 551
SEM
h^o 231

EL GLACIAR 15 DEL ANTIZANA (ECUADOR)

Investigaciones Glaciológicas 1994-1997

*Hubert Sémiond¹, Bernard Francou², Edgar Ayabaca³,
Alfredo de la Cruz³, & Ramón Chango⁴*

¹IFEA-ORSTOM, Quito. - ²ORSTOM-CNRS, Quito -
³EMAAP-Q, Quito - ⁴INAMHI, Quito -

*Leurs cimes se perdent dans les nues.
& presque toutes sont couvertes de masses énormes
d'une neige aussi ancienne que le monde.*

Charles-Marie de La Condamine,
Journal du voyage à l'Equateur, 1751

INDICE

	Pág.
PREFACIO	6
1. PROGRAMA DE MONITOREO DE GLACIARES	7
1.1. Extensión del programa en los Andes Centrales	7
1.2. Programa de monitoreo en el Ecuador	7
1.3. Objetivo del presente informe	8
2. GENERALIDADES	8
2.1. ¿Cómo estudiar el funcionamiento de un glaciar ?	8
2.1.1. Balance neto específico	8
2.1.2. Métodos empleados en la estimación del balance	9
2.1.3. Gradiente Vertical del Balance, Línea de Equilibrio Relación del área de acumulación respecto al área total del glaciar	9
2.1.4. Dinámica del glaciar, variación de la velocidad y oscilaciones del frente	10
2.2. Particularidades de los glaciares ecuatorianos	11
2.2.1. Particularidades físico - geográficas	11
2.2.2. Particularidades históricas	12
3. EL PROGRAMA ANTIZANA Y SUS APLICACIONES	13
3.1. El Antizana, una importante fuente de agua del proyecto La Mica - Quito Sur	13
3.2. Características generales del Glaciar 15 α del Antizana	13
4. SISTEMA DE MEDICIONES INSTALADO EN EL GLACIAR 15 α Y PROCESAMIENTO DE SUS DATOS	16
4.1. Zona de ablación	16
4.1.1. Red inicial de balizas	16
4.1.2. Colocación de nuevas balizas	18
4.1.3. Equipamiento de la lengua β del Glaciar 15	20
4.1.4. Frecuencia de las mediciones y procedimiento de cálculo	21
4.1.5. Datos obtenidos	24
4.2. Zona de acumulación	25
4.2.1. Pozos de nieve (snow pits)	25
4.2.2. Perforación realizada en la cumbre del Antizana.	26
4.3. Estimación del balance neto específico, metodología.	26
4.4. Medición de las precipitaciones	27

4.4.1. Precipitaciones registradas en las proximidades del Glaciar 15	26
4.4.2. Ampliación del estudio a los alrededores del nevado	28
4.5. La ablación.	28
5. RESULTADOS, BALANCE NETO ESPECIFICO	29
5.1. Serie completa de mediciones entre agosto de 1994 y agosto de 1997	29
5.1.1. El balance	29
5.1.2. Índice de ablación	31
5.2. Resultados en el año hidrológico 1995	32
5.2.1. Balance en la zona de ablación	32
5.2.2. Balance en la zona de acumulación	39
5.2.3. El balance neto específico y línea de equilibrio del glaciar en 1995	46
5.2.4. Relación con las precipitaciones	48
5.3. Resultados en el año hidrológico 1996	49
5.3.1. Balance en la zona de ablación	49
5.3.2. Balance en la zona de acumulación	54
5.3.3. Balance neto específico y línea de equilibrio del glaciar en 1.996	58
5.3.4. Relación balance-precipitaciones	60
5.4. Comparación entre resultados de los años 1.995 y 1.996	60
5.4.1. La zona de ablación.	60
5.4.2. Balance neto específico de todo el glaciar	65
5.4.3. Isolíneas del balance.	66
5.4.4. Línea de equilibrio (ELA) y relación AAR	69
6. PRECIPITACIONES : NIEVE Y LLUVIA.	70
6.1. Serie comprendida entre agosto de 1.994 y julio de 1.997	70
6.2. Precipitaciones del año 1.995	71
6.3. Precipitaciones del año 1.996	74
6.4. Comparación de las precipitaciones medidas cerca del glaciar del Antizana en los años 1.994 a 1997.	76
7. CAMBIOS GEOMETRICOS DEL GLACIAR 15 α ENTRE 1.994 Y 1.997.	76
7.1. Levantamientos topográficos	76
7.2. Desplazamientos de las balizas.	78
7.3. Medición directa de la ubicación del frente de la lengua α del glaciar	79
8. LIMNIMETRÍA	80
8.1. Estación limnimétrica <i>Antizana</i> .	80

8.1.1. Ubicación	80
8.1.2. Equipo de medición	80
8.1.3. Adecuaciones hechas en la estación	80
8.2. Ejemplos de caudales e hidrogramas registrados.	81
8.2.1. Serie comprendida entre diciembre de 1996 y septiembre de 1997	81
8.2.2. Un régimen típico de ríos emisarios de glaciares.	82
9. CONCLUSIONES	84
10. REFERENCIAS	85
AGRADECIMIENTOS	86
DOCUMENTOS ANEXOS	87

PREFACIO

El Programa NGT (Neiges & Glaciers Tropicaux) del ORSTOM en 1991 se planteó como primer objetivo instalar una red de monitoreo de glaciares que se extienda en los Andes Centrales desde Bolivia, al Sur, hasta el Ecuador, al Norte. Seis años han transcurrido y gran parte de lo previsto ha sido alcanzado: mediciones glacio - hidrológicas básicas, junto con datos especializados, son recogidos regularmente en dos glaciares de Bolivia (16° S), un primer apoyo ha sido dado al programa de monitoreo existente en Perú (10° S), y en este informe se publican los primeros resultados que han sido registrados en un nevado del Ecuador. El Programa NGT ha sido apoyado significativamente por nuestros consocios de los países anfitriones, sin cuya participación sería imposible mantener un sistema permanente de mediciones. Son ellos quienes tomarán sobre sí la carga esencial del monitoreo luego de una transferencia paulatina que garantizará la permanencia de la red de mediciones y la calidad de los datos.

En el Ecuador ya existía una tradición de observaciones glaciológicas. Las primeras expediciones, en las cuales constan las efectuadas por los primeros glaciólogos como Hans Meyer y observadores meticulosos como Edward Whymper, han reunido una gran cantidad de datos que todavía no han sido explotados metódicamente. Stefan Hastenrath, el pionero de la glaciología tropical en Africa y América Andina, en su breve síntesis de 1.981 insistía sobre los glaciares del Ecuador señalando la necesidad de emprender un programa de monitoreo minucioso y sistemático sobre algunos de ellos; allí citaba los nevados del Altar, el Cotopaxi o el Cayambe como los más favorables. Nuestra opción fue diferente ya que estuvo dictada, al igual que en otros glaciares importantes del programa, por la preocupación de considerar junto al estudio glaciológico las aplicaciones y necesidades hidrológicas. El primer estudio sobre el Nevado Antizana fue realizado en los años 1980 para la EMAAP-Quito por Louis Lliboutry, quien en aquella ocasión no dispuso de mayor cantidad de datos y mediciones de campo.

Por lo expuesto se puede considerar que el presente informe constituye el primer estudio sistemático de un glaciar ecuatoriano. Al igual que en otros informes publicados por el ORSTOM sobre glaciares monitoreados, éste documento consiste ante todo en una exposición de los métodos de trabajo y un resumen de datos debidamente comprobados, con lo cual se convierte esencialmente en una herramienta para ulteriores análisis y publicaciones especializadas. Es menester subrayar el importante esfuerzo realizado por la EMAAP de Quito en la recolección de datos y su apoyo en las obras de campo, así como la gran labor efectuada por el Ing. Hubert Sémond durante los 15 meses de su permanencia en el programa NGT - Ecuador. El ha sido el principal autor de la redacción de este informe. Quienes hemos participado directamente en la preparación de esta publicación agradecemos en las últimas páginas a todas las personas que contribuyeron al éxito de las investigaciones presentadas.

Y si bien es cierto que con este trabajo se concluye la primera fase del programa, también es verdad que los estudios efectuados constituyen sólo un primer paso. Otras mediciones y trabajos serán emprendidos próximamente sobre este glaciar. En 1998 sus instrumentos de medición serán equivalentes al dispositivo más completo de cuantos existen en los Trópicos, como sucede con el Glaciar Zongo de Bolivia. Se ha previsto que el informe del próximo año dará una visión más amplia y completa del Glaciar 15 del Antizana.

*Dr. Bernard Francou,
Quito, octubre de 1997*

1. PROGRAMA DE MONITOREO DE GLACIARES

1.1. Extensión del programa en los Andes Centrales

El programa de monitoreo de glaciares en el Ecuador forma parte del estudio de glaciares que el ORSTOM (Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación), a través de su programa NGT (*Neiges & Glaciers Tropicaux*) desarrolla con sus contrapartes regionales en los Andes Centrales. El programa incluye: dos glaciares en Bolivia (Zongo y Chacaltaya) ; dos glaciares en Perú (Yanamarey y Artesonraju) ; y dos glaciares en Ecuador (Antizana y Carihuayrazo).

El programa, basándose en las mediciones de esta red regional, tiene como objetivo:

- Estudiar la respuesta que presentan los glaciares, ubicados entre los Trópicos, al cambio climático global y la variabilidad del clima en la zona, respuesta que en Perú y Bolivia podría estar altamente controlada por eventos climáticos del Pacífico Ecuatorial como el fenómeno El Niño (Francou *et al.*, 1995);
- Analizar las consecuencias que podría tener para el futuro de los recursos hídricos, la reducción acelerada de los volúmenes de hielo, tal como se ha venido observando desde principios del año 1980 (Pouyaud *et al.*, 1995).

1.2. Programa de monitoreo en el Ecuador

El monitoreo en el Ecuador se ha centrado en dos glaciares: uno en el Antizana y otro en el Carihuayrazo. El estudio del primero empezó en 1994 con la misión de Bernard Francou en el Ecuador, cuando seleccionó el Glaciar 15 que se emplaza en las laderas occidentales del volcán Antizana. En aquella ocasión fueron colocados los primeros equipos en colaboración con la EMAAP-Quito¹ y el INAMHI². A partir de ello, la continuidad de las mediciones fue garantizada por la EMAAP-Quito; a la vez que B. Francou realizaba misiones periódicas desde Bolivia a fin de participar directamente en las mediciones y ampliar los equipos instalados sobre el glaciar. En 1996, el ORSTOM reforzó su participación mediante la colaboración con dedicación exclusiva de Hubert Sémiond, investigador del IFEA (Instituto Francés de Estudios Andinos), que coordinó y ejecutó el programa en Quito y quien además, es el principal autor de este primer informe.

El Antizana fue escogido por cuanto sus glaciares tienen un interés económico ya que entregarán parte de sus aguas al futuro embalse La Mica y suministrarán agua potable a los barrios del Sur de Quito. El Glaciar 15, además, posee características favorables para su investigación, ya que:

- Sus hielos dan origen a un río emisario que recoge la mayoría de las aguas producto de la fusión y su caudal puede ser medido con relativa facilidad; cabe mencionar que el *bedrock* de los glaciares ecuatorianos muchas veces está constituido por cenizas volcánicas donde se infiltran las aguas sin que lleguen a formar ríos;

¹ Empresa Municipal de Agua Potable de Quito, Ecuador.

² Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Ecuador.

- Su cuenca de acumulación puede ser delimitada con bastante precisión, lo cual no es frecuente en el Ecuador cuyos nevados se desarrollan sobre volcanes de forma cónica, donde las fronteras entre las cuencas glaciológicas son difíciles de establecer;
- El acceso al Glaciar es uno de los más fáciles debido a que se dispone de un camino que partiendo del campamento La Mica permite llegar con vehículo a la estación limnigráfica en menos de una hora; desde allí, con una caminata de 20 minutos se puede alcanzar el extremo inferior del glaciar;
- La lengua del Glaciar no está recubierta por depósitos morrénicos y permite medir con mucha precisión sus movimientos en el transcurso del tiempo.

1.3. Objetivo del presente informe

Este informe tiene como objetivo presentar la primera recopilación de los estudios realizados en el Glaciar 15 del Antizana a partir del año 1994. Al igual que otros informes anuales del ORSTOM sobre los glaciares bolivianos, aquí se exponen los datos iniciales luego de haberlos sometido a una revisión preliminar, a partir de lo cual se formulan diversos comentarios. El análisis detallado de estos datos será efectuado en estudios posteriores y publicaciones especializadas. Los datos están organizados en cuatro capítulos que resumen las cuatro grandes orientaciones del trabajo realizado en el transcurso de los tres últimos años:

- Balance de masa del glaciar: ablación y acumulación.
- Precipitaciones y su distribución.
- Cambios geométricos: topografía del glaciar, variaciones del extremo inferior, velocidades superficiales.
- Primeras mediciones de caudal en la estación limnigráfica Antizana.

2. GENERALIDADES

2.1. ¿Cómo estudiar el funcionamiento de un glaciar?

Un glaciar puede ser considerado como un objeto hidrológico cuya masa cambia a corto plazo en función de la evolución que tenga el clima. Esos cambios de masa generan variaciones geométricas del glaciar, lo cual se traduce en modificaciones de su superficie y longitud, así como en alteraciones de la velocidad del movimiento que tiene el hielo. La estimación de esa evolución conforma la parte glaciológica del informe, cuyos métodos y resultados se exponen en los capítulos 2 a 5. En las siguientes secciones 6 y 8 se presentan otras variables tales como precipitaciones y datos limnimétricos que luego se emplean en la estimación del balance hidrológico.

2.1.1. Balance neto específico

Un glaciar es una masa de hielo que se alimenta de agua sólida, la transforma en hielo y la restituye luego en estado gaseoso (evaporación y sublimación) o estado líquido (agua del

torrente emisario). El análisis de esos ingresos y esas pérdidas de agua se conoce con el nombre de balance del glaciar.

El balance de masa B se determina mediante la diferencia entre la acumulación y ablación que se han producido durante cierto intervalo de tiempo (generalmente un año hidrológico) y representa el cambio de masa que ha experimentado el glaciar. Cuando el balance se expresa en términos de volumen equivalente de agua (ya sea en metros cúbicos o milímetros de agua prorrateada sobre toda la superficie del glaciar), se denomina balance neto específico (B_n), el mismo que se define mediante la siguiente relación:

$$B_n = \int S_c \cdot b_n \cdot dS + \int S_a \cdot b_n \cdot dS \quad (1);$$

donde: S_c es el área de la zona de acumulación, S_a el área de la zona de ablación y b_n representa el balance elemental en cada punto del glaciar.

2.1.2. Métodos empleados en la estimación del balance

En la estimación del balance de masa de un glaciar se emplean diversos métodos, entre los cuales consta el método de la restitución aerofotogramétrica que permite calcular las variaciones del volumen de hielo entre dos fechas, separadas generalmente por varios años.

Se utiliza también el método hidrológico que a escala anual, calcula la diferencia entre la cantidad de hielo acumulado por las precipitaciones sólidas P , y los egresos debidos a la ablación E (evaporación y sublimación) y la fusión R . Esta última es medida directamente con ayuda de una estación limnimétrica que se ubica sobre el río emisario, a poca distancia de la lengua terminal del glaciar. Al disponer de la respectiva información, el balance neto B_n se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$B_n = P - R - E \quad (2).$$

El método más usual consiste en medir directamente el cambio de masa del glaciar. Para ello, partiendo desde el extremo inferior del glaciar hacia arriba, se clavan en el hielo profundas estacas (llamadas balizas) que conforman una red distribuida sobre gran parte del glaciar. En las zonas superiores del glaciar, donde generalmente la acumulación supera a la ablación, se excavan pozos en los cuales, mediante densimetría, se mide directamente la cantidad de agua acumulada entre el principio y el final del año hidrológico. A partir de esos datos, el balance se calcula para cada rango altitudinal, dentro de los cuales se toman en consideración los puntos de medición más representativos.

2.1.3. Gradiente Vertical del Balance, Línea de Equilibrio, Relación del área de acumulación respecto al área total del glaciar

El valor que tiene el balance en diversos puntos altitudinales del glaciar no es constante ya que varía de un lugar a otro. La tasa de variación que presenta el balance a medida que aumenta la posición altimétrica se denomina Gradiente Vertical del Balance (GVB), y se la calcula mediante su derivada db/dz . Usualmente se la expresa en: milímetros equivalentes de agua /metro de desnivel (mm/m). La gradiente vertical suele alcanzar grandes valores en la zona de

ablación, particularmente en los glaciares tropicales donde con frecuencia supera los 10 mm/m ó mucho más. En las zonas altas del glaciar el gradiente del balance tiene valores menores ya que depende sobretodo de la acumulación, la misma que cambia en dependencia de la altura, el relieve y la orientación de la superficie.

La variación que sufre el balance, en función de la altura, no es rectilínea ya que tiene la forma de una curva más o menos regular. El nivel altimétrico donde el balance es nulo corresponde a la línea de equilibrio del glaciar, la misma que delimita a la zona de acumulación (donde la acumulación es mayor a la ablación) respecto de la zona de ablación (donde la acumulación es menor a la ablación). La posición altimétrica de la línea de equilibrio del glaciar (*Equilibrium Line Altitude* en inglés, o ELA), varía cada año en dependencia de los cambios que ha tenido el balance.

Las mediciones del balance, hechas con balizas en glaciares de diversas montañas del mundo, han conducido a la siguiente conclusión: cada año el gradiente vertical db/dz , desde la cumbre hasta el frente terminal del glaciar, conserva una misma forma. Sólo el eje de esa curva puede desplazarse hacia el lado de los valores positivos (en el caso de que el balance sea positivo) o hacia el lado de los valores negativos. Ello hace que al conocer la forma de la curva, se pueda reconstruir el balance del glaciar cuando se ha perdido un número significativo de balizas.

Además de ello, esa propiedad que tiene la gradiente vertical de mantener constante su forma a lo largo del tiempo, ha permitido formular un modelo que es empleado en estimaciones del balance, y que se lo conoce con el nombre de modelo lineal del balance. Su versión simplificada, con ayuda de datos de pocas balizas, describe correctamente las variaciones del balance en el decurrir del tiempo (Liboutry, 1974).

Una vez que la posición de la línea de equilibrio ELA ha sido establecida, se puede calcular la relación (en %) entre la superficie de la zona de acumulación y la superficie total del glaciar (*Accumulation Area Ratio AAR*), relación, que al igual que la línea ELA, también tiene un comportamiento lineal respecto al balance. Esta propiedad hace posible que luego de algunos años de medición, se puedan calcular los valores que tienen la línea ELA y la relación AAR cuando el balance alcanza su punto de equilibrio ($B_n = 0$); esos valores son representados con los símbolos ELA_0 y AAR_0 respectivamente.

2.1.4. Dinámica del glaciar, variación de la velocidad y oscilaciones del frente

Debido a que el hielo posee un cierto grado de plasticidad y se deforma bajo la acción de su propio peso, la dinámica del glaciar se expresa mediante la transferencia del exceso de masa, generada en la parte superior del glaciar o zona de acumulación, hacia la parte inferior, donde la ablación es mayor (zona de ablación). Ese movimiento es variable y depende de la magnitud que alcance el balance neto. Cuando el balance es positivo, se tiene un gran exceso de masa que debe ser evacuada; en caso contrario el exceso es mínimo. La dinámica del glaciar suele ser estimada mediante el análisis de los desplazamientos de las balizas y sus cambios de altura en relación con un punto fijo.

Un balance neto *positivo* se traduce en un aumento de la velocidad y el espesor del glaciar; la disminución de esos dos parámetros se observa en el caso contrario. La respuesta que presenta

un glaciar ante los cambios del balance es variable y depende principalmente del tamaño y espesor del glaciar, así como de la pendiente del lecho rocoso.

El movimiento del frente del glaciar (avances, retrocesos y períodos de estabilidad) en un año dado es el resultado de la ablación producida ese mismo año (b_t), así como de la dinámica del glaciar; esta última por su parte depende del efecto acumulado de los balances precedentes (correspondientes a los años anteriores) y del espesor máximo que tiene el glaciar (h_{max}). Por lo expuesto, existe un tiempo de respuesta t_{resp} del movimiento del frente del glaciar, el cual se define mediante la siguiente relación:

$$t_{resp} = h_{max} / b_t \quad (3)$$

2.2. Particularidades de los glaciares ecuatorianos

2.2.1. Particularidades físico - geográficas

La ubicación geográfica de los nevados ecuatorianos les confiere una destacada originalidad respecto a lo establecido en los otros glaciares de Bolivia y Perú que son monitoreados por el programa "Nieve y Glaciares Tropicales". En el Ecuador, el régimen de precipitaciones difiere de los regímenes existentes en regiones más cercanas al Trópico, ya que posee dos máximos vinculados con los equinoccios y carece de una pronunciada temporada seca. Además, la proximidad de sus costas en el Pacífico, donde la incidencia del fenómeno ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) es elevada, hace del Ecuador un lugar especial para el estudio de la respuesta de objetos tan sensibles a las variaciones del clima, como lo son los glaciares.

Las cordilleras ecuatorianas tienen una morfología particular ya que no están cubiertas de glaciares ininterrumpidos y sus nevados se encuentran separados entre sí por decenas de kilómetros. En consecuencia, los glaciares no se encuentran encerrados por cadenas montañosas, ni están afectados por barreras de roca o hielo que modifiquen los procesos de acumulación y ablación. Allí no existen numerosos micro - climas ni tantos efectos de interrelación que impidan la observación directa de los efectos que provoca el cambio climático global en los glaciares. Por lo expuesto cabe esperar que la reacción de los glaciares ante la evolución climática, pueda ser observada con claridad. A ello se agrega el hecho de que la forma cónica de sus volcanes permite que un mismo nevado posea todas las orientaciones posibles, lo cual facilita el estudio (en un reducido lugar) de la evolución que tienen varias lenguas afectadas por un sólo factor geográfico.

Debido a que el Ecuador tiene dos cordilleras principales, la Oriental y la Occidental, es interesante estudiar la evolución en el tiempo que tienen los glaciares de cada una de ellas. Es conocido que las precipitaciones en el Ecuador reciben dos influencias marcadas: la del Pacífico y la de la Amazonía, por ello a fin de documentar ambas influencias, los nevados elegidos para el estudio se encuentran en la Cordillera Oriental (el Antizana) y en la Cordillera Occidental (el Carihuayrazo).

Por último es menester mencionar que un estudio completo y minucioso de esos glaciares se justifica también por el hecho de que según las primeras mediciones, el retroceso de sus hielos podría estar ocurriendo en forma acelerada. Como ejemplo se puede citar el repliegue de más de 60 metros que tuvo el Glaciar 15 α del Antizana durante el primer año (1994-1995); esta

cifra se ubica entre las más elevadas que se han medido en los Andes Centrales (ver capítulo 7).

2.2.2. Particularidades históricas

Desde el siglo pasado, varios exploradores han iniciado ya el estudio de los glaciares del Ecuador. Muchos de ellos ascendieron a sus volcanes y han dejado dibujos, descripciones y comentarios de los lugares visitados. Tales informaciones son numerosas en el Ecuador y constituyen una fuente documental única en los Andes y en todo el Trópico (Hastenrath, 1981), lo cual resulta invaluable para un estudio sobre glaciares y cambios climáticos en altas montañas, ya que se dispone de información documentada de más de un siglo.

El primero de los trabajos efectuados sobre los glaciares del Ecuador, fue realizado por Edward Whymper, geólogo alpinista inglés, muy conocido en Europa por sus ascensiones a los Alpes y sus grabados. El permaneció en Ecuador entre el 9 de diciembre de 1879 y el 20 de julio de 1880. Durante esa época, hizo las primeras ascensiones de los principales volcanes cubiertos de nieve en el país. De acuerdo con su costumbre, dibujó muchos de los glaciares observados con bastante rigurosidad y dejó diversos documentos de gran interés. Todos sus grabados y observaciones están recopilados en su libro que fue traducido en el Ecuador bajo el título "Viajes a Través de los Majestuosos Andes del Ecuador". La meticulosidad de su trabajo se revela en el hecho de que sus grabados permiten medir con elevada precisión el replegamiento de los glaciares en el Sincholagua y el Cotacachi. Documentos de tal calidad permiten estimar el efecto que ha inducido en los glaciares el cambio climático desde aquellas épocas.

A inicios del presente siglo un explorador alemán Hans Meyer, el primer glaciólogo que visitó el Ecuador, realizó sus observaciones y escribió su libro "En los Altos Andes del Ecuador", que lo ha publicado en el Ecuador. Allí, Meyer incluyó muchas consideraciones sobre del estado de la glaciación en el país. Además, elaboró mapas precisos de los nevados y tomó numerosas fotografías de ellos (23 años después de Whymper), lo cual constituye un inapreciable documento sobre los glaciares del Ecuador.

Desde los años 1940, el ejército ecuatoriano con mucha frecuencia realiza una cobertura de fotografías aéreas de alta calidad sobre los nevados, con lo cual se dispone de documentos únicos que aún no han sido explotados. Esas fotografías permiten analizar los cambios que ha sufrido la ubicación de las lenguas terminales en todos los glaciares, lo cual facilita el estudio sincronizado de las modificaciones ocurridas en lenguas con diversa orientación.

La última fuente de datos sobre los glaciares ecuatorianos constituye la síntesis realizada por Stefan Hastenrath (1981), quien ha recopilado todos los datos mencionados anteriormente, desde los dibujos de Whymper hasta las fotografías aéreas. La obra de Hastenrath constituye una excelente herramienta de trabajo ya que contiene todos los datos glaciológicos del país.

De todo lo expuesto se concluye que el Ecuador dispone de documentación histórica única sobre sus glaciares. Sería de gran interés que una investigación especial utilice sistemáticamente todo lo acumulado a fin de obtener un conocimiento exhaustivo de la evolución que han tenido los glaciares ecuatorianos desde hace más de un siglo.

3. EL PROGRAMA ANTIZANA Y SUS APLICACIONES

3.1. El Antizana, una importante fuente de agua del proyecto La Mica - Quito Sur

Una de las aplicaciones más importantes del monitoreo de los glaciares en el Ecuador lo constituye su aporte al manejo y suministro de agua potable para la ciudad de Quito. Esta urbe actualmente se alimenta con las aguas del río Pita que nace en el Cotopaxi, y del río Papallacta que recibe aportes del Antizana. En un futuro próximo la ciudad se alimentará también con los recursos hídricos que llevará el proyecto La Mica - Quito Sur, el mismo que está ubicado al pie del nevado Antizana. Allí, la Empresa Municipal de Agua Potable de Quito (EMAAP-Quito), mediante la construcción de una presa en la salida del lago Micacocha creará un embalse para regular los caudales de agua y entregarlos al sector sur de la ciudad. La cuenca de ese lago se emplaza junto a los glaciares del Antizana, y varios de los ríos a ser captados nacen directamente en las nieves del volcán. En consecuencia, el proyecto aprovechará aguas que en su mayoría son producto de la fusión de glaciares.

Es importante señalar que el nevado en sí mismo constituye un embalse natural de regulación de caudales, ya que debido a la fusión del hielo, puede entregar importantes volúmenes de agua durante las estaciones secas. Ello contrasta con la situación del lago Santa Lucía, ubicado también al pie del Antizana, pero que no recibe aguas de los glaciares y por lo tanto se seca durante algunos meses al año.

3.2. Características generales del Glaciar 15 α del Antizana

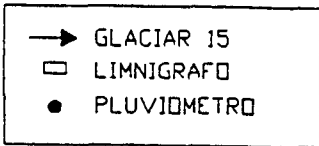
El nevado Antizana se ubica en la cumbre de un volcán activo, al Sudeste de Quito, sobre la Cordillera Real del Ecuador y a corta distancia de la línea ecuatorial (0°28'30" S; 78°08'55" O). El glaciar estudiado suele ser identificado con el número 15 de acuerdo con la clasificación y el mapa elaborados por Hastenrath (1981) (fig. 3.1.). A ese código de identificación se le ha añadido el símbolo α por cuanto el Glaciar 15, en su parte baja, se ha dividido recientemente en dos lenguas. Actualmente al Noroeste del Glaciar 15 α se puede observar la lengua vecina, bastante diferenciada que se le ha denominado el lengua 15 β y donde las mediciones han sido ampliadas desde 1997.

El Glaciar 15 α se extiende desde los 4.800 msnm hasta la cumbre misma del volcán en los 5.760 msnm. Su exposición general es Noroeste y su borde superior limita con las laderas orientales del volcán, hasta donde llega la influencia amazónica. Pero su lado occidental, el Antizana se encuentra a la sombra de esa influencia oriental ya que lo impide el cuerpo mismo del volcán.

El Glaciar 15 α tiene una superficie total de 353.158 m² (35,3 ha) y una longitud de 2.0 km. Es 3,6 veces más extenso que el Glaciar de Chacaltaya (9,6 ha), pero seis veces menor que el Glaciar de Zongo (210 ha), los dos glaciares monitoreados en Bolivia. La cuenca aportante, hasta el sitio de la estación limnigráfica, incluye también la superficie del Glaciar 15 β , cuya zona de acumulación no ha sido medida hasta hoy. El cuadro 3.1 y la figura 3.1 presentan el área ocupada por el glaciar en diferentes rangos altitudinales.

Rango altitudinal msnm	Distribución del área del glaciar		
	parcial m ²	parcial %	acumulada %
5.650 - 5.765	14.603	4	100
5.550 - 5.650	27.721	8	96
5.450 - 5.550	34.094	10	88
5.350 - 5.450	43.757	12	78
5.250 - 5.350	37.329	11	66
5.150 - 5.250	36.080	10	55
5.050 - 5.150	45.617	13	45
4.950 - 5.050	51.811	15	32
4.850 - 4.950	52.718	15	18
4.800 - 4.850	9.427	3	3
Total	353.158	100	---

Cuadro 3.1. Distribución altitudinal de la superficie del Glaciar 15 α del Antizana



1 Km

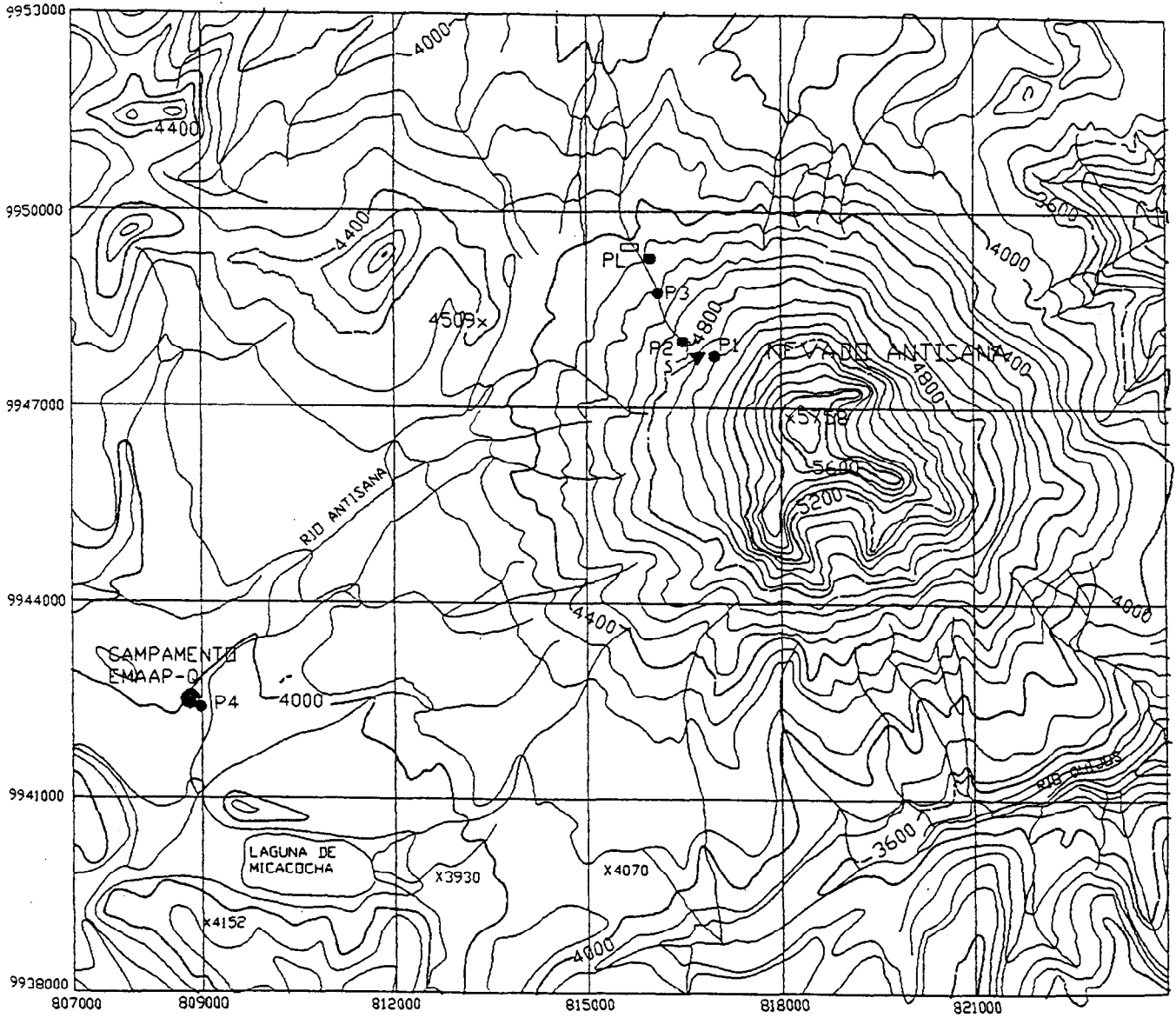


Figura 3.1. El nevado Antizana : el Glaciar 15, los principales rios, el Campamento EMAAP-Q y la zona de Micacocha.

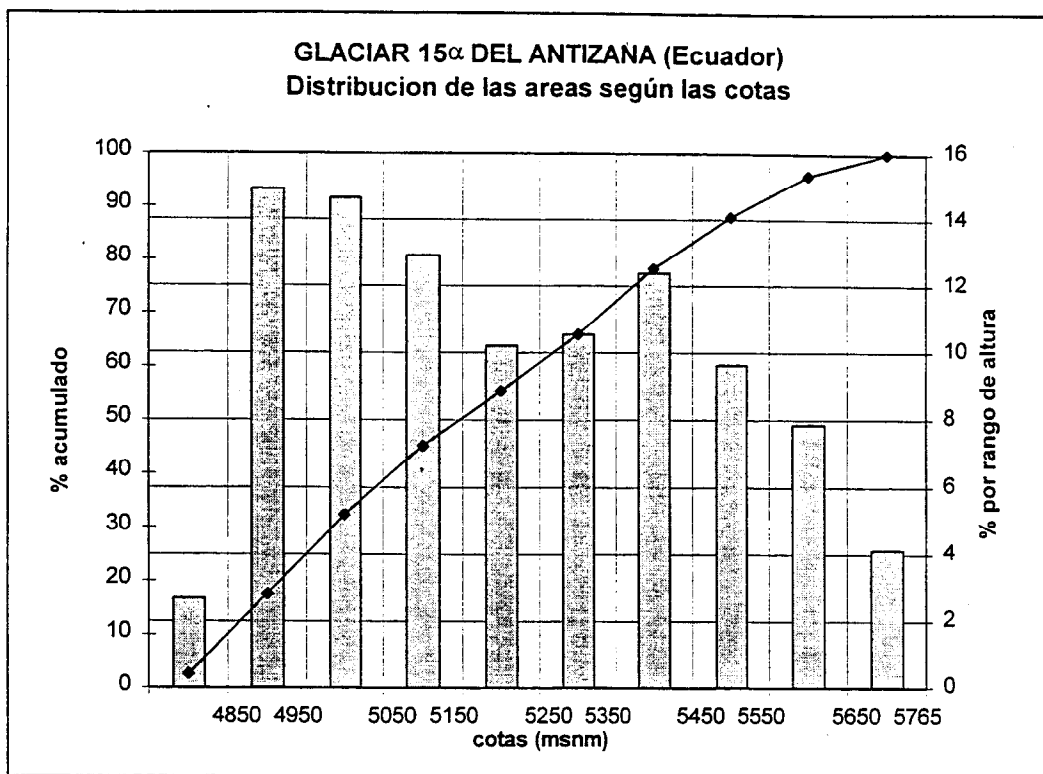


Figura 3.2. Distribución del área del Glaciar 15 α según sus rangos altitudinales

4. SISTEMA DE MEDICIONES INSTALADO EN EL GLACIAR 15 α Y PROCESAMIENTO DE SUS DATOS

Desde el año de 1994 se ha venido instalando una red de equipos de medición sobre el Glaciar 15 α a fin de establecer los parámetros que permitan estimar el balance de masa y el balance hidrológico. Esos equipos están concentrados ante todo en la zona de ablación.


4.1. Zona de ablación

4.1.1 Red inicial de balizas

La zona inferior del glaciar está equipada con balizas de ablación las cuales permiten realizar mediciones mensuales de la altura de la nieve para estimar el balance en la zona de ablación. Las balizas son de tipo clásico y están constituidas por seis tubos de plástico, de dos metros cada uno. Fueron instaladas mediante la utilización de una sonda a vapor elaborada por el Laboratorio de Glaciología de Grenoble (LGGE, CNRS). La colocación de la primera red de balizas en la lengua 15 α fue realizada por B. Francou y un equipo del INAMHI y la EMAAP-Quito en junio de 1994. Esa red, conformada por ocho balizas (codificadas desde B1 a B8), fue colocada siguiendo el trazado de una línea central que empieza en los 4.800 y llega a los

5.050 msnm. En los años siguientes, la red fue mantenida y ampliada; los cambios de balizas que tuvieron lugar en los años 1.995 y 1.996, así como su ubicación, están resumidos en el cuadro 4.1 y figura.

BALIZA	Enc. 95	Feb. 95	Mar. 95	Abr. 95	May. 95	Jun. 95	Jul. 95	Ago. 95	Sep. 95	Oct. 95	Nov. 95	Dic. 95
B0	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B1	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B2	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B3	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B3A		==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B4	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B4A		==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B5	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B5A		==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B6	==	==										
B6A		==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B7	==	==										
B7A		==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B8	==	==	==	==								

 Período con lecturas continuas de las balizas

Cuadro 4.1. Composición de la red de balizas en el glaciar 15α durante 1995

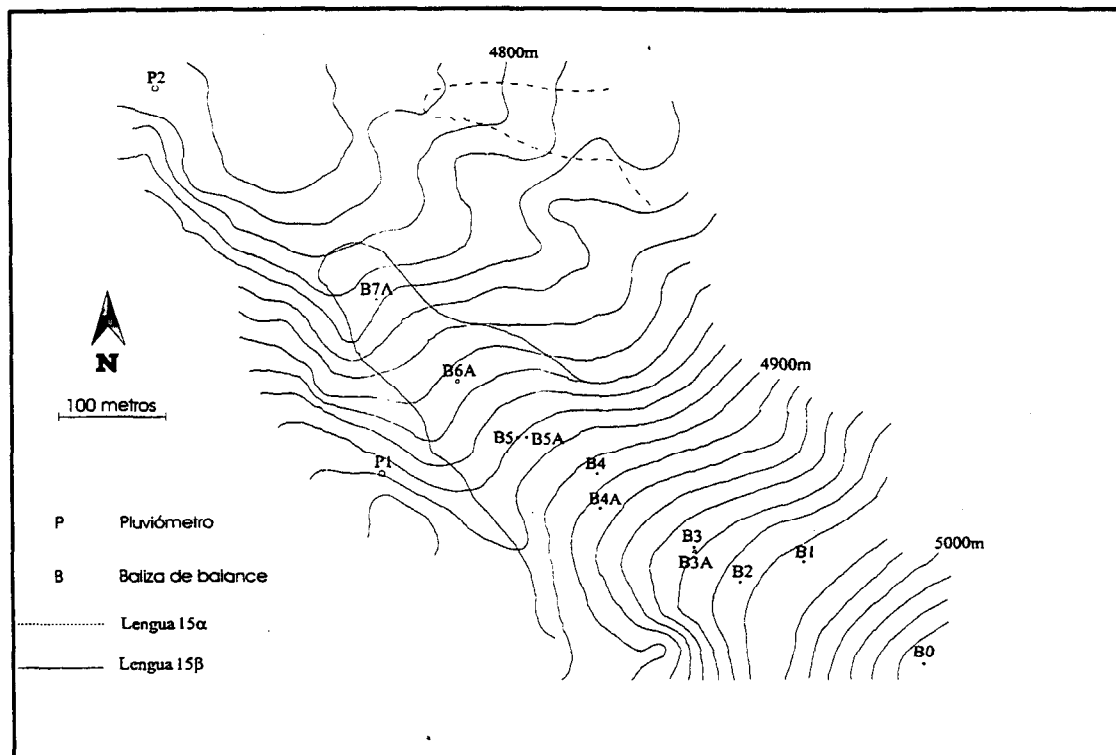


Figura 4.1. Ubicación, en octubre de 1995, de las balizas instaladas en el Glaciar 15α

4.1.2. Instalación de nuevas balizas

En agosto de 1996 se añadieron nuevas balizas que se distribuyeron por sobre toda la zona de ablación (cuadro 4.2 y figura 4.2). Esto se hizo con la finalidad de estudiar la variabilidad espacial de la ablación dentro de un determinado rango altitudinal, para eventualmente elucidar los efectos de borde del glaciar y su orientación. Según observaciones de campo se tiene, por ejemplo, que en las mañanas la ribera derecha del glaciar está más expuesta al sol, es decir, cuando hay mayor radiación solar y por lo tanto la ablación puede ser más elevada. También se puede señalar que el viento sopla de modo predominante en dirección Este - Oeste, con lo cual se tendría una dirección preferencial para la reubicación de la nieve. Esas observaciones puntuales tienen que ser estudiadas durante algunos años con la red ampliada de balizas y la estación Campbell, para luego corregir los datos en caso de serlo necesario. Los cambios que tuvo la red las balizas en los años 1996 y 1997, al igual que su ubicación, constan en el cuadro 4.2 y 4.3

BALIZA	Enc. 96	Feb. 96	Mar. 96	Abr. 96	May. 96	Jun. 96	Jul. 96	Ago. 96	Sep. 96	Oct. 96	Nov. 96	Dic. 96
B0	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B0A								==	==	==	==	==
B0B								==	==	==	==	==
B1	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==		
B1A								==	==	==	==	==
B1B								==	==	==	==	==
B2	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B2A								==	==	==	==	==
B3	==	==	==	==	==	==	==	==				
B3A	==	==										
B3B		==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B4	==	==	==	==	==							
B4A	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==
B4B								==	==	==	==	==
B4D								==	==	==	==	==
B4I								==	==	==	==	==
B5	==	==	==									
B5A	==	==	==	==	==	==	==	==	==			
B5B								==	==	==	==	==
B5D								==	==	==	==	==
B5I								==	==	==	==	==
B6A	==	==	==	==	==	==	==	==	==			
B6B								==	==	==	==	==
B7												==
B7A	==	==	==	==	==	==	==	==	==			
B8												==
B9												==

== Período con lecturas continuas de las balizas

Cuadro 4.2. Composición de la red de balizas en el Glaciar 15α en el año de 1996

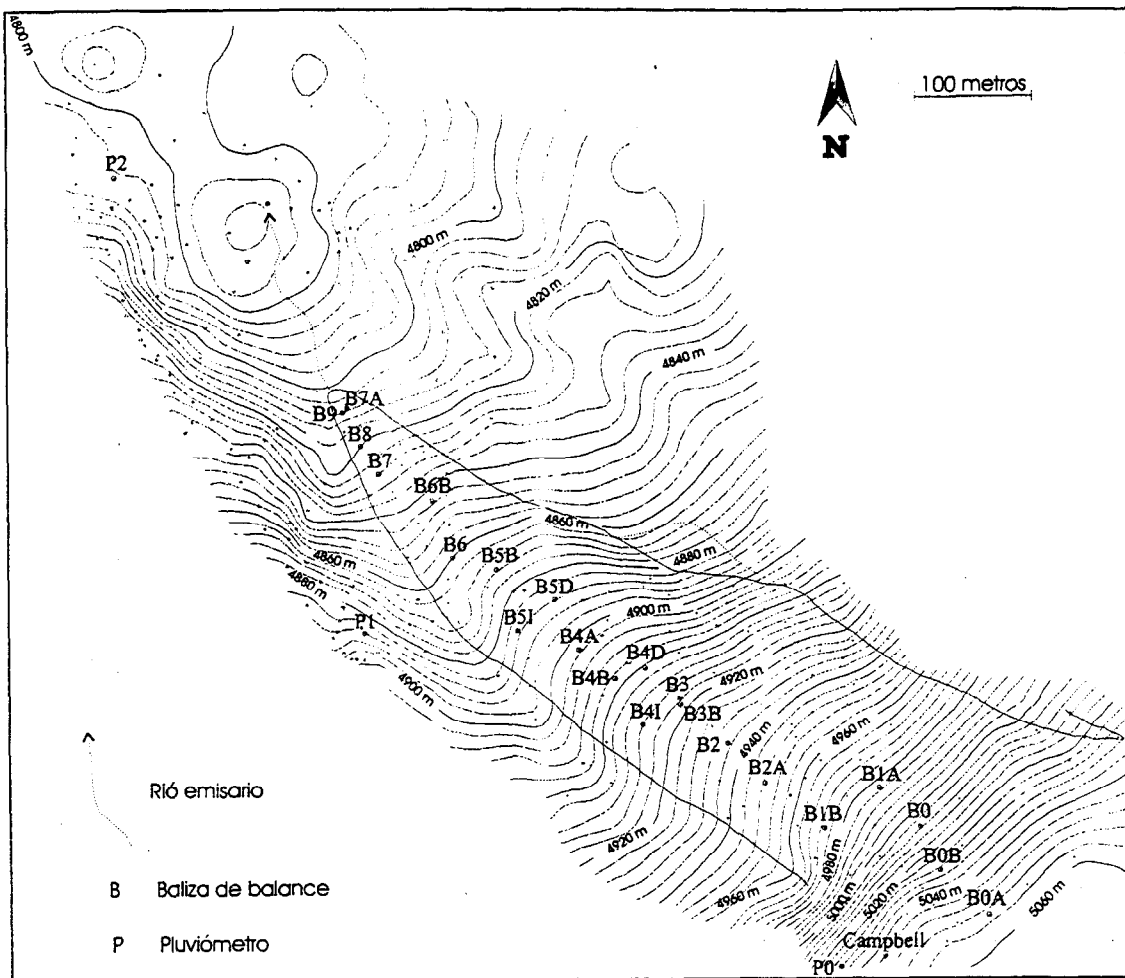


Figura 4.2. Ubicación, en enero de 1997, de las balizas instaladas en el Glaciar 15 α

4.1.3. Equipamiento de la lengua β del Glaciar 15

Las aguas provenientes del glaciar 15 β fluyen hacia el mismo torrente que recoge las aguas de la lengua 15 α ; por este motivo y con la finalidad de relacionar el balance hidrológico con el balance glaciológico, es necesario conocer el origen de todas las aguas medidas en la estación limnimétrica. Por ese motivo en enero de 1.997 se instaló otra red de balizas sobre la lengua β que se emplaza al lado derecho de la lengua α . Las seis balizas que conforman esa red, se ubican siguiendo una línea por el eje del glaciar y cubren toda la zona de ablación. Allí las mediciones se efectúan cada tres o cuatro meses.

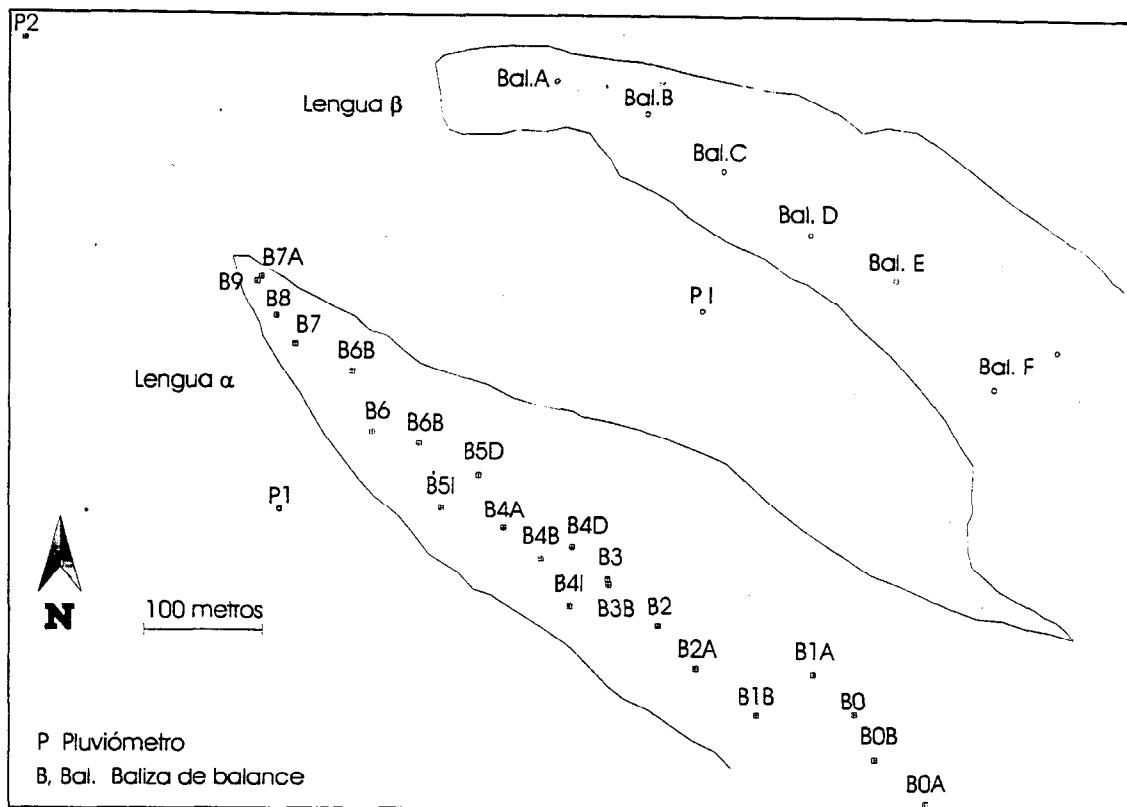


Figura 4.3. Red de balizas sobre las lenguas α y β al inicio del año 1997

4.1.4. Frecuencia de las mediciones y procedimiento de cálculo

Las mediciones en las balizas se efectúan a inicios de cada mes, desde agosto de 1994, por parte del Area de Hidrología de la EMAAP-Quito. Pocos son los glaciares en el mundo donde se realizan tales mediciones mensuales. En el Antizana y en Bolivia, se ha adoptado esa frecuencia por dos razones:

- La falta de conocimientos sobre la distribución espacial de la acumulación y la ablación a escala anual bajo los Trópicos, y
- La facilidad existente para realizar observaciones durante todo el año, ya que en las altas latitudes la nieve del invierno impide todo tipo de medición.

Debido a las particularidades del clima en el Ecuador, las mediciones de las balizas y el procesamiento de sus datos difieren de lo realizado en Bolivia ya que:

- Por su ubicación ecuatorial el nevado recibe radiaciones solares muy altas todo el año (el ángulo de incidencia se mantiene casi perpendicular a las capas atmosféricas),
- No existe una gran diferencia entre las estaciones del año :la estación seca es muy corta y la posibilidad de precipitaciones atmosféricas está presente cada mes del año, y

- La temperatura media mensual es casi constante todo el tiempo, aún cuando a nivel horario la temperatura presenta una gran amplitud de variación.

Como resultado de todo ello se tiene, que durante cada mes y en toda la zona de ablación uno tras otro se alternan diversos periodos de *ablación y acumulación*. En tales circunstancias es imprescindible medir cada mes el grado de emergencia de la baliza respecto a la superficie del glaciar, así como el espesor de la nieve. Esta información es necesaria para calcular la fusión en la superficie de hielo. La importancia que tienen este tipo de mediciones, se destaca claramente al comparar los resultados de los dos cálculos del balance b que a continuación se presentan utilizando las mediciones obtenidas en la baliza B5D las fechas 1 de abril y 1 de mayo de 1997 (ver fig. 4.3).

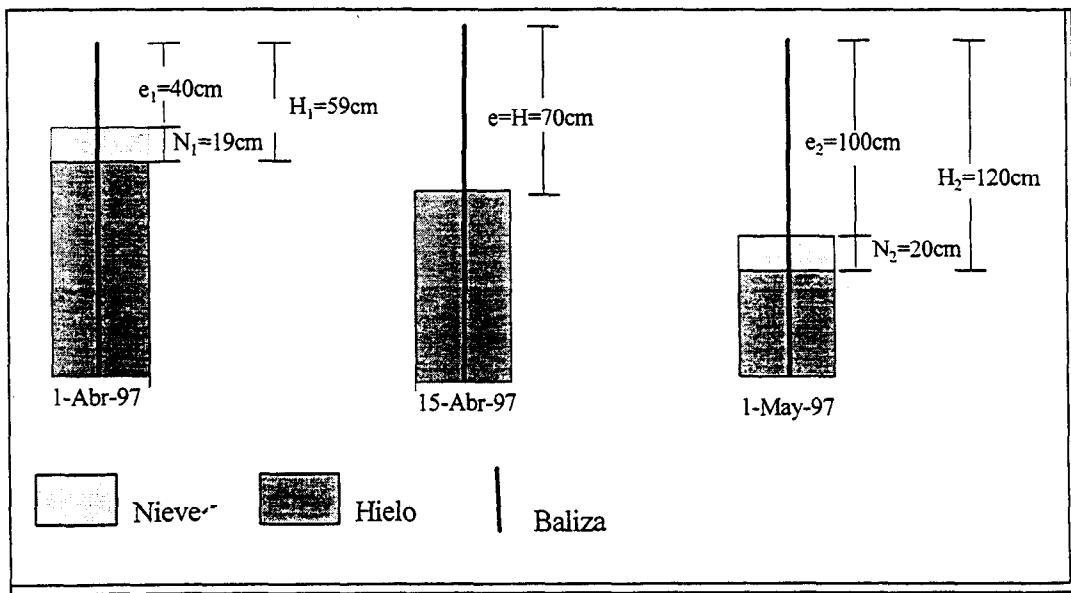


Figura 4.3. Esquema de las mediciones realizadas en la baliza B5D del Glaciar 15 α del Antizana durante los meses de abril y mayo de 1997

El primer cálculo del balance b , considerando la fusión del hielo y de la nieves se realiza mediante la siguiente ecuación del balance:

$$b = 0.4 (N_1 - N_2) + 0.9 (H_2 - H_1) \quad \text{en cm de agua} \quad (4);$$

donde :

e = emergencia del extremo de la baliza respecto a la superficie superior del lugar (sea nieve o hielo), en cm;

N = espesor de la capa de nieve, en cm;

$H = N + e$ = emergencia del extremo de la baliza respecto a la superficie de hielo, en cm;

0.4 = densidad promedio de la nieve;

0.9 = densidad promedio del hielo.

Al reemplazar los valores indicados en la figura 4.3 se obtiene que el balance es igual a:

$$b = 0,4 (19 - 20) + 0,9 (120 - 59) = 54,5 \text{ cm de agua} \quad (5)$$

El segundo procedimiento de cálculo del balance (que se emplea usualmente cuando no se mide el espesor de la nieve) considera sólo la emergencia de la baliza respecto a la superficie superior del lugar y que la diferencia existente entre dos lecturas se debe únicamente a la fusión de la nieve. En consecuencia con ello el balance se determina según la siguiente expresión:

$$b = 0,4 (e_2 - e_1) \quad (6);$$

donde :

b = balance, en cm de agua;

e = emergencia del extremo de la baliza, respecto a la superficie superior, en cm;

0,4 = valor de la densidad de la nieve existente sobre la superficie superior en los momentos cuando se efectuaron las dos mediciones.

Al reemplazar los valores de la figura 4.3 se obtiene que el balance sería igual a:

$$b = 0,4 (100 - 40) = 24 \text{ cm de agua} \quad (7)$$

La diferencia entre los resultados que proporcionan los dos métodos de medición y cálculo, es muy grande y supera el 100 %. Ello justifica la obtención de datos completos en el Antizana y cualquier otro lugar con parecidas características climáticas.

En la figura 4.3 se puede observar también que los períodos de acumulación y ablación se alternan con mucha frecuencia, y que la presencia de nieve al inicio y al final del mes no implica que el hielo haya permanecido invariable en el transcurso de ese mes. Por la razón expuesta, los cálculos de la ablación (A), presentados en este informe, se realizaron mediante la siguiente expresión:

$$A = 0,4 (N_m - N_{m+1}) + 0,9 (H_{m+1} - H_m) + 0,9 (200) (E_{m+1} - E_m) - P \quad (8);$$

donde:

A = ablación del mes, en cm;

0,4 = densidad promedio de la nieve en el glaciar;

0,9 = densidad promedio del hielo;

N = espesor de la capa de nieve, en cm;

e = emergencia del extremo de la baliza respecto a la superficie superior, en cm;

H = e + N = emergencia de la baliza respecto a la superficie del hielo, en cm;

E = número de la estaca;

200 = altura de cada estaca, en cm;

P = lámina de precipitación, cm agua;

m = mes dado,

m+1 = mes siguiente.

De esta manera si se toman en cuenta todos los parámetros necesarios, se puede cumplir el requerimiento lógico de que la suma de las ablaciones mensuales sea igual a la ablación calculada entre el primero y el último mes del año. Únicamente cuando se ha registrado una gruesa capa de nieve (por ejemplo los 59 cm de nieve que hubo en mayo junto a la baliza B0),

se puede utilizar el procedimiento usual y considerar que la diferencia de emergencia se debe sólo a la ablación de la nieve.

4.1.5. Datos obtenidos

En la actualidad se ha recogido una serie de datos de tres años, comprendidos entre agosto de 1.994 y agosto de 1.997 pero como en la zona del Antizana el año hidrológico se inicia el mes de enero, se dispone únicamente de dos años completos. Se ha asumido que el año hidrológico coincide con el año calendario ya que noviembre y diciembre son los meses en los cuales con mayor frecuencia las precipitaciones son mínimas (ver el anexo 1). Las características indicadas no necesariamente se repiten todos los años por cuanto existe una fuerte variabilidad interanual en la distribución mensual de las precipitaciones. En los pozos de nieve, se considera también que la superficie de ablación (sobre la cual se mide la acumulación anual) se forma principalmente en esos meses como se indica en el numeral 4.2. En consecuencia, el balance del glaciar se ha calculado también entre el mes de enero y el mes de diciembre de cada año.

La calidad de los datos medidos en cada baliza fue comprobada con el método de las curvas de doble masa, cuyos gráficos constan en el capítulo 5 y permiten valorar la calidad de la información recogida. Las correcciones hechas a los datos iniciales están explicadas en cada tabla (como ejemplo de ello, en el siguiente cuadro se indica que la emergencia anotada en el campo fue igual a 65,8 cm pero que luego de las revisiones se comprobó que su verdadero valor era igual a 165,8 cm).

Baliza	Estaca No.	Emergencia (cm)	Nieve o Hielo (cm)	Hielo (cm)	
B7A	5-	165,8	13	178.8	165,8 = 65,8

Este tipo de revisiones permitieron establecer la representatividad de cada baliza según su ubicación y rango altitudinal, para luego seleccionarlas y emplearlas en los cálculos del balance.

Año 1995	Baliza	B0	B2	B3A	B4A	B5A	B6A	B7A
Cotas msnm		5.070-5.050	4.980-4.960	4.960-4.940	4.940-4.905	4.905-4.875	4.875-4.850	4.850-4.800

Año 1996	Baliza	B0	B2	-	B4A	B5A B5D	B6A B6B	-
Cotas msnm		5.050-5.030	5.000-4.925	-	4.925-4.895	4.895-4.875	4.875-4.815	-

Cuadro 4.3 Balizas seleccionadas para cada rango altitudinal.

4.2. Zona de acumulación

4.2.1. Pozos de nieve (snow pits)

En mayo de 1997 se excavaron cuatro pozos en la zona de acumulación (en las cotas 5.150; 5.300; 5.400 y 5.760 msnm) cuya finalidad consistía en establecer la cantidad de precipitaciones que se habían acumulado durante el período de investigaciones (fig. 4.4.). Se obtuvieron los perfiles densimétricos con lo cual se puede conocer la variación de la densidad en función de la profundidad y los niveles donde el hielo tiene una densidad igual a $0,9 \text{ g/cm}^3$. Debido a las características climáticas mencionadas en el capítulo anterior, y a la morfología del nevado, el cálculo de la acumulación debe superar algunas dificultades:

- La diferenciación y medición de la cantidad de nieve correspondiente a un año dado no puede realizarse en base a las variaciones de la densidad, ya que la estación seca es de muy corta duración. Ello hace que en la parte baja de la zona de acumulación, no se produzca la capa de nieve de textura granular y de alta densidad (>0.5) llamada *nevé* (o *firn*) de los meses más secos que se observa por ejemplo en Bolivia. Además, en los meses de julio y agosto el viento es muy fuerte y transporta polvo que ensucia la nieve, aún cuando no sea temporada seca. En consecuencia, la nieve correspondiente a un mismo año hidrológico puede ser delimitada sólo por la textura de la nieve (tipo y diámetro de los granos, presencia de hielo, y en ocasiones capas de polvo).
- La gran variabilidad interanual hace posible que las capas de hielo no siempre correspondan a los mismos meses del año.
- La forma más o menos cónica del nevado, impide la delimitación precisa del área ocupada por la cuenca de acumulación.

En tales condiciones, y para determinar con precisión los límites entre las capas de cada año en las paredes de los pozos, se utilizó el índice de ablación, que es igual a la diferencia (en valores centrados y normados) entre el balance mensual, medido en la zona de ablación con ayuda de las balizas, y las precipitaciones. Las razones que justifican su empleo radican en que una capa de hielo puede formarse en las alturas, cuando hay condiciones que favorezcan la ablación, tales como: nubosidad baja, fuertes radiaciones, altas temperaturas y ausencia de precipitaciones. En la parte baja del glaciar ello sucede con frecuencia ya que a pesar de que haya nevado algunos días, siempre puede producirse una elevada ablación en los días siguientes. En la parte alta del glaciar, por el contrario, si en un determinado mes hubo varios días de precipitaciones, es poco probable que se forme una capa superficial de hielo. En consecuencia, al restar el balance de las precipitaciones, se obtiene un índice que indica la existencia en la zona alta del glaciar de un período de ablación (en tales casos el índice alcanza elevados valores).

Es evidente que a pesar del cuidado con el cual se ha procurado establecer la acumulación correspondiente a cada año, se necesita realizar comprobaciones adicionales; por tal motivo en enero de 1.997 se instalaron dos balizas en la zona alta del glaciar. Esa nueva red será ampliada próximamente.

4.2.2. Perforación realizada en la cumbre del Antizana.

En febrero de 1996, se efectuó una perforación en la cima del Antizana a fin de conocer los valores que alcanza la acumulación en la cumbre misma. El trabajo, realizado durante cuatro días con un equipo SIPRE (Francia) y que contó con la participación de Patrick Wagnon (ORSTOM - Bolivia), permitió extraer una muestra de 13 metros que fue analizada para conocer los cambios de dos parámetros a lo largo de la muestra: la densidad y la concentración de $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}$). Los análisis se llevaron a cabo en los laboratorios del *Byrd Polar Research Center* de la Universidad Estatal del Ohio (EEUU) gracias a la colaboración del Prof. L. G. Thompson. Los resultados se describen y comentan en el capítulo 5 de este informe.

4.3. Estimación del balance neto específico, metodología.

A fin de conocer el balance en las zonas de ablación y acumulación, que ha tenido lugar en cada año de mediciones, se ha dividido al glaciar en varios pisos altitudinales considerando la ubicación que tenían los lugares de medición. El cálculo del balance, efectuado para cada uno de los pisos, se realizó asumiendo que tiene una variación lineal entre cada par de puntos de medición. El balance neto específico se obtuvo mediante la suma de los balances de cada piso, afectados por su coeficiente de ponderación (cuociente entre el área ocupada por cada piso y el área total del glaciar).

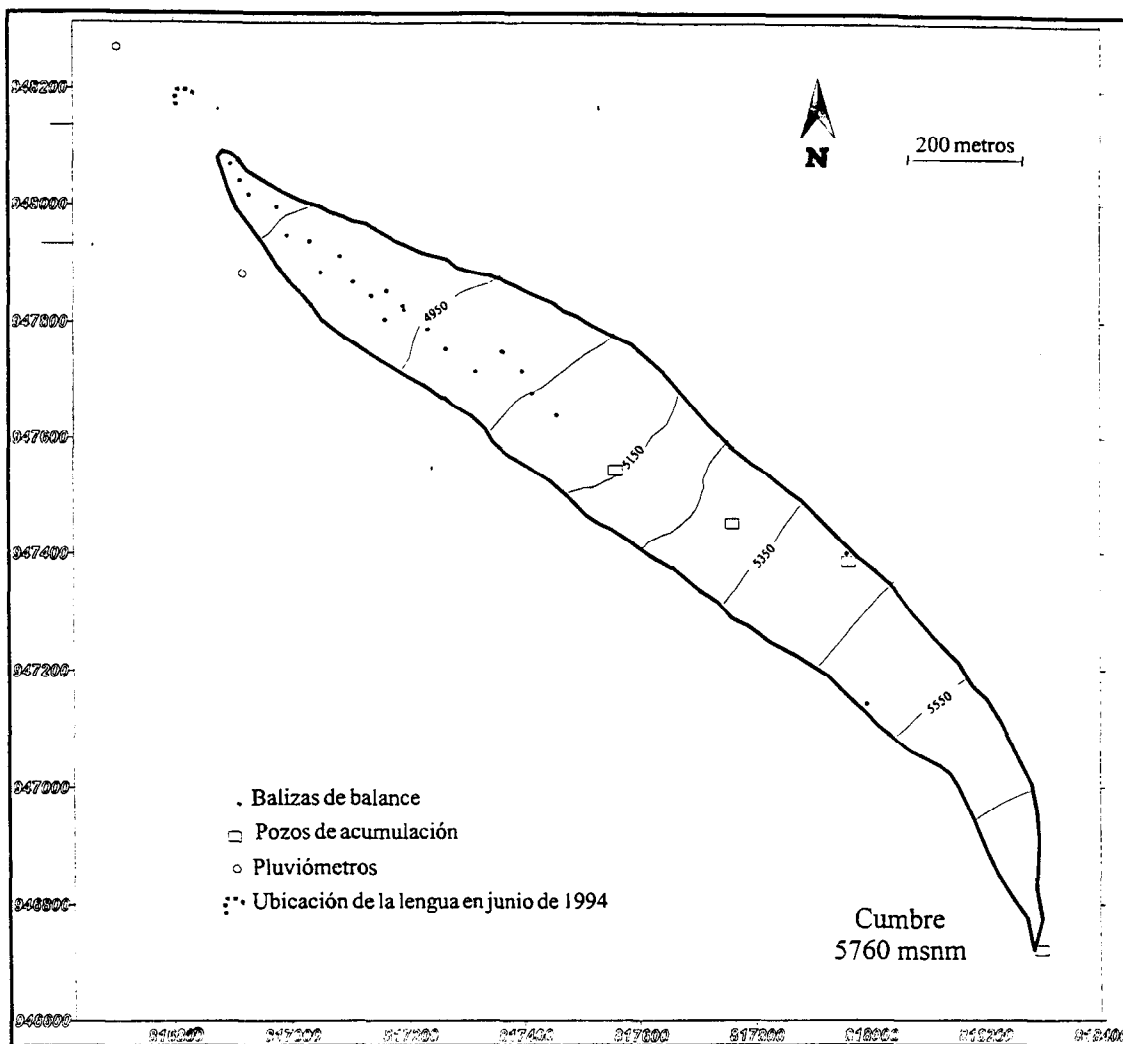


Figura 4.4. Red completa de medición del balance de masa en enero-mayo 1997

4.4. Medición de las precipitaciones

Las precipitaciones atmosféricas que se producen sobre un glaciar constituyen los “ingresos” de su balance hidrológico y son datos fundamentales para modelizar el comportamiento global del glaciar.

4.4.1. Precipitaciones registradas en las proximidades del Glaciar 15

En agosto de 1.994 se instalaron cuatro pluviómetros en el sector del Antizana. El primero (4.890 msnm) se colocó en la ribera izquierda del glaciar, sobre la morrena principal, el segundo (4.795 msnm) al pie del glaciar, y el tercero (4.555 msnm) en el páramo cerca del glaciar. El último pluviómetro se emplazó en el campamento de la EMAAP-Quito, es decir, bastante lejos del glaciar en la cota 3.930 msnm (ver mapa 3.1.).

Esos pluviómetros son iguales a los empleados en Bolivia (tipo 2000) y están constituidos por cilindros de 150 cm de alto y 50 cm de diámetro. Su superficie de captación es igual a 2.000

cm² y están pintados de negro. Para evitar la evaporación del agua acumulada contienen dos litros de aceite que forman una película superficial de protección de un centímetro de espesor.

En septiembre 1996 se instalaron dos nuevos pluviómetros: uno en la ribera derecha del glaciar (~4.860 msnm), y el segundo cerca de la estación limnigráfica (~4.450 msnm). Posteriormente, en el mes de noviembre, se agregó un último pluviómetro en los 5.100 msnm junto a la estación Campbell.

Estos pluviómetros tienen el mismo tamaño de los anteriores, pero están recubiertos con pintura metálica de color claro a fin de que no absorban demasiado calor y se pueda colocar un aceite menos viscoso. La necesidad de cambiar el tipo de aceite se debe a que cuando es muy viscoso, el agua no puede atravesarlo y corre el peligro de evaporarse si al cabo de poco tiempo se producen fuertes radiaciones. Además, al igual que en Bolivia y Perú, durante los períodos fríos existe el riesgo de que se congele la capa superior de aceite y agua, con lo cual la nieve permanece cautiva varios días en la superficie posibilitándose su evaporación y sublimación.

Al revisar la calidad de las mediciones con el método de doble masa se han detectado dos problemas importantes:

- En las primeras mediciones hubo evidencia de fugas (valores negativos) que fueron evitadas poco después;
- En dos ocasiones, en 1995, las mediciones se realizaron antes del vaciado del tanque y no después, lo cual provocó la pérdida de un dato que pudo ser recuperado mediante extrapolaciones. En enero 1997, se volvió a cometer el mismo error que ya no se pudo superar por cuanto el vaciado fue realizado en todos los pluviógrafos. En el siguiente mes de febrero, no se pudo tomar las mediciones por el paro general que vivió el país; en consecuencia se perdieron dos meses de datos.

Los cálculos de doble masa están resumidos en el capítulo de resultados.

4.4.2. Ampliación del estudio a los alrededores del nevado

Es menester señalar la existencia de otros pluviógrafos de la EMAAP-Quito en todo el sector del Antizana, lo cual permitirá efectuar en el futuro un análisis más detallado de las precipitaciones en el sector del Antizana y el lago La Mica.

4.5. La ablación.

Al conocer el balance B_n y las precipitaciones P , el cálculo de la ablación A se realiza mediante la siguiente expresión:

$$A = P - B_n \quad (9)$$

5. RESULTADOS, BALANCE NETO ESPECIFICO

Como se ha indicado anteriormente, en la actualidad están disponibles tres años completos de datos correspondientes a la zona de ablación (de agosto de 1994 a julio de 1997), dentro de los cuales hay dos años hidrológicos completos con mediciones de ablación y acumulación en toda la superficie del glaciar. Esta información permite, en primer lugar, efectuar un estudio comparativo del desarrollo que ha tenido el balance en los tres años, a fin de comprender su evolución y repartición estacional. Luego, se estudian la ablación, la acumulación y los balances de masa correspondientes a los dos primeros años hidrológicos 1995 y 1996, para luego hacer una comparación entre ellos.

5.1. Serie completa de mediciones entre agosto de 1994 y agosto de 1997

En esta sección se resumen los datos obtenidos desde el inicio de las investigaciones.

5.1.1 El balance

Como lo demuestra la figura 5.1., que representa la variación en el tiempo que han tenido los valores acumulados del balance, durante los 36 meses del estudio se registró una buena sincronización entre los cambios que tuvieron lugar en cada una de las cinco balizas de la zona de ablación.

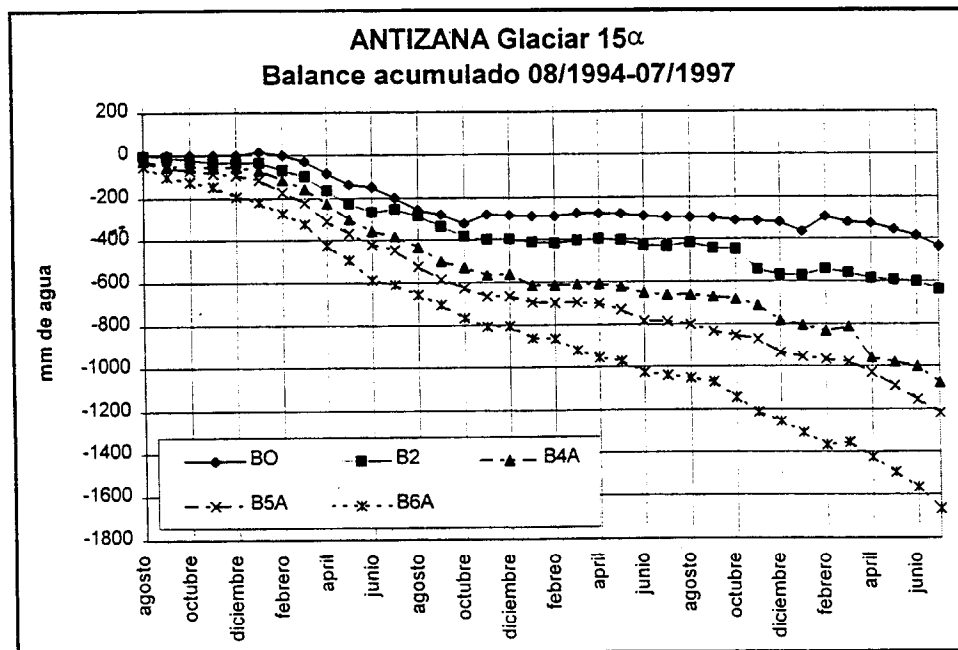


Figura 5.1. Valor acumulado del balance en cinco balizas de la zona de ablación del Glaciar 15 α , serie 1994-97.

También se puede observar la presencia de un gradiente vertical en los cambios del balance ya que a partir de la baliza inferior B6A el balance disminuye progresivamente hasta llegar a la baliza B0, la más alta en la zona de ablación. Si se analiza el desarrollo en el tiempo que ha

tenido el balance, se puede distinguir cuatro periodos diferentes por la pendiente que tienen todas las curvas:

- entre agosto de 1994 e inicios de 1995 el balance es equilibrado,
- durante todo el año de 1995 el balance es muy negativo,
- todo el año de 1996, al contrario, se registra un balance equilibrado, y
- a principios del año 1997, el balance es nuevamente muy negativo.

La variación mes tras mes que ha tenido el balance cambia mucho de un año a otro. En las figuras 5.2 y 5.3, que presentan los cambios acaecidos en las dos balizas extremas de la zona de ablación: B0 y B5A, se destacan algunos valores mensuales extremos aislados, lo cual indica que en un mes dado del año el glaciar no siempre tiene un mismo comportamiento. Debido a que las irregularidades son frecuentes, por ahora es difícil establecer alguna periodicidad en la alternancia de las fases.

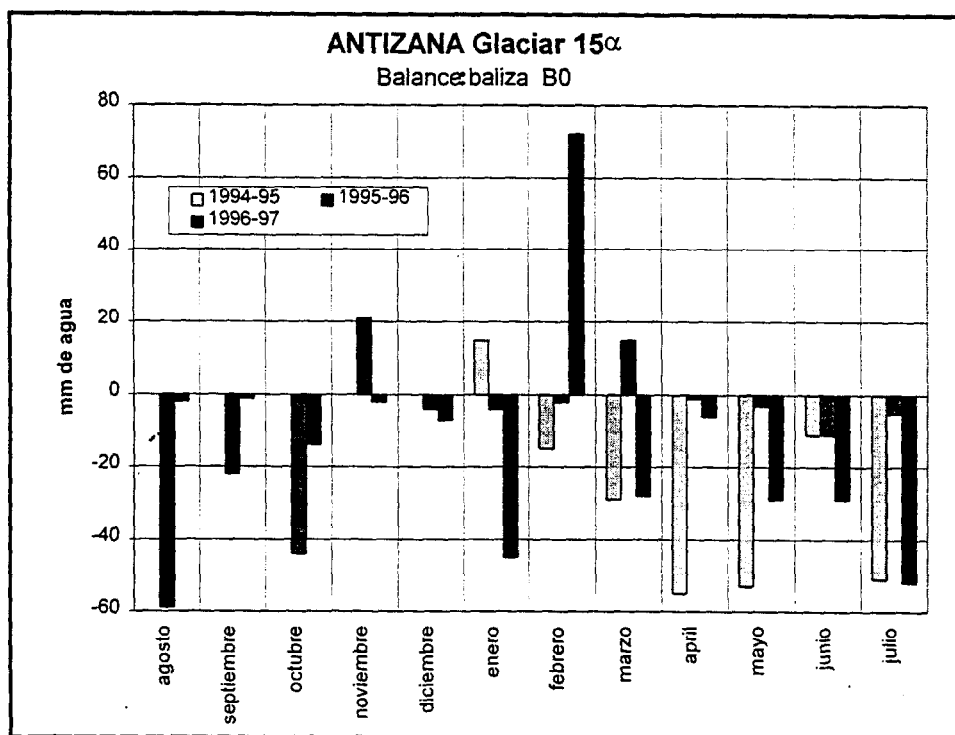


Figura 5.2. Balance mes a mes en la baliza B0 de la zona de ablación del Glaciar 15α, serie 1.994 – 1.997.

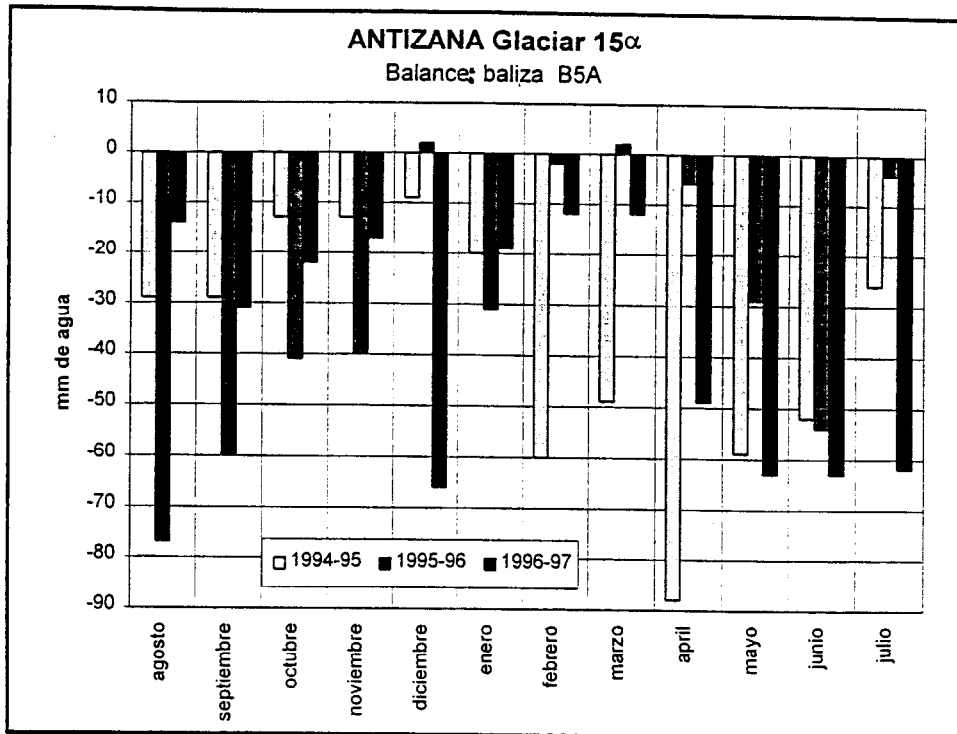


Figura 5.3. Balance mes a mes en la baliza B5A de la zona de ablación del Glaciar 15 α , serie 1.994 - 1.997.

5.1.2. Índice de ablación

Los resultados obtenidos con el índice de ablación (definido en el numeral 4.2.1 y representado en la figura 5.4)) ponen en evidencia las dificultades que existen a la hora de interpretar los perfiles densimétricos de los pozos de acumulación. Como ejemplo se puede citar el periodo febrero - mayo, cuyos índices tienen valores contrapuestos en diferentes años.

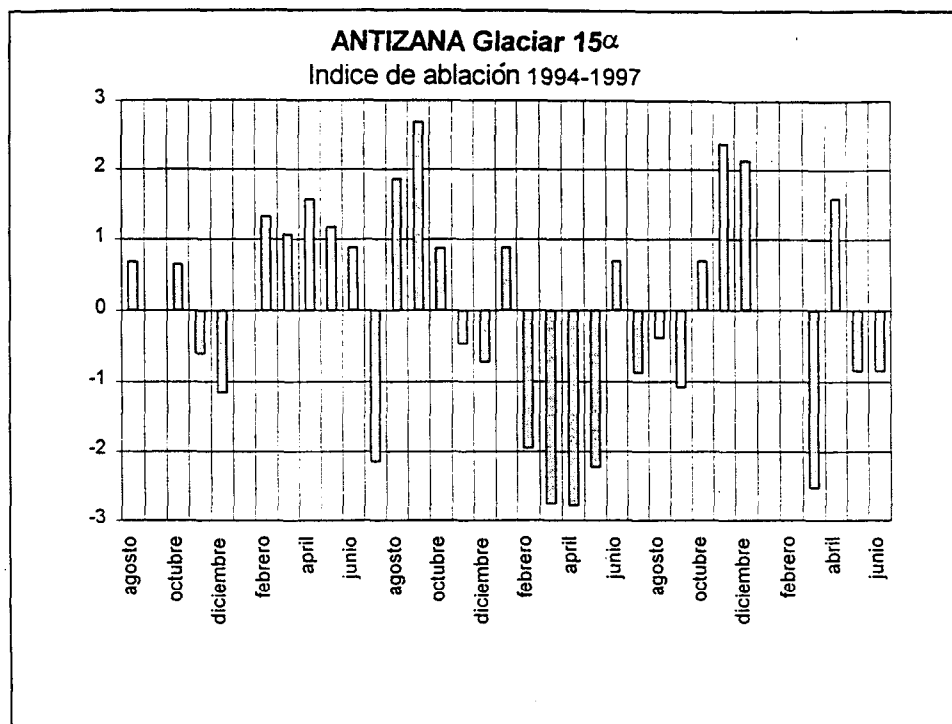


Figura 5.4. Índice de ablación en el Glaciar 15α del Antizana, serie 1.994 – 1.997.

5.2. Resultados en el año hidrológico 1995

5.2.1. Balance en la zona de ablación

Red de balizas y rangos altitudinales

Toda la zona de ablación tuvo balizas que proporcionaron mediciones representativas de cada rango altitudinal, para cada uno de los cuales fue necesario conocer el área que ocupaban. La suma de esas áreas debe ser igual a la superficie total del glaciar (cuadro 5.1). Para obtener estos datos se realizaron tres levantamientos topográficos en diferentes fechas: octubre de 1.995, enero de 1.997 y mayo de 1.997 (ver capítulo 7).

El primer levantamiento topográfico cubre la parte inferior del Glaciar 15α y sus equipos. Las balizas fueron bien ubicadas, pero los límites de la lengua del glaciar llegaron sólo hasta los 4.864 msnm, lo cual permite calcular las áreas correspondientes a las dos primeras balizas. Las superficies de las partes altas fueron calculadas con ayuda del segundo levantamiento, considerando que entre los 4.864 y 4.950 msnm el glaciar se había estrechado. Se admitió que sobre los 4.950 msnm el glaciar tenía el mismo tamaño que a inicios de 1.997.

La posición altimétrica asignada a cada baliza fue igual a la altitud indicada en el levantamiento de octubre de 1.995. El rango altitudinal, representado por una baliza, se encuentra comprendido entre un límite inferior ubicado debajo de la posición de la baliza en 0,25 veces su desplazamiento anual, mientras que el límite superior se encuentra 0,75 veces arriba de la baliza. Adicionalmente, se realizó un ajuste de los rangos para cubrir toda la zona de ablación.

Debido a que las curvas de nivel fueron trazadas cada cuatro metros las cotas son múltiples de cuatro, y como entre las balizas B0 y B2 hay una gran diferencia en altura, existe un rango cuya ablación no fue medida y tuvo que ser interpolada. Las áreas fueron calculadas con el programa *Autocad*[®].

Rangos Altitudinales Msnm	Baliza Representativa
5.052 – 5.072	B0
4.980 – 5.052	Interpolación
4.960 – 4.980	B2
4.940 – 4.960	B3A
4.904 – 4.940	B4A
4.876 – 4.904	B5A
4.848 – 4.876	B6A
4.800 – 4.848	B7A

Cuadro 5.1. Rangos altitudinales del Glaciar 15 α y sus respectivas balizas representativas. Las alturas indicadas corresponde al levantamiento topográfico de 1.995.

La información correspondiente a las balizas seleccionadas, y que ha sido empleada en los cálculos del año 1.995, puede ser evaluada mediante las curvas de doble masa que constan en la figura 5.5. Como se puede observar allí, la concordancia es satisfactoria, tanto entre dos balizas vecinas como entre dos balizas alejadas. La buena calidad de esa información se debe a la buena calidad de las mediciones, condición *sine qua non* de todo estudio. Influyó el hecho de que en el año de 1.995 tuvo lugar una elevada ablación y que todas las balizas estuvieron en la zona de ablación, con lo cual todos los puntos de medición tuvieron una evolución parecida durante casi todo el año. Además, durante varios meses, el glaciar estuvo sin o con muy poca nieve, lo que mejoró mucho la precisión de las mediciones ya que al haber nieve, ésta puede ser removida por el viento y acumulada en uno u otro lugar según lo determinen las corrientes de aire.

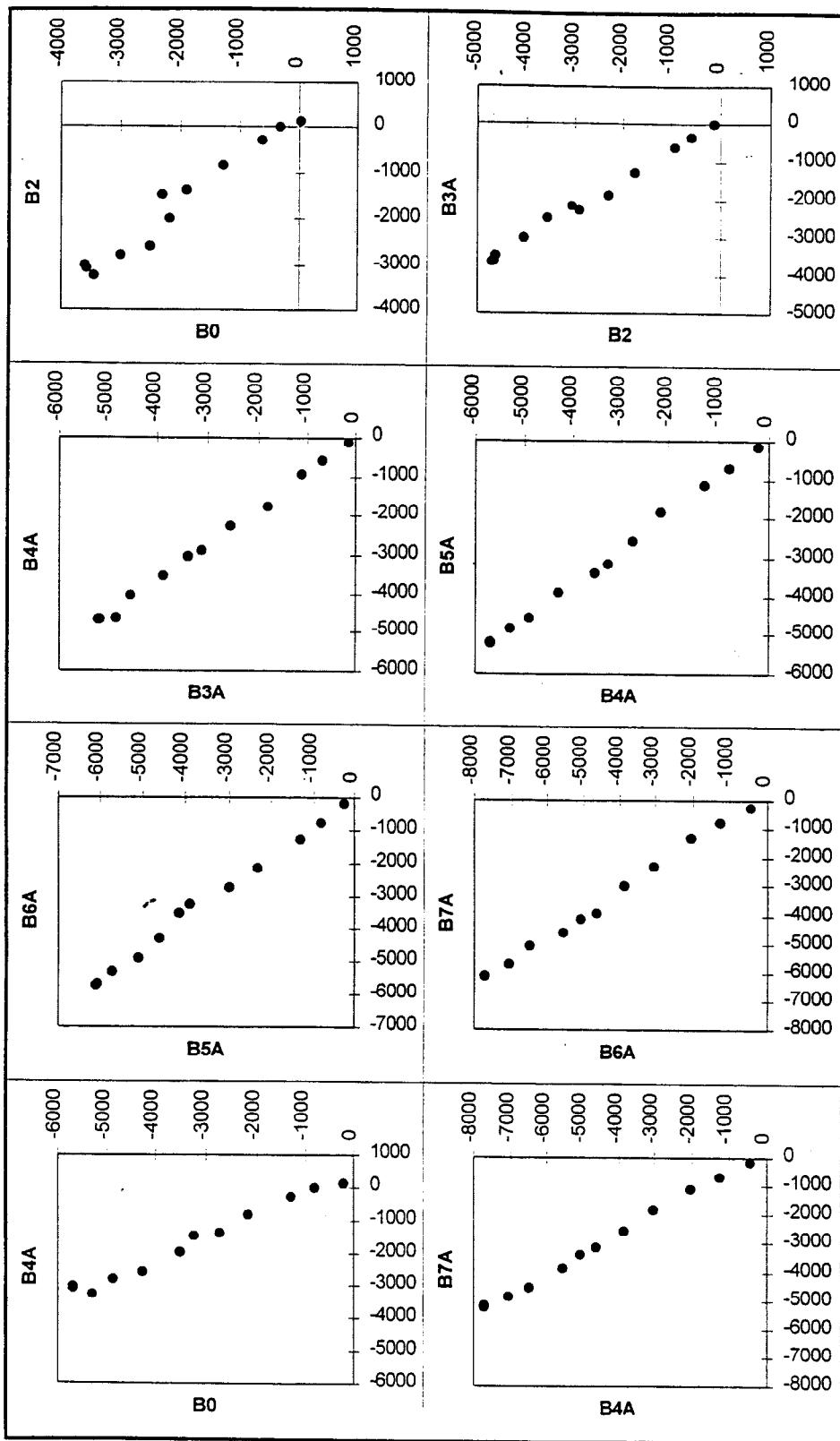


Figura 5.5. Curvas de doble masa entre las balizas de la zona de ablación (año 1995).

Evolución mensual del balance y la ablación

La evolución que ha tenido el balance en el transcurso del año 1995 se puede observar en la figura 5.6 donde están representadas siete balizas de diferentes rangos.

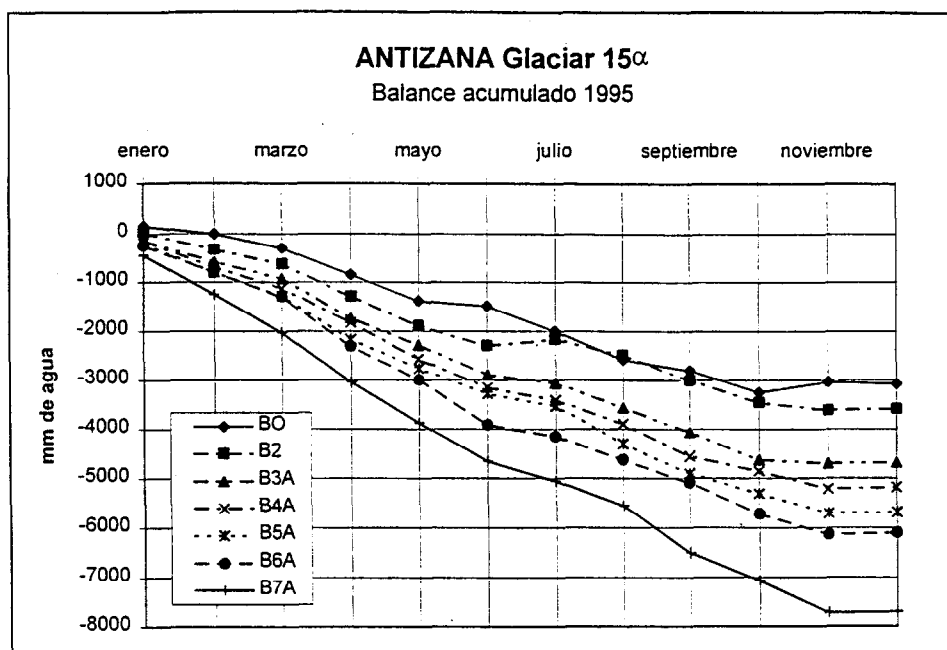


Figura 5.6. Balance acumulado de las balizas de ablación. Glaciar 15 α , año 1.995

Allí se destaca la buena sincronización que tienen las balizas entre sí aún cuando pertenecen a rangos altitudinales muy separados. Se nota también una gradiente muy marcada y que cada baliza tiene un fuerte balance negativo igual a -7.700 mm al pie del glaciar y que se reduce a -3.000 mm en la cota 5.050 msnm (baliza B0). Esto implica que en el año de 1.995 todas las balizas estuvieron en la zona de ablación y que la línea de equilibrio ELA se ubicó sobre los 5.050 msnm. Las pendientes de las curvas son bastante lineales, es decir, que no hubo mayores variaciones de un mes a otro.

Para conocer la repartición estacional del balance, en la figura 5.7 se ha representado el balance mensual promedio de entre todas las balizas seleccionadas. De igual manera se ha procedido con la ablación (figura 5.8).

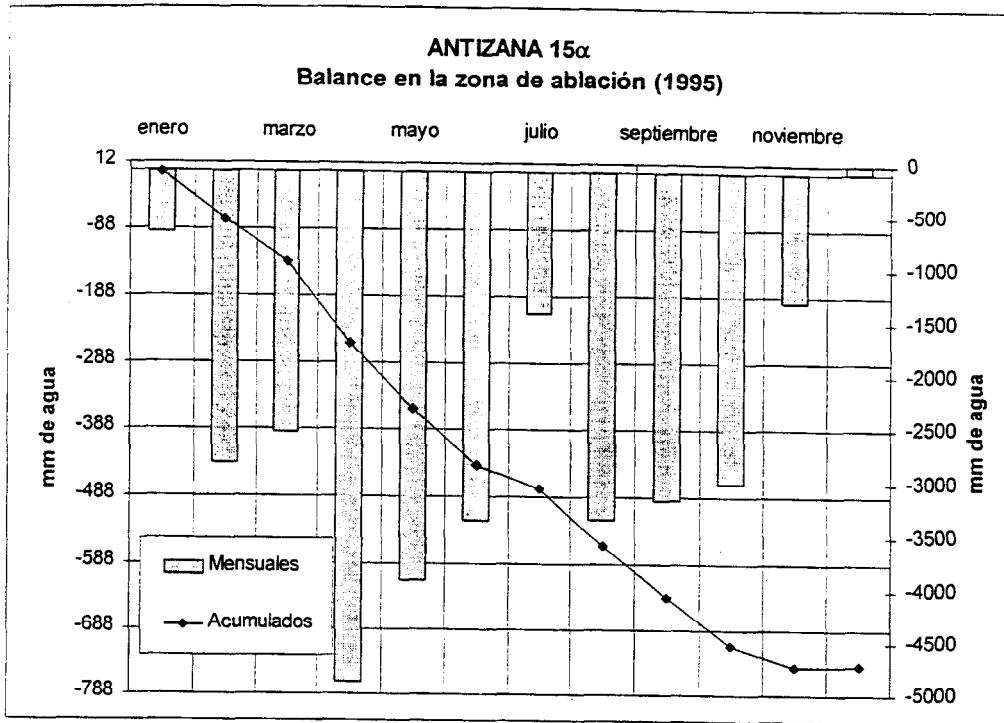


Figura 5.7. Variación del balance en la zona de ablación del Glaciar 15 α del Antizana durante el año de 1.995, valores promedio de las balizas B 0, 2, 3A, 4A, 5A y 6A.

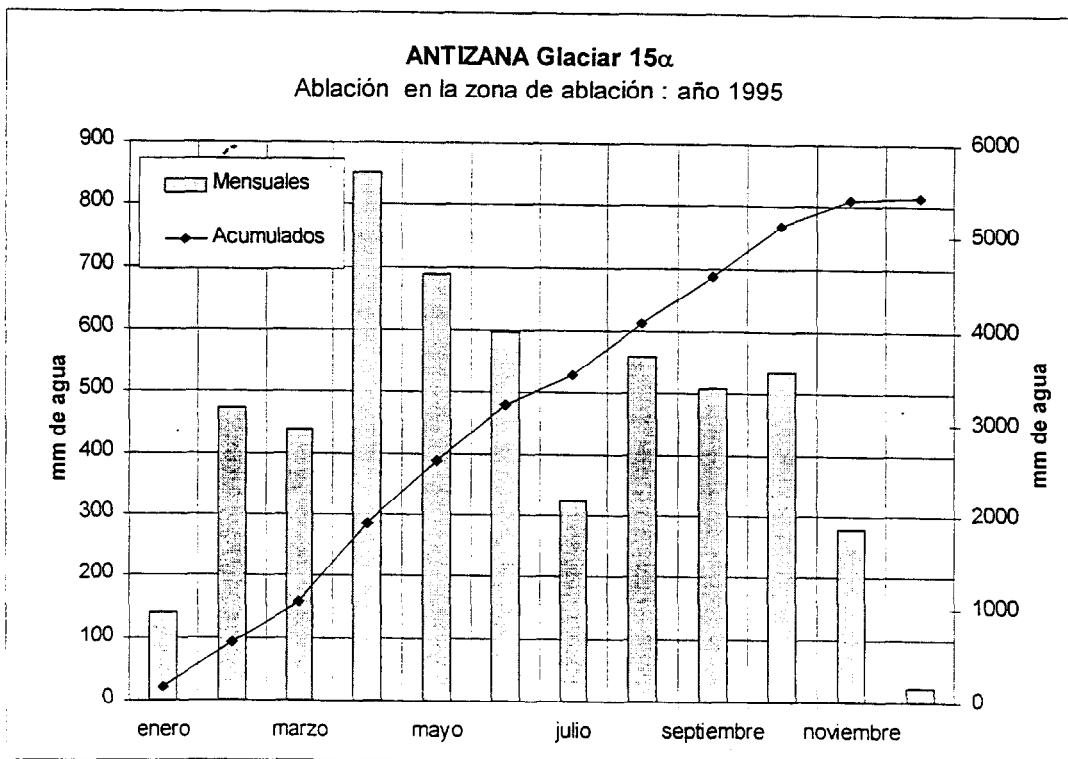


Figura 5.8. Variación de la ablación en la zona de ablación del Glaciar 15 α del Antizana durante 1.995, valores promedio de las balizas B 0, 2, 3A, 4A, 5A y 6A.

En los dos gráficos se destaca la presencia de dos picos de fusión, los cuales están vinculados con las épocas de los equinoccios cuando el glaciar recibe mayor cantidad de energía solar. Como ese año fue bastante seco, la ablación estuvo relacionada directamente con la intensidad de la radiación solar.

Gradiente Vertical del Balance

Al representar la variación que ha tenido el balance anual en dependencia de la posición altimétrica de la baliza (figura 5.9) se puede observar que el Gradiente Vertical del Balance tuvo un valor de 20,3 mm/m ($R^2 = 0,93$) en la zona de ablación durante el año de 1.995.

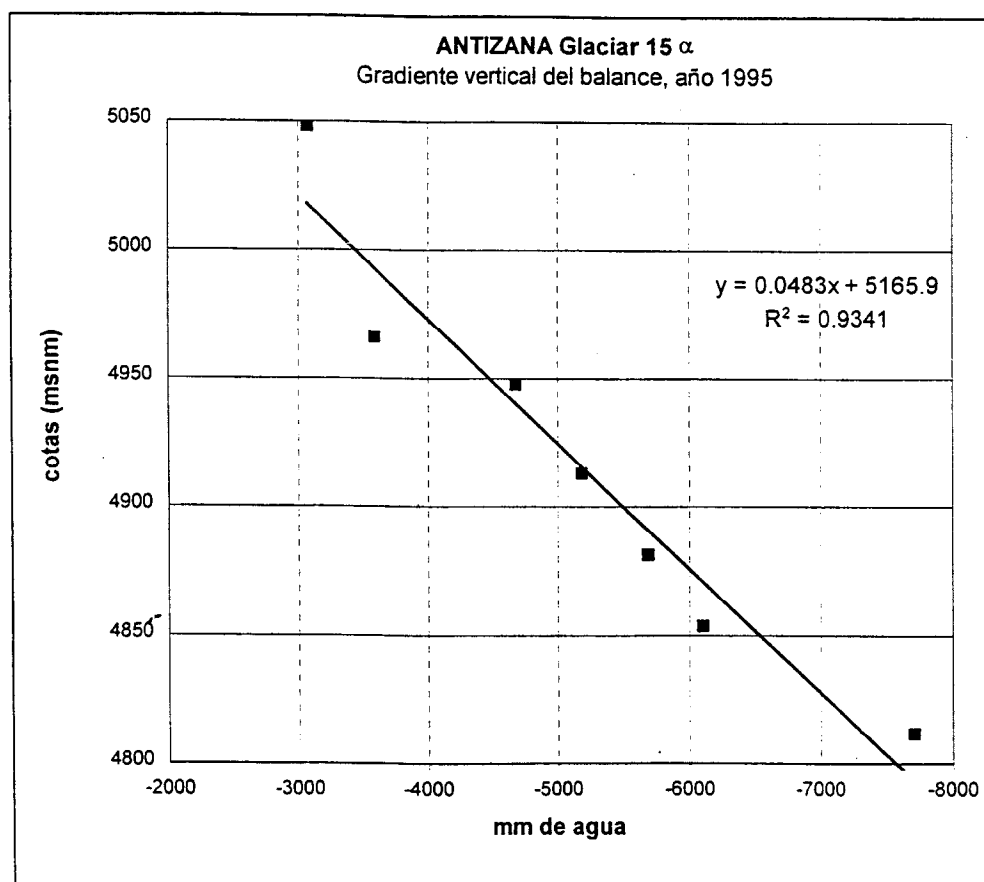


Figura 5.9. Variación del balance anual en función de la posición altimétrica y su Gradiente Vertical en la zona de ablación del Glaciar 15 α , año de 1.995.

Presencia de la capa de nieve

Como se ha explicado anteriormente, cada mes se medía el espesor de la capa de nieve que rodeaba a las balizas para lograr suficiente precisión en los cálculos de la ablación; pero esas mediciones proporcionan otra interesante información adicional ya que el espesor de la nieve puede ser considerado como un valor puntual del día, mientras que el balance refleja los cambios acaecidos en el glaciar durante el mes. Ello es así por cuanto la capa de nieve pudo caer el día anterior a la medición y fundirse el día siguiente; únicamente los espesores importantes de nieve son significativos porque permanecen más tiempo sobre el glaciar. Al

interpretar con suficiente precaución esos datos, se puede estimar la variación que ha tenido la capa de nieve en el transcurso del año. Como lo indican las figuras 5.10 y 5.11, en este caso también se observa una buena sincronización entre las balizas. Hasta la altura de los 4.980 msnm hubo cinco meses sin nieve y 10 meses con menos de diez centímetros. Ello significa que durante esos 10 meses el glaciar estuvo con muy poca (o sin ninguna) nieve y que en consecuencia hubo ablación.

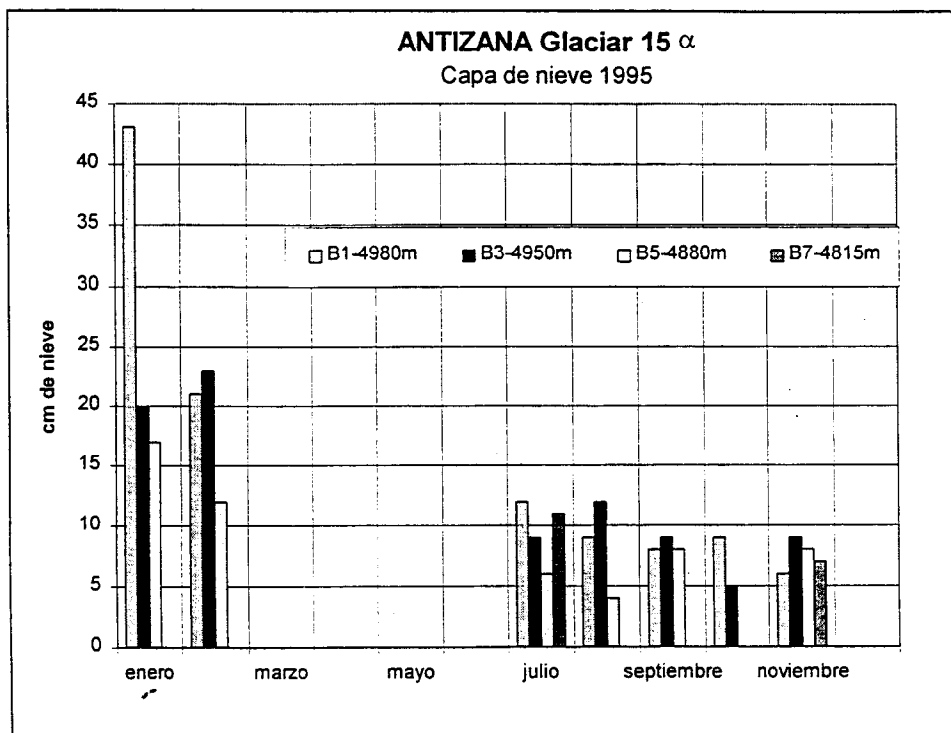


Figura 5.10. Espesor de la capa de nieve a principio de cada mes en la zona de ablación del Glaciar 15 α durante el año de 1995.

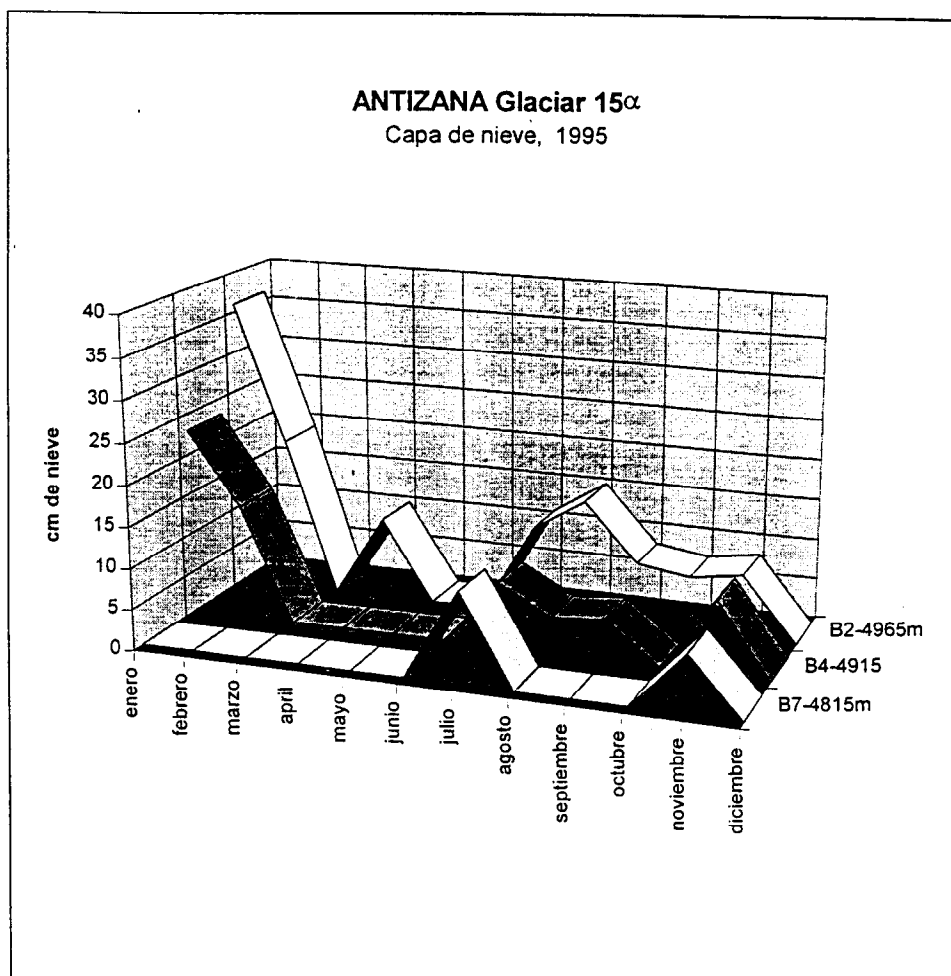


Figura 5.11. Espesor de la capa de nieve en la zona de ablación del Glaciar 15 α en 1995.

Unicamente en los meses de enero y febrero el glaciar estuvo cubierto de nieve, lo cual concuerda con el hecho de que casi todo el año hubo ablación y explica la buena sincronización que registran las mediciones realizadas.

5.2.2. Balance en la zona de acumulación

El balance que tuvo lugar en la zona de acumulación durante el año de 1.995 puede ser calculado en base a dos fuentes de datos. La primera, lo constituye el pozo que fue excavado en la cota 5.400 msnm y que permitió medir la precipitación acumulada del año. La segunda fuente radica en los resultados de la perforación hecha en la cumbre del Antizana el año de 1.996 y que cubre algunos períodos anuales.

Índice de ablación

Como se ha señalado anteriormente uno de los problemas particulares de la investigación consiste en delimitar con precisión el inicio de cada ciclo anual, para lo cual se ha utilizado el

índice (descrito en el numeral 4.2.1) que establece las épocas más favorables para la ablación (figura 5.12).

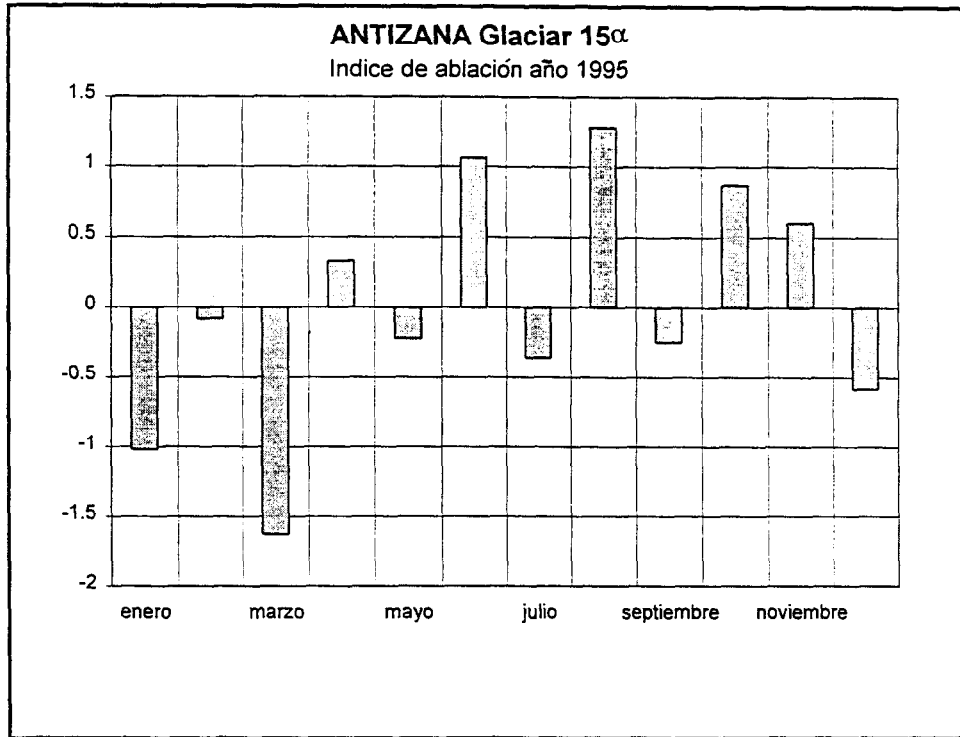


Figura 5.12. Valores del índice de ablación en el Glaciar 15 α durante el año de 1.995

Durante el año de 1.995 la ablación fue elevada y las precipitaciones bajas, razón por lo cual es difícil definir la temporada ablación de alta ya que la tendencia en cada mes fue diferente (e inclusive contraria a la que tenían los meses próximos). Esto implica que todos los meses del año estuvieron potencialmente en fase de ablación, lo cual tiene importancia para la interpretación en la figura 5.13.

Perfil densimétrico del pozo ubicado en los 5.400 msnm

El pozo excavado en los 5.400 msnm proporcionó el valor de la acumulación producida en un punto intermedio entre la cumbre del Antizana y la última de las balizas. En la figura 5.13, donde se presenta el perfil densimétrico obtenido, se puede observar que el inicio del año 1996 se encuentran en la profundidad -125 cm, es decir, inmediatamente después de que se ha registrado un amplio número de capas con alta densidad que se explican por la ablación intensa del año 1.995.

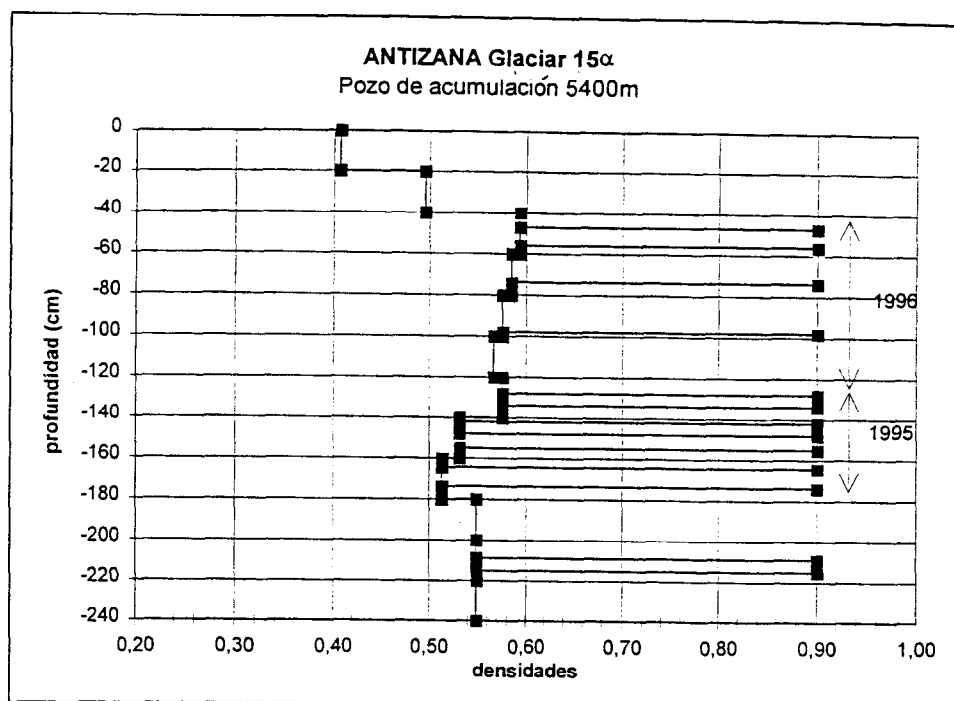


Figura 5.13. Perfil de densidad del pozo ubicado en la cota 5.400 msnm

Perforación de enero 1.996 en la cumbre del Antizana (5.760 msnm)

Los resultados obtenidos gracias a la perforación realizada en la cumbre del Antizana (figura 5.14, anexo 2), no contienen evidencias de que las variaciones de la densimetría reflejen la existencia de alguna secuencia cíclica o anual. Ello confirma la ausencia en las cumbres de una temporada seca suficientemente extensa y marcada, (como sucede por ejemplo en Bolivia), que cada año trasforma la capa superior de nieve hasta alcanzar el nivel de densidad del *nieve* compacto o del hielo.

Las concentraciones de oxígeno ^{18}O , por el contrario, muestran una variación periódica que permite identificar una señal estacional. Esas concentraciones de ^{18}O no pueden estar relacionadas primero con la temperatura existente cuando se producen las precipitaciones, ya que la temperatura es casi constante en el Ecuador en el transcurso del año a nivel mensual. Es probable que las variaciones del ^{18}O dependan del régimen de precipitaciones, de la siguiente manera :

- i. cuando las precipitaciones son débiles y escasas, la sublimación tiene un rol importante en la superficie de la capa de nieve y aumenta la concentración de ^{18}O , hasta cuando se produzca la siguiente nevada.
- ii. las precipitaciones sobre la vertiente oriental de la cordillera, que se producen no vienen directamente del Atlántico, sino que más bien, por un proceso de evaporación se forman en la cuenca amazónica. Es así como entre la selva y la sierra, existen varios ciclos evaporación/precipitación, que producen paulatinamente un enriquecimiento del agua precipitada en ^{16}O . Esos ciclos al tener una mayor frecuencia en la temporada de lluvias, (entre abril y octubre) hacen que las precipitaciones de este periodo contengan una mayor cantidad relativa de ^{16}O .

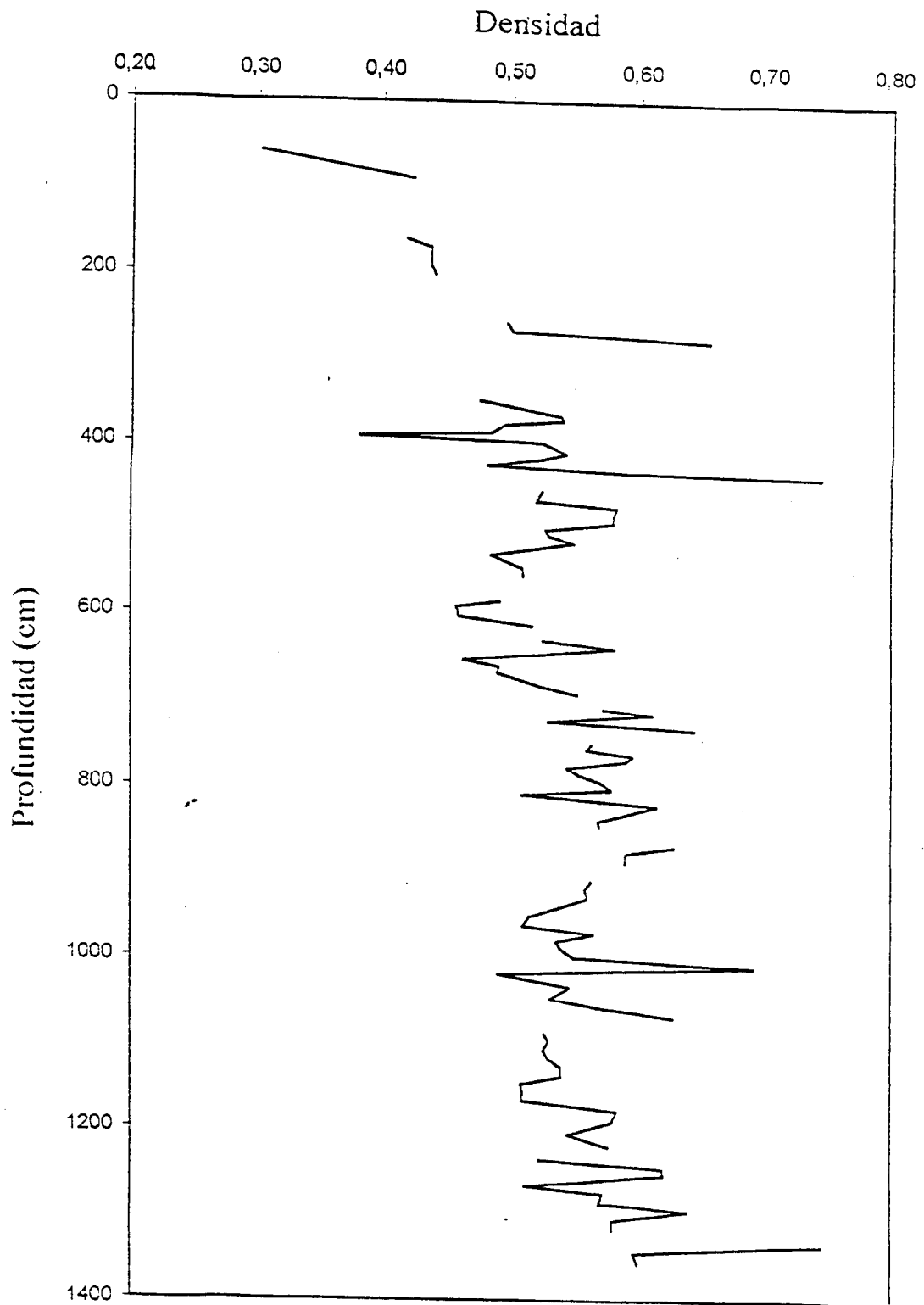


Figura 5.14. Perfil de densidad de la muestra de nieve obtenida por perforación en la cumbre del Antizana en enero 1.996 (valores en el anexo 2).

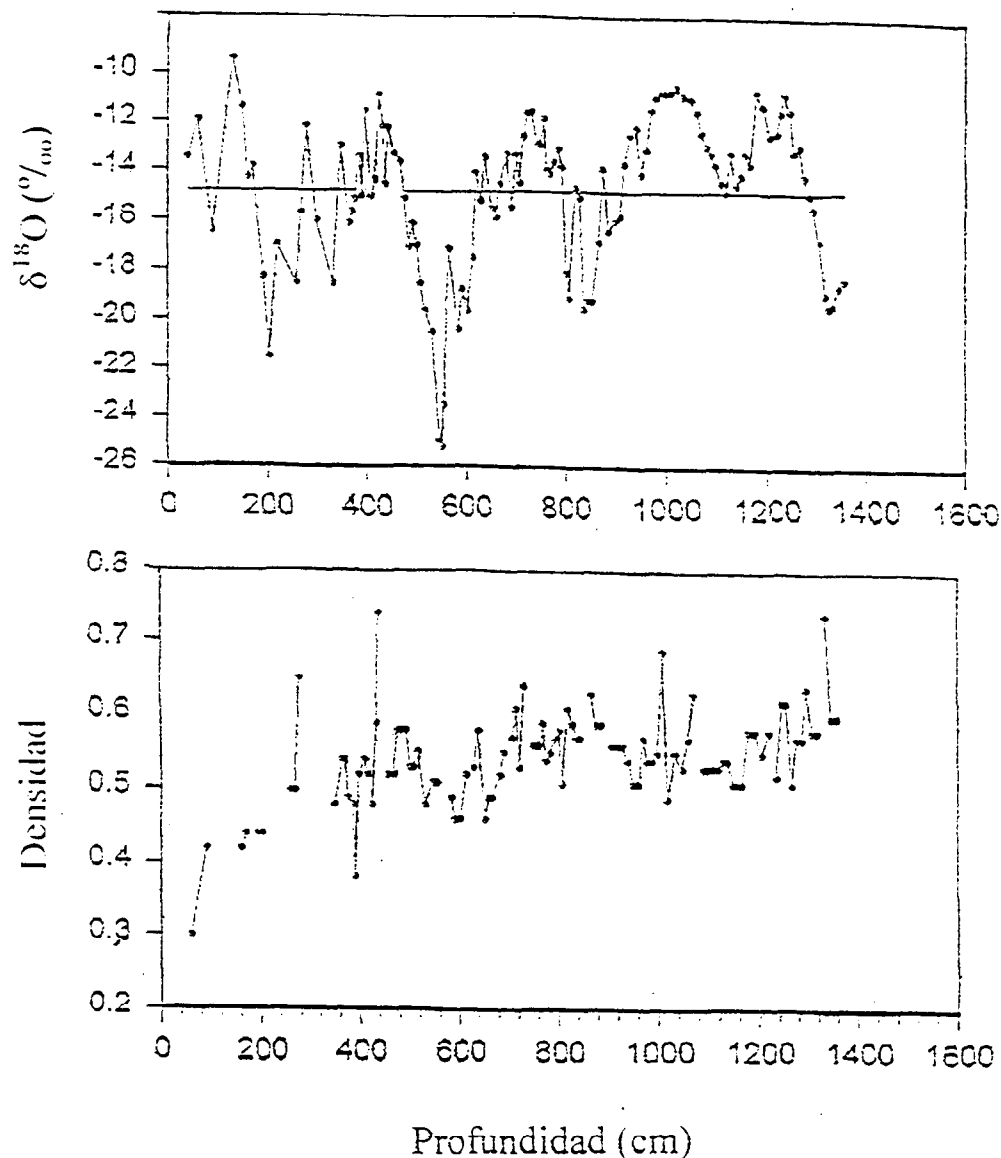


Figura 5.15. : Variación del $\delta^{18}\text{O}$ y densimetría en la muestra de nieve obtenida por perforación en la cumbre del Antizana en enero 1.996. Análisis : L.G.Thompson.

La mayor cantidad relativa de ^{16}O en las nieves precipitadas entre abril y octubre, y una cantidad relativa más elevada de ^{18}O entre noviembre y enero (por efecto de la sublimación *in situ*), son dos factores que se acumulan y podrían explicar las variaciones estacionales del $\delta^{18}\text{O}$ que se han observado en la cumbre del Antizana.

En consecuencia, en este estudio, se ha considerado que el ciclo del $\delta^{18}\text{O}$ coincide con el ciclo hidrológico anual : su periodo con valores más negativos corresponde a la estación con precipitaciones escasas, (entre noviembre y enero). Los ciclos anuales de acumulación fueron identificados haciendo coincidir el valor más débil del $\delta^{18}\text{O}$ en el mes de diciembre. Utilizando las densidades obtenidas en la misma muestra, se ha reconstituido una secuencia de acumulación de 5 años (cuadro 5.2.)

Año	Espesor de la nieve [cm]	Espesor acumulada [cm]	Promedio de densidad [g/cm ³]	Balace de acumulación [mm de agua]
1991	200	200	0.56	1120
1992	300	500	0.56	1680
1993	260	760	0.54	1400
1994	320	1080	0.53	1700
1995	260	1340	0.43	1120

Cuadro 5.2. Estimación del balace de acumulación en la cumbre del Antizana a partir de la perforación en enero de 1.996. Los límites entre los años han sido determinados mediante la interpretación de las variaciones del $\delta^{18}\text{O}$ en la nieve.

En el año de 1995, se tuvo una acumulación neta de 1.120 mm de agua

Los datos del pozo, que fue excavado simultáneamente en las proximidades de la perforación, indican para el mismo año (cuadro 5.3) una acumulación de agua un poco diferente e igual a 1.062 mm (cuadro 5.3, figura 5.16.).

Profundidad acumulada [cm]	Densidad [g/cm ³]	Lámina equivalente de agua [mm]	Lámina acumulada [mm]	Tipo de medición
-19	0.46	87.8	87.8	TUBO
-52	0.17	54.9	142.7	TUBO
-54.5	0.44	11.0	153.6	TUBO
-74.5	0.40	80.5	234.1	TUBO
-85	0.42	43.9	278.0	TUBO
-87.5	0.07	1.8	279.8	TUBO
-107.5	0.48	96.9	376.8	TUBO
-127.5	0.48	96.9	473.7	TUBO
-146.5	0.48	91.4	565.1	TUBO
-166.5	0.52	104.2	669.4	TUBO
-186.5	0.55	109.7	779.1	TUBO
-206.5	0.55	109.7	888.8	TUBO
-216.5	0.52	52	940.8	SIPRE
-228.5	0.39	46.7	987.5	SIPRE
-240.5	0.42	50.4	1037.9	SIPRE
-258	0.50	18.84	1056.7	SIPRE
-268	0.50	5	1061.7	SIPRE
-278	0.65	6.54	1068.3	SIPRE

Cuadro 5.3. Densimetría correspondiente al año 1.995 en el pozo de nieve. Cumbre del Antisana. (La doble línea indica el límite entre 1.994 y 1.995. A partir de los-216 cm, la perforación fue realizada con ayuda del equipo SIPRE.

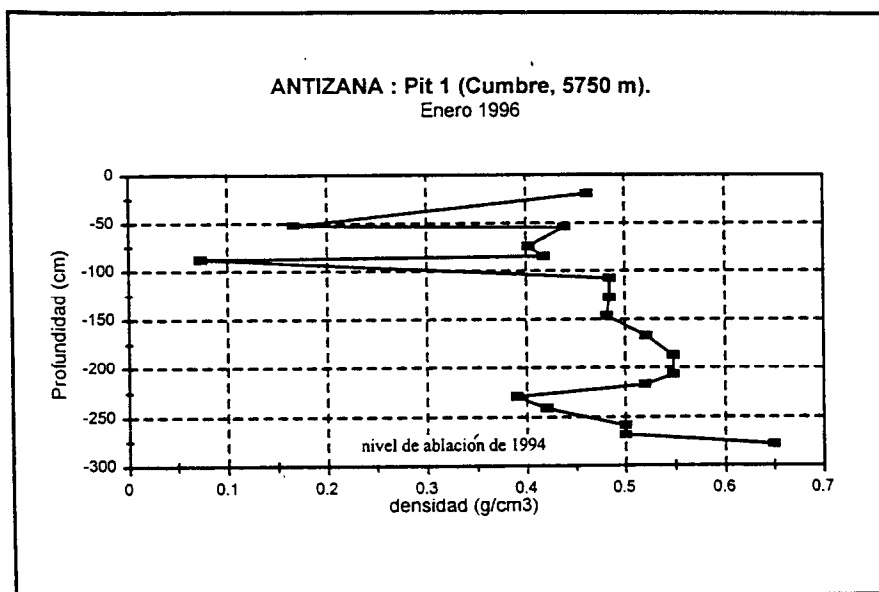


Figura 5.16. Densimetría del año 1.995 en el pozo de nieve, Cumbre del Antizana.

El detalle de la estratigrafía del mismo pozo consta en el cuadro 5.4..

Nº	Espesor cm	Observaciones
1	0 - 18	Nieve reciente
2	18 - 22	Nevé con granos de 1 mm
3	22 - 23	Capa de hielo de 5 mm
4	24 - 28	Nevé, ídem 2
5	28 - 29	Capa de hielo 5 mm
6	29 - 33	Nevé, ídem 2
7	33 - 34	Capa de hielo de 5 mm
8	34 - 47	Nieve suelta
9	47 - 49	Capa de hielo
10	49 - 53	Nevé, granos de 2 mm
11	53 - 66	Nieve suelta
12	66 - 69	Hielo macizo
13	69 - 80	Nevé, granos entre 3 y 4 mm
14	80 - 82	Capa de hielo
15	82 - 89	Nevé, ídem 13
16	89 - 93	Hielo macizo
17	93 - 118	Nevé grueso con granos de 5 mm
18	118 - 120	Capa de hielo
19	120 - 125	Nevé, ídem 17
20	125 - 128	Capa de hielo
21	128 - 175	Nevé coherente con granos entre 2 y 3 mm
22	175 - 177	Capa de hielo
23	177 - 181	Nevé, ídem 21
24	181 - 183	Capa de hielo
25	183 - 189	Nevé, ídem 21

Cuadro 5.4. Estratigrafía de la capa de nieve del año 1.995, pozo en la cumbre del Antizana.

Cabe señalar que en comparación a los cinco años de medición, el año de 1.995 resulta bastante seco, o por lo menos tuvo una baja acumulación neta.

En conclusión del estudio sobre la acumulación en la cumbre del Antizana, se puede subrayar la importancia de la información siguiente : la existencia de una estacionalidad en la curva del $\delta^{18}\text{O}$, (si se confirma con mediciones) adicionales, demostraría, por vez primera, que se puede realizar una perforación profunda en los Andes ecuatorianos, con la garantía de que se podrá identificar las capas anuales así como datar el hielo.

5.2.3. Balance neto específico y línea de equilibrio del glaciar en 1.995

Luego de obtener los resultados correspondientes a las zonas de ablación y acumulación se puede establecer el balance neto específico del glaciar. Para ello se establecen en primer los rangos altitudinales y sus respectivos puntos representativos, que en el año 1.995 fueron los enumerados en el cuadro 5.5.

Rango Altitudinal msnm	Punto representativo de medición
5.400 - 5.760	Pozo 5.760 msnm
5.052 - 5.400	Pozo 5.400 msnm/B0
4.980 - 5.052	Balizas B0 y B2
4.960 - 4.980	Baliza B2
4.940 - 4.960	Baliza B3A
4.904 - 4.940	Baliza B4A
4.876 - 4.904	Baliza B5A
4.848 - 4.876	Baliza B6A
4.800 - 4.848	Baliza B7A

Cuadro 5.5. Puntos representativos de medición y rangos altitudinales considerados en la estimación del balance neto específico del año 1.995.

A continuación se analiza la variación del balance de masa en función de la altitud del lugar utilizando las mediciones hechas en puntos representativos de medición (balizas y pozos), asumiendo que entre dos puntos contiguos el balance varía en forma lineal. El cuadro 5.6 resume los sucesivos cálculos que conducen al valor del balance neto: superficie ocupada por cada rango altitudinal (en m^2 y en fracciones respecto al área total del glaciar), así como el balance promedio y ponderado en cada uno de ellos. El balance neto específico del año se determina finalmente mediante la suma de los balances ponderados de todos los pisos altitudinales.

Rango Altitudinal [msnm]	Superficie parcial S [m ²]	Superficie relativa S _r	Balace B [mm]	Balace Ponderado S _r *B [mm]
5.760 - 5.400	98.297	0,28	+654	185
5.400 - 5.050	140.905	0,40	-1.395	-565
4.980 - 5.050	31.726	0,09	-3.326	-303
4.960 - 4.980	10.806	0,03	-3.584	-111
4.940 - 4.960	11.308	0,03	-4.673	-152
4.904 - 4.940	18.629	0,05	-5.179	-277
4.876 - 4.904	15.631	0,04	-5.686	-255
4.848 - 4.876	12.256	0,04	-6.098	-215
4.800 - 4.848	8.383	0,02	-7.703	-186
Suma	347.941	1	Balace neto Especifico de 1.995 = -1.880 mm	

Cuadro 5.6. Cálculo del balance neto específico del año 1.995.

La posición altimétrica de la línea de equilibrio (ELA) se determina mediante el gráfico que representa el cambio del balance en función de las cotas donde se ubican los puntos representativos (figura 5.17). A partir de ello y apoyándose en el levantamiento topográfico del glaciar se determina la relación AAR del área de acumulación.

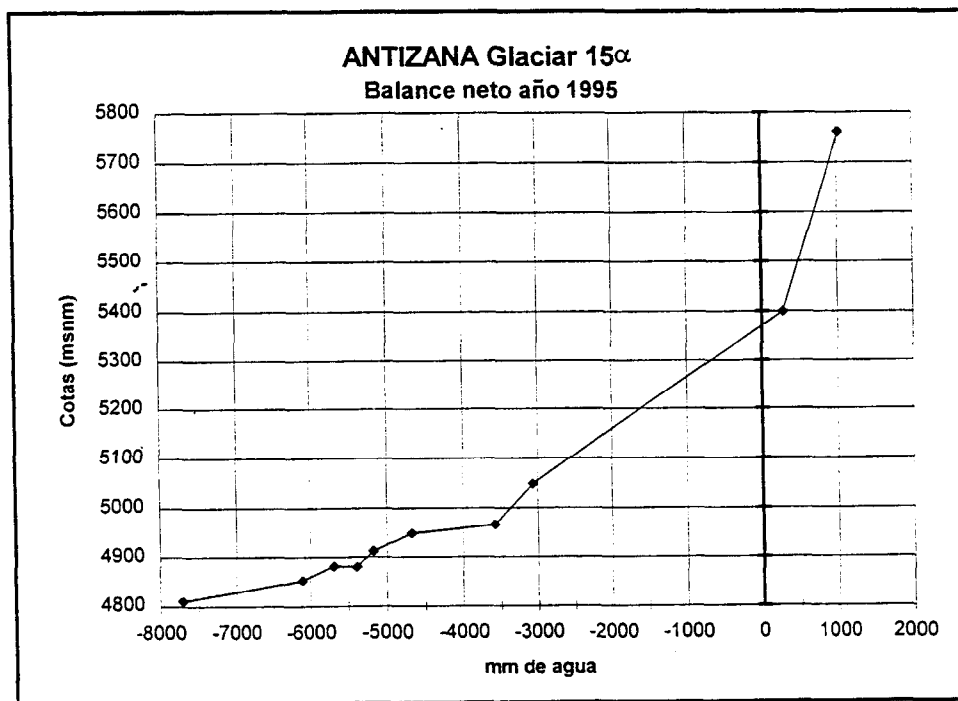


Figura 5.17. Balance en función de la altitud sobre el Glaciar 15α en 1.995

Como se puede observar en la figura 5.17, durante el año de 1.995, la línea de equilibrio se ubicó en los 5.370 msnm, lo cual permite conocer que el área de acumulación fue igual al 35 % de toda la superficie ocupada por el glaciar. Este valor es muy pequeño, lo cual concuerda con el balance neto específico que tuvo un elevado valor negativo: -1.880 mm de agua. Estos resultados, en primera instancia, podrían estar correlacionados con el alto retroceso que la lengua del glaciar tuvo en aquel año (ver capítulo 7).

De acuerdo con la teoría del modelo lineal de Lliboutry (1.974), la forma que tiene el balance en función de la altura debe mantenerse invariable año tras año, lo cual, para el caso del Antizana, se deberá comprobar después de algunos años de mediciones. No obstante, si se toma en cuenta la variación que tuvo el balance en función de la altitud en el año 1996, se puede considerar que el cálculo del balance neto específico de 1.995 estaría subestimando el valor real. En concordancia con ello, la verdadera línea de equilibrio estaría en una cota un poco inferior y la relación AAR sería algo más elevada. Por las razones aquí expuestas, en el numeral 5.4.2 se propone una corrección a la curva dada en la figura 5.17..

5.2.4. Relación con las precipitaciones

Con la finalidad de ampliar el análisis hecho con los datos del año 1.995 en la figura 5.18 se comparan los valores mensuales de las precipitaciones y del balance.

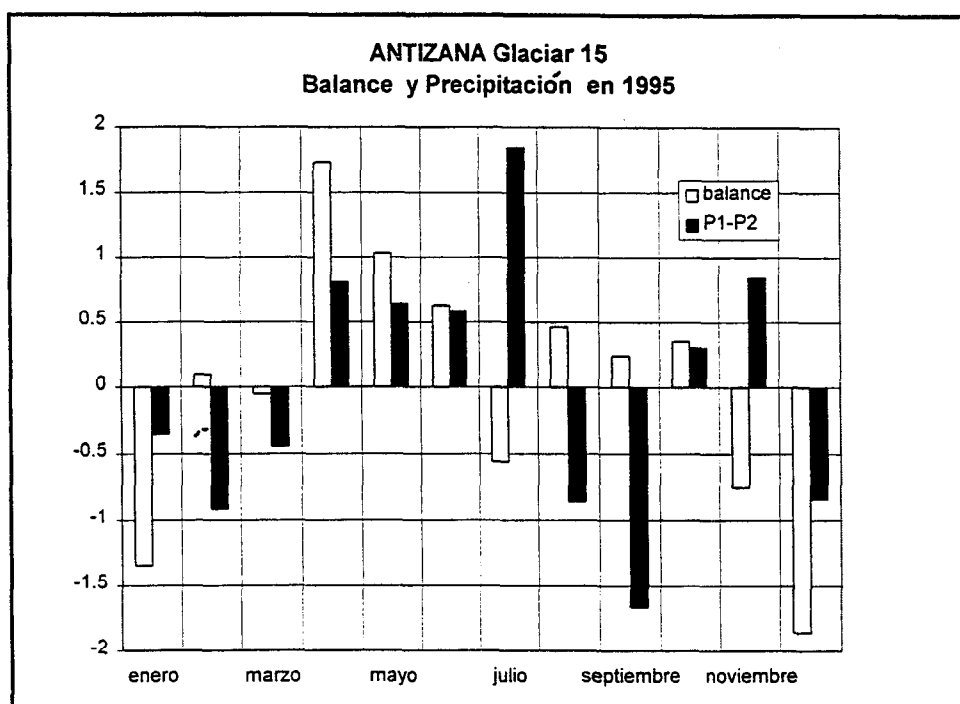


Figura 5.18. Balance y precipitaciones (en valores centrados y normados) del Glaciar 15 α en 1.995.

Allí se observa que períodos con fuerte ablación, como diciembre y enero concuerdan con períodos de menores precipitaciones, mientras que durante otros periodos, como julio y noviembre, la presencia de precipitaciones importantes no impide una fuerte ablación; este fenómeno también se produce en Bolivia durante las épocas de verano. En noviembre, diciembre y enero, al contrario ocurre, una coincidencia entre períodos de precipitaciones escasas y de fuerte ablación.

5.3. Resultados del año hidrológico 1.996

5.3.1. Balance en la zona de ablación

Red de balizas y rangos altitudinales

Al estudiar del comportamiento del Glaciar No. 15 α durante el año de 1.996 se utilizaron los datos altimétricos obtenidos en el levantamiento topográfico de enero de 1.997. Los rangos altitudinales fueron establecidos considerando el desplazamiento que tuvo la respectiva baliza representativa durante el año anterior, e incrementándolo en un mismo valor en sus extremos superior e inferior (cuadro 5.7). Esos rangos altitudinales fueron luego ajustados a fin de que cubran toda la zona de ablación; empero el gran desnivel existente entre las balizas B0 y B2 dio lugar a un rango altitudinal donde la ablación tuvo que ser interpolada. Las áreas fueron determinadas con ayuda del programa *Autocad*[®].

Rango Altitudinal msnm	Baliza Representativa
5.032 - 5.052	B0
5.000 - 5.032	Interpolación
4.924 - 5.000	B2
4.896 - 4.924	B4A
4.876 - 4.896	B5A y B5D
4.816 - 4.876	B6A y B6B

Cuadro 5.7. Balizas representativas de los rangos altitudinales, datos de alturas según el levantamiento topográfico de 1.997.

A diferencia del año anterior las curvas de doble masa del año 1.996 no son tan buenas, ya que en primer lugar no todas las balizas tuvieron permanentemente un balance negativo. Así se tiene que la baliza B0 estuvo siempre muy cerca de la línea de equilibrio, mientras que varios meses las balizas altas estuvieron en equilibrio ó acumulación y las más bajas registraban una ablación. Ello explica las diferencias que se observan en las curvas de doble masa que constan en la figura No 5.19. Estos problemas se deben también al hecho de que durante todo el año hubo una cobertura de nieve sobre el glaciar, lo cual incide en la precisión de las mediciones ya que el viento extrae la nieve de algunos lugares y la acumula en otros. No obstante, las correlaciones entre los datos de la zona baja son muy buenas y garantizan la calidad de los cálculos.

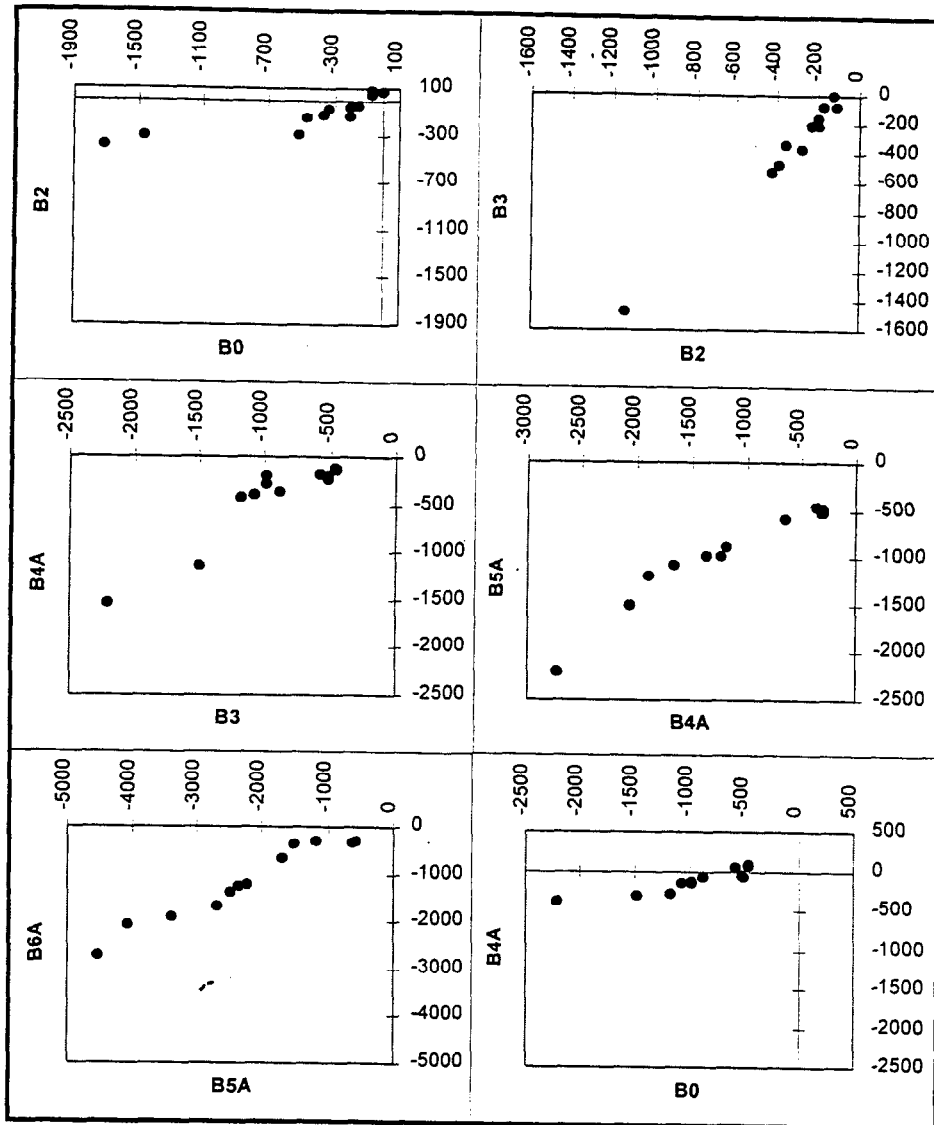


Figura No. 5.19. Curvas de doble masa del balance registrado en las balizas del Glaciar No. 15 α durante el año de 1.996.

El gradiente altitudinal que se observó en el balance del año 1.996 es bastante claro, aún cuando la sincronización de los cambios entre los puntos de medición fue débil, como lo indican los balances acumulados de cinco balizas correspondientes a diversos rangos altitudinales (figura 5.20.). Allí se destaca la gran diferencia existente entre el balance negativo al pie del glaciar y el elevado equilibrio que la baliza B0 tuvo durante todo el tiempo. La importancia de este hecho se destaca si se toma en cuenta que en 1.996 la baliza B0 estuvo en cotas inferiores a las de 1.995, y que a pesar de ello su balance se elevó desde los -3.000 mm en 1.995 a los -400 mm en 1.966. Algo semejante sucedió al pie del glaciar ya que su balance en 1.996 no fue tan negativo (-4.500 mm en) como el registrado durante el año anterior, cuando tuvo un valor de -7.700 mm de agua.

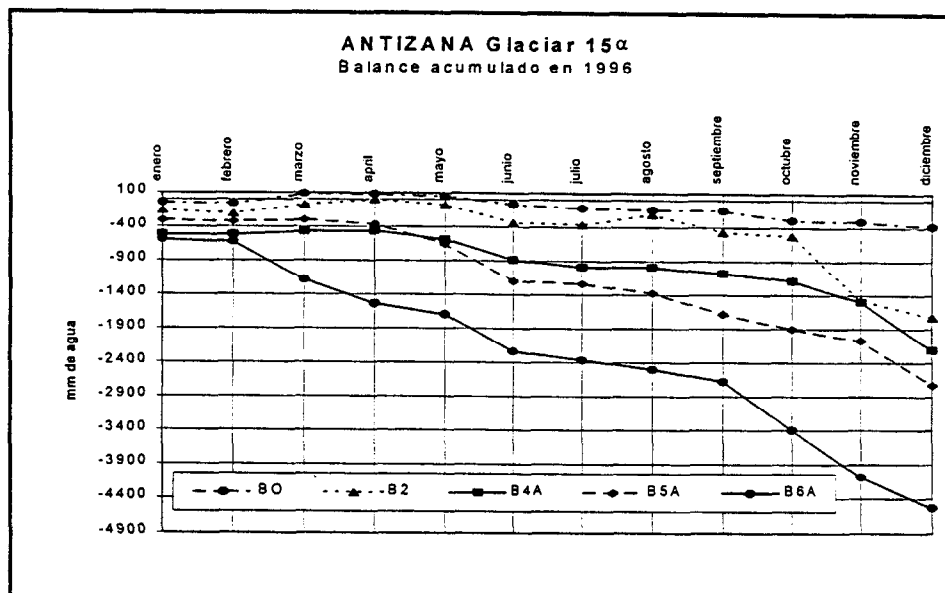


Figura 5.20. Valor acumulado del balance en las balizas del Glaciar 15 α en 1996.

Para ampliar la visión de las variaciones que hubo durante el año de 1996, las figuras 5.21 y 5.22. presentan los valores promedio del balance (de todas las balizas seleccionadas) y la ablación que se produjeron en la zona baja del glaciar. Allí se observan dos picos de fusión: el mayor de ellos que ocurre en los meses de octubre a diciembre, y el siguiente del mes de junio. Esa variación mensual concuerda más con la distribución promedio que tienen las precipitaciones en el sector, donde la temporada seca se extiende generalmente desde noviembre hasta enero.

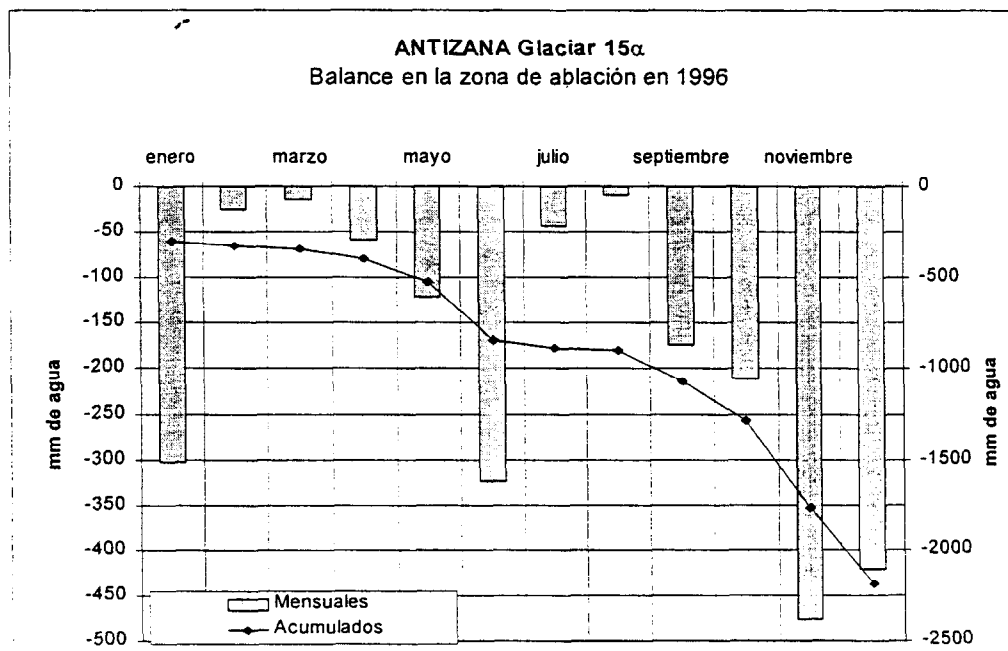


Figura 5.21. Variación mensual del balance en la zona de ablación del Glaciar 15 α durante el año de 1.996 (promedio de los valores registrados en las balizas B 0, 2, 3A, 4A, 5A, 6A).

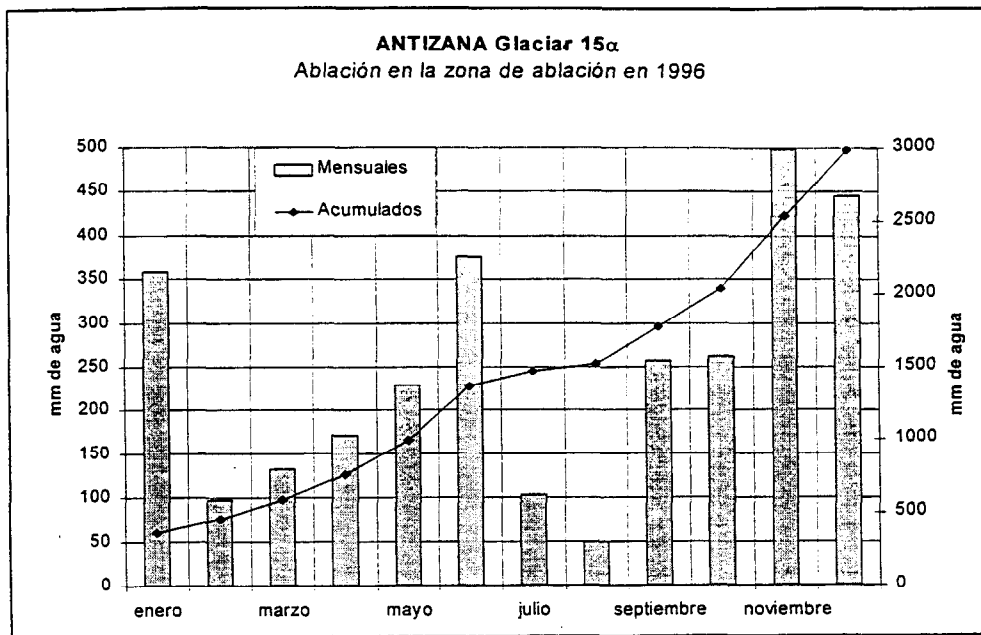


Figura 5.22. Variación mensual de la ablación en la zona de ablación del Glaciar 15 α , durante el año de 1.996 (promedio de los valores en las balizas B0, 2, 3A, 4A, 5A, 6A).

Los cambios que durante el año de 1.996 tuvo el balance en la zona de ablación, a medida que aumenta la posición altimétrica del lugar, constan en la figura 5.23., donde además se observa la magnitud que tuvo el gradiente vertical del balance.

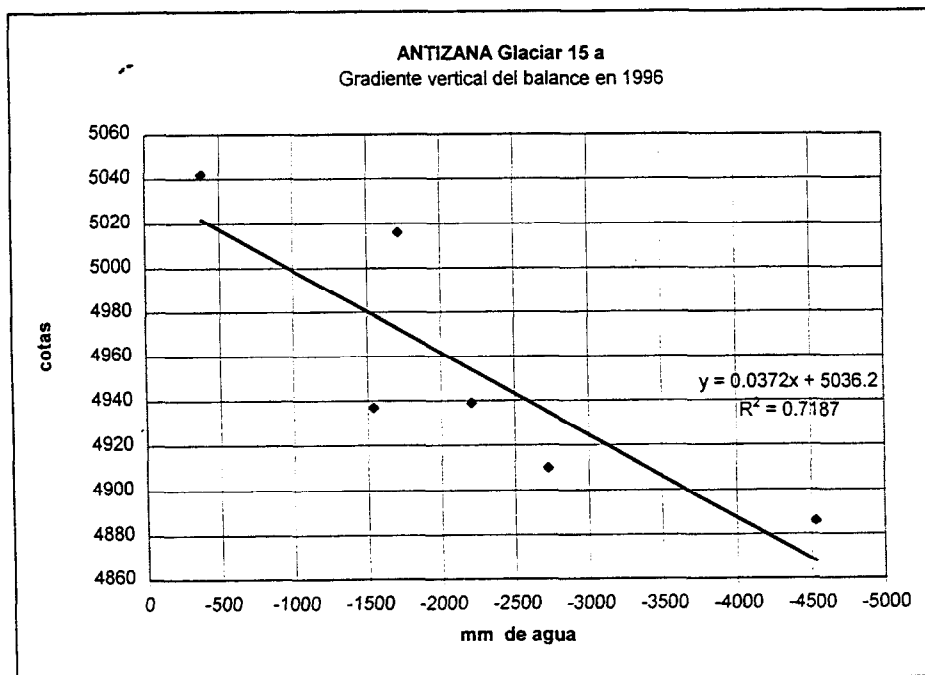


Figura 5.23. Variación del balance en dependencia de la posición altimétrica y su gradiente vertical en la zona de ablación del Glaciar 15 α durante el año de 1.996

Durante ese año, no se tuvo una variación perfectamente lineal del balance según cambia la altura del lugar como lo demuestra la recta de regresión ($R^2 = 0,72$) de la figura 5.20. Tales resultados son consecuencia de las causas indicadas al inicio de este numeral, donde se describen la red de balizas y los rangos altitudinales. El gradiente GVB que se obtiene, al estimarlo mediante la pendiente de la línea recta, es igual a 26,9 mm/m, valor que supera el gradiente del año 1.995. Esa diferencia se explica, en parte, por la baja calidad del ajuste obtenido mediante la línea recta.

Cobertura de nieve en la parte inferior del glaciar durante el año de 1.996

En el transcurso del año 1.996, se encontró con mucha frecuencia que el espesor de la nieve superaba los 10 cm, lo cual implica que ella se mantuvo presente casi todo el tiempo sobre el glaciar (figuras 5.24 y 5.25). Encima de los 4.900 msnm el glaciar permaneció casi siempre cubierto de nieve; excepto en noviembre, diciembre y enero, meses en los cuales el hielo estuvo al descubierto. Ello hizo que el balance sea más positivo que en 1.995.

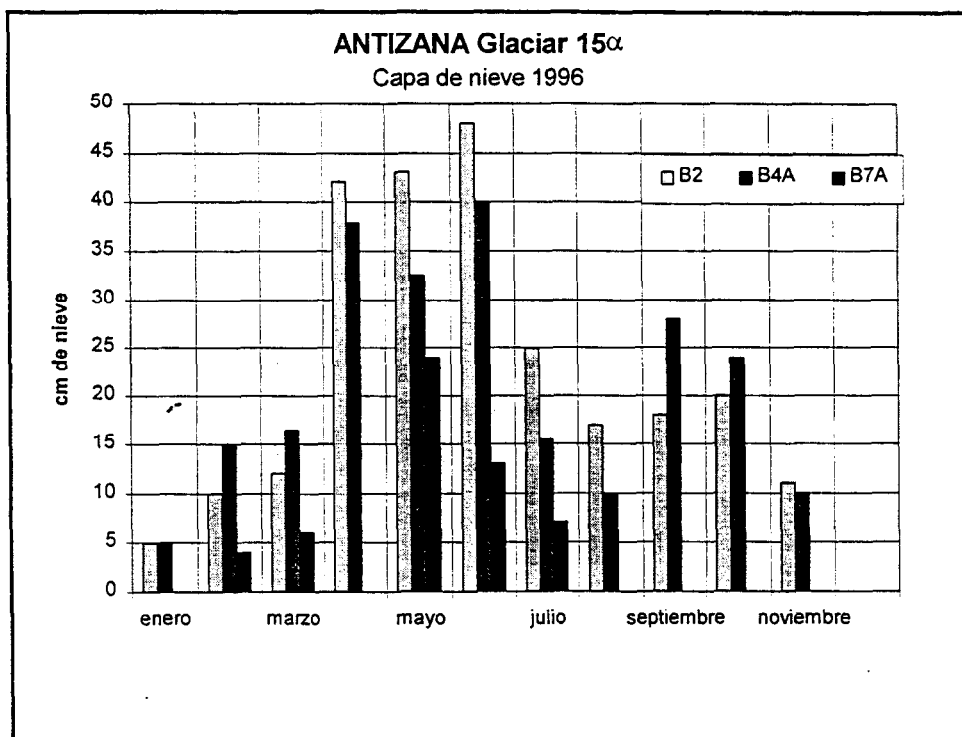


Figura 5.24. Espesor de la capa de nieve en la zona de ablación del Glaciar 15 α en 1.996

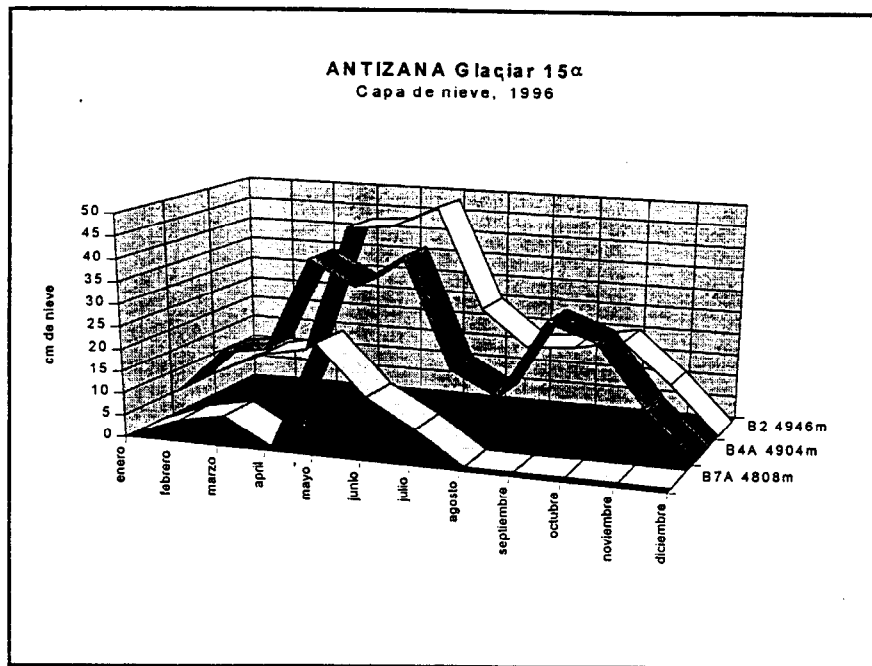


Figura 5.25. Espesor de la capa de nieve en la zona de ablación del Glaciar 15 α del Antizana en 1.996

5.3.2. Balance en la zona de acumulación

Al igual que en los cálculos efectuados para 1.995, en el año de 1.996 también se determinó el índice de ablación a fin de conocer cuáles fueron los períodos de ablación que se produjeron en la parte alta del glaciar. Ello define las posibilidades de que se haya formado un denso estrato de hielo, visible en medio de la capa de nieve. (fig. 5.26.).

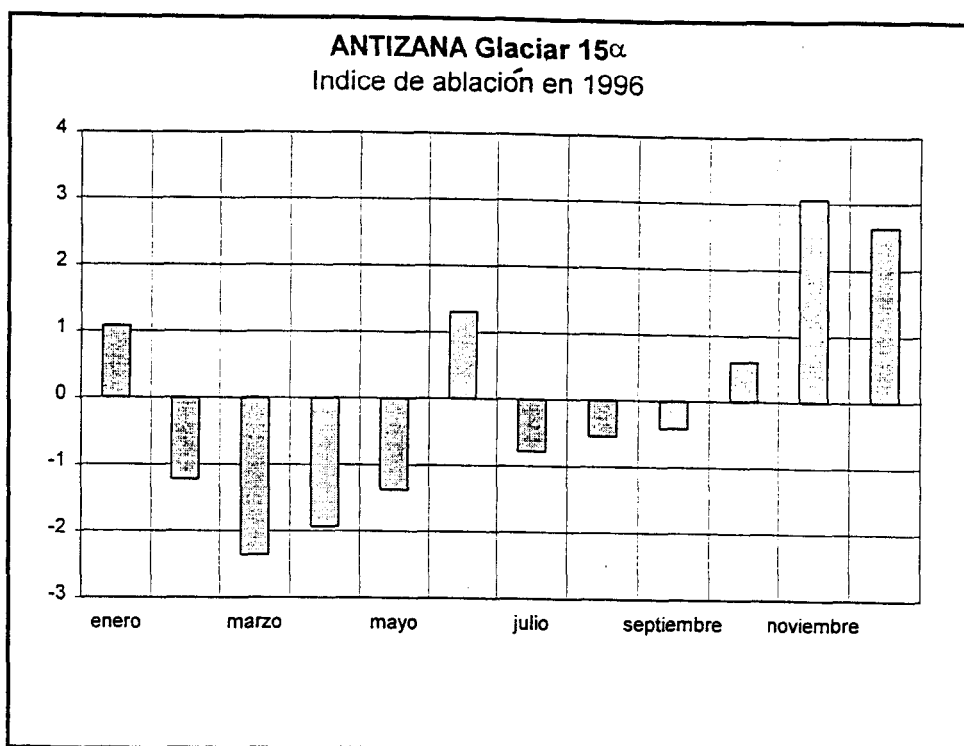


Figura 5.26. Variación mensual del índice de ablación en la zona baja del glaciar durante 1.996.

En esta figura, se puede distinguir, sin embargo, que la temporada de ablación se ubicó en noviembre y diciembre, temporada en la cual las condiciones son favorables para la ablación en la parte alta del glaciar, ya que al mismo tiempo la zona baja del glaciar registra menores precipitaciones y una elevada ablación. Con ayuda de ello se pudo asignar fechas a las capas de hielo encontradas en los pozos.

Mediciones en los pozos

Durante el año de 1.996 se obtuvo información en cinco pozos de acumulación que fueron excavados en los 5.150, 5.300, 5.400 y 5.760 msnm. La interpretación del perfil densimétrico del pozo ubicado en la cumbre (figura 5.27.), permite considerar que la capa de hielo encontrada a -20 cm de profundidad se formó a inicios del año 1.997 (en noviembre y diciembre, cuando hubo una elevada ablación), mientras que la capa encontrada en los -240 cm correspondería a la temporada seca del año anterior. La capa de hielo que ocupa una posición intermedia (-180 cm) es consecuencia de la ablación de junio de 1.996 como lo indica el índice de ablación de la figura 5.26.. En consecuencia, durante el año de 1.996 en la cumbre del Antizana hubo una acumulación neta de 1.150 mm de agua.

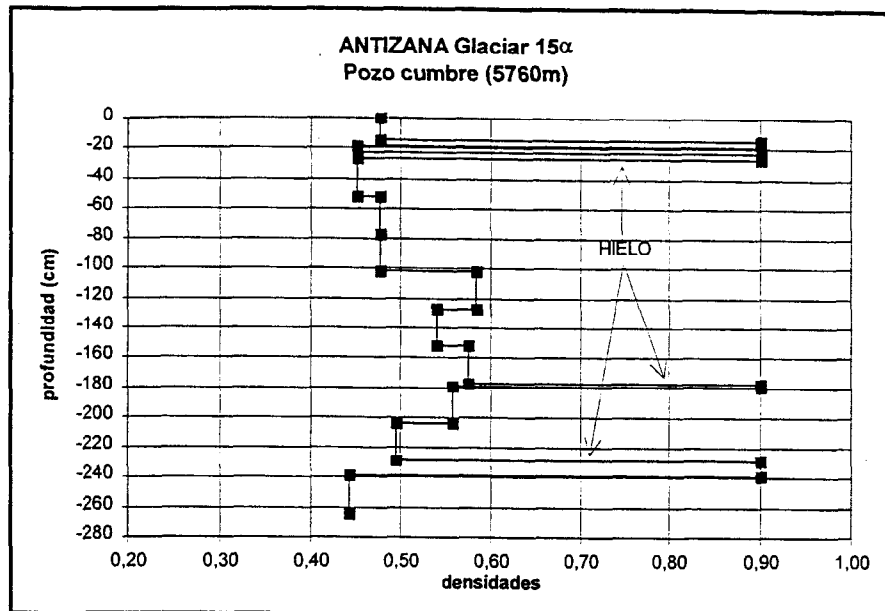


Figura 5.27. Perfil densimétrico de la nieve en el pozo de acumulación ubicado en los 5.760 msnm del Glaciar 15 α del Antizana, año 1.996

El perfil del siguiente pozo, ubicado en los 5.400 msnm, contiene un mayor número de capas de hielo, lo cual posiblemente se deba a que ese lugar sería muy sensible a la ablación. Como se observa en la figura 5.28, el perfil contiene las huellas de precipitaciones acaecidas durante dos años. El año de 1.996 está comprendido entre la capa superior de hielo y el inicio del segundo grupo de capas; la acumulación neta de ese año fue igual a 460 mm de agua.

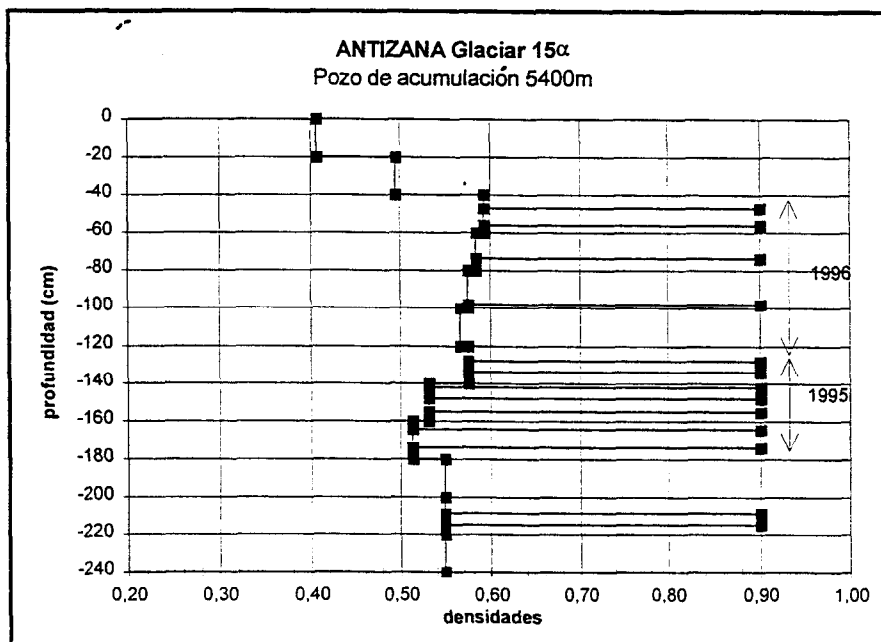


Figura 5.28. Perfil densimétrico de la nieve en el pozo de acumulación ubicado en los 5.400 msnm del Glaciar 15 α del Antizana, año 1.996

El pozo excavado en los 5.300 msnm, parece estar ubicado en un lugar muy sensible a la acumulación ya que contiene elevadas precipitaciones respecto a lo encontrado en el pozo anterior (si se toma en cuenta el hecho de que por estar ubicado en una cota inferior la acumulación debería ser mucho menor). Las precipitaciones del año 1.996 (figura 5.29), están ubicada entre la capa de nieve sucia y de alta densidad de inicios de 1.997 y la capa de hielo (-120 cm) de fines de 1995. Ello implica que la acumulación neta fue igual a 358 mm de agua.

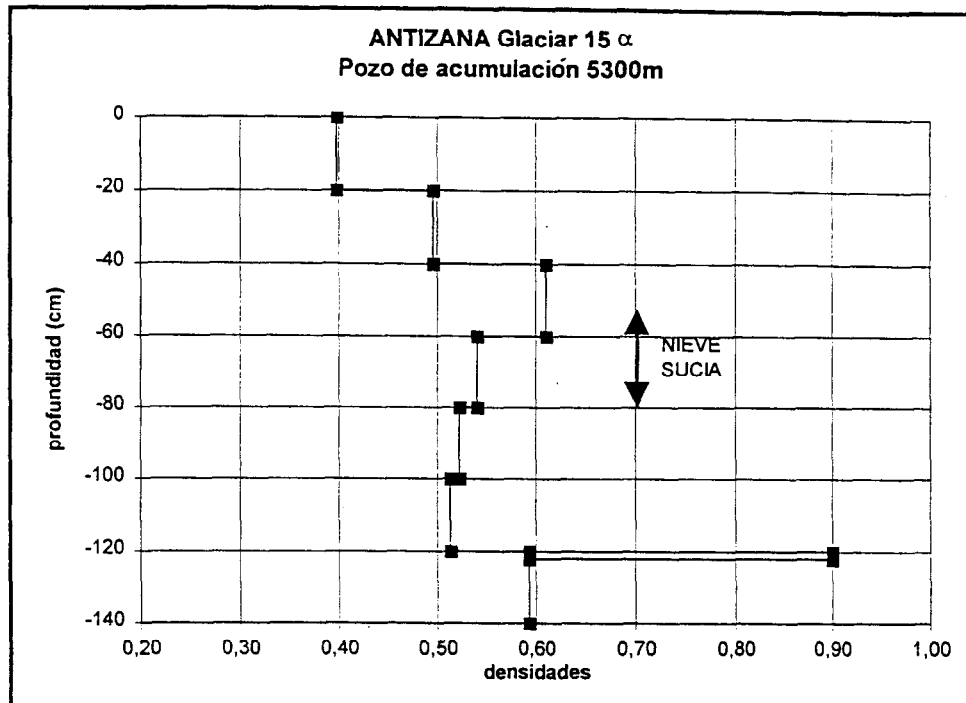


Figura 5.29. Perfil densimétrico de la nieve en el pozo de acumulación ubicado en los 5.300 msnm del Glaciar 15 α del Antizana, año 1.996

El último pozo (5.150 msnm) también parece estar afectado por una sobreacumulación (figura 5.30) ya que está ubicado al pie de un corredor por el cual descienden numerosas avalanchas. Tomando en cuenta valores cercanos al balance, se ha asumido que la acumulación de 1.996 corresponde sólo a la capa de nieve sucia, lo cual arroja una acumulación neta de 186 mm de agua. En el perfil densimétrico de ese lugar llama la atención la ausencia de capas de hielo en el fondo del pozo que deberían haberse formado durante la ablación de 1.995.

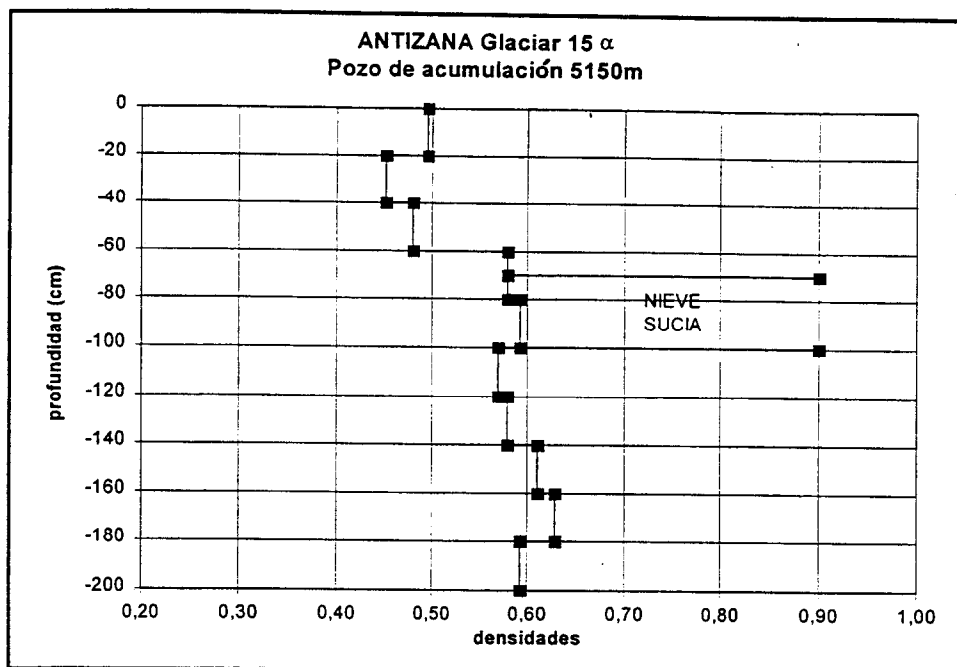


Figura 5.30. Perfil densimétrico de la nieve en el pozo de acumulación ubicado en la cota 5.150 m del Glaciar 15 α del Antizana en 1.996

Es interesante comparar esos datos con los de los pluviómetros del glaciar que están presentados en el capítulo siguiente. Sin embargo, cabe subrayar que los primeros datos son la acumulación neta, a la cual se debe agregar la ablación (por fusión y sublimación) para obtener la lámina total de agua precipitada

5.3.3. Balance neto-específico y línea de equilibrio del glaciar en 1.996

El cálculo del balance neto específico del año 1.996 fue realizado con el procedimiento descrito anteriormente. Los rangos altitudinales y los puntos de medición que se emplearon se resumen en el cuadro 5.8, mientras que los cálculos del balance constan en el cuadro 5.9. La variación del balance en función de la posición altimétrica está representada en la figura 5.31.

Rango Altitudinal msnm	Punto representativo de medición
5.580 – 5.760	Pozo 5.760 msnm
5.350 - 5.580	Pozo 5.400 msnm
5.225 - 5.350	Pozo 5.300 msnm
5.050 – 5.225	Pozo 5.150 msnm
5.032 – 5.052	Baliza B0
5.000 – 5.032	Balizas B0 y B2
4.924 – 5.000	Baliza B2
4.896 – 4.924	Baliza B4A
4.876 – 4.896	Balizas B5A y B5D
4.816 – 4.876	Balizas B6A y B6B

Cuadro 5.8. Puntos representativos de medición y rangos altitudinales considerados en la estimación del balance neto específico del Glaciar 15 α del Antizana en 1.996.

Rango Altitudinal [msnm]	Superficie Parcial S [m ²]	Superficie relativa S _r	Balance B [mm]	Balance Ponderado S _r *B [mm]
5.760 - 5.400	98.297	0,29	+826	235
5.400 - 5.300	40.543	0,12	+413	49
5.300 - 5.150	54.745	0,16	+272	43
5.150 - 5.050	45.617	0,13	-97	-13
5.032 - 5.052	9.250	0,03	-380	-10
5.000 - 5.032	12.991	0,04	-1.049	-40
4.924 - 5.000	39.809	0,12	-1.717	-198
4.896 - 4.924	14.309	0,04	-2.207	-92
4.876 - 4.896	9.834	0,03	-2.726	-78
4.816 - 4.876	19.432	0,06	-4.532	-255
Suma	344.837	1	Balance neto	
			Específico de 1.995 =	-359 mm

Cuadro 5.9. Cálculo del balance neto específico del año 1.996

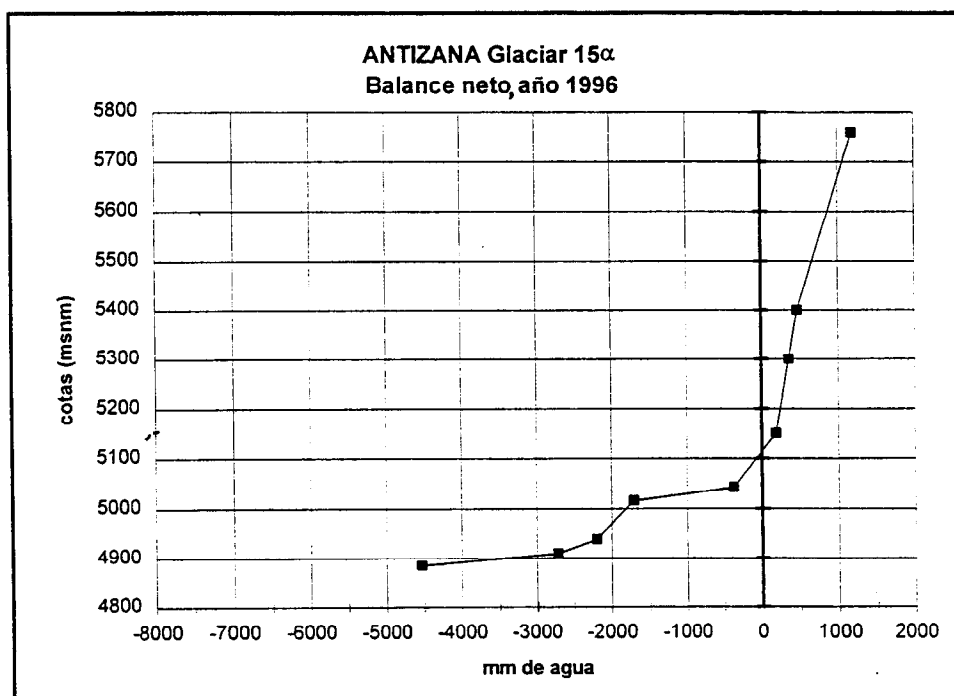


Figura 5.31. Variación del balance en función de la altitud durante el año de 1.996 en el Glaciar 15α.

Al observar la variación del balance en función de la altitud, se puede constatar que la forma general de la curva es semejante a la obtenida en el año anterior. Así se tiene que el gradiente GVB en la zona de ablación es elevado y que luego disminuye a medida que se asciende hacia la cumbre. La línea ELA se ubica en los 5.100 msnm y la relación AAR del año alcanza el 57 %. Este valor es mucho más alto que en el año de 1995, aún cuando al compararlo con las relaciones encontradas en otros glaciares no resulta muy elevado. El balance neto específico en 1.996 fue igual a -359 mm de agua, es decir, que fue mucho menos deficitario que en el año precedente.

5.3.4. Relación balance-precipitaciones

Durante 1.996 ha tenido lugar cierta contraposición de fases entre la precipitaciones y el balance (figura 5.32.). Los meses con mayor ablación se presentan en la época seca y los meses con menor ablación cuando las precipitaciones son elevadas. Estos resultados sugieren que las precipitaciones frecuentes pudieron mantener un *albedo* elevado, gracias a lo cual la fusión fue mínima. Ese no fue el caso que se produjo en los meses más lluviosos de 1995 (figura 5.18)..

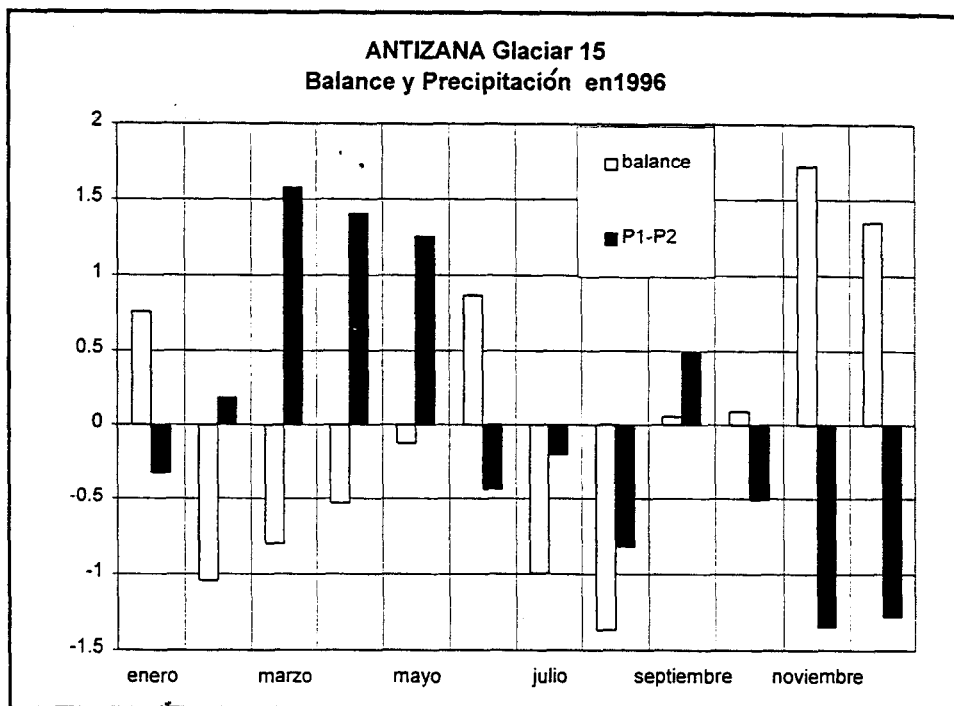


Figura 5.32. Precipitaciones y balance en 1.996 (valores centrados y normados).

5.4. Comparación entre resultados de los años 1.995 y 1.996

A pesar de que se dispone sólo de dos años hidrológicos de mediciones, es conveniente compararlos entre sí ya que cada uno revela un comportamiento muy diferente.

5.4.1. La zona de ablación.

Al equiparar las variaciones mensuales que tuvieron el balance y la ablación (figuras 5.33. y 5.34. respectivamente) en la zona baja del glaciar, se constata la gran diferencia que existe en los regímenes de cada año. En 1.995 el valor elevado de la la ablación revela cierta coincidencia con la posición del sol en las épocas de los equinoccios, mientras que al siguiente año se desplaza a las cercanías de los solsticios.

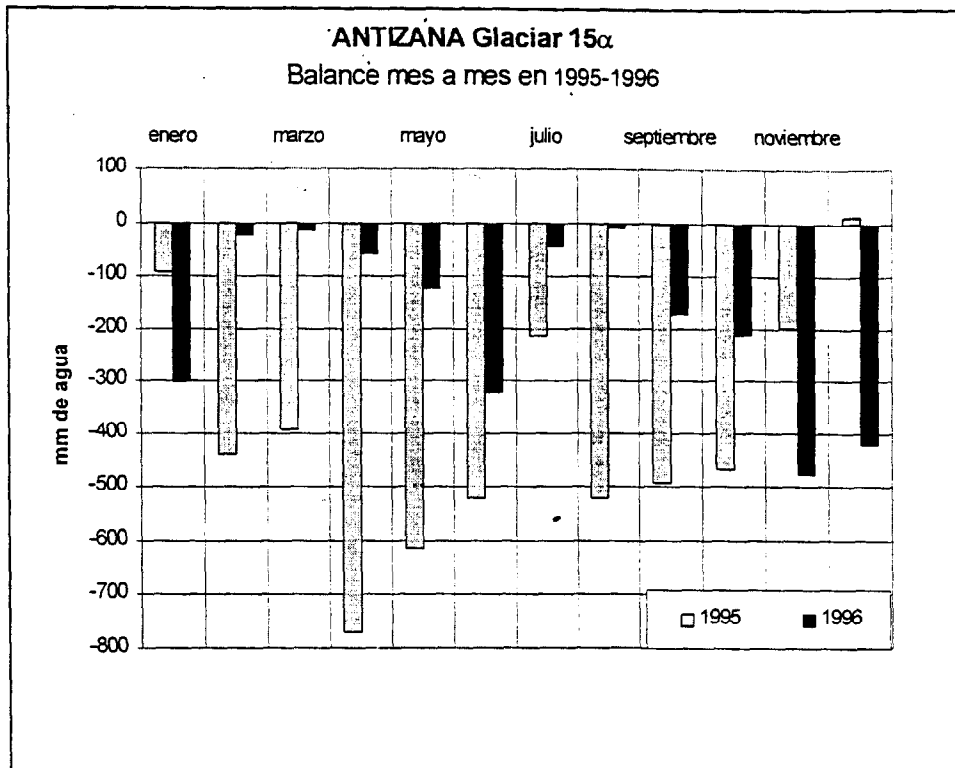


Figura 5.33. Comparación del balance en la zona de ablación del Glaciar 15 α del Antizana en los años 1.995 y 1.996

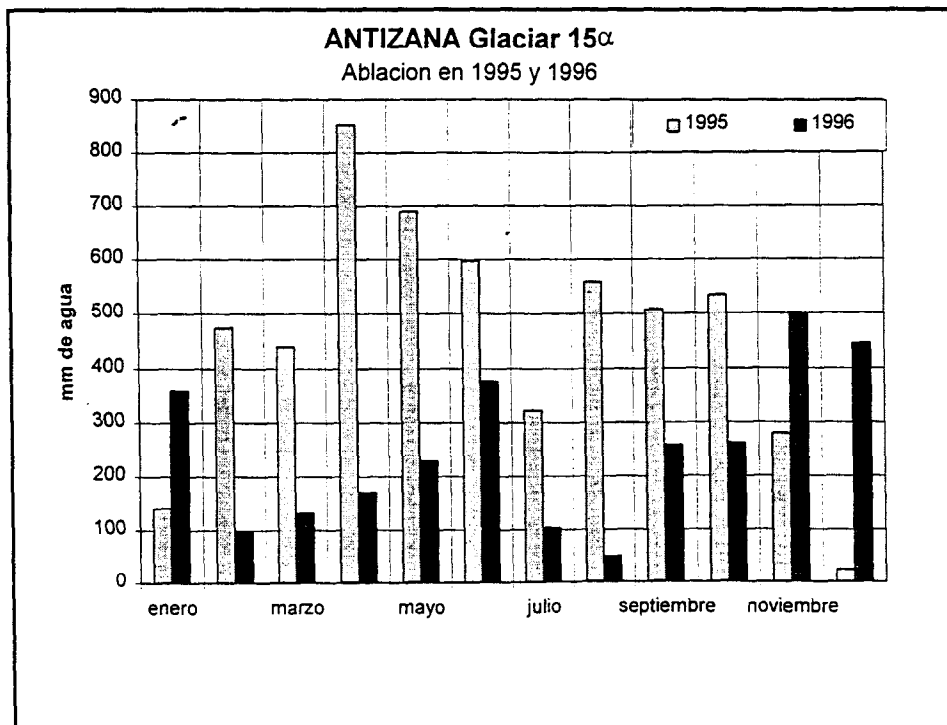


Figura 5.34. Comparación de la ablación en la zona de ablación del Glaciar 15 α del Antizana en los años 1.995 y 1.996

Existe también una gran diferencia entre las magnitudes del balance de cada año. Como lo demuestra la figura 5.35., en 1.995 el balance fue mucho más negativo que en 1.996 y su diferenciación aumentó a lo largo de todo el año ya que las curvas divergen entre sí desde sus inicios.

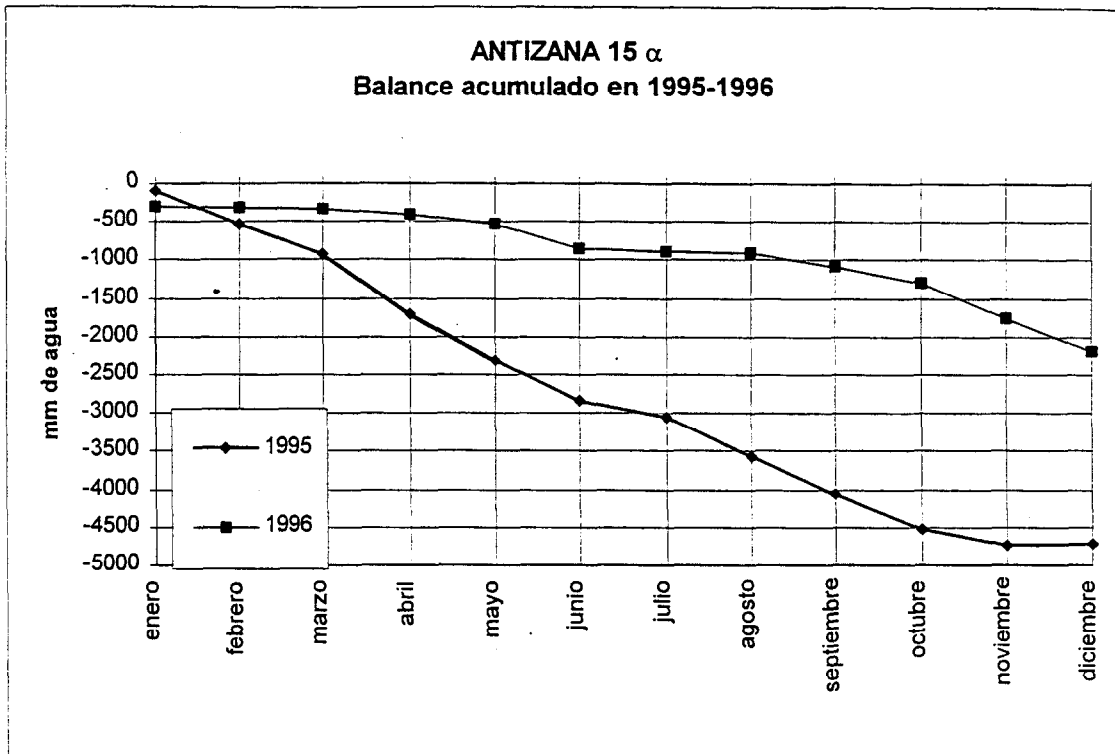


Figura 5.35. Comparación de los balances promedios acumulados de la zona de ablación del Glaciar 15 α del Antizana en 1.995 y en 1.996.

Los valores centrados y normados que tuvo el balance (fig. 5.36.) revelan la diferencia que existe entre la distribución del balance de cada año.

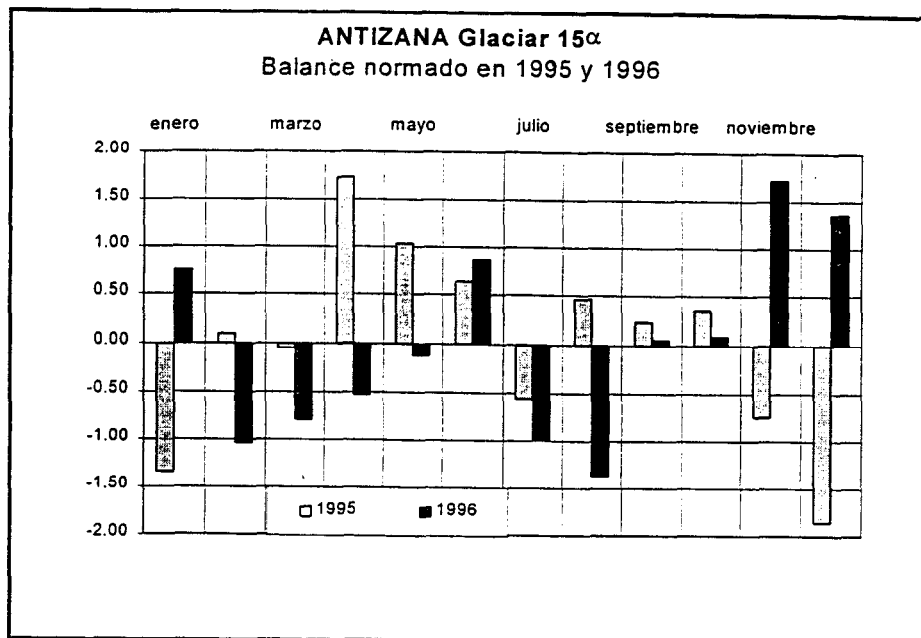


Figura 5.36. Valores centrados y normados del balance, años 1.995 y 1.996

Esas disimilitudes entre los dos años se pueden observar también en la capa de nieve que cubrió las diferentes zonas del glaciar, como lo ilustran las figuras 5.37. a 5.39..

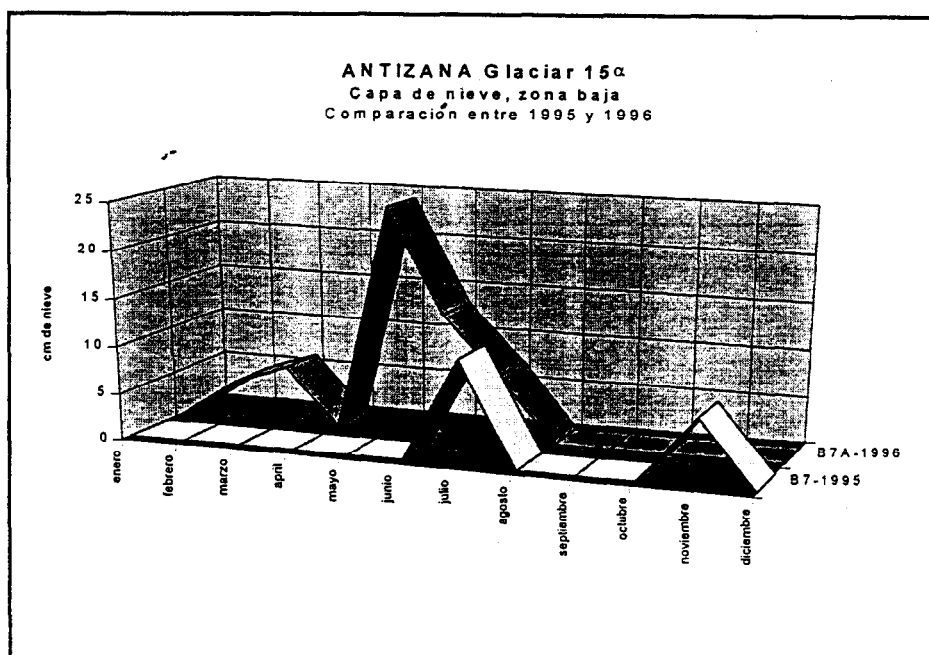


Figura 5.37. Comparación entre las capas de nieve que cubrieron la parte baja de la zona de ablación del Glaciar 15 α en 1.995 y en 1.996

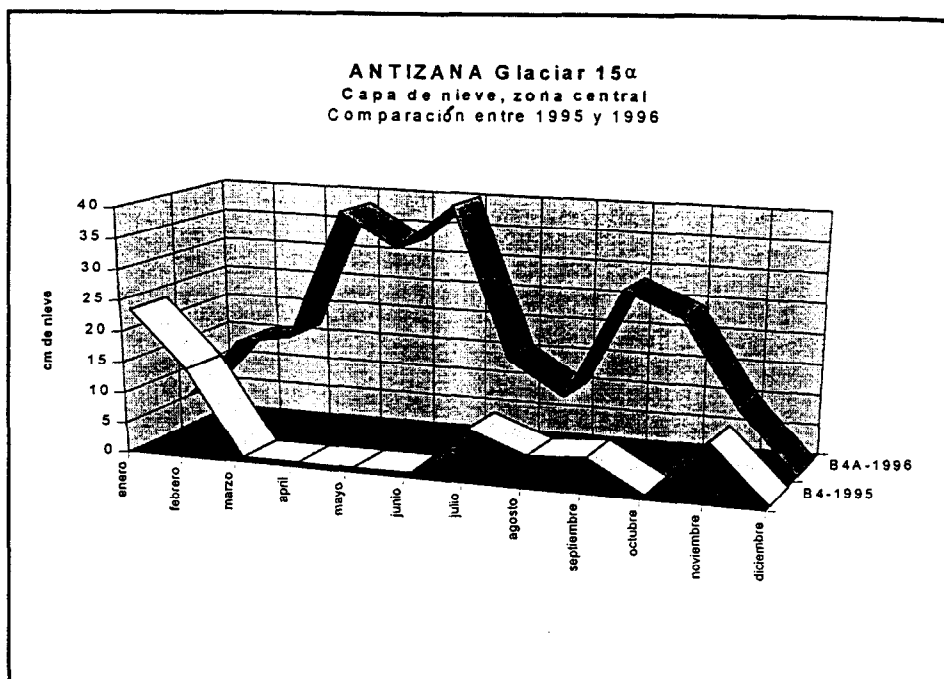


Figura 5.38. Comparación entre las capas de nieve que cubrieron la parte central de la zona de ablación del Glaciar 15 α en 1.995 y 1.996.

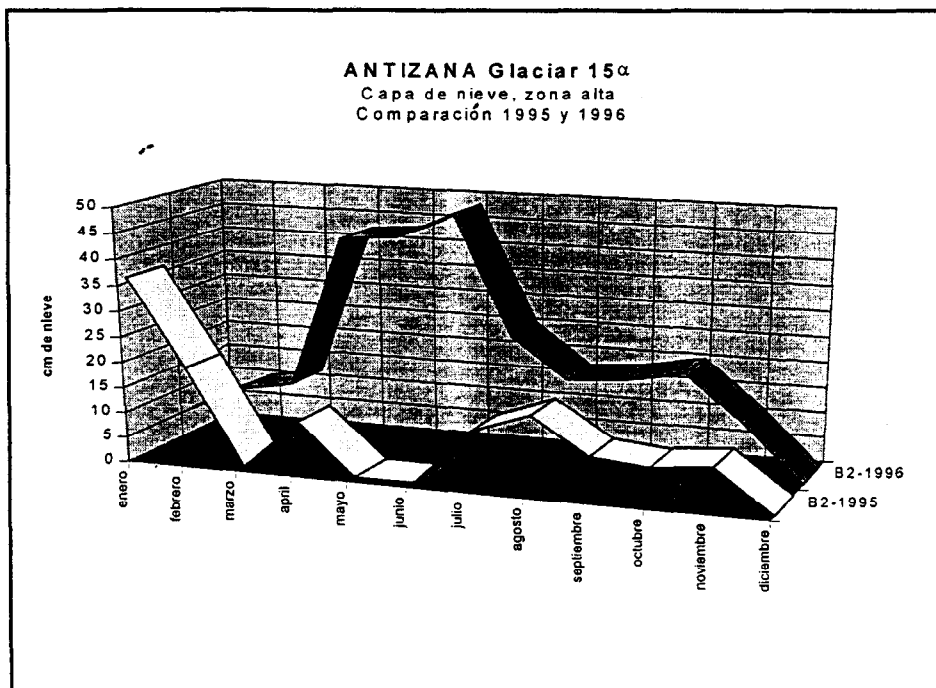


Figura 5.39. Comparación entre las capas de nieve que cubrieron la parte alta de la zona de ablación del Glaciar 15 α en 1.995 y 1.996.

En estos gráficos se pueden apreciar las grandes diferencias cualitativas y cuantitativas que posee la capa de nieve a lo largo del glaciar. Se observa también la contraposición que tienen las variaciones de la nieve en el transcurso de los dos años, así como el contraste que hay entre la pequeña cantidad de nieve de 1.995 y la gran cantidad de 1.996.

5.4.2 Balance neto específico de todo el glaciar

Los cambios que tiene el balance en función de la posición altimétrica, durante los dos años, concuerda bastante bien con los postulados del modelo lineal (figura 5.40.) ya que en general las formas de las dos curvas son más o menos similares. Las mayores diferencias en las curvas del balance se encuentran en la zona de ablación, lo cual es usual en otros glaciares.

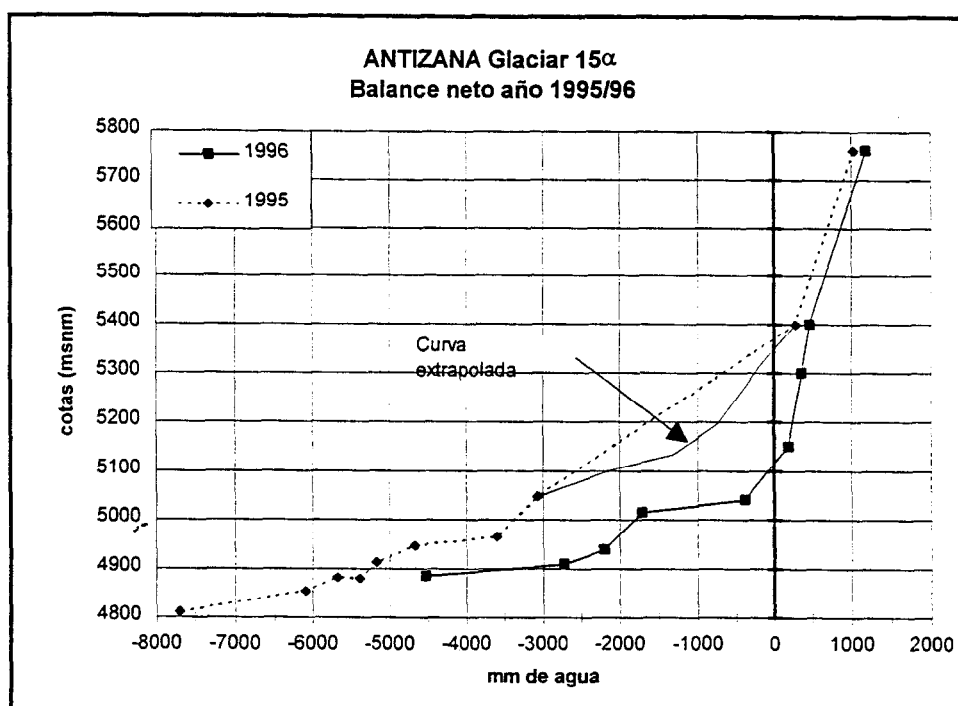


Figura 5.40. Variación del balance anual del Glaciar 15α en función de la altitud en 1.995 y 1.996

Para resumir los resultados obtenidos, en el cuadro 5.10 se presentan las principales características registradas en el glaciar durante los dos años de mediciones. (La información de las precipitaciones y los movimientos del frente son presentados *in extenso* en los capítulos siguientes 6 y 7).

año (1)	B _n (2)	ΣB _n (3)	A (4)	ELA (5)	AAR (6)	Prec. (7)	Térm. (8)	Σ Térm. (9)
1995	-1880	-1880	2590	5370	35	710	28.2	28.2
1996	-359	-2239	1189	5100	57	830	27.4	55.6
1997								
1998								
1999								
2000								

- (1) Año hidrológico (enero-diciembre)
(2) Balance neto específico (en mm de agua)
(3) Balance neto específico (2) acumulado
(4) Ablación específica $[P - B_n]$ (en mm de agua)
(5) Equilibrium Line Altitude (en metros snm)
(6) Accumulation Area Ratio (en %)
(7) Precipitaciones $P = [(P1 + P2)/2]$ (en mm de agua)
(8) Fluctuaciones del término, medición directa (en metros) : 2/95-8/96 y 8/96-9/97
(9) Fluctuaciones del término (7) acumuladas

Cuadro 5.10. Resumen de las características del Glaciar 15α del Antizana en 1.995 y 1.996

5.4.3. Isolíneas del balance.

En las figuras 5.41. y 5.42. se ha representado el balance mediante isolíneas de balance. Como es lógico esperar, la distribución espacial del balance es muy diferente en uno y otro año.

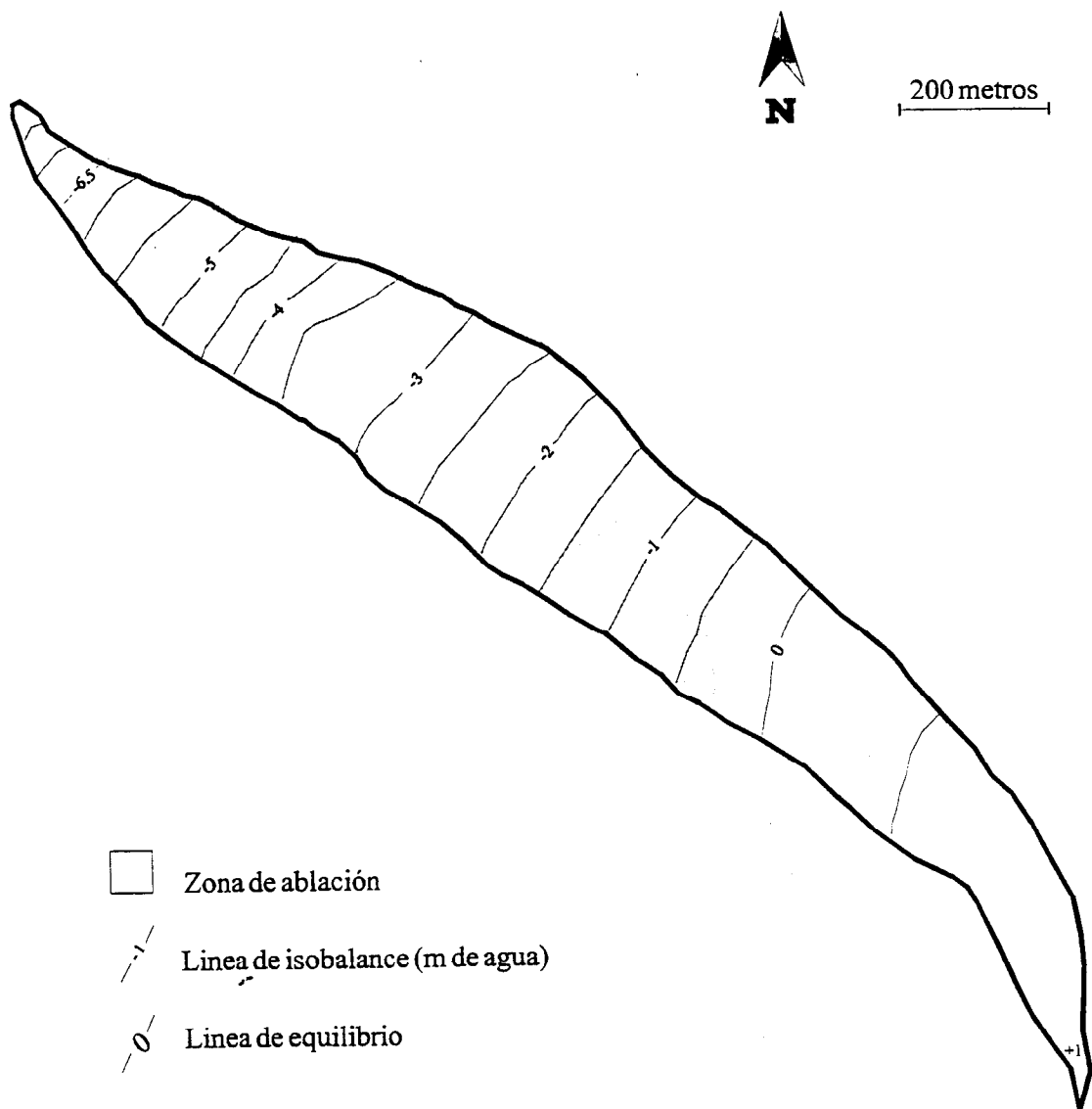


Figura 5.41. Isolíneas del balance sobre el Glaciar 15 α del Antizana en 1.995

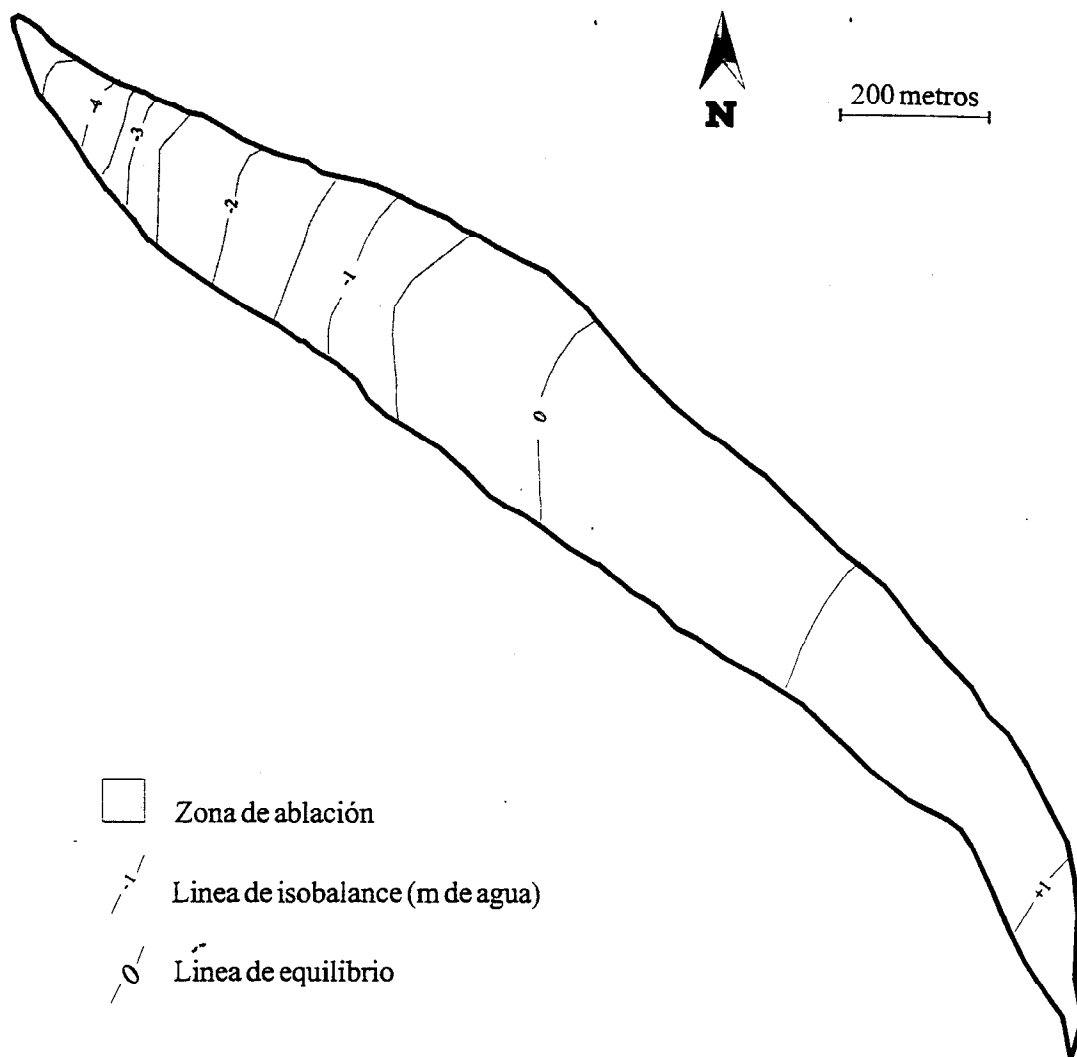


Figura 5.42. Isolíneas del balance sobre el Glaciar 15 α del Antizana en 1.996.

5.4.4. Línea de equilibrio (ELA) y relación AAR

En las figuras 5.43. y 5.44. se presentan las relaciones encontradas entre la línea ELA (*Equilibrium Line Altitude*), por una parte, y la relación AAR (*Accumulation Area Ratio*) por otra, con el balance neto específico. Esas relaciones tienen un carácter lineal en todos los glaciares monitoreados del mundo (ver *World Glacier Monitoring Bulletin*), lo cual todavía no se ha sido comprobado en el Glaciar 15 α del Antizana. Si esas relaciones se cumplen también allí, la línea ELA₀ y la relación AAR₀ (correspondientes al caso cuando el balance está en equilibrio) deberán aproximarse a los 5.050 msnm y los 65 ó 70%. Cabe señalar que en Bolivia, después de 6 años de mediciones en el Zongo y Chacaltaya, las líneas ELA₀ calculadas mediante regresión se ubicaron en los 5.140 y 5.220 msnm respectivamente, mientras que la relación AAR₀ alcanzó los 80% y 70% en cada caso (Berton *et al.*, 1997).

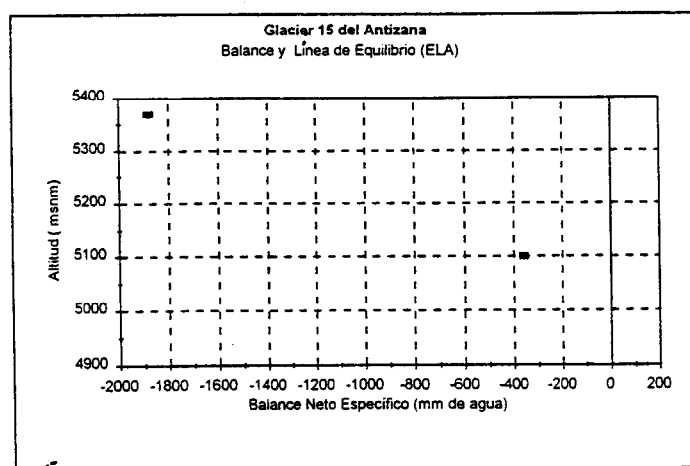


Figura 5.43. Relación entre la línea ELA y el balance neto específico en los años 1.995 y 1.996.

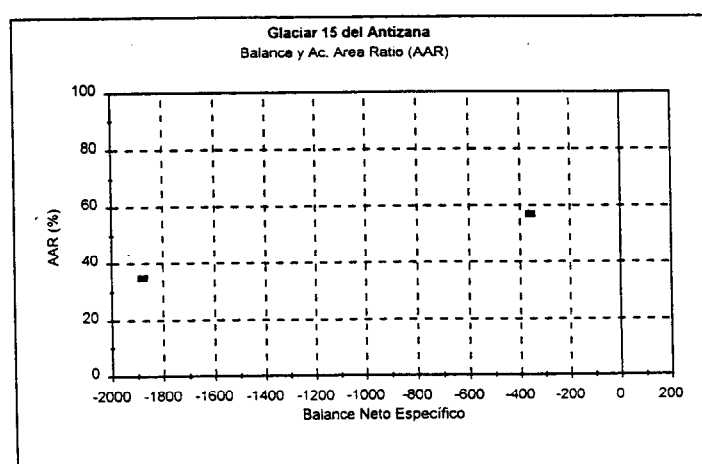


Figura 5.44. Relación entre el índice AAR y el balance neto específico en los años 1.995 y 1.996.

6. PRECIPITACIONES : NIEVE Y LLUVIA.

Antes de presentar las precipitaciones recogidas en las cercanías del Glaciar 15, es conveniente referirse a los hietogramas de precipitaciones de algunas estaciones analizadas en el Plan Maestro de la Zona Quito (documentos del Anexo 1). Allí se puede observar la diferencia significativa que tiene el régimen pluviométrico de las subcuencas altas de la Amazonía Ecuatoriana (Sistema Papallacta), respecto al régimen de las cuencas que pertenecen más a la Cordillera Central (Volcán Cotopaxi y Sistema Pita -Tambo), cuyo patrón bimodal es característico de la zona ecuatorial por tener precipitaciones máximas durante los dos equinoccios.

La zona del Antizana, que forma parte del Sistema Papallacta - La Mica, se distingue por tener un régimen unimodal con su máximo de precipitaciones en los meses de junio y julio. Esto constituye un argumento importante para justificar la división del año hidrológico (igual al año civil) que ha sido adoptada en las investigaciones glaciológicas del Antizana.

6.1. Serie comprendida entre agosto de 1.994 y julio de 1.997

La serie completa (36 meses) de precipitaciones atmosféricas del sector del Antizana, medidas con los cuatro pluviómetros descritos en el capítulo 4, demuestra que ellas tuvieron un marcado crecimiento durante el año de 1.996 (figura 6.1).

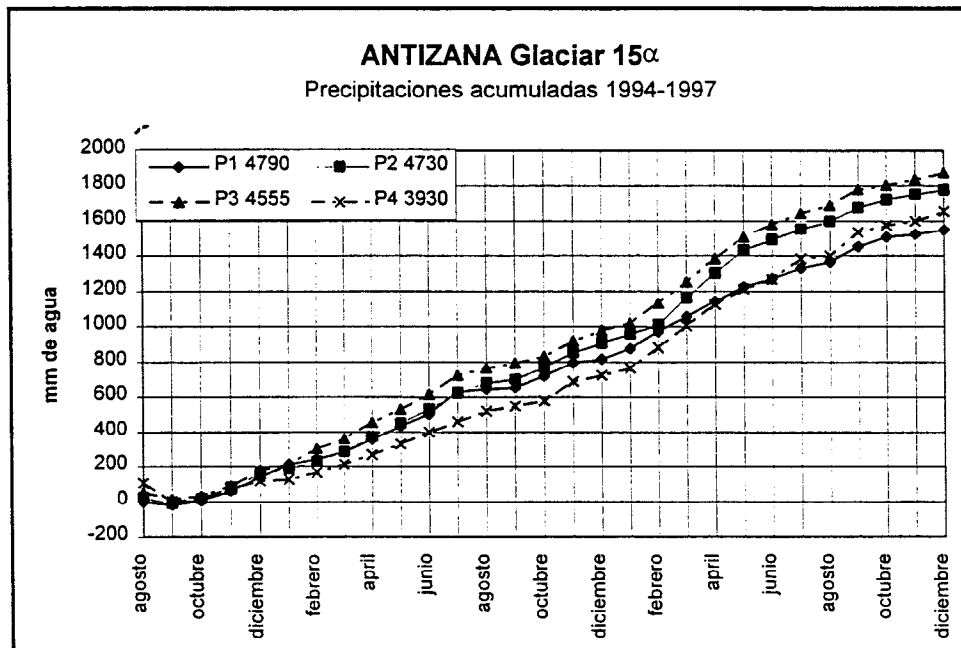


Figura 6.1. Precipitaciones acumuladas en el Antizana. Serie 1.994 – 1.997.

Al analizar los valores mensuales de las precipitaciones (figura 6.2) se puede concluir que existe una secuencia de estaciones húmedas y secas. Las mayores precipitaciones se producen entre febrero y julio de cada año, aún cuando existen meses en los cuales el régimen cambia año tras año.

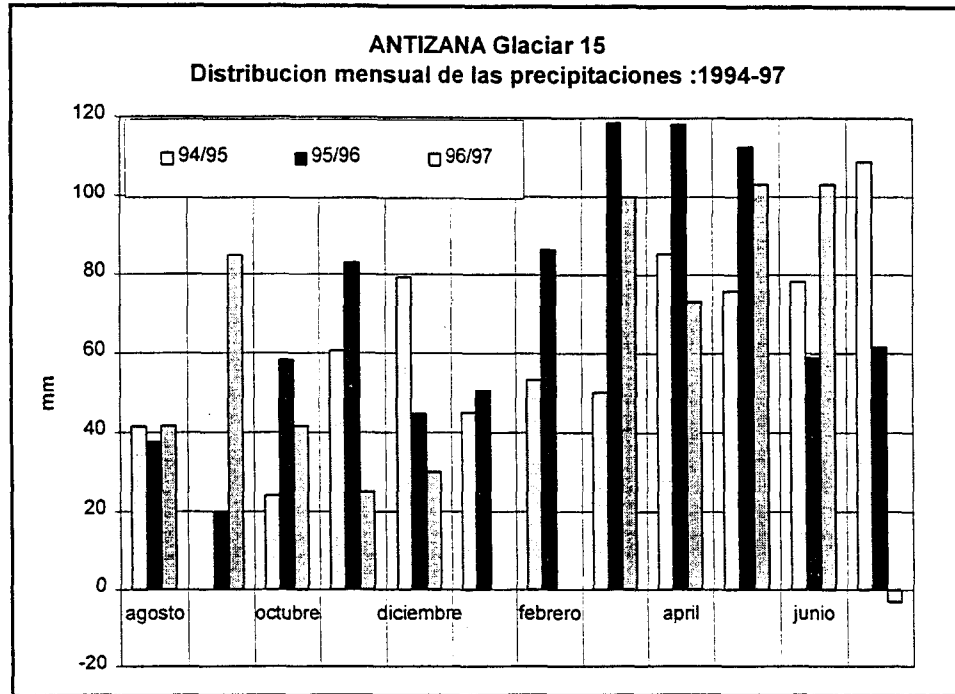


Figura 6.2. Lámina de precipitaciones mensuales en el Antizana. Serie 1.994 – 1.997.

6.2. Precipitaciones del año 1.995

Las revisiones de los datos de campo, realizadas con las curvas de doble masa, indican que las mediciones fueron excelentes por cuanto tienen una buena sincronización en sus cambios, ya sea entre los pluviógrafos cercanos al glaciar, así como entre esos equipos y el totalizador situado en el campamento. Durante todo el año no se han producido problemas de fugas, exceptuando el primer mes. Ello se puede observar en la figura 6.3., donde están representadas las precipitaciones acumuladas. Se distinguen también dos épocas de menores precipitaciones: en los meses de agosto y septiembre y en el mes de diciembre.

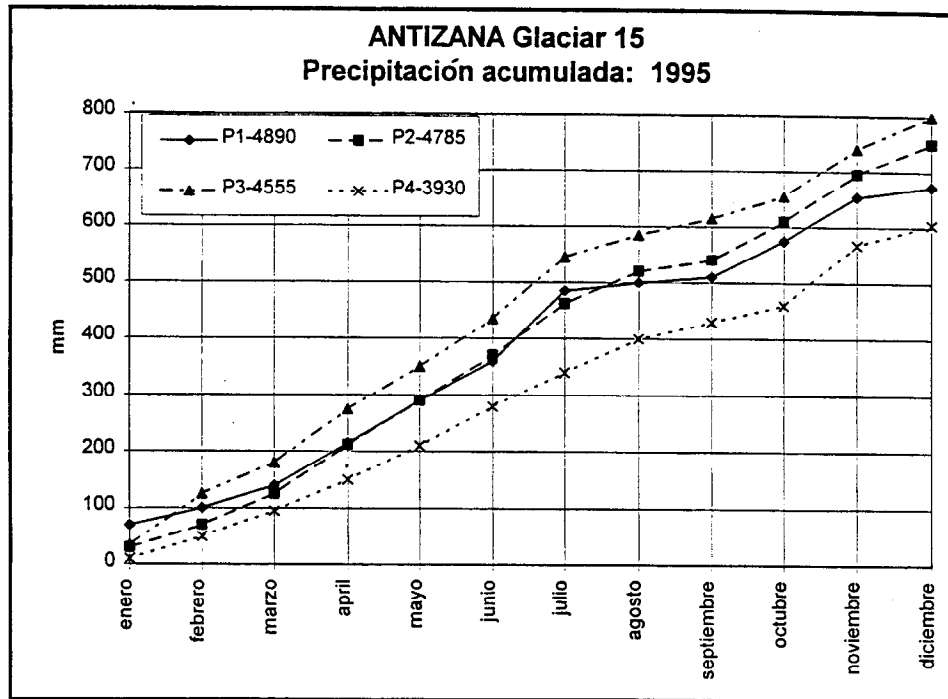


Figura 6.3. Precipitaciones acumuladas en el Antizana durante 1.995.

La variación de la lámina de precipitación en función de la altura presenta un máximo en el pluviógrafo P3 (4.550 msnm), lo cual implica que allí existe una inversión del gradiente (tales casos son usuales en otras regiones). Llama la atención el bajo valor que se ha observado en el pluviógrafo P4, lo cual podría explicarse por su ubicación más alejada de la influencia amazónica. Hay que tomar en cuenta de que el pluviógrafo P1 tendría una mayor precipitación acumulada si se tomase en cuenta que hubo fugas en los primeros meses.

El gradiente que se desprende de los otros pluviómetros podría ser consecuencia de los cambios que sufren las precipitaciones con la altura del lugar, ya que mientras mayores son las cotas, mayor es la frecuencia con la cual las precipitaciones se presentan en forma de nieve y, no de agua. Ello afecta a la precisión de las mediciones ya que la nieve se deposita suavemente sobre el aceite y no cruza fácilmente la capa de aceite, con lo cual puede evaporarse. A todo esto se agrega el hecho de que sobre los 4.700 msnm, las bajas temperaturas permiten que el agua y el aceite se congelen durante varios días consecutivos, lo cual también obstaculiza que la nieve se derrita y cruce la capa de aceite. Estos problemas se producen en Bolivia sobre los 5.100 msnm.

La distribución de las precipitaciones a lo largo del año se puede analizar utilizando el promedio de todos los cuatro pluviómetros que funcionan en la zona la Mica, así como el promedio de los tres pluviómetros ubicados junto al Glaciar 15 (figuras 6.4 y 6.5 respectivamente). Allí se observa con claridad que hay temporadas con menores precipitaciones: una entre agosto y septiembre, y otra durante los meses de diciembre y enero. La temporada más húmeda se encuentra entre febrero y julio, aún cuando octubre y noviembre también tienen mayores precipitaciones.

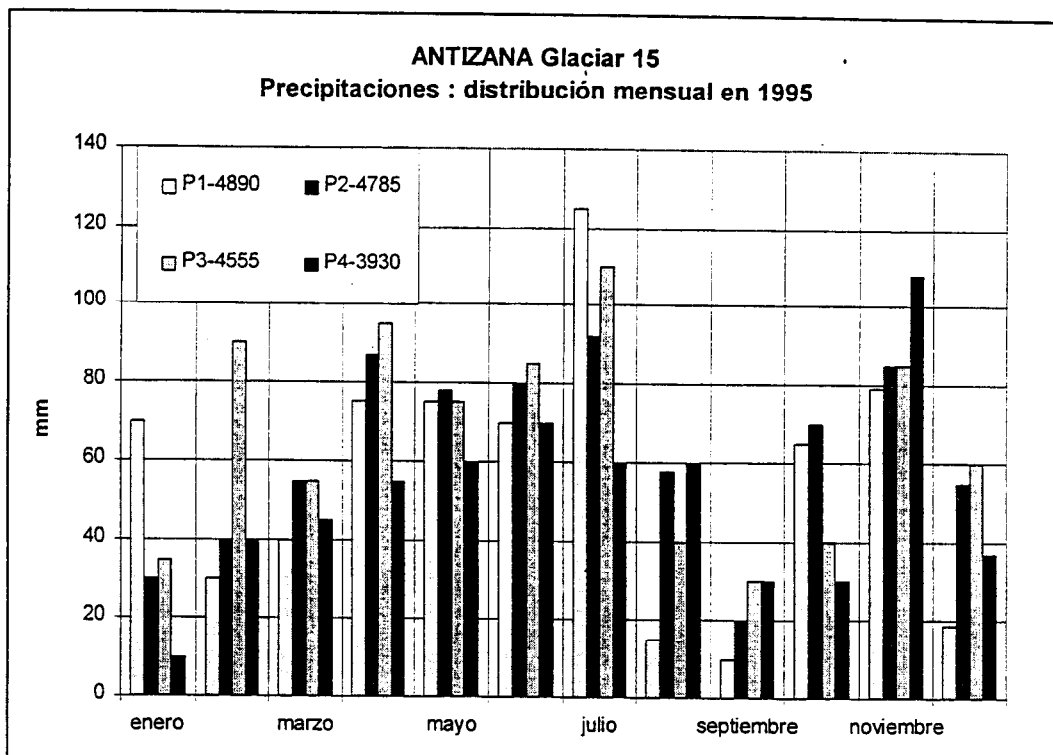


Figura 6.4. Precipitaciones medias mensuales en la zona del Antizana durante 1.995.

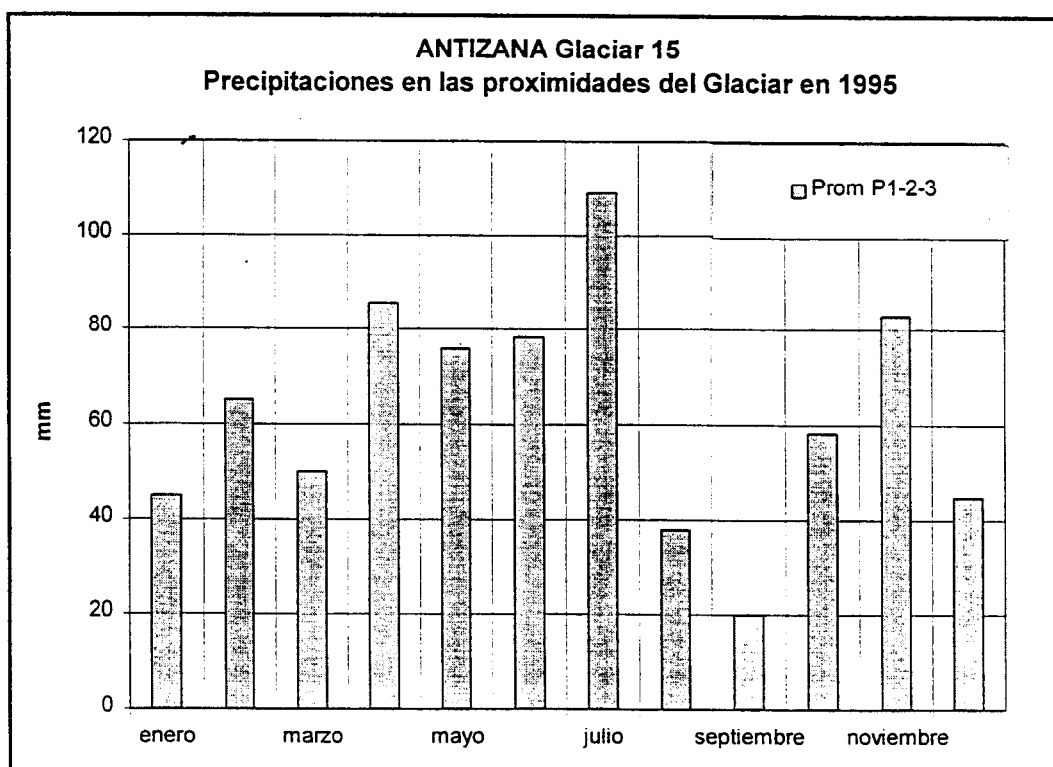


Figura 6.5. Precipitaciones mensuales en la zona del Glaciar 15 del Antizana durante 1.995.

En la zona del Glaciar 15, la lámina de precipitaciones de los meses más secos fluctuó entre los 20 y 40 mm, mientras que en los meses húmedos se acercó a los 80 mm; sólo en el mes de julio las precipitaciones superaron los 100 mm. Allí el total anual de precipitaciones llegó a los 710 mm y no hubo una pronunciada temporada seca.

6.3. Precipitaciones del año 1.996

Durante el año de 1.996 también se registró buena sincronización entre las precipitaciones de los cuatro pluviómetros (figura 6.6). Cabe señalar que asimismo en esta ocasión el pluviógrafo más alto (P1) registró la menor cantidad de precipitaciones.

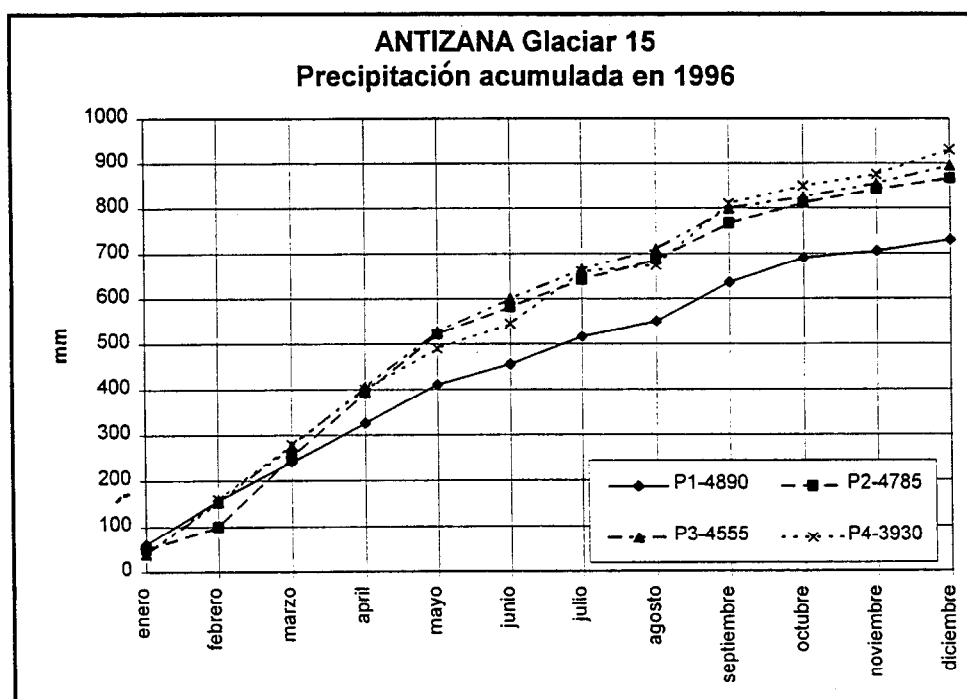


Figura 6.6. Lámina acumulada de las precipitaciones en el Antizana, año 1.996

El promedio de las precipitaciones mensuales medidas sobre toda el área (desde el campamento hasta el glaciar) consta en la figura 6.7, mientras que el promedio correspondiente a los alrededores del glaciar se indica en la figura 6.8. Allí se puede advertir una temporada con destacadas precipitaciones entre febrero y mayo, a la cual le sigue el mes de septiembre que también fue húmedo. La temporada con menores precipitaciones, de octubre a diciembre, está bien marcada, a lo cual se agregan los meses de enero y agosto también que también fueron secos. Ello permite suponer que las mayores precipitaciones podrían estar vinculadas con las fechas de los equinoccios, es decir, con la posición de la zona de convergencia intertropical.

La lámina mensual de precipitaciones en los meses secos está comprendida entre los 20 y 40 mm, mientras que en los meses húmedos se ubica entre los 90 y 120 mm. El total anual de precipitaciones de 830 mm fue un poco más alto que en el año precedente, pero sigue siendo modesto.

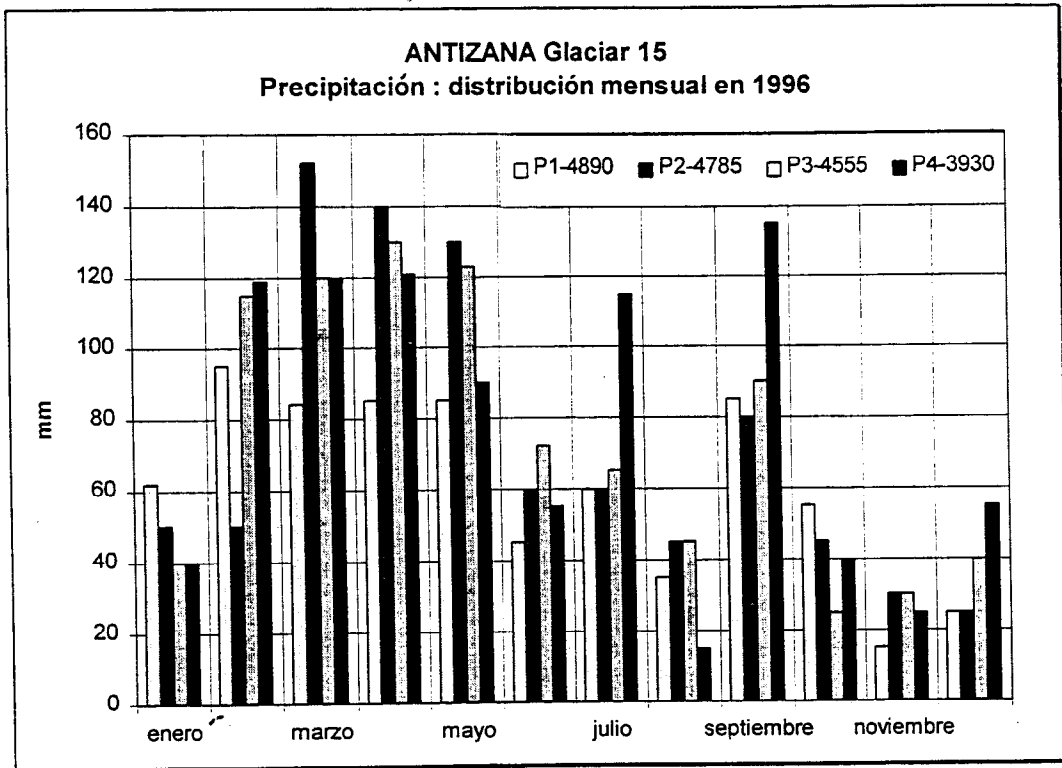


Figura 6.7. Precipitaciones mensuales en el sector del Antizana durante 1.996

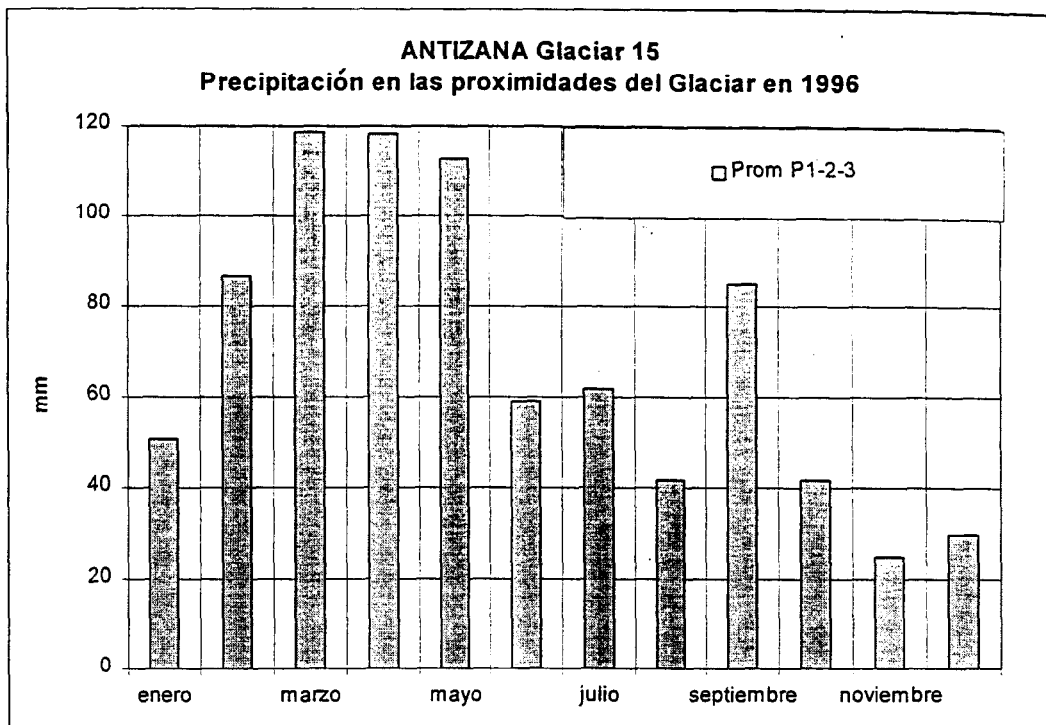


Figura 6.8. Láminas mensuales de las precipitaciones registradas en el Glaciar 15 α durante el año de 1.996

6.4. Comparación de las precipitaciones medidas cerca del glaciar del Antizana en los años 1.994 a 1.997.

Durante estos tres años, se ha observado una gran variabilidad en las precipitaciones, tanto de sus cantidades como en su repartición estacional. Únicamente los meses de marzo a julio fueron muy húmedos en cualesquiera de los tres años. El año 1.995 – 1.996 fue el más húmedo.

7. CAMBIOS GEOMETRICOS DEL GLACIAR 15a ENTRE 1.994 Y 1.997.

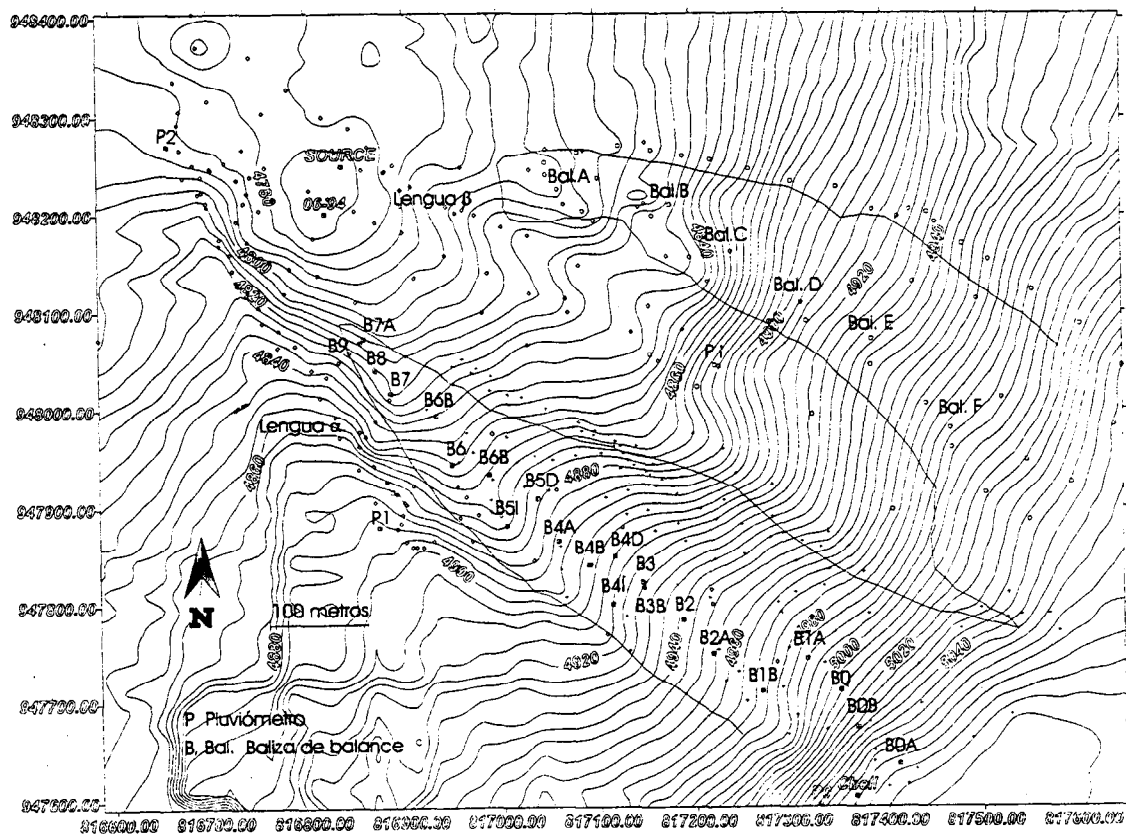
7.1. Levantamientos topográficos

El primer levantamiento topográfico del Glaciar 15 α , realizado en octubre de 1.995 por un equipo de topógrafos contratados, suministró información sobre las curvas de nivel, la ubicación de las balizas y los pluviómetros, pero los datos sobre el perímetro de las lenguas α y β son muy aproximados. Además, no fueron medidas las zonas superiores del glaciar ya que el levantamiento llegó sólo hasta las cotas 4.800 y 4.870 msnm, lo cual impide calcular las superficies altas del glaciar.

En enero de 1997, se elaboró un nuevo levantamiento topográfico, que estableció de forma satisfactoria los límites de toda la parte baja de la lengua α . En la zona de ablación fueron ubicados unos 300 puntos que garantizan la precisión necesaria de la restitución, además, se estableció la nueva ubicación de las balizas. Finalmente en mayo de 1997 se realizó otro levantamiento de la parte baja de la lengua β y sus balizas (figura 7.1.). En estos dos últimos trabajos se empleó un teodolito equipado con distanciómetro de marca *Zeiss Rec Elta*.

En los tres levantamientos las curvas de nivel fueron trazadas con ayuda del programa *Winsurfer*[®] (interpolación *kriging*) y los dibujos finales se obtuvieron con el programa *Autocad*[®].

Debido a la insuficiente calidad del primer levantamiento, no se ha podido establecer los cambios que han tenido los límites del Glaciar 15 α en el transcurso del tiempo; únicamente se puede estimar el movimiento de las balizas.



7.1. Levantamiento topográfico de las dos lenguas (α y β) del Glaciar 15 del Antizana.

7.2. Desplazamientos de las balizas.

Los datos sobre el desplazamiento de cada baliza permiten estimar la velocidad con la cual se mueve la superficie del glaciar (cuadro 7.1, figura 7.2.).

Código de la baliza y ubicación en enero de 1.997 (msnm)	Velocidad horizontal (m/año)	Descenso de nivel (m/año)
B0 5028	34,0	15,0
B1 4968	22,5	7,5
B3 4937	22,5	6,7
B4A 4903	22,5	7,5
B7A 4810	15,0	4,5

Cuadro 7.1. Desplazamiento de balizas entre octubre de 1.994 y enero de 1.997.

Estos datos indican que en el eje central del glaciar la velocidad de avance disminuye desde los 34 m/año en la cota 5.028 msnm hasta los 15 m/año en el extremo inferior de la lengua. La velocidad disminuye normalmente en los tramos de la lengua con menor pendiente (B1-B4A) y en el frente mismo del glaciar (B7A).

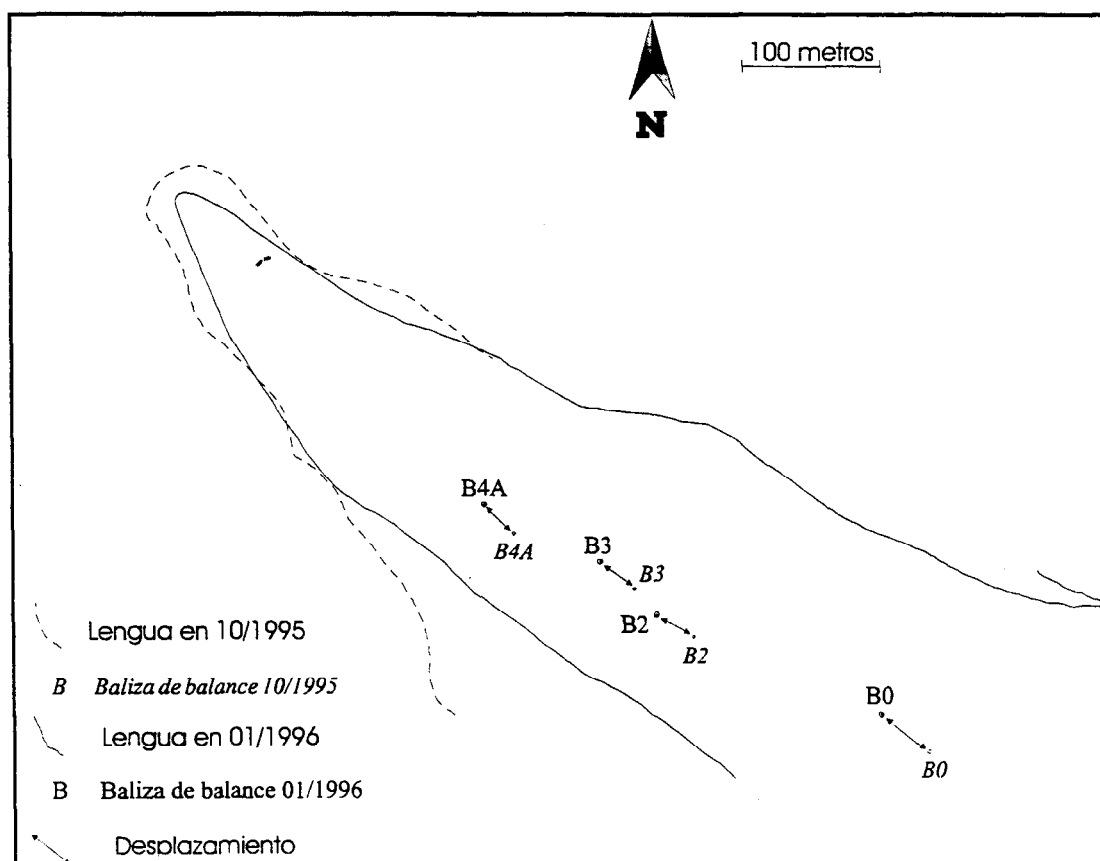


Figura 7.2. Desplazamiento de balizas entre octubre de 1.994 y enero de 1.997

7.3. Medición directa de la ubicación del frente de la lengua α del glaciar

En junio de 1.994, cuando se visitó por vez primera el glaciar, se marcó una señal en una piedra que se encontraba en el río, junto al borde inferior del glaciar. Para evitar la pérdida de esa señal, por los desplazamientos que podría sufrir la piedra, se colocó otra marca a la izquierda, en una roca fija de más de 1m³ de volumen. Estas señales fueron luego ubicadas en el levantamiento topográfico de enero de 1997, y desde aquel entonces en cada visita se mide directamente la distancia entre el punto fijo y el término del glaciar; la precisión las mediciones es de un metro.

El cuadro 7.2 resume los datos del significativo retroceso que ha tenido el frente del Glaciar 15 α . Después del importante ritmo alcanzado en los ocho primeros meses, el retroceso ha disminuido hasta ubicarse en unos 30 m/año. Al evaluar la magnitud de este repliegue, se debe considerar también la rápida velocidad de avance (15 m/año) que tiene el frente del glaciar. No hay razones para suponer que ese retroceso sea muy diferente en las lenguas de otros glaciares occidentales del Antizana ya que tienen orientaciones, rangos altitudinales y pendientes muy semejantes.

Fecha de la medición y meses acumulados respecto a junio de 1.994	Distancia entre el frente y la señal inicial (m)	Distancia respecto al sitio de la medición precedente (m)	Velocidad media entre dos fechas de medición (m/año)
Febrero de 1.995 (8 meses)	- 61	- 61	- 91.5
Agosto de 1.996 (25 meses)	- 101	- 40	- 28.2
Septiembre de 1.997 (39 meses)	- 133	-32	- 27.4

Figura 7.2. Mediciones del retroceso del frente del Glaciar 15 α entre junio de 1.994 y septiembre de 1.997.

Cabe señalar que el repliegue del Glaciar 15 α , registrado durante el período de mediciones, es equiparable al retroceso observado en glaciares semejantes (por su tamaño, pendiente y rango altitudinal) de los Andes centrales, aún cuando se ubica entre los más grandes. Así por ejemplo se puede indicar que el Glaciar de Zongo, de 3.000 m de longitud, pierde desde 1991 un promedio de 9 a 10 m/año. El Glaciar Uruashraju, de la Cordillera Blanca del Perú y que tiene una misma longitud que el Glaciar 15 (2.300 m), registra desde 1.990 un retroceso de 30 m/año. Basándose en estos datos, y a pesar de que provienen de un número limitado de glaciares, se puede concluir que los glaciares de las regiones más húmedas son los que retroceden con mayor velocidad.

8. LIMNIMETRÍA

8.1. Estación limnimétrica Antizana.

8.1.1. Ubicación

Con el propósito de obtener datos sobre caudales de agua para el cálculo del balance, en enero de 1.996 se construyó una estación limnimétrica sobre el río que nace al pié del Glaciar 15 del Antizana (Fournier, 1.996). La cuenca aportante hasta el sitio de la estación incluye al glaciar con sus dos lenguas α y β , así como la zona morrénica secular (Pequeña Edad de Hielo), cubierta de páramo que se ubica río abajo entre los 4800 y 4400 msnm. Debido al desconocimiento que se tiene del área total de la zona de acumulación del glaciar 15 β y de la zona de páramo, por ahora no se ha podido calcular un balance hidrológico de la cuenca. Se ha previsto que ese trabajo será realizado a comienzos del año hidrológico 1.998.

8.1.2. Equipo de medición

La estación limnimétrica está equipada con un limnígrafo automático de tipo *Chloe* (marca Elsyde), cuyo sensor de presión (SPI) mide la altura de la lámina de agua que fluye por el canal. Las mediciones son recopiladas en el módulo de registro de datos de la estación, cuyo medio magnético para almacenamiento de información puede transferirla directamente a una computadora con ayuda del programa HYDROM[®], elaborado por el ORSTOM. El equipo quedó programado tal manera que las mediciones se realicen cada 15 minutos y sus resultados sean almacenados en el caso de que el valor obtenido sea igual o superior en 1 cm respecto a la medición anterior; lo cual habla sobre la precisión de las mediciones.

8.1.3. Adecuaciones hechas en la estación

Debido a la alta cantidad de sedimentos sólidos que transporta el agua, y por el hecho de que el pozo de medición está vinculado directamente con el lecho del canal, la estación limnimétrica no ha funcionado en forma continua. Durante los primeros meses, ella no dispuso de una vigilancia permanente, lo cual impidió que se obtengan mediciones correctas de caudal. La llegada de Hubert Sémiot y su asignación a tiempo completo en este programa, permitió introducir algunas adecuaciones en la estación de tal manera que las mediciones están disponibles desde fines de noviembre de 1.996.

Las modificaciones realizadas en la estación buscaron una solución para los siguientes problemas:

- La gran acumulación de sedimentos que se producía en el pozo, ya que si bien el sensor mide en presencia de sedimentos, la magnitud de sólidos que se acumulaban era tan alta que impedía la obtención de mediciones confiables.
- La presencia de una capa de sedimentos de varios centímetros de espesor en el lecho mismo del canal que variaba desde cero centímetros en horas de crecidas, hasta unos 5 cm cuando los caudales eran bajos.

Por lo indicado los arreglos tenían como finalidad alcanzar un equilibrio entre velocidades altas, que eliminen la sedimentación, y velocidades suficientemente bajas que garanticen una buena sensibilidad en las mediciones; es decir, que no haya mucha turbulencia y que las variaciones del nivel del agua sean significativas.

Los primeros cambios introducidos permitieron alcanzar el equilibrio en el canal y se obtuvieron datos correctos entre los meses de diciembre y agosto; pero el pozo de medición, que se ubicaba muy cerca de la entrada al canal, seguía afectado por la mínima uniformidad que tenía el flujo durante las crecidas. Para resolver este inconveniente se decidió: prolongar el canal, mantener altas velocidades en el canal (que impidan toda sedimentación), y evitar las mediciones en el tramo del canal donde la turbulencia anula la uniformidad del flujo. Estos trabajos fueron terminados en septiembre, mes a partir del cual se dispone de nuevas mediciones.

La calibración de la curva de descarga, luego de las modificaciones introducidas en la estación, está en proceso de ejecución y sus resultados serán presentados en el próximo informe. En consecuencia, aquí se presentan únicamente los datos recogidos durante los nueve primeros meses de funcionamiento.

8.2. Ejemplos de caudales e hidrogramas registrados.

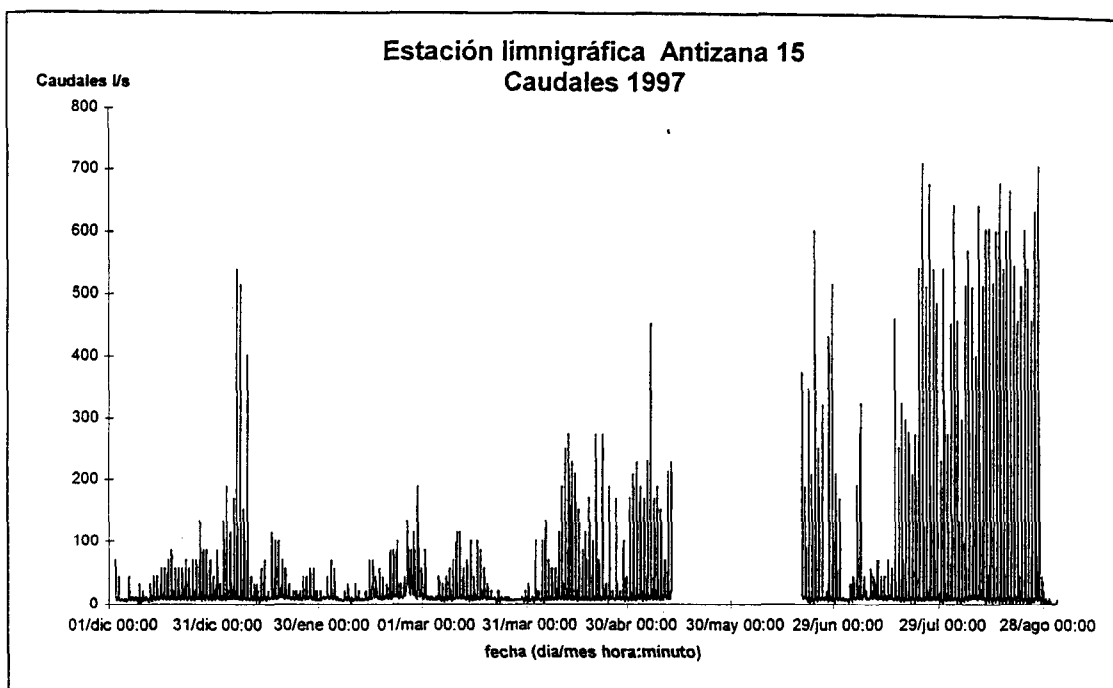
8.2.1. Serie comprendida entre diciembre de 1.996 y septiembre de 1.997

El hidrograma del período entre diciembre de 1.996 y septiembre de 1.997 (figura 8.1) no está completo por cuanto en junio de 1.997 no se pudo extraer el medio magnético de almacenamiento de datos. Los caudales representados en el hidrograma deben ser interpretados con cierta precaución ya que la curva de descarga aún no sido comprobada en toda su extensión mediante aforos líquidos. Ello sucede cuando los caudales superan los 250 l/s por lo cual se recurrió a estimaciones con fórmulas hidráulicas (Manning).

En el hidrograma se puede observar que durante la estación seca normal (de diciembre a enero) los caudales se elevan como resultado de una mayor fusión en el glaciar ya que por la falta de precipitaciones, desaparece paulatinamente la nieve de la lengua terminal y el albedo disminuye. Después de ello y hasta llegar al mes de abril, los caudales descienden por efecto del período húmedo que reinó en la zona del Antizana. Finalmente a partir de abril hasta agosto se produce un nuevo ascenso de los caudales que alcanzan valores muy elevados durante varias semanas.

Usualmente los meses comprendidos entre abril y agosto son muy lluviosos y la ablación sobre el glaciar disminuye. Así se tiene que la laguna Santa Lucia perdió agua poco a poco hasta secarse totalmente en el mes de agosto. Sobre el glaciar, entre los 4.800 y 5.000 msnm. se observó la formación de "penitentes de hielo" verticales de gran tamaño (de hasta 1 metro de longitud), lo cual es poco frecuente en esta zona del Ecuador, inclusive en épocas secas.

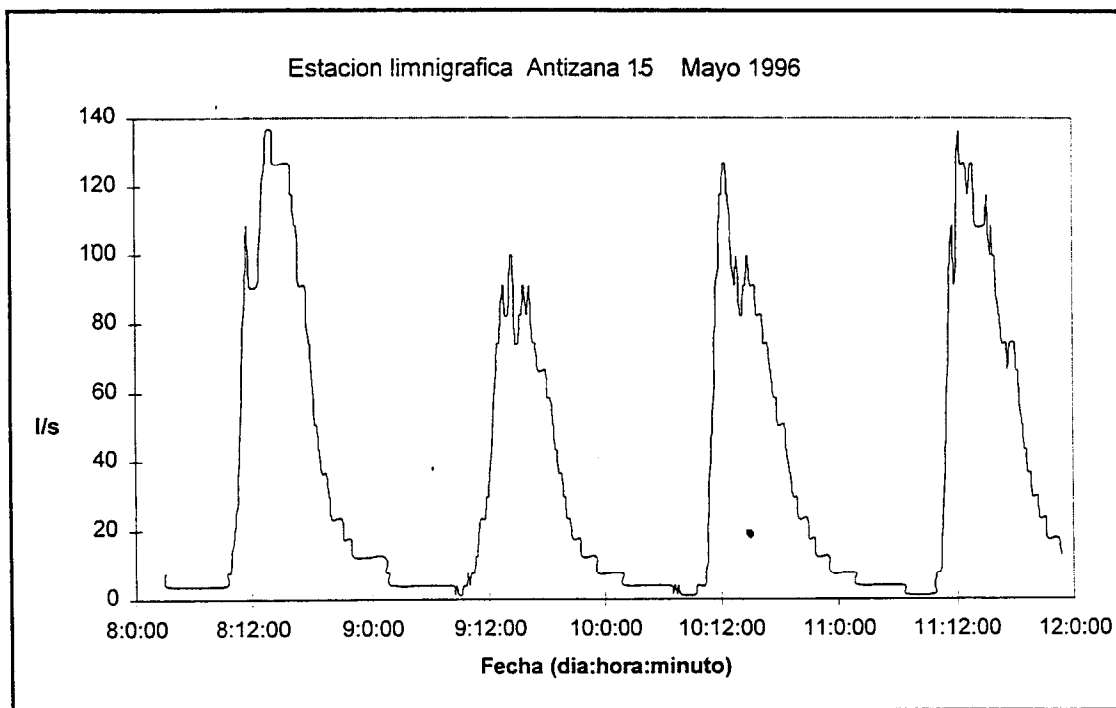
Se deberá analizar en qué medida esa anomalía, al igual que la excepcional escasez de lluvias registrada en la parte oriental y central del Ecuador durante 1.997, pueda estar relacionada con el fenómeno ENSO de fuerte intensidad que se ha establecido desde el mes de marzo en el Océano Pacífico.



8.1. Hidrograma de la estación Antizana desde diciembre de 1.996 hasta agosto de 1.997 (el período de mayo y junio carece de mediciones).

8.2.2. Un régimen típico de ríos efluentes de glaciares.

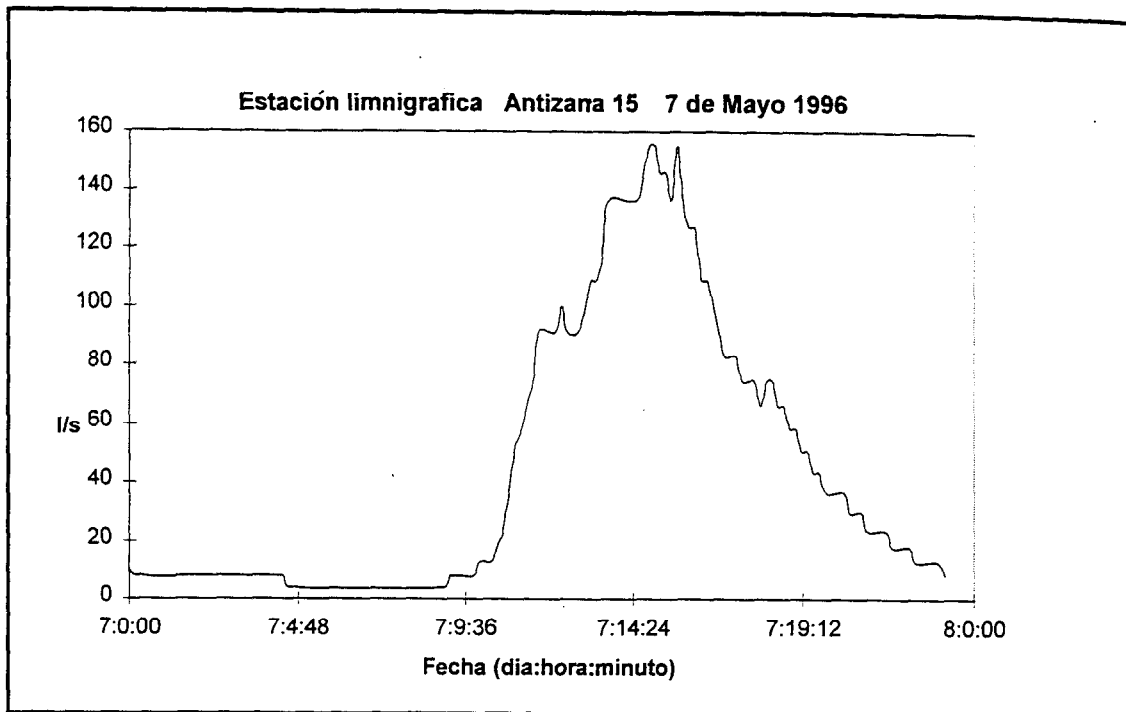
El régimen de caudales que tiene el efluente del Glaciar 15 durante el día, es el típico que se presenta en ríos de origen glaciar, ya que después de las 12 a.m. se produce una crecida diurna como efecto de la fusión de la nieve y el hielo. Ello es reflejo directo de la acción ejercida por las radiaciones solares y los cambios de temperatura sobre el glaciar. Varios ejemplos de ello están representados en el hidrograma de la figura 8.2.



8.2. Hidrograma del 8 al 12 de mayo de 1.996 en la estación del Antizana.

Si se analiza el hidrograma ampliado de un día en la figura 8.3, se puede constatar que la crecida diurna empieza alrededor de las 10 a.m. y que luego, asciende rápidamente hasta alcanzar su máximo a las 3 p.m. aproximadamente. A continuación se produce la fase de recesión, mucho más lenta que la de ascenso, que dura hasta las 8 p.m. Esta secuencia de caudales se debe a que cuando empieza la fusión, las cavidades existentes en el cuerpo del glaciar (así como las ubicadas en el contacto con el lecho rocoso y en las zonas de «hielo muerto» de los depósitos morrénicos) funcionan como reservorios que tienden primero a llenarse de agua. Además de ello, al empezar la fusión, el río está cubierto parcialmente por el hielo que se ha formado en la noche. Todos estos factores contribuyen a que la descarga de las cavidades sea un tanto abrupta y que la crecida se desarrolle rápidamente.

Durante las tardes, por el contrario, el flujo decrece poco a poco, ya que las cavidades permanecen abiertas y el caudal depende exclusivamente de la reducción que tienen las radiaciones, así como de la disminución de la temperatura sobre el glaciar.



8.3. Hidrograma del 7 de Mayo 1.996 en la estación del Antizana.

9. CONCLUSIONES

Como lo han demostrado los datos recogidos sobre el Glaciar 15 del Antizana y presentados en este informe, este programa ha cumplido sus primeros objetivos: instalar y mantener un equipo permanente que permita obtener una estimación correcta del balance de masa y del balance hidrológico. Poco falta para que este último resultado sea alcanzado en su totalidad. Se ha logrado también proporcionar, por primera vez en el Ecuador, datos relevantes sobre el hecho de que los glaciares de esta área han entrado en una fase de retroceso acelerado, comparable o más rápido todavía a lo que se observa en otras cordilleras de los Andes Centrales.

Luego de esta primera etapa, el objetivo buscado consiste en equipar a ese glaciar con un dispositivo específico que permita medir, sobre la superficie misma, el balance energético puntual. Para alcanzar estos propósitos, se instaló ya a fines de 1.996 una estación *Campbell* básica en la cota 5.100 msnm, o sea en las proximidades de la línea de equilibrio del glaciar. Actualmente se ha previsto mejorarla e instalar otra estación en la cumbre del Antizana para que las dos estaciones funcionen en paralelo. De este modo el dispositivo que trabajará sobre el glaciar durante el próximo ciclo (1.998), será semejante al que funcionó durante varios años en el Glaciar Zongo de Bolivia.

10. REFERENCIAS

- Berton, P., Wagnon, P., Francou, B., Pouyaud, B. & Valdivieso, H., 1997.** Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le Glacier de Zongo. Année hydrologique 1995-1996. *Rapports annuels, 55, ORSTOM, La Paz, Bolivie*
- Fournier, R., 1996 :** Informe sobre la construcción de la estación limnimétrica del Antizana. *Informe ORSTOM-EMAAP-Q, Quito.*
- Francou, B., Guereca, J., Mendoza, J., Miranda, G., Noriega, E. & Ramirez, E., 1997.** El Glaciar de Chacaltaya, Cordillera Real, Bolivia: investigaciones glaciológicas (1991-1997). *Rapports annuels, 56, ORSTOM, La Paz, Bolivie*
- Francou, B., Ribstein, P., Sémiond, H., Portocarrero, C. & Rogriguez, A, 1995.** Balances glaciares y clima en Bolivia y Perú. Impactos de los eventos ENSO. *Actes du Séminaire "Eaux, Glaciers et Changements Climatiques dans les Andes Tropicales (Cordillères et Altiplano)", IFEA-ORSTOM, Lima.*
- Francou, B. & Sémiond, H., 1997.** Estado de la red de monitoreo existente e impactos de los eventos ENSO sobre el balance de masa de los glaciares en Bolivia y Perú. *Memorias del Encuentro Científico «Montaña, Glaciares y Cambios Climáticos», EPN, FUNDACYT, ORSTOM, Quito.*
- Hastenrath, S., 1981.** The Glaciation of the Ecuadorian Andes. *A.A.Balkema, Rotterdam.*
- Lliboutry, L., 1974.** Multivariate statistical analysis of glacier annual balances. *Journal of Glaciology, Vol. 13, N° 69.*
- Meyer, H., 1907.** In der Hochanden con Ecuador. *2 vol., Dietrich Reiner-Ernst Vohsen, Berlin.*
Edición en castellano : En los Altos Andes del Ecuador. Terra incognita, 3, Abya-Yala, Quito.
- Pouyaud, B., Francou, B. & Ribstein, P., 1995.** Un réseau d'observation des glaciers dans les Andes Tropicales. *Séminaire "Eaux, Glaciers et Changements Climatiques dans les Andes Tropicales (Cordillères et Altiplano)", IFEA-ORSTOM, Lima.*
- Sémiond, H. & de la Cruz, A., 1996.** La red de monitoreo glacio-hidrológico en el Ecuador: investigación fundamental y aplicaciones. *Memorias del Encuentro Científico « Montaña, Glaciares y Cambios Climáticos », EPN, FUNDACYT, ORSTOM, Quito.*
- Sémiond, H., 1997.** Recorrido alrededor del Antizana a inicios del mes de enero 1997: inventario de Glaciares y recursos hídricos. *Informe, EMAAP-Q, Quito.*
- Whympers, E., 1892.** Travel amongst the Great Andes of Equator.
Charles Steiner's and Sons, New York.
Edition en castellano : Viajes a través de los majestuosos Andes del Ecuador, 1993, Terra Incognita, 4, Abya-Yala, Quito

AGRADECIMIENTOS

Por su contribución, en un momento u otro al éxito de este programa, agradecemos a las personas siguientes:

Por el buen funcionamiento del programa:

Ing. Gustavo Gómez (INAMHI, Quito), Ing. Rodrigo Salvador (EMAAP-Quito), Dr. Remigio Galárraga (EPN, Quito), Dr. Jean Louis Perrin (ORSTOM-EMAAP-Quito), Dr. Georges Pratlong (IFEA, Lima), Dr. Eric Cadier (ORSTOM, Quito) y Dr. Michel Portais (ORSTOM, Quito).

Por su contribución al funcionamiento de la estación hidrológica:

Ing. Richard Fournier (ORSTOM-EMAAP-Quito) y Ing. Robert Hoorelbecke (ORSTOM-EMAAP-Quito).

Por la perforación en la cumbre en 1996:

Ing. Patrick Wagnon (ORSTOM, Bolivia) y Dr. Lonnie G. Thompson (Byrd Polar Research Center).

Por los trabajos de campo, al Ing. Benoît Fourcade (ORSTOM, Quito), el Lic. Frédéric Buraud, y por supuesto, a los técnicos de la EMAAP-Quito y el INAMHI (Quito) que han participado activamente en las campañas de mediciones en el campo y la reparación de instrumentos en los laboratorios.

El programa ha recibido, desde sus inicios, el firme apoyo del ORSTOM, a través del Director Dr. Bernard Pouyaud (ORSTOM, Bolivia, coordinador del Programa « Neiges & Glaciers Tropicaux »), el Dr. Pierre Chevallier (ORSTOM, Montpellier), y el Dr. Pierre Ribstein (ORSTOM, Paris).

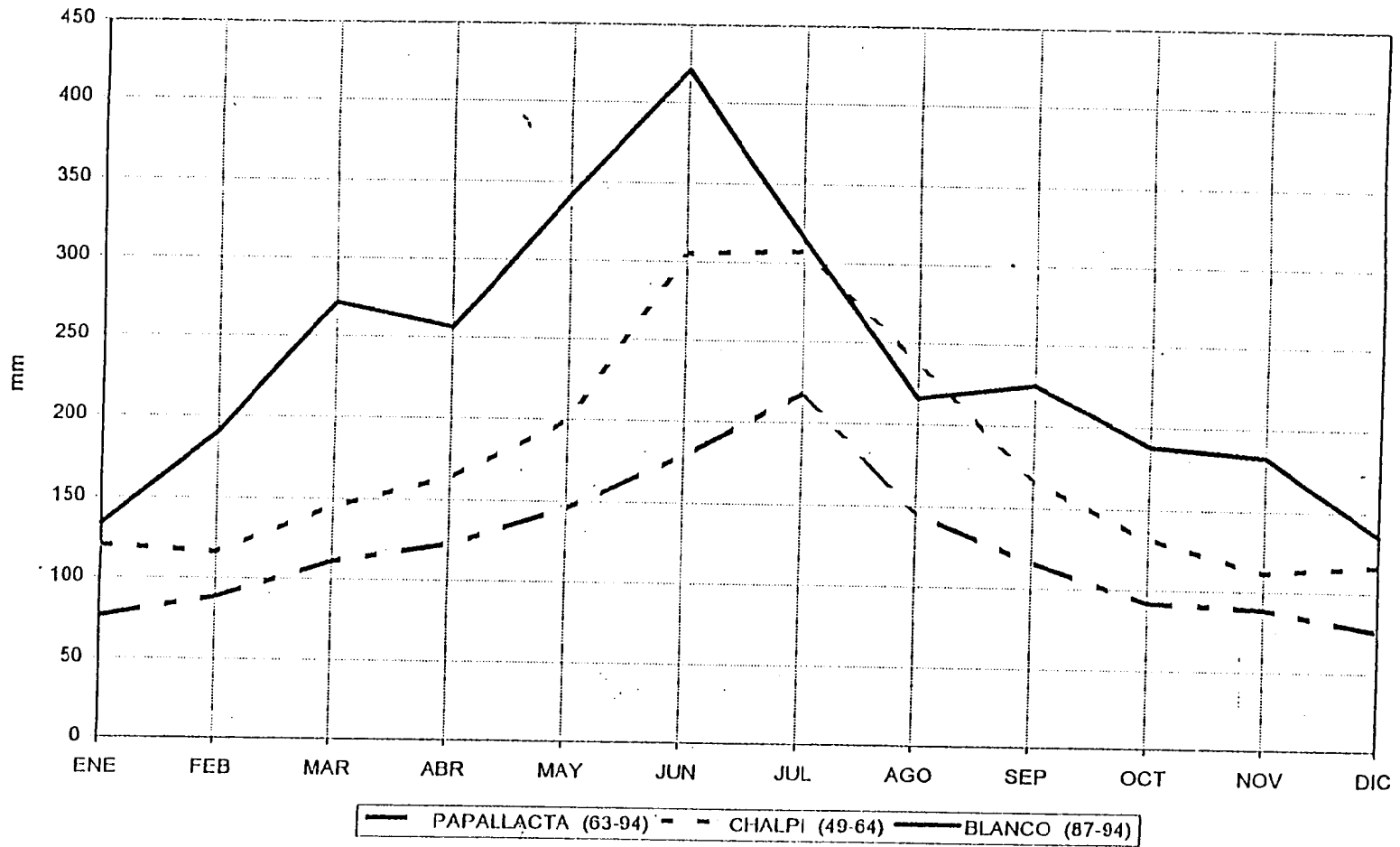
DOCUMENTOS ANEXOS

1. Precipitaciones (media mensual) en algunos sectores de la Cordillera Oriental cercanos de la ciudad de Quito.

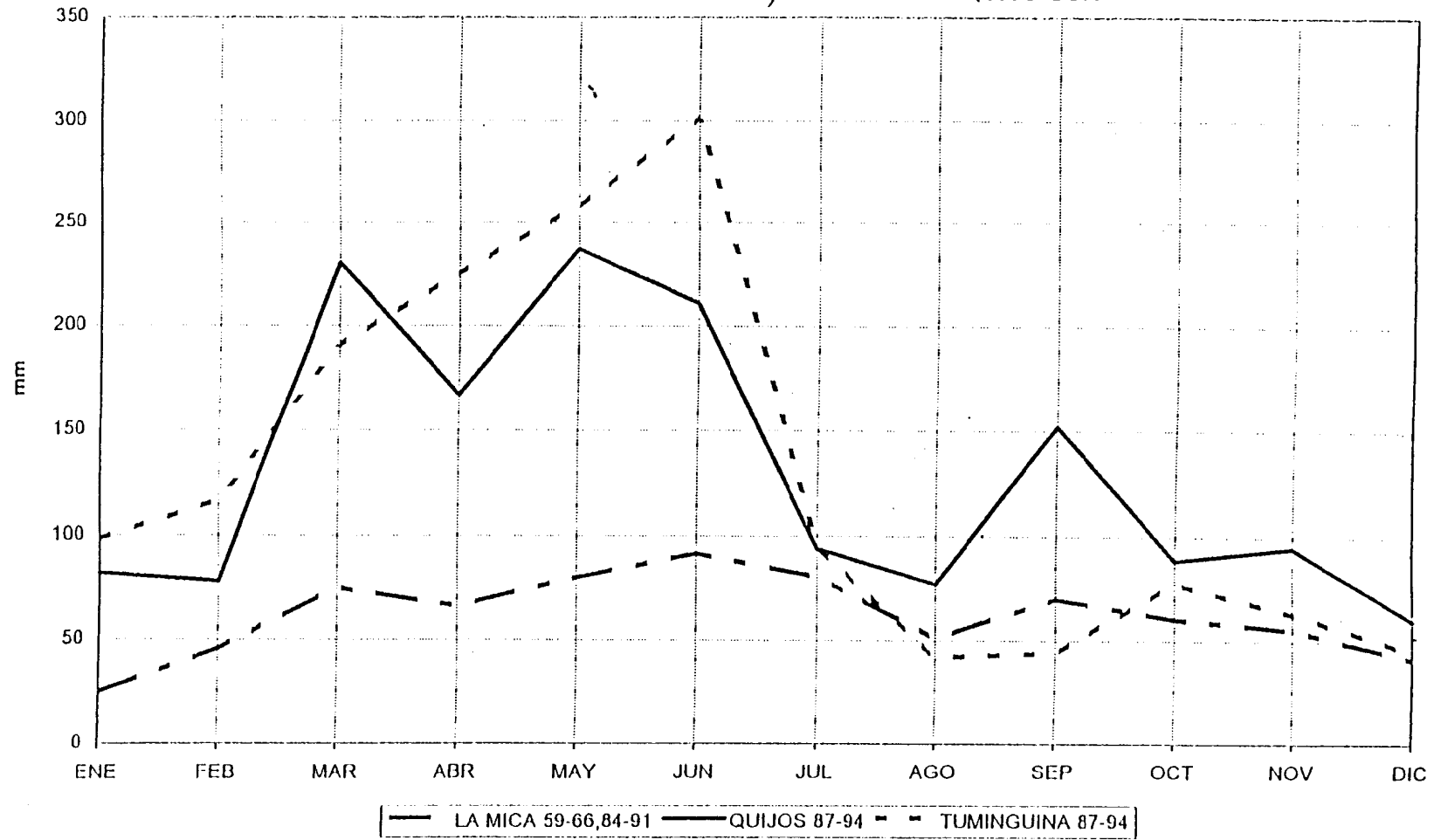
- sistema Papallacta
- sistema Mica-Quito Sur
- sistema Pita-Tambo
- sistema Pita-Tambo

2. Perforación en la cumbre del Antizana en enero de 1.996 con el SIPRE. Densimetría y acumulación (en equivalente-agua).

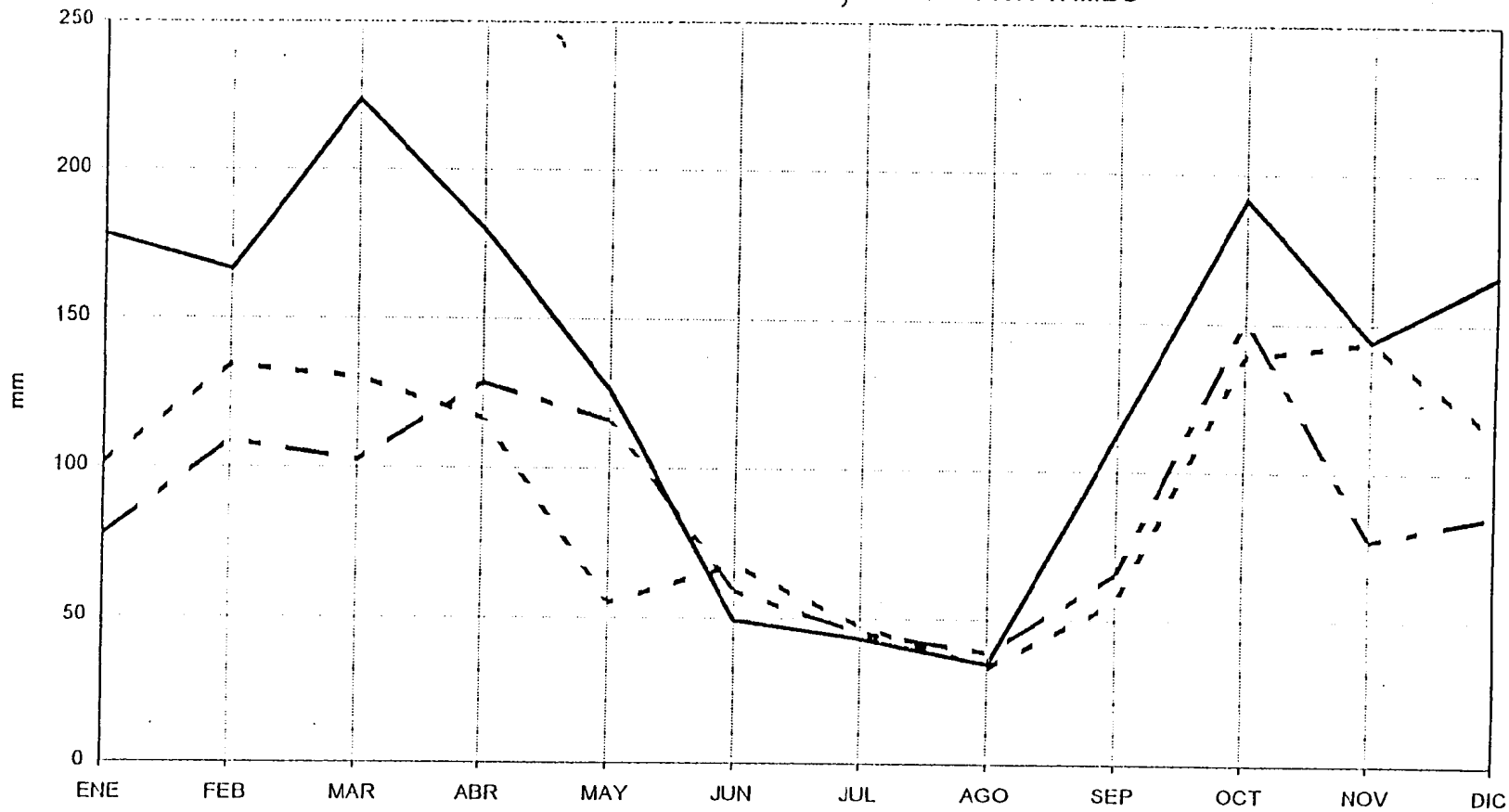
PRECIPITACION MEDIA MENSUAL, SISTEMA PAPALLACTA



PRECIPITACION MEDIA MENSUAL, SISTEMA MICA-QUITO SUR

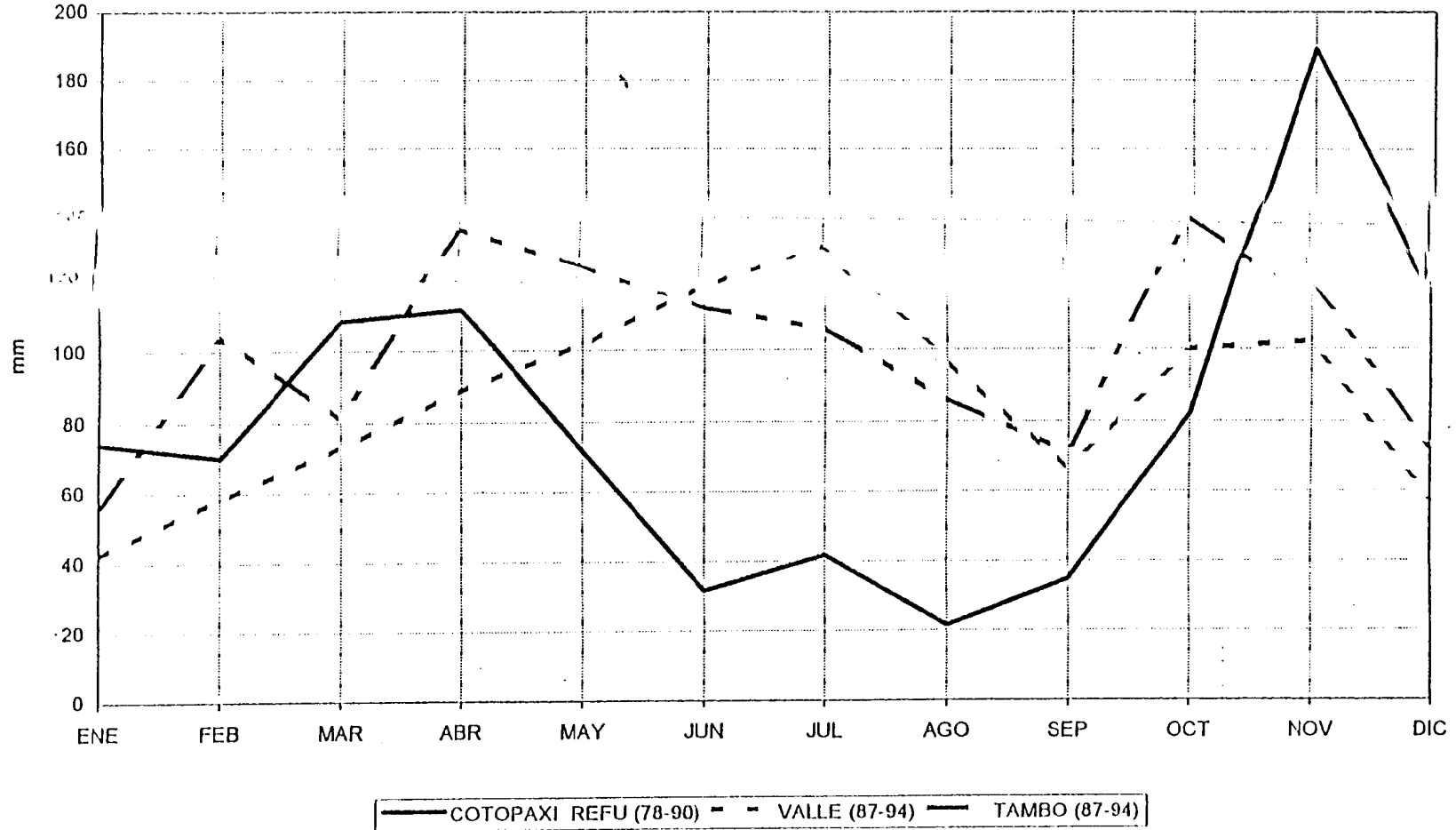


PRECIPITACION MEDIA MENSUAL, SISTEMA PITA-TAMBO



- - PITA A.J. SALTO (67-75) — LORETO-PEDR (63-94) - . COTOPAXI MINIT (30-92)

PRECIPITACION MEDIA MENSUAL, SISTEMA PITA-TAMBO



Carottage Antisana, 26 jan 96									
Altitude : 5740m (somet).									
Echantillon	Profondeur	Circonférence	Diamètre	Longueur	Masse	Densité	Profondeur	Epaisseur	Eq. eau
1	40						40	40	
2	60	21,5	6,84	4,5	50	0,30	60	20	6,04
3	90	23,5	7,48	3,5	65	0,42	90	30	12,68
4	130						130	40	
5	150						150	20	
6	160	24	7,64	6	115	0,42	160	10	4,18
7	170	24	7,64	4,5	90	0,44	170	10	4,36
8	192	24	7,64	5,5	110	0,44	192	22	9,60
9	202					0,44	202	10	4,40
10	220						220	18	0,00
11	258	24	7,64	11	250	0,50	258	38	18,84
12	268					0,50	268	10	5,00
13	278	24	7,64	5	150	0,65	278	10	6,54
14	300						300	22	0,00
15	333						333	33	0,00
16	348	23	7,32	3	60	0,48	348	15	
17	365	23,5	7,48	15	355	0,54	365	17	
18	370					0,54	370	5	
19	375	24	7,64	7,5	170	0,49	375	5	
20	385	23,5	7,48	8	170	0,48	385	10	4,84
21	390	24	7,64	4	70	0,38	390	5	1,91
22	396	24	7,64	5	120	0,52	396	6	3,14
23	409	24,5	7,80	8,5	220	0,54	409	13	7,04
24	416	23,5	7,48	5	115	0,52	416	7	3,66
25	424	24,5	7,80	5	115	0,48	424	8	3,85
26	432	24,5	7,80	5,5	155	0,59	432	8	4,72
27	437	24,5	7,80	4,5	160	0,74	437	5	3,72
28	442						442	5	0,00
29	455	24	7,64	21	505	0,52	455	13	6,82
30	467					0,52	467	12	6,24
31	475	23,5	7,48	20,5	525	0,58	475	8	4,66
32	484					0,58	484	9	5,22
33	492					0,58	492	8	4,64
34	500	24,5	7,80	12,5	315	0,53	500	8	4,22
35	507					0,53	507	7	3,71
36	516	24,5	7,80	8	210	0,55	516	9	4,95
37	530	24	7,64	9	200	0,48	530	14	6,79
38	545	24	7,64	21	490	0,51	545	15	7,64
39	550					0,51	550	5	2,55
40	554					0,51	554	4	2,04
41	564						564	10	0,00
42	584	24,5	7,80	10	235	0,49	584	20	9,84
43	591	25	7,96	14,5	330	0,46	591	7	3,20
44	602					0,46	602	11	5,06
45	613	23,5	7,48	5,5	125	0,52	613	11	5,69
46	619						619	6	0,00
47	629	23	7,32	7	155	0,53	629	10	5,26
48	638	24	7,64	7,5	200	0,58	638	9	5,24
49	652	24	7,64	12	255	0,46	652	14	6,49
50	660	24	7,64	14	315	0,49	660	8	3,93
51	667					0,49	667	7	3,43
52	682	24,5	7,80	8	200	0,52	682	15	7,85
53	691	23,5	7,48	7	170	0,55	691	9	4,97
54	701						701	10	0,00
55	708	24	7,64	4	105	0,57	708	7	4,01
56	715	24	7,64	5	140	0,61	715	7	4,28
57	723	24	7,64	7	170	0,53	723	8	4,24
58	732	23,5	7,48	6	170	0,64	732	9	5,80
59	742						742	10	0,00
60	749	24	7,64	12	310	0,56	749	7	3,95
61	755					0,56	755	6	3,36
62	762	24	7,64	11	300	0,59	762	7	4,16

63	768					0,59	768	6	3,54	
64	776	24,5	7,80	5	130	0,54	776	8	4,35	
65	784	24	7,64	6,5	165	0,55	784	8	4,43	29,60
66	792	24	7,64	6,5	170	0,57	792	8	4,56	
67	801	24,5	7,80	8,5	235	0,58	801	9	5,21	
68	807	24	7,64	6	140	0,51	807	6	3,05	12,83
69	819	25	7,96	9	275	0,61	819	12	7,37	
70	829	24,5	7,80	5,5	155	0,59	829	10	5,90	
71	837	23	7,32	14	335	0,57	837	8	4,55	
72	844					0,57	844	7	3,99	
73	854						854	10	0,00	
74	867	24,5	7,80	5,5	165	0,63	867	13	8,16	
75	875	23	7,32	18,5	460	0,59	875	8	4,73	34,70
76	886					0,59	886	11	6,49	
77	901						901	15	0,00	
78	908	25	7,96	5	140	0,56	908	7	3,94	
79	917	24,5	7,80	15	400	0,56	917	9	5,02	
80	928					0,56	928	11	6,16	
81	940	23,5	7,48	7	165	0,54	940	12	6,44	
82	950	24,5	7,80	18,5	455	0,51	950	10	5,15	
83	961					0,51	961	11	5,61	
84	970	22	7,00	8,5	185	0,57	970	9	5,09	
85	979	24,5	7,80	12,5	320	0,54	979	9	4,82	
86	988					0,54	988	9	4,86	
87	998	24,5	7,80	4	105	0,55	998	10	5,50	
88	1008	24	7,64	6	190	0,69	1008	10	6,91	65,98
89	1018	24	7,64	8	180	0,49	1018	10	4,91	
90	1033	23	7,32	5	115	0,55	1033	15	8,20	
91	1047	24,5	7,80	6,5	165	0,53	1047	14	7,44	
92	1058	24	7,64	9,5	250	0,57	1058	11	6,32	
93	1068	24,5	7,80	7	210	0,63	1068	10	6,28	
94	1078						1078	10	0,00	33,14
95	1087	24,5	7,80	15,5	390	0,53	1087	9	4,74	
96	1096					0,53	1096	9	4,77	
97	1106	24,5	7,80	17,5	440	0,53	1106	10	5,26	
98	1116					0,53	1116	10	5,30	
99	1126	24,5	7,80	19	490	0,54	1126	10	5,40	
100	1137					0,54	1137	11	5,94	
101	1145	24,5	7,80	17,5	425	0,51	1146	9	4,58	35,99
102	1155					0,51	1155	9	4,59	35,84
103	1165	24	7,64	6	140	0,51	1165	10	5,09	36,16
104	1177	24,5	7,80	14	390	0,58	1177	12	7,00	37,89
105	1190					0,58	1190	13	7,54	40,13
106	1205	24	7,64	8	200	0,55	1205	15	8,18	42,92
107	1219	24	7,64	7	185	0,58	1219	14	8,07	45,05
108	1225						1225	6	0,00	40,47
109	1234	24,5	7,80	7	175	0,52	1234	9	4,71	40,59
110	1245	24	7,64	15,5	440	0,62	1245	11	6,81	42,31
111	1253					0,62	1253	8	4,96	40,28
112	1265	24,5	7,80	4,5	110	0,51	1265	12	6,14	38,88
113	1275	25	7,96	13	370	0,57	1275	10	5,72	36,42
114	1286					0,57	1286	11	6,27	34,62
115	1294	24	7,64	7	205	0,64	1294	8	5,11	39,73
116	1306	24,5	7,80	11	305	0,58	1306	12	6,97	41,98
117	1318	24,5	7,80	11	305	0,58	1318	12	6,97	42,14
118	1325						1325	7	0,00	37,18
119	1334	24,5	7,80	4,5	160	0,74	1334	9	6,70	37,73
120	1345	24,5	7,80	16,5	470	0,60	1345	11	6,56	38,57
121	1357					0,60	1357	12	7,20	39,50
Profondeur réelle atteinte, 1300 cm.										