



UNIVERSIDAD
MAYOR DE
SAN
ANDRÉS



Proyecto:
IAI CRN 2047

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
CARRERA DE FÍSICA

TESIS DE GRADO

ANALISIS MENSUAL DE LOS BALANCES DE MASA GLACIOLÓGICO E HIDROLÓGICO DEL GLACIAR TROPICAL ZONGO (BOLIVIA)

POSTULANTE : Gonzalo Américo Leonardini Quelca
TUTOR : Dr. Ing. Patrick Ginot
TUTOR : Dr. Ing. Edson Ramírez

La Paz- Bolivia

Julio, 2010

A Teodocia y Elías...mis padres

Agradecimientos

Agradezco a mi familia y amigos por su tolerancia y su apoyo constante. A los profesores de física por la física compartida. Agradecimientos a todos los miembros del IHH e IRD, particularmente a Patrick Ginot y Edson Ramírez por la acogida, la confianza y la dirección del presente trabajo, a Jean-Emmanuel Sicart por sus sugerencias, por su lectura atenta y la corrección del presente documento; a Maxime Litt y Antoine Rabatel por sus comentarios y críticas, a Rolando Fuertes y Cynthia Ramallo por buena acogida en el IHH. Finalmente al Dr. Andrade y el Ing. Ricaldi por la revisión y sugerencias como parte de tribunal.

Contenido

Resumen.....	iv
Notación.....	v
1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos y plan de trabajo	3
2. Fundamento teórico.....	4
2.1. Glaciar.....	4
2.2. Clasificación de los glaciares.....	4
2.3. Glaciares tropicales.....	5
2.4. El glaciar de Zongo.....	6
2.5. Balance de masa.....	8
2.5.1. Método directo o balance glaciológico.....	8
2.5.2. Método indirecto o balance hidrológico.....	10
2.5.3. Otros métodos.....	10
2.6. Zonas y parámetros importantes en el estudio de glaciares tropicales.....	11
2.7. Aspectos meteorológicos.....	12
2.7.1. Balance de energía para un glaciar.....	12
2.7.2. Radiación neta.....	12
2.7.3. Índice de nubes.....	14
2.8. Contexto climático.....	14
2.9. ENSO.....	15
3. Materiales y equipo sobre el glaciar.....	22
3.1. Medida de la precipitación.....	23
3.2. Medida de la ablación.....	24
3.2.1. Instalación de balizas.....	24
3.2.2. Medición de balizas.....	25
3.3. Medida de la acumulación.....	25
3.4. Estaciones meteorológicas.....	27

4. Condiciones climáticas locales.....	31
4.1. Precipitación y estacionalidad.....	31
4.2. Condiciones meteorológicas en la cuenca glaciar.....	33
4.2.1. Temperatura, humedad relativa y viento.....	33
4.2.2. Radiación de onda corta incidente, de salida y albedo.....	36
4.2.3. Radiación de onda larga.....	39
4.3. Conclusiones del capítulo.....	41
5. Cálculo del balance de masa.....	43
5.1. Balance de masa anual.....	43
5.1.1. Balance de masa glaciológico.....	43
5.1.1.1. Zona de acumulación.....	43
5.1.1.2. Zona de ablación.....	46
5.1.1.3. Balance neto y parámetros del glaciar.....	47
5.1.2. Balance de masa hidrológico.....	50
5.1.3. Comparación con los años precedentes.....	51
5.2. Balance de masa mensual.....	56
5.2.1. Balance glaciológico.....	56
5.2.1.1. Zona alta.....	57
5.2.1.2. Zona baja.....	60
5.2.1.3. Balance neto y parámetros del glaciar.....	61
5.2.2. Balance de masa hidrológico.....	63
5.3. Validación de resultados.....	64
5.4. Consideraciones importantes.....	66
5.5. Conclusiones del capítulo.....	67
6. Análisis de los balances de masa glaciológico e hidrológico.....	69
6.1. Valores promedios de balance de masa.....	69
6.2. Series temporales mensuales.....	72
6.2.1. Series de balance de masa	72
6.2.2. Series de índices ENSO y meteorología local.....	77
6.3. Conclusiones del capítulo.....	81
7. Análisis mensual de periodos determinados.....	83

7.1. Comparación simultanea.....	84
7.1.1. Balance de masa.....	84
7.1.2. Precipitación.....	86
7.1.3. Temperatura, humedad relativa y viento.....	88
7.1.4. Radiación de onda corta.....	91
7.1.5. Radiación de onda larga.....	93
7.1.6. Radiación neta, albedo e índice de nubes.....	95
7.2. Influencia de parámetros meteorológicos locales sobre la ablación.....	96
7.3. Conclusiones del capítulo.....	104
Conclusiones generales y perspectivas.....	107
Referencias	110
Anexos.....	113
A.1 Sonda de perforación para hielo Heucke.....	113
A.2 Detalle de las estaciones meteorológicas.....	114
A.3 Script en MatLab para el cálculo del ELA y AAR.....	115
A.4 Fórmulas de errores.....	116
A.5 Datos mensuales.....	118
A.6 Tablas de correlaciones.....	128

Resumen

Los glaciares tropicales son indicadores climáticos muy sensibles. Para comprender mejor esta relación realizamos el cálculo de los balances de masa mensuales del glaciar Zongo (16°S, 68°O) en Bolivia durante el periodo sep/1993 y ago/2008. Esta tesis presenta por una parte los métodos empleados para el cálculo del balance de masa a escala mensual y por otra parte el interés por la comprensión del funcionamiento del glaciar y su relación con la climatología local.

En una primera parte nos concentramos en describir las condiciones climáticas reinantes en la cuenca glaciar. Así, la precipitación, la humedad, la temperatura y el viento presentan una marcada estacionalidad durante el año hidrológico con valores elevados en las estaciones húmeda y de transición y valores bajos en la estación seca (el viento presenta un comportamiento inverso). Por otra parte, los flujos que componen el balance radiativo presentan igualmente una estacionalidad a lo largo del año hidrológico, con flujos de onda larga incidentes elevados en las estaciones húmeda y de transición y bajos en la estación seca (la radiación de onda corta presenta un comportamiento inverso) y flujos de salida que caracterizan el estado de la superficie local.

Siendo el balance de masa la variable más representativa de un glaciar, se detalla su metodología de cálculo a escala anual por dos métodos (el glaciológico y el hidrológico) para luego poder extender la metodología a escala mensual (considerando, para el balance glaciológico, una reconstrucción de datos en la zona de acumulación). Se encuentra así, una aceptable correlación de ambos métodos, principalmente en el periodo húmedo, y se observa una frecuente ablación mensual (balance de masa negativo) que por su intensidad es quien determina el balance neto.

Finalmente, con el fin de comprender mejor el funcionamiento del glaciar y su relación con el clima local a escala mensual, se realiza un estudio comparativo de cinco años hidrológicos, donde se observa que la precipitación determina la cobertura de nieve en la superficie y la cobertura nubosa controla los flujos radiativos incidentes. Así, en años con balance negativo se observa un retraso en el establecimiento de la estación húmeda y/o una débil intensidad de precipitación y en los años con balance positivo un adelanto en la estación húmeda y/o intensidades elevadas de precipitación.

Notación

• mm eq.a.	milímetros equivalentes de agua.
• Bn	Balance de masa mensual obtenido por el método glaciológico.
• Bh	Balance de masa mensual obtenido por el método hidrológico.
• Bn_anual	Balance de masa anual obtenido por el método glaciológico.
• Bh_anual	Balance de masa anual obtenido por el método hidrológico.
• Bn_baja	Balance de masa mensual en la zona baja.
• Bn_alta	Balance de masa mensual en la zona alta.
• r^2	Coefficiente de correlación.
• s	desviación estándar.
• ELA	Linea de equilibrio altitudinal (Equilibrium Line Altitude)
• AAR	Razón del área de acumulación (Accumulation Area Ratio)
• SAMA	Station Automatique Météorologique d'Altitude
• ORE	Observatoire de Recherche sur l'Environnement
• P	Precipitación.
• P_acum	Precipitación acumulada.
• HR	Humedad relativa
• T	Temperatura.
• V	intensidad de viento
• SW_in	Radiación de onda corta incidente (incoming Short Wave)
• SW_out	Radiación de onda corta de salida (outcoming short Wave)
• SW	Radiación neta de onda corta
• LW_in	Radiación de onda larga incidente (incoming Long Wave)
• LW_out	Radiación de onda larga emitida (outcoming Long Wave)
• LW	Radiación neta de onda larga
• Rn	Radiación neta
• SW_extra	Radiación solar en el tope exterior de la atmósfera

Capítulo 1

Introducción

La región tropical es la más poblada (2/3 de la población) y en promedio representa el 40% de la superficie total del planeta, así mismo, es la región donde se llevan a cabo intercambios de flujos energéticos considerables entre la radiación solar y la atmósfera, siendo así una región clave para la dinámica del clima global.

Los glaciares tropicales son indicadores climáticos particularmente interesantes ya que “conservan” importante información del clima pasado (a través de estudios de testigos de hielo), y presentan una notable sensibilidad al clima actual (Oerlemans y Fortuin, 1992); de esta manera ante un evidenciado retroceso de glaciar es necesario una interpretación del mismo en términos del recalentamiento global, el efecto invernadero y eventos más locales (ENSO, Pacific Shift). Así, debe establecerse un monitoreo constante de los mismos en procura de series de datos más extensas para poder prever su situación en escenarios de climas futuros.

Después de la pequeña edad del hielo (finales siglo XVIII) la mayoría de los glaciares en el mundo han experimentado un retroceso significativo (Francou, 1992). En los Andes centrales¹ la tasa de retroceso glaciar es comparable con aquellas de la región tropical.

1.1. Antecedentes

El estudio de glaciares tropicales es relativamente reciente en los Andes. En Bolivia el programa glaciológico comenzó en julio de 1991 con el estudio del glaciar Zongo en el marco del programa NGT (Neige et Glaciers Tropicaux) y GREAT ICE (Glaciers et Ressources en Eau d'Altitude Indicateurs Climatiques et Environnementaux) del IRD (Institut de Recherche pour le Développement. Antiguamente ORSTOM) y con apoyo de una contraparte local: IHH (Instituto de Hidráulica e Hidrología), SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidráulica) y COBEE (Compañía Boliviana de Energía Eléctrica). A partir de 1991 diferentes instrumentos fueron instalados sobre el glaciar a fin

¹ Los Andes centrales se extienden desde Perú hasta el nevado Tres Cruces en Chile. La disposición de los cordones montañosos es de dos cordones separados por el altiplano andino. La altura máxima en esta región es el cerro Huascarán (6.768 msnm) y en la zona argentino-chilena es el nevado Ojos del Salado (6.891 msnm).

de tener un monitoreo constante del mismo (mediciones glaciológicas, meteorológicas e hidrológicas) y así estudiar la evolución de los glaciares y de su hidrología en las montañas tropicales bajo la influencia de las fluctuaciones climáticas actuales y pasadas.

Un importante número de publicaciones relativas al glaciar Zongo han sido llevadas a cabo desde el inicio del programa (tesis doctorales, tesis de licenciatura, reportes de fin de carrera, artículos, reportes anuales, etc.). Estos trabajos se centran en diferentes tópicos de estudio: Glaciología, hidrología, hidro-glaciología, micro-meteorología, paleo-climatología y climatología, entre las más importantes.

1.2. Justificación

Los glaciares tropicales son muy buenos indicadores de la evolución del clima por su extrema sensibilidad a las variaciones de los parámetros meteorológicos como la temperatura, la radiación y la precipitación (Pouyaud et al., 1995). Bajo este concepto, contribuyen al estudio del clima tropical y de los fenómenos El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (pudiendo proporcionar valiosa información sobre su frecuencia y su magnitud). Son también objetos hidrológicos, cuyos recursos son aprovechados por las sociedades andinas, susceptibles ante evoluciones futuras muy rápidas. El actual retroceso, generalizado y acelerado de los glaciares de los Andes centrales y sus consecuencias en términos de aprovisionamiento de agua, de generación de electricidad o de riesgos naturales motivan su estudio generalizado.

1.3. Objetivos y Plan de Trabajo

El presente trabajo tiene por objetivo comprender mejor la relación glaciar-clima considerando el balance de masa como la variable más representativa del glaciar (Francou et al., 2005).

Para precisar mejor lo expresado anteriormente a continuación se indican los objetivos específicos de la tesis.

- Realizar la revisión bibliográfica del tema es cuestión.
- Apoyar en las mediciones de campo sobre el glaciar.
- Estudiar la climatología local y regional y su estacionalidad.
- Estudiar la metodología de cálculo de balances de masa a escala de tiempo anual.
- Validar y completar los balances de masa mensual en la zona de ablación.
- Establecer un método de cálculo de balances en la zona de acumulación y calcular el balance de masa mensual neto del glaciar (método glaciológico).
- Calcular el balance de masa neto por el método hidrológico.
- Calcular los parámetros del glaciar de manera mensual
- Analizar los balances obtenidos por ambos métodos.
- Analizar los balances y su relación con eventos regionales ENSO.
- Analizar la influencia de las variables meteorológicas locales sobre el balance de masa (acumulación/ablación) para algunos años representativos.

Capítulo 2

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Glaciar

Un glaciar es una masa de hielo que se va formando con el transcurso del tiempo a causa de la acumulación sucesiva de lluvia sólida (nieve, granizo, escarcha). El carácter cristalino del hielo y los efectos gravitatorios son importantes en el proceso de formación.

La formación de glaciares está relacionada con la longitud y las condiciones climáticas locales así como en aquellas partes del planeta donde la temperatura es baja y la tasa de precipitación es mayor que la de fusión de la nieve/hielo (estas condiciones establecen una región imaginaria llamada "línea de nieve"). Así, los lugares propicios para la formación de glaciares son las regiones polares y montañas a gran altitud. Globalmente se ha observado que la línea de nieve se encuentra a nivel del mar en los polos, 1200 m por Escandinavia, 2500-3000 m por los Alpes y 5000-6000 por las regiones ecuatoriales (Singh et al, 2001).

2.2. Clasificación de Los Glaciares

Diferentes criterios son adoptados para la clasificación de glaciares: basados en su tamaño y topografía se clasifican en **mantos, casquetes de hielo, glaciares de valle o glaciares de montaña y glaciares de pie de monte**; los primeros dos tipos encontrados en regiones continentales (polos) o de meseta y los dos últimos en regiones montañosas. Basados en su característica térmica interna, los glaciares son clasificados como **glaciares fríos ($T < 0^{\circ}\text{C}$)** y **glaciares templados ($T = 0^{\circ}\text{C}$)**, excepto en el límite de hielo con la superficie que presenta variaciones estacionales.

Para el presente trabajo nos interesa más bien un tipo de glaciares ubicados en zonas tropicales a los que llamamos glaciares tropicales.

2.3. Glaciares tropicales

Según Kaser y Osmaston [2002] la zona tropical está definida como la intersección de tres superficies del globo terrestre: la superficie barrida por la zona de convergencia intertropical, la superficie donde la amplitud térmica diaria es superior a la amplitud térmica anual y la superficie comprendida entre los trópicos de cáncer y capricornio (figura 2.1).

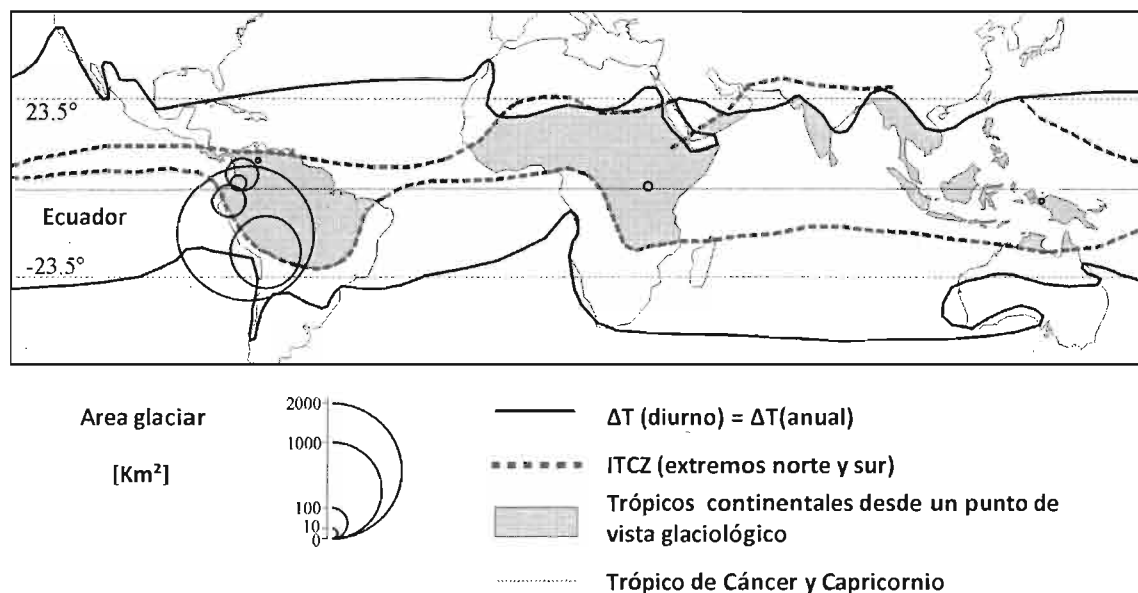


Figura 2.1. Distribucion de los glaciares tropicales en el mundo (Kaser-Osmaston, 2002)

Los glaciares tropicales representan el 0.16% de la superficie glaciar total del planeta (Kaser, 1996) y de esta superficie el 99.68% se encuentra en América del Sur, 0.18% en África y 0.12% en Papuasia-Nueva Guinea. De la totalidad de glaciares en América del sur el 71.1% se encuentra en Perú y el 20.4% se encuentra en Bolivia (tabla 2.1) (CAN, IRD [2007]).

Tabla 2.1. Distribución de glaciares en la zona tropical. Las cifras entre paréntesis representan estimaciones hechas por B. Francou y G. Kaser, más conservadoras que las originales, basadas en extrapolaciones de mediciones efectuadas sobre algunos glaciares de las zonas indicadas. Fuente : CAN, IRD [2007].

- Glaciares tropicales -			
Región	Área en km ²	% de los glaciares tropicales	Año de estimación
Perú	1,958 (1,370)	71.1	1970 (2006)
Bolivia	562 (393)	20.4	1975 (2006)
Ecuador	112.8 (79)	4.1	1976 (2006)
Colombia	108.5 (76)	3.9	1950 (2006)
Venezuela	2.7 (1.8)	0.09	1950 (2006)
Total América del Sur	2,744 (1,920)	99.68	2006
Kilimanjaro	2.2		2000
Ruwendori	0.96		2003
Mt. Kenya	0.3		2004
Total Africa	3.46	0.18	~2000
Papúa-Nueva Guinea	2.3	0.12	2000
Total probable para los glaciares del trópico	~1,926	100	

2.4 El glaciar Zongo (Bolivia)

Este glaciar forma parte del masivo Huayna Potosí (16°15' S, 68°10' O) situado en el corazón de la Cordillera Real en Bolivia a 30 Km al norte de La Paz (Figura 2.1). Esta cordillera de dirección NO-SE marca el límite entre el altiplano al este (meseta de altitud promedio 4000 msnm) y la cuenca del Amazonas al oeste (altitud inferior a 2000 msnm), esta última perteneciente a los Yungas de Bolivia. Varios son los masivos que sobrepasan los 6000 msnm como el Huayna Potosí que culmina a los 6088 msnm.

El glaciar Zongo es un glaciar templado y de valle con una superficie de 2.4 km². Entre 5150 y 6000 msnm, la parte superior del glaciar, presenta una pendiente de 30° orientada al Sud-Este (figura 2.2); entre 4900 y 5150 msnm el glaciar tiene una pendiente de 15° y está orientado al este (Sicart, 2002). De este glaciar se generan muchos arroyos que alimentan un lago drenado por un torrente único. Su caudal instantáneo es medido por una estación limnimétrica a 4830 msnm. La cuenca glaciar que finaliza en este punto tiene un área de 3.7 Km², de la cual el 65% presenta glaciar. Las zonas rocosas

así como el lecho rocoso del glaciar están constituidos de granodiorito impermeable de manera que casi la totalidad de agua de fusión transita por la estación limnimétrica.

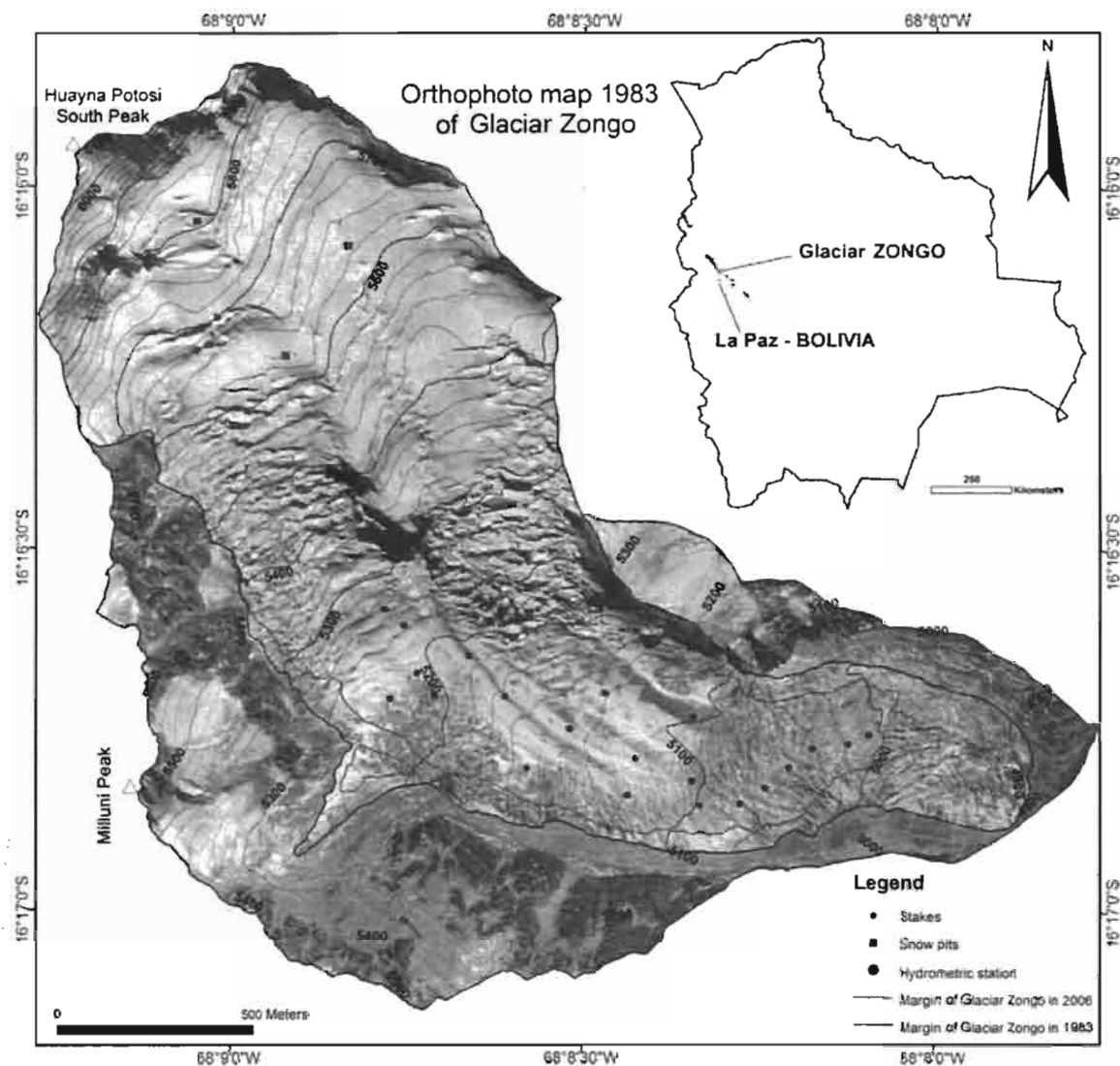


Figura 2.2. Ortomapa del glaciar Zongo. Fuente : Soruco [2009].

2.5 Balance de masa

El balance de masa de un glaciar representa el equivalente de agua de lo que gana y de lo que pierde en un tiempo determinado. Los estudios de balance de masa están relacionados con los cambios en la masa de un glaciar y la distribución de estos cambios en espacio y tiempo. Tales estudios forman un importante vínculo en una cadena de eventos que conectan avances y retrocesos glaciares con el clima (Paterson, 1994).

En las subsecciones siguientes se detallan los métodos para el cálculo de balance de masa que serán empleados en el presente trabajo, así mismo, se indican otros métodos conocidos.

2.5.1 Método directo o balance glaciológico

La ecuación básica del balance (b) de masa en un punto del glaciar para un instante, db/dt , se escribe básicamente (Lliboutry 1964; Paterson, 1994; Dyurgerov, 2002):

$$\frac{db}{dt} = \rho \frac{dh}{dt} + \int \frac{d\rho}{dt} dy \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad del hielo de espesor h que varía según el tiempo t . El primer término del lado derecho de la ecuación representa el cambio de masa de hielo (con densidad constante). El segundo término es el cambio de densidad de la columna de nieve de espesor y sobre el periodo de tiempo t (figura 2.3).

A partir de (1) y considerando dos instantes de medición, t_i y t_{i-1} , se obtiene el balance de masa para el instante i como:

$$b_i = \rho_0 \Delta h + (\rho_i y_i - \rho_{i-1} y_{i-1}) \quad (2)$$

Considerando $\rho_i = \rho_{i-1} = \rho$, se tiene

$$b_i = \rho_0 (h_i - h_{i-1}) + \rho (y_i - y_{i-1}), \quad (3)$$

O escribiendo h en términos de la emergencia (z , distancia desde la superficie de la nieve fresca hasta el extremo superior de la baliza) (figura 2.3):

$$b_i = \rho_0 (z_{i-1} - z_i) + \rho (y_i - y_{i-1}) \quad (4)$$

Donde ρ_0 y ρ son la densidad del hielo (0.9 g/cm^3) y la nieve (0.4 g/cm^3) respectivamente.

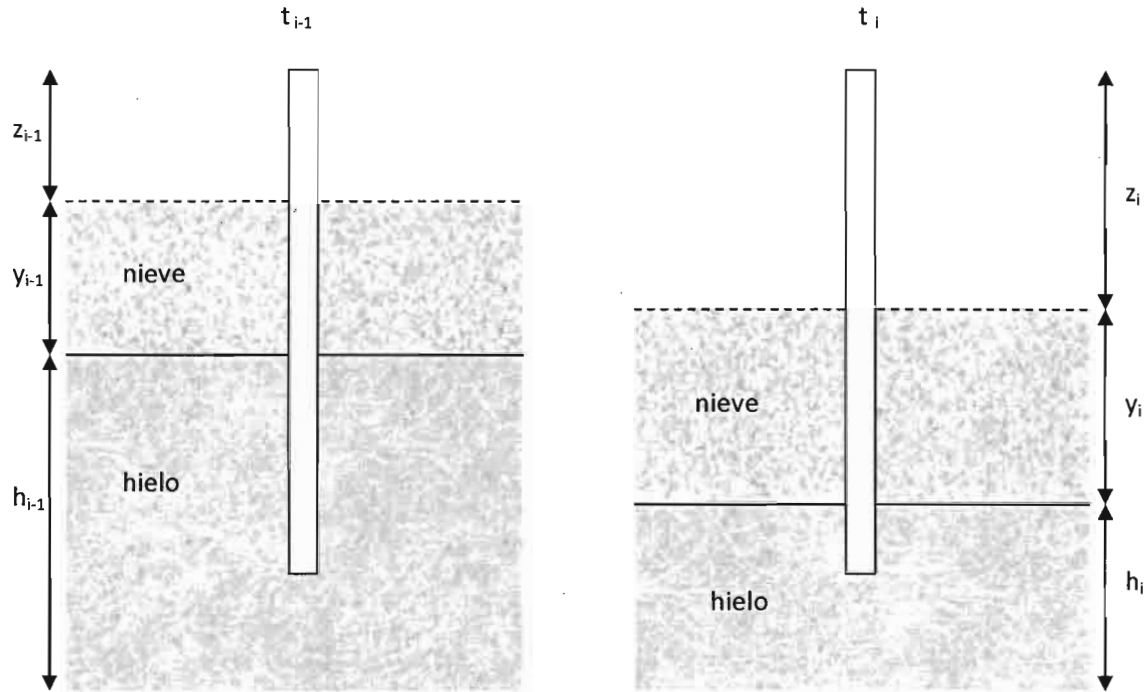


Figura 2.3. Diagrama del estado de una baliza para dos instantes consecutivos. Aquí puede observarse la altura de la emergencia (z), nieve (y) y hielo (h) para los instantes respectivos

A escala anual, para extender el balance a todo el glaciar se utilizan diversos puntos de medición (balizas y pozos) distribuidos en una red bien definida. El principio básico es el de ponderar el balance medido por el área del rango relativo del glaciar:

$$B_n = \left(\frac{1}{S}\right) \sum b_j s_j \quad (4)$$

Donde,

B_n : balance neto específico del glaciar

S : superficie total

b_j : Balance de masa neto en el rango altitudinal j.

s_j : Área del rango latitudinal j.

2.5.2 Método indirecto o balance hidrológico

Este método determina solamente el balance de masa neto del glaciar. Las medidas deben ser realizadas sobre toda la cuenca glaciar donde el torrente emisario es bien controlado. Así, debe contarse con mediciones de caudal (Q) y precipitación (P) de toda la cuenca glaciar (ambos medidos en milímetros). La cantidad de agua, hielo y nieve perdida por evaporación debe ser medida o estimada (E). Si cada una de estas cantidades representan el total sobre el periodo de interés (anual, mensual, etc.) y son expresadas en milímetros equivalentes de agua, el balance de masa neto de glaciar (B_h) puede ser obtenida por la siguiente ecuación (Paterson, 1994):

$$B_h = P - R - E \quad (5)$$

Donde P representa la cantidad de hielo acumulado por las precipitaciones sólidas, R la ablación del glaciar en mm eq.a. y E la sublimación del glaciar. Considerando E despreciable se tiene (Sicart et al. , 2007):

$$B_h = P - R = P - \frac{1}{S_g} (Q - (S - S_g)ceP) \quad (6)$$

Donde términos correspondientes a los aportes de la morrena y del glaciar se detallan a continuación.

$$\text{Aporte de la morrena} : \frac{(S - S_g)}{S_g} ceP. \quad (7)$$

$$\text{Aporte del glaciar} : \frac{Q}{S_g} - \frac{(S - S_g)}{S_g} ceP. \quad (8)$$

Donde P es la precipitación sobre el glaciar, Q el caudal medido en la estación limnimétrica, S la superficie de la cuenca glaciar, S_g la superficie del glaciar y ce el coeficiente de escurrimiento del area no cubierta por el glaciar (=0.8, estimación empírica para una cuenca de alta montaña con vertientes muy empinadas).

2.5.3 Otros métodos

Entre otros métodos para el cálculo del balance de masa se puede mencionar el *método topográfico de terreno* (apto para glaciares pequeños como por ejemplo el Chacaltaya) donde se utilizan datos topográficos y un modelo digital del terreno. También el *método por restitución fotogramétrica* que

permite estimar los cambios de superficie y volumen de hielo a través del análisis de pares estereoscópicos compuestos por fotografías aéreas en fechas diferentes (varios años)

2.6 Zonas y parámetros importantes en el estudio de glaciares tropicales

El balance de masa obtenido a diferentes altitudes muestra un incremento del balance con la altura. De manera que, en la parte más baja del glaciar se tiene un balance negativo y en la parte más elevada se tiene un balance positivo. Así, a cierta altitud se tendrá un balance nulo, esta altitud es denominada **Altitud de la línea de equilibrio** (Equilibrium Line Altitude, ELA). La línea de equilibrio es aquella que dividirá al glaciar en dos zonas la **zona de ablación** y la **zona de acumulación** donde los balances de masa específicos son negativos y positivos respectivamente (Paterson, 1994). (Figura 2.4). Una vez identificada la ELA es posible calcular la proporción entre la superficie de la zona de acumulación y la superficie total del glaciar, valor conocido como **Proporción del Área de Acumulación** (Accumulation Area Ratio, AAR)

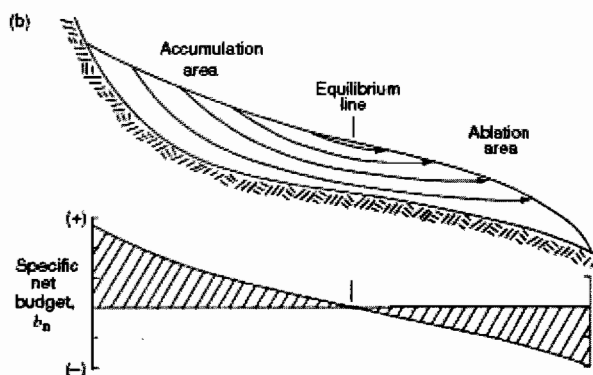


Figura 2.4. Sección transversal de un glaciar de valle típico. La línea de equilibrio divide al glaciar en una zona de ablación y otra de acumulación donde los balances de masa son negativos y positivos respectivamente (Paterson, 1994). En el esquema también se muestran las líneas de flujo y más abajo el balance específico neto en la superficie del glaciar (modificado de Hooke, [2005]).

En el presente trabajo también se propone la división del glaciar de acuerdo al rango altitudinal. Así, se define la **Zona Alta** como aquella comprendida entre los 5300-6000 msnm y la **Zona Baja** comprendida entre los 4900-5300 msnm. Esta división es hecha en virtud de las diferentes técnicas de medición (y los errores asociados) que se realizan en estas zonas y la representatividad con las zonas de acumulación y ablación respectivamente. Este aspecto será discutido con más detalles en el capítulo 5.

2.7 Aspectos Meteorológicos

2.7.1 Balance de energía para un glaciar

La ecuación del balance de energía en la superficie del glaciar está definida como sigue (Krauss, 1973):

$$R_n + H + LE + P = \Delta Q_M + \Delta Q_S \quad (9)$$

Donde R_n es la radiación electromagnética neta, H y LE son los flujos de calor turbulentos sensible y latente respectivamente, P es el calor suministrado por la precipitación. El término ΔQ_S corresponde a una variación de la reserva de calor sensible en el seno de un volumen en relación con una variación de la temperatura de la nieve/hielo que debe ser seca (sin agua líquida), ΔQ_M es la variación de la reserva de calor latente debido a la fusión (positivo) o congelación (negativo).

2.7.2 Radiación neta

La radiación neta o balance radiativo (R_n) es el balance de las radiaciones de longitud de onda corta incidente y reflejada (SW_{in} , SW_{out}), y de las radiaciones de longitud de onda larga incidentes y emitidas por la superficie (LW_{in} , LW_{out}):

$$R_n = SW_{in} - SW_{out} + LW_{in} - LW_{out} \quad (10)$$

Donde:

R_n : Balance de flujos ascendentes y descendentes de radiación electromagnética de corta y grande longitud de onda.

SW_{in} : Radiación electromagnética global (radiación solar directa y difusa en la atmósfera) ($0.3 < \lambda < 2.8 \mu m$).

SW_{out} : Radiación electromagnética de onda corta reflejada en la superficie considerada ($0.3 < \lambda < 2.8 \mu m$)

LW_{in} : Radiación electromagnética de grande longitud de onda emitida por la atmósfera ($5 < \lambda < 50 \mu m$).

LW_{out} : Radiación electromagnética de grande longitud de onda emitida por la superficie considerada ($5 < \lambda < 50 \mu m$).

O también,

$$R_n = SW_{in}(1 - \alpha) + LW_{in} + LW_{out} \quad (11)$$

Donde $\alpha \left(= \frac{SW_{out}}{SW_{in}} \right)$ es el albedo de la superficie nieve/hielo.

Eventualmente, el término LW_{in} puede escribirse como sigue:

$$LW_{in} = (\epsilon_a \sigma T_a^4) V_f + (\epsilon_{ss} \sigma T_{ss}^4) (1 - V_f), \quad (12)$$

Donde el primer y segundo términos corresponden a la radiación térmica emitida por la atmósfera y las superficies próximas al instrumento. ϵ_a es la emisividad de la atmósfera, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$), T_a es la temperatura del aire próxima al instrumento, ϵ_{ss} y T_{ss} son la emisividad y la temperatura de las superficies próximas al instrumento respectivamente, V_f es la proporción de un hemisferio imaginario centrado en el instrumento a 5150 msnm (estación SAMA): $V_f = 73\%$ (Wagnon, 1999).

De manera análoga para LW_{out} :

$$LW_{out} = \epsilon_s \sigma T_s^4, \quad (13)$$

Donde ϵ_s es la emisividad de la superficie nieve/hielo y T_s la temperatura de la superficie al nivel de la estación SAMA (5150 msnm)

2.7.3 Índice de nubes

Definimos el índice de nubes como $N = \frac{SW_{in}}{SW_{toa}}$ (14),

Donde SW_{extra} es la radiación solar de onda corta calculada en el tope externo de la atmósfera (Paltridge & Platt, 1976).

2.8 Contexto climático

Los trópicos

Hastenrath [1991] hace una revisión completa sobre las características de la región tropical y concluye que la misma está comprendida entre las latitudes 30°S y 30°N, englobando la mitad de la superficie terrestre. Sobre los trópicos, los procesos diurnos y las circulaciones locales son mucho más vigorosos que a latitudes más elevadas. La delimitación por los trópicos de Cáncer y de Capricornio tienen una justificación astronómica más no meteorológica. Ligeramente móviles con las estaciones las posiciones de los anticiclones subtropicales definen un límite natural de los trópicos. La atmósfera tropical está caracterizada por temperaturas elevadas y una fuerte humedad. Sin embargo, las masas de aire de origen y características tropicales pueden penetrar lejos en las medias latitudes a lo largo del verano.

La Zona de convergencia intertropical y las precipitaciones

El masivo Huayna Potosí se sitúa en la zona externa del trópico sur (16°15'S) caracterizado por una marcada estacionalidad de precipitaciones, un periodo de lluvias en verano y un periodo seco en invierno (esta estacionalidad se pone de manifiesto en el capítulo 4). La estacionalidad de la cobertura nubosa está ligada a la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ por Inter Tropical Convergence Zone), figura 2.1 [Vuille et al., 1998]. La ITCZ puede ser definida como una región de orientación este-oeste, a lo largo de la cual convergen los vientos Alisios del nor-este y del sud-este. El encuentro de los vientos Alisios cargados de humedad oceánica se traducen en movimientos ascendentes de las masas de aire que generan turbulencias y precipitaciones intensas.

2.9 ENSO

El fenómeno ENSO (El Niño Southern Oscillation) es una oscilación océano-atmósfera (variación de la presión atmosférica) a lo largo del Pacífico ecuatorial con consecuencias climáticas a nivel mundial. Dos fases han sido identificadas: La fase negativa o El Niño y la fase positiva o La Niña [Trenberth, 1997].

En condiciones normales (figura 2.5a), la circulación atmosférica en la región Ecuatorial del Pacífico, visto en un plano a lo largo del Ecuador, está compuesta por los vientos superficiales y los vientos de altura. Los vientos superficiales conocidos con el nombre de Alisios fluyen de Este a Oeste y transportan aire caliente y húmedo que convergen al Norte de Australia y sureste de Asia cargados de humedad en una zona donde la superficie del mar está relativamente caliente, (temperaturas por encima de 28°C , a veces de hasta 31.5°C), además en esta situación la diferencia en la Temperatura Superficial del Mar (TSM) es de alrededor de 8°C entre ambas zonas del Océano Pacífico.

Cuando esta masa de aire asciende, se forman las nubes de tipo cumulonimbus, típico en las regiones tropicales, que da origen a precipitaciones abundantes en Indonesia y Australia. A alturas más elevadas (tropósfera superior donde se produce la subsidencia, zona seca), el aire ya seco, retorna hacia el Este donde desciende y luego cierra el circuito. A esta circulación se le conoce con el nombre de *Circulación o Célula de Walker*.

Por otra parte el agua fría asciende desde las profundidades del océano hasta la superficie, frente a las costas de Sudamérica, en un proceso conocido como surgencia que es el *"afloramiento"* o *"upwelling"* de las aguas profundas hacia la superficie. Esta corriente ascendente es causada por el transporte de EKMAN (debida al efecto Coriolis por el cual las aguas superficiales se desvían hacia izquierda en el Hemisferio Sur) y por la acción de los vientos Alisios, que soplan desde el Continente hacia el centro del Océano y que alejan el agua superficial próxima al borde costero. El agua profunda mas fría emerge a la superficie para sustituir el agua desplazada.

Estas aguas profundas generalmente emergen desde profundidades menores de 100–200 metros, produciéndose así un aporte de nutrientes a las aguas superficiales empobrecidas por el consumo

biológico. Si bien el fenómeno puede ocurrir en cualquier parte del Océano, sus características más destacadas se presentan a lo largo de los bordes orientales de los Océanos (esto es en las costas occidentales de los Continentes)

Con el tiempo, los fuertes vientos que soplan en dirección oeste sobre el océano Pacífico producen una acumulación de agua superficial calentada por el Sol en la parte occidental del Pacífico Ecuatorial, cerca de Filipinas, Indonesia y Australia. Los científicos denominan a esta acumulación de agua *“deposito caliente”* o *“piscina caliente”*. Como resultado, el nivel del océano es de unos 50 a 60 cm. más alto en el Pacífico Occidental que en el Pacífico Oriental

La termoclina (Capa en que la temperatura desciende bruscamente con la profundidad en el cuerpo del agua, es permanente en los Océanos ocurre entre 200 y 1000 metros de profundidad) se constituye en el límite de las aguas superficiales templadas homogéneas y las aguas profundas frías y más densas. En la zona de Indonesia y Australia se encuentra a unos 200 metros, mientras que en la zona de Sudamérica a unos 50 metros de profundidad respectivamente. Asimismo *la presión atmosférica es mayor* en la región de Sudamérica, y *menor* en la región de Filipinas, Indonesia y Australia.

Durante estas temporadas, en las costas occidentales de Sudamérica, las aguas del Pacífico se encuentran enriquecidas por sales minerales que fomentan la producción del plancton, el alimento principal de la fauna marina, lo que incrementa la población de peces y la pesca en esa región.

Para la situación “El Niño” (figura 2.5b) los vientos Alisios declinan en razón de la disminución del gradiente de presión entre el Pacífico oriental y occidental. A causa de tal disminución de los vientos Alisios, un desequilibrio se produce y la piscina caliente se desplaza hacia la zona central y oriental del océano Pacífico. En consecuencia, la disminución del gradiente de presión entre Tahití (Polinesia) y Darwin (norte de Australia) continúa, disminuyendo aún más los vientos Alisios e incrementando el ingreso de aguas cálidas hacia el continente sudamericano. El ciclo dura en promedio 18 meses.

En situación la niña (figura 2.5c) es observado una magnificación de la situación “normal”, con la intensificación del upwelling ecuatorial, las aguas llegan a ser más frías, las precipitaciones al oeste se

intensifican y a la inversa, la sequedad, se instala a lo largo de las costas sudamericanas. En conjunto, con los vientos Alisios fortalecidos, las precipitaciones provenientes del atlántico y de la cuenca amazónica se distribuyen al centro del continente americano según un mecanismo complejo.

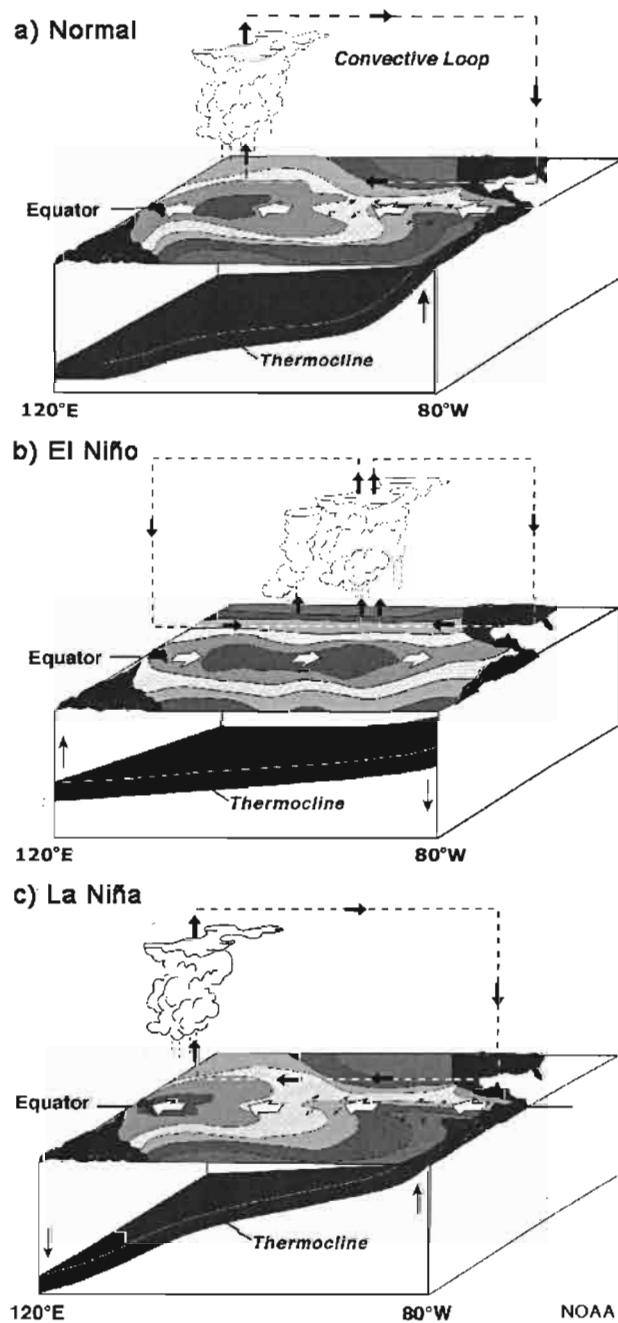


Figura 2.5: Fenómeno ENSO. El Pacífico ecuatorial: a) en situación « Normal », b) en

situación « El Niño » et c) en situación « La Niña ». Las flechas negras blancas y rojas representan los desplazamientos de masas de aire ascendentes y descendentes como los desplazamientos de aguas superficiales y profundas del océano Pacífico respectivamente (Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)

Varios autores analizaron la relación entre eventos ENSO y la variabilidad climática interanual en el continente sudamericano. Aunque estos estudios ayudaron a mejorar la comprensión de la influencia de los eventos ENSO a gran escala, no fueron suficientes para explicar las características espaciales de los mismos en regiones como los Andes Centrales, donde su señal es espacialmente incoherente (Vuille, 1999). Varios autores han reportado un bajo promedio de la precipitación y un incremento en las temperaturas asociadas con la fase negativa de la oscilación sur. Un balance de masa negativo debido a un aumento de temperatura y una disminución de precipitación en el glaciar Zongo (Franco et al., 1995) podrían ser atribuidas a anomalías climáticas causadas por el Niño. Ronchail [1999] mostró que en el altiplano boliviano la baja frecuencia de precipitación promedio en la estación húmeda (Ene-abr) está relacionada con la fase negativa de la Oscilación Sur (El Niño), pero también hace énfasis en que algunos periodos con importante déficit de precipitación sobre el altiplano no están relacionados con el fenómeno ENSO.

A continuación se describen brevemente algunos índices desarrollados para describir el fenómeno ENSO.

SOI(Southern Oscillation Index)

El SOI está diseñado para medir la fuerza y la fase de la oscilación del Sur. El SOI se calcula utilizando diferencias de presión entre Tahití (Polinesia Francesa) y (Darwin, Australia). Estas estaciones son utilizadas debido a su largo registros de datos. Durante episodios de El Niño/La Niña el SOI presenta valores negativos/positivos (figura 2.6).

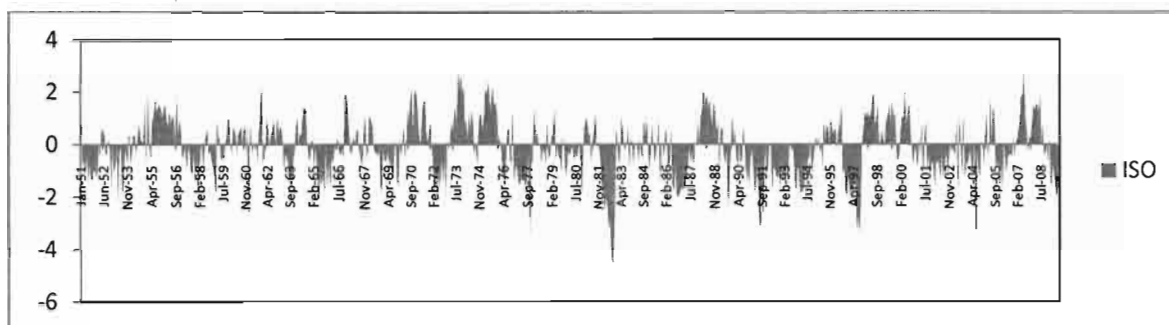


Figura 2.6. Anomalía del Índice de oscilación sur (SOI) desde enero/1951 hasta abril/2010.

MEI (Multivariate ENSO Index)

El MEI es obtenido a partir de 6 variables medidas sobre el pacífico tropical. Estas seis variables son: presión a nivel del mar, viento zonal y meridional, las componentes de la superficie eólica, temperatura superficial del mar, temperatura del aire, y la fracción de cobertura nubosa. Los valores negativos de la MEI representan fase fría del ENSO (Niña), mientras que los valores positivos del MEI representan la fase cálida del ENSO (El Niño) (figura 2.7).

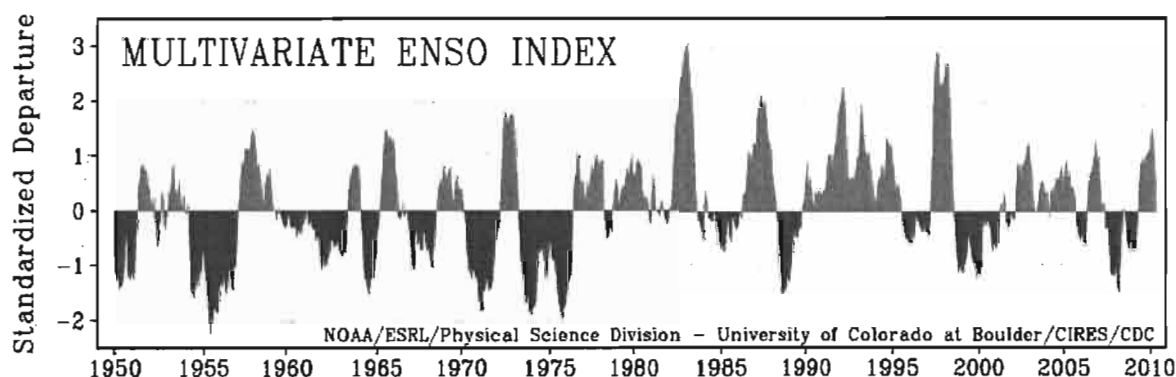


Figura 2.7. Índice ENSO Multivariante (MEI) desde enero/1951 hasta abril/2010. (Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA).

Niño 1+2, 3,4

Los índices NIÑO 1+2, 3 y 4 son obtenidos a partir de la temperatura de la superficie del océano. Estos índices corresponden a las regiones de la figura 2.8 y la serie temporal de los mismos se muestran en la figura 2.9.

La comunidad científica Internacional, para el monitoreo y estudio del Fenómeno de El Niño, y además por la gran extensión del Océano Pacífico, establecen y clasifican la existencia de regiones (áreas) en el Océano Pacífico Ecuatorial (Figura 1.9), que son las siguientes:

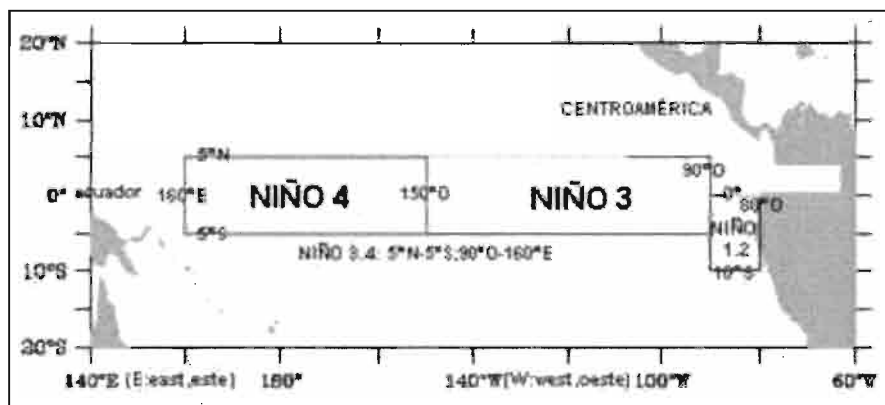


Figura 2.8. Regiones en las que se divide el Océano Pacífico Ecuatorial para estudiar el Fenómeno ENSO.

- La región 1 y la 2, que afectan a Sudamérica.
- La región 3, que impacta en México y los Estados Unidos.
- La región 4, que afecta a varios Países del Continente Asiático.

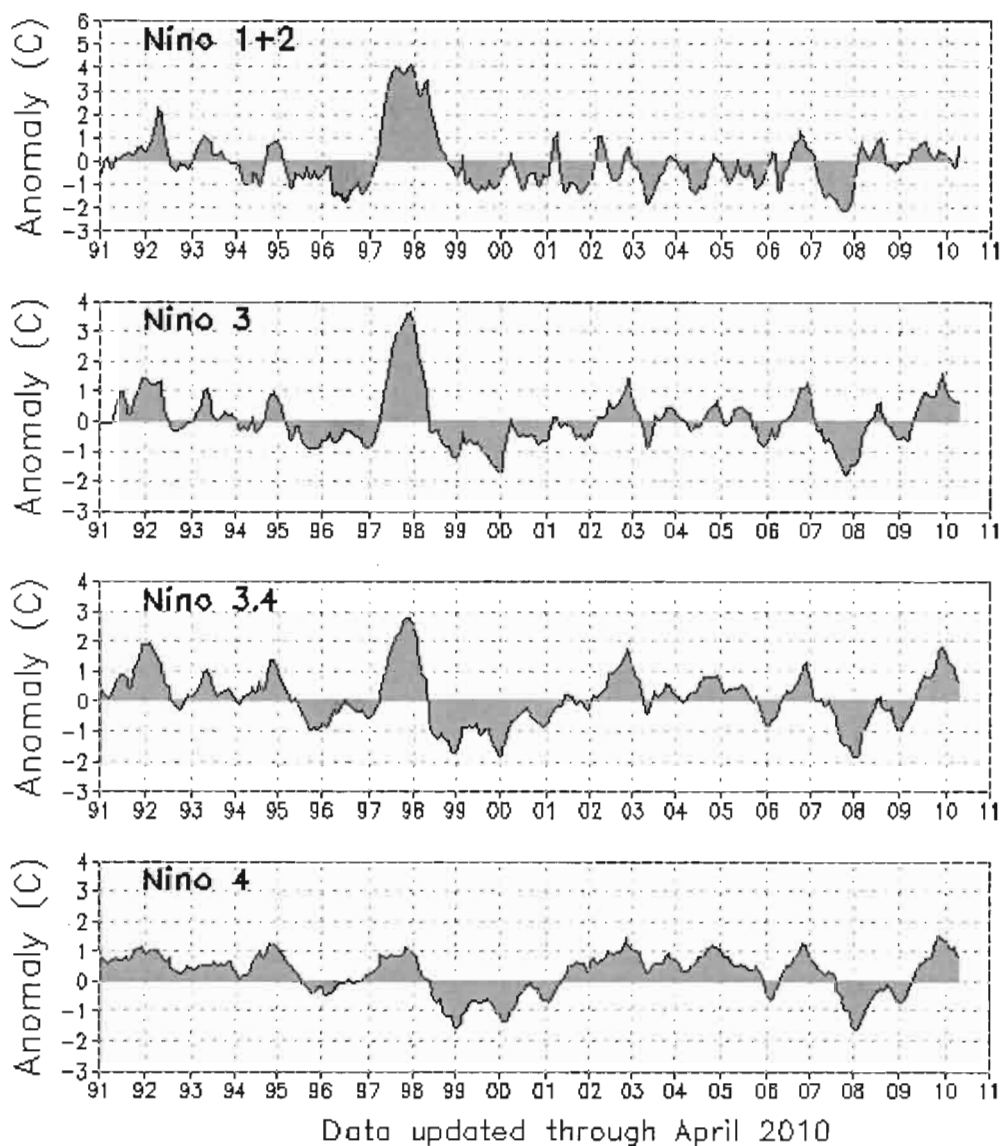


Figura 2.9. Anomalías Indices Niño 1+2 (0°N - 10°S)(90°O - 80°O), Niño 3 (5°N - 5°S)(150°O - 90°O), Niño 4 (5°N - 5°S) (160°E - 150°O) y Niño 3.4 (5°N - 5°S)(170°O - 120°O). (Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA).

Capítulo 3

3 Materiales y equipos sobre el glaciar.

En el presente capítulo se describe el equipo instalado en la cuenca glaciar y la metodología de medición. En este sentido se comienza con la precipitación, luego la ablación, luego la acumulación y finalmente la meteorología local.

La figura 3.1 muestra el mapa de la cuenca glaciar, las isolíneas altitudinales, los pluviómetros totalizadores y las diferentes estaciones y sensores instalados.

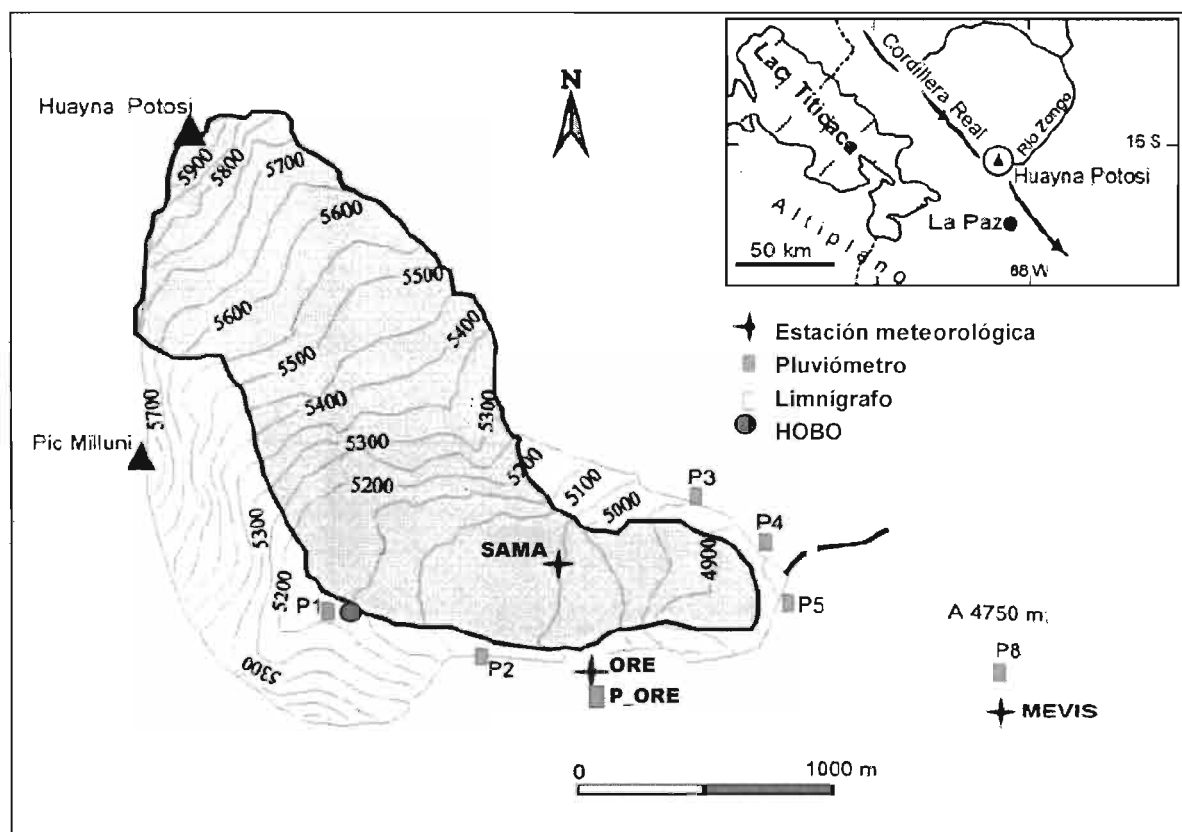


Figura 3.1. Mapa de la cuenca Glaciar y los dispositivos instalados en el mismo. (Modificado de Sicart [2002])

3.1 Medida de la precipitación

Los pluviómetros totalizadores están ubicados sobre las morrenas laterales en la parte baja del glaciar entre los 4750 y 5165 msnm (figura 3.1 y figura 3,2). Las características de los mismos se indican en la tabla siguiente:

Tabla 3.1. Características de los pluviómetros totalizadores existentes en la cuenca glaciar.

pluviómetro	diámetro(cm)	altura(cm)	altitud de localizacion(m)	
P_ORE	50.5	122	5050	morrena derecha
P1	50.5	122	5165	morrena derecha
P2	50.5	102	5080	morrena derecha
P3	50.5	122	4945	morrena izquierda
P4	50.5	122	4860	morrena frontal
P5	50.5	122	4855	morrena frontal
P8	50.5	102	4750	plataforma

Los pluviómetros contienen en su interior una mezcla de aceite y alcohol etílico (2L y 1L respectivamente) para evitar la evaporación del agua contenida en el pluviómetro. A pesar de esto la precipitación solida medida en los pluviómetros es generalmente deficiente [Larson y Peck, 1974; 2001; Sicart et al.,2007].

Debe indicarse también el funcionamiento de dos pluviómetros de mayor precisión: el primero ubicado dentro de la estación ORE (pluviómetro de medición por pesada donde un sistema de balanza registra la masa cada 15 min. La principal ventaja de este tipo de pluviómetro es la capacidad de registrar precipitación sólida o líquida o una mezcla de ambos) y el segundo pluviómetro ubicado en la plataforma, donde se realizan lecturas diarias de altura del pluviómetro por un observador de la COBBE.



Figura 3.2. Pluviómetros totalizadores P_ORE (izquierda) y P3 (derecha) localizados sobre la morrena lateral derecha e izquierda del glaciar respectivamente.

3.2 Medida de la ablación.

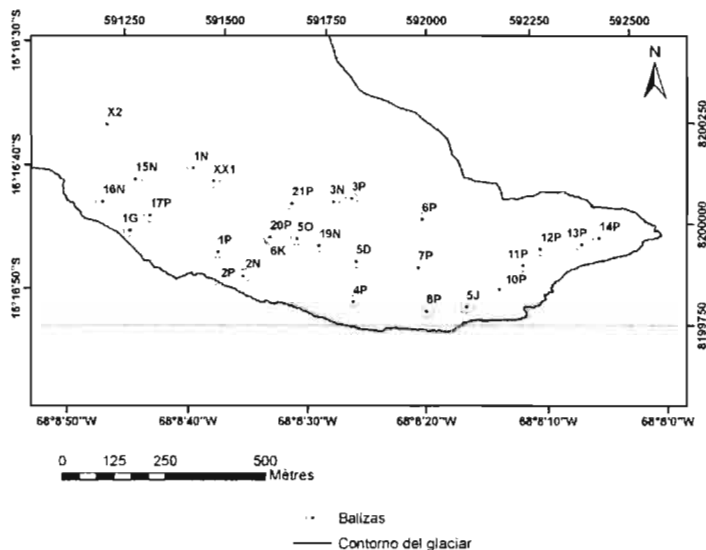
La medición de la ablación es hecha mediante balizas, las cuales están introducidas hasta diez metros debajo de la superficie, de manera que estas se desplacen junto con el glaciar y permitan el registro de la emergencia mensualmente.

3.2.1 Instalación de balizas

Para medir la ablación se dispone una red de balizas distribuidas en la zona baja del glaciar, donde cada baliza está formada por 5 tubos PVC de 2m de longitud y 1 pulg de diámetro (ver figura 3.3). Los tubos están unidos en los extremos con una cuerda para evitar la pérdida de la misma (son reutilizables).



(a)



(b)

Figura 3.3. (a) Baliza lista para ser instalada a 5050 msnm. (b) Red de balizas instaladas en el glaciar Zongo en el periodo 2007-2008.

La instalación de las balizas en el glaciar se realiza con la sonda de perforación para hielo Heucke (Véase los detalles de la sonda en el anexo A1) que funde el hielo gracias a la presión de vapor de agua que la sonda expulsa.

El procedimiento para la instalación de una baliza es el siguiente:

Primero se encuentra un lugar donde colocar la baliza (de preferencia un lugar plano, sin grietas y sin peligro de avalanchas de rocas), después, se llena el tanque con agua (max. 5l), a continuación se enciende el mechero y se espera aprox. 45 min hasta que el agua contenida en el tanque hierva. Luego se abre el grifo de vapor y se verifica la salida de vapor de la sonda, se dispone de manera vertical y sin ejercer presión (para no obstruir el extremo de la sonda) se controla que la sonda perfora los 9 metros previstos. Una vez logrado esto se retira rápidamente la sonda y se coloca inmediatamente la respectiva baliza.

3.2.2 Medición de balizas

La medición de la emergencia (z) se realiza a fin de mes ó a más tardar en los primeros días del mes siguiente. Esta medición va acompañada de la medición de la altura de nieve (y) con ayuda de una sonda graduada para nieve dentro de un círculo de $\frac{1}{2}$ m de diámetro en la vecindad de la baliza (se considera el valor más representativo) (Francou & Pouyaud, 2004). Como es conocida la longitud de la baliza es suficiente medir z e y para el cálculo del balance de masa (cf. figura 2.3, ecuación 4).

3.3 Medida de la acumulación

Se trata más bien de la acumulación neta, pues representa el balance entre la cantidad de agua sólida precipitada (nieve, escarcha) y su ablación por erosión mecánica (efecto del viento), sublimación y fusión (como resultados del balance energético).

La medición de la acumulación se realiza por lo general al final de la estación húmeda (mayo o junio para evitar pérdidas debido a sublimación) y al final del año hidrológico (agosto). Se utiliza un perforador manual PICO (Polar Ice Coring Office), véase figura 3.5. La perforación se realiza hacia abajo ($\vec{g}$) y se van extrayendo las muestras (figura 3.7) hasta identificar la capa basal (capa de polvo color oscura que corresponde al nivel sobre el cual va a acumularse la nieve a partir del inicio del ciclo hidrológico). Luego de identificar la capa basal, se miden la longitud de acumulación (profundidad) y la densidad (masa/volumen) de diferentes porciones de la muestra de hielo. Cabe notar que la capa basal también puede calcularse a partir de un grafico de densidad en función de la profundidad mediante la cual también puede identificarse la capa basal.

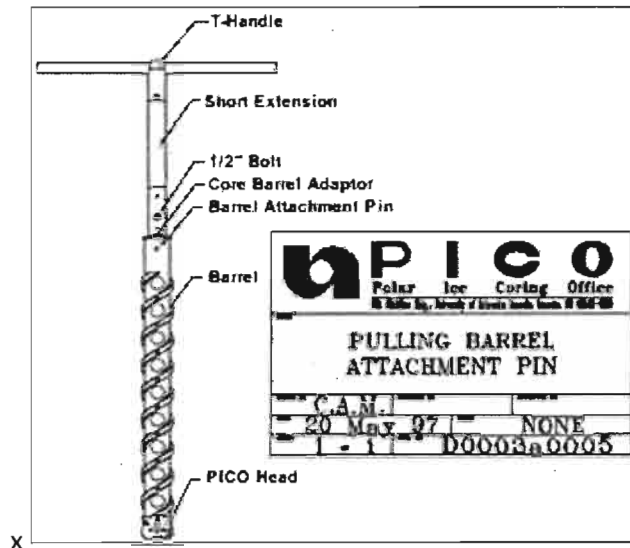


Figura 3.4. Estructura de un PICO (Polar Ice Coring Office) con una corta extensión. Fuente: Engineering & Science Research/support Facility, University of Nebraska).

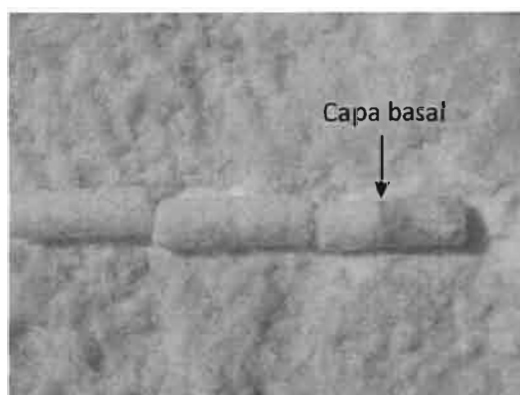


Figura 3.5. Muestra de hielo obtenida con el instrumento PICO en el glaciar Zongo en mayo de 2009 a 5800 msnm. En la misma puede distinguirse la capa basal.

3.4 Estaciones Meteorológicas.

Desde el inicio del programa hasta la culminación del presente trabajo se han realizado el montaje y desmontaje de estaciones meteorológicas con propósitos determinados (Estudios de flujos energéticos, altura de nieve, etc.) A fin de sintetizar esta información, la tabla 3.2 muestra las variables meteorológicas medidas por una determinada estación. Así mismo, la figura 3.6 muestra un esquema de la disponibilidad de las estaciones meteorológicas en la cuenca glaciar para el periodo estudiado.

Tabla 3.2. Síntesis de variables medidas en las diferentes estaciones meteorológicas: Temperatura (T), Humedad Relativa (HR), Radiación de onda corta (SW), radiación de onda larga (LW), Radiación neta (R), V velocidad del viento, albedo (α).

Nombre de la estación	Variables medidas									
	Altitud (msnm)	T	HR	SW (in)	SW (out)	LW (in)	LW (out)	R (neta)	V	α
MEVIS(lagunas)	4750	✓	✓	✓					✓	
ORE	5050	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
SAMA 1	5050	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	v	
HOBO (Morrena)	5165	✓	✓							
Cr10-98(Estacion Meteorologica a 5150m)	5150	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
SAMA	5040	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Estación Meteorológica a 5500m	5500	✓		✓	✓			✓	✓	✓
thermographe à bande papier	4750	✓								
Station Campbell 21X	5150	✓	✓	✓	✓			✓	✓	
Estación Campbell Cr10	5150	✓							✓	✓
Estación meteorológica portable	5025	✓	✓	✓	✓				✓	✓

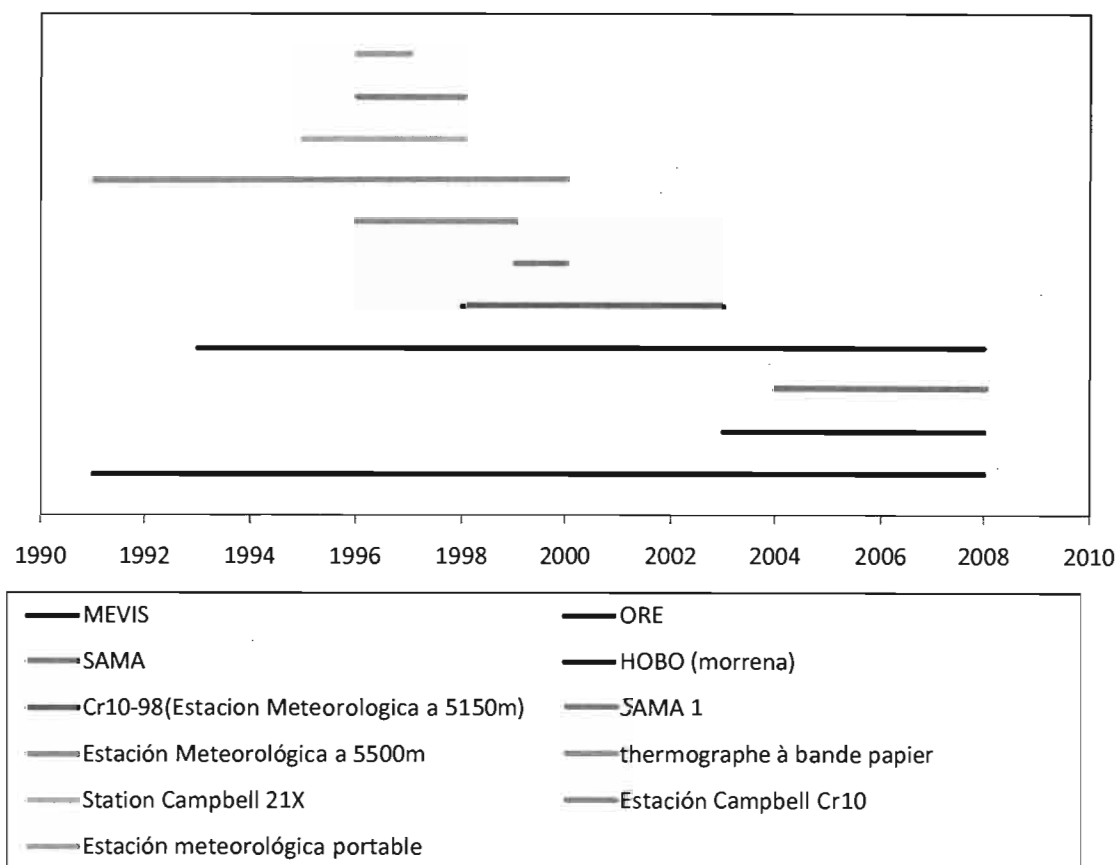


Figura 3.6. Disponibilidad de las estaciones meteorológicas en la cuenca glaciar. Todas excepto la estación MEVIS y la ORE se encuentran sobre el glaciar.

Las estaciones de las figuras 3.7 – 3.10 (estaciones MEVIS, SAMA, ORE y sensor HOBO (morrena). Más detalles en el anexo, A2), que en la actualidad están funcionando, guardan registros de cuatro años en común así que se vio interesante hacer el análisis en estas estaciones en el periodo de tiempo en común (2004-2008). El capítulo siguiente trata este aspecto.



Figura 3.7. Estación meteorológica MEVIS localizada en la plataforma a 4750msnm.



Figura 3.8. Estación meteorológica SAMA localizada sobre el glaciar a 5050 msnm.



Figura 3.9. Estación meteorológica ORE localizada sobre la morrena lateral derecha del glaciar a 5050 msnm.



Figura 3.10. Sensor HOBO contenida en la caseta blanca (junto al pluviómetro totalizador P1) localizada sobre la morrena lateral derecha del glaciar a 5150 msnm.

Capítulo 4

4 Condiciones climáticas locales

La sección 2.8 trata sobre las condiciones climáticas de la región tropical externa. A partir de ello, en el presente capítulo se precisan las condiciones pluviométricas y meteorológicas en la cuenca glaciar, principalmente a escala mensual que es la escala que retiene nuestra atención. En una primera parte se define la estacionalidad en el año hidrológico a partir de las mediciones pluviométricas mensuales de toda la cuenca glaciar en el periodo en estudio (1993-2008). En una segunda parte se describe y analiza la meteorología local de los últimos 4 años en las estaciones meteorológicas SAMA, ORE, MEVIS y el sensor HOBO (cf. figura 3.1 para la ubicación de los dispositivos). Se considera el mencionado periodo porque las estaciones no son cambiadas de lugar, lo que proporciona interesante información a tres diferentes altitudes.

4.1 Precipitación y estacionalidad

Para el año hidrológico 2007-2008 el ciclo anual muestra de septiembre a diciembre la instalación progresiva de la estación de precipitación (con un aumento progresivo de las intensidades y frecuencias de precipitación). El mes de enero es el mes con mayor precipitación. Los meses de diciembre a marzo en el curso de los cuales llueve 2 de 3 días concentran más del 50% de la precipitación anual. En mayo el paso al periodo de muy baja precipitación es muy abrupto y en el mismo se producen algunos días con precipitación de baja intensidad (Figura 4.0).

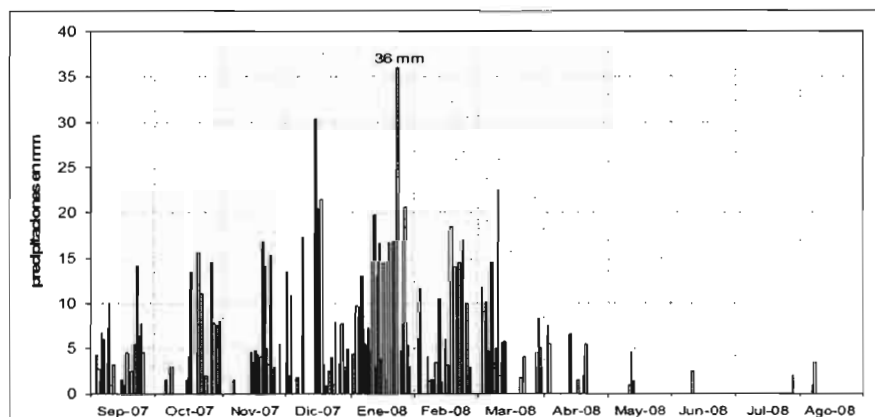


Figura 4.0 Precipitaciones diarias medidas por el pluviómetro P_4750 localizado en la plataforma para el año hidrológico 2007-2008 (fuente: Ginot et al [2009]).

A fin de establecer una estacionalidad en el transcurso del año hidrológico para el periodo de estudio (1993-2008) La figura 4.1 muestra el promedio mensual de los pluviómetros totalizadores localizados en la cuenca glaciar. De acuerdo con esta figura 87% de la precipitación tiene lugar entre octubre y abril y 66% entre diciembre y marzo. Durante el periodo de octubre-abril, debido a la intensa evaporación por encima de la Amazonía, las masas de aire que se desplazan de este a oeste a lo largo del ITCZ están fuertemente cargadas en humedad. Cuando ellas sobrepasan la barrera de los Andes, se elevan, su temperatura disminuye, la presión de vapor saturada cae y por lo tanto se produce precipitación [Vuille et al 1998]. Los máximos de precipitación tienen lugar en el rango altitudinal 1000-2000 msnm donde no es raro tener precipitaciones anuales que sobrepasan los 3m de agua. A continuación, el gradiente de precipitación con la altitud se vuelve negativo porque las masas de aire que todavía se elevan ya han perdido la mayor parte de su contenido en vapor de agua. Así, a nivel de la plataforma a 4750 msnm los valores anuales son del orden de 1 m de agua (0.938 m en el periodo 1993-2008, figura 4.1). Durante la estación seca se registra una precipitación anual del 3 %; en este periodo, Bolivia está bajo la influencia de anticiclones tropicales que mantienen una fuerte estabilidad de la capa atmosférica límite sobre los andes bolivianos [Ribstein et al., 1995; Hardy et al., 1998; Vuille et al., 1998].

Para análisis posteriores, se considerará el año hidrológico dividido en tres periodos: el **húmedo** (diciembre-marzo), el **seco** (mayo-agosto) y el de **transición** (abril, septiembre-noviembre). Esta misma división también fue planteada por Roche [1992] para la región boliviana.

La variabilidad, expresada a través de la desviación estándar, es máxima en el periodo húmedo, moderada en el periodo de transición y mínima en el periodo seco (Figura 4.1)

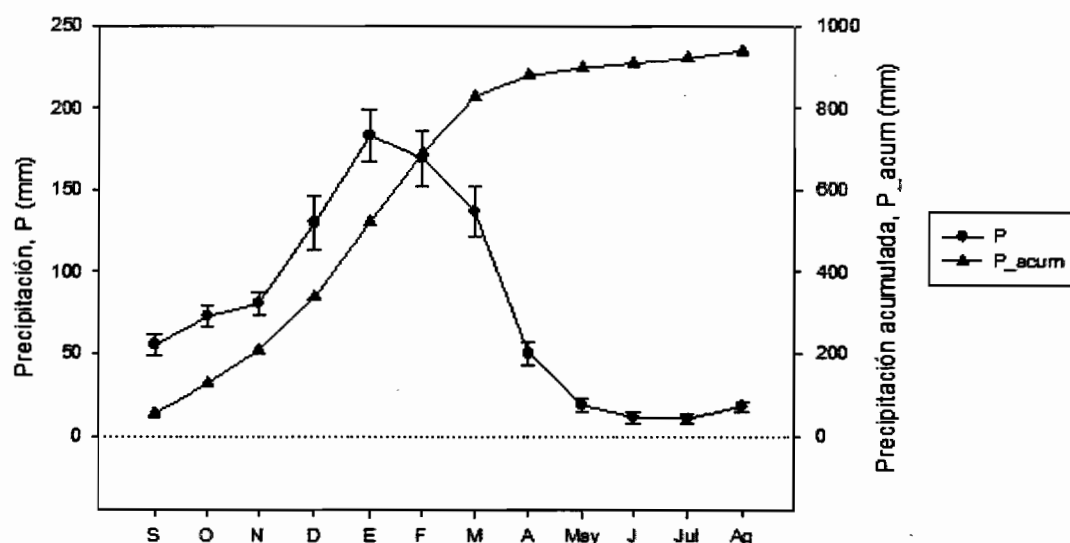


Figura 4.1. Distribución mensual de precipitación (promedio mensual del periodo 1993-2008 utilizando los pluviómetros totalizadores P1, P2, P3, P4, P5, P8 y P_ORE). Los círculos representan los valores mensuales de precipitación con sus respectivas variabilidades asociadas. Los triángulos representan la precipitación acumulada en cada mes.

4.2 Condiciones meteorológicas en la cuenca glaciar

En esta sección se hace énfasis en la meteorología local tomando en cuenta las estaciones ORE, SAMA, MEVIS y el sensor HOBO (véase la figura 3.1 para localizar los dispositivos). Se realiza el análisis para el periodo en el cual las estaciones registran mediciones simultáneas (2004-2008). Así mismo, se discuten otros trabajos pertinentes a la sección.

4.2.1 Temperatura, humedad relativa y viento

El año hidrológico comienza con un establecimiento progresivo en la frecuencia de precipitación hasta llegar a un máximo en los meses de enero o febrero para luego disminuir de manera más abrupta. Este comportamiento es relativamente proporcional a la temperatura y humedad relativa e inversamente proporcional al viento (figura 4.2). En el caso de la temperatura se observa un marcado gradiente altitudinal negativo (en promedio $-0.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ figuras 4.2 (a) y (b)). Para este cálculo no se consideran los datos de la estación sobre el glaciar, SAMA, debido a las condiciones muy locales (Aspecto que se trata en el capítulo 8). A partir de agosto de 2007 se observa una disminución

en los valores de temperatura registrados por la ORE debido a que la estación no presenta ventilación (robo de la estación en nov/06 y re-instalación en jul/07; Perroy [2008]). El gradiente térmico obtenido presenta un error relativo porcentual de 29% [Brasseur, 1982].

Con respecto a la humedad relativa y al viento, hacemos notar la marcada estacionalidad y nos evitamos el cálculo de un gradiente altitudinal por contar únicamente con dos puntos de medición (MEVIS y SAMA), véase las figuras 4.2 c y d. La estación SAMA registra un comportamiento más local de estas variables en el periodo seco debido posiblemente a la formación de penitentes en la superficie del glaciar [Lliboutry, 1964].

Durante el día, Según Sicart [2005], en la estación húmeda el viento de valle del este o sud-este prevalece, mientras que por la noche, el viento del nor-oeste que desciende sobre el glaciar es observado (figura 4.3). El viento del este prevalece la mayor parte del día en la estación seca, y solo unas horas por la tarde en la estación húmeda.

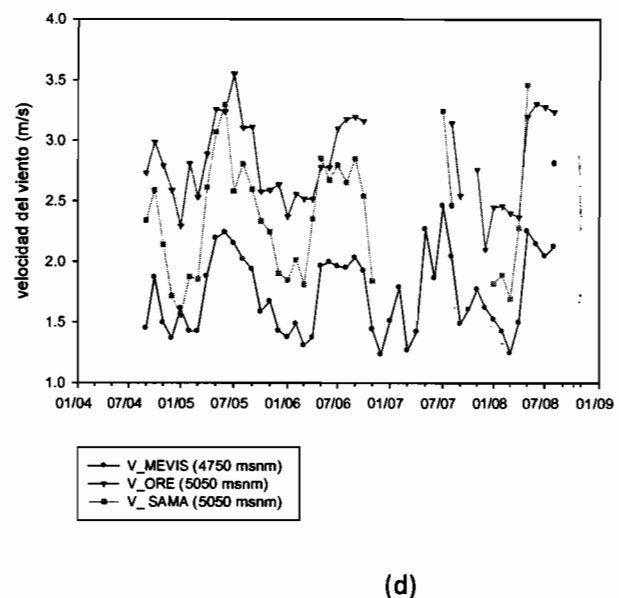
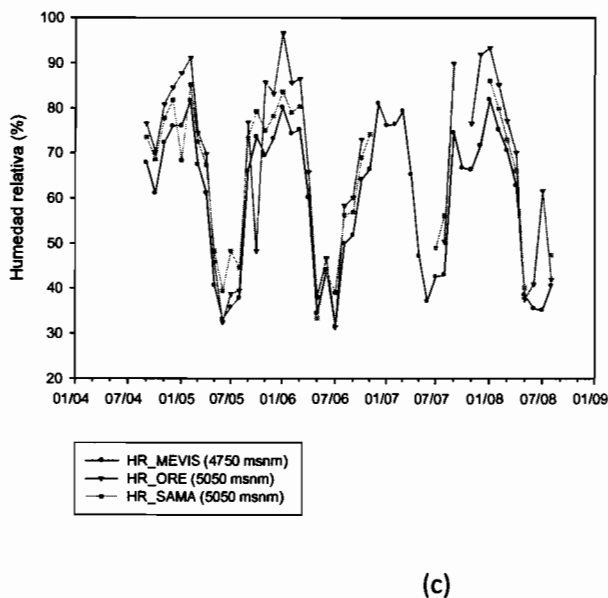
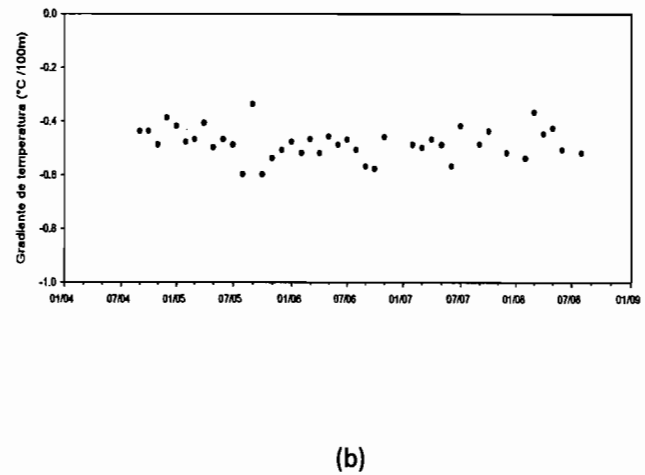
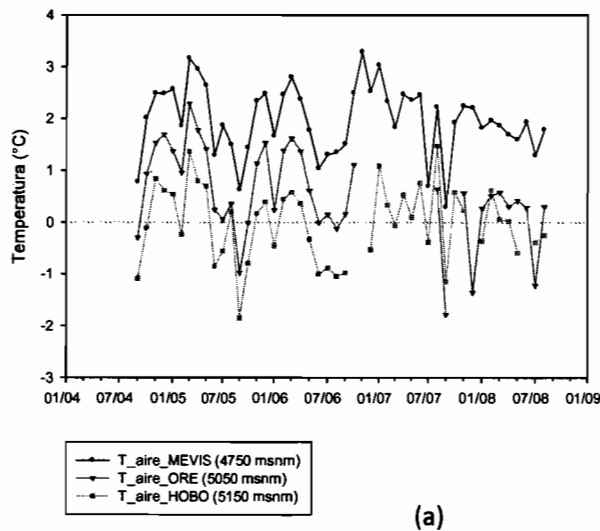


Figura 4.2. Promedios mensuales de algunas variables meteorológicas a diferentes altitudes para el periodo 2004-2008. En la leyenda, entre paréntesis, se indica la altura correspondiente de los dispositivos. Recuérdese que solamente la estación SAMA se encuentra sobre el glaciar.(a) Temperatura del aire. (b) Gradiente de temperatura cada 100 metros obtenida a partir de los datos de las estaciones en (a). (c) Humedad relativa. (d) Velocidad del viento.

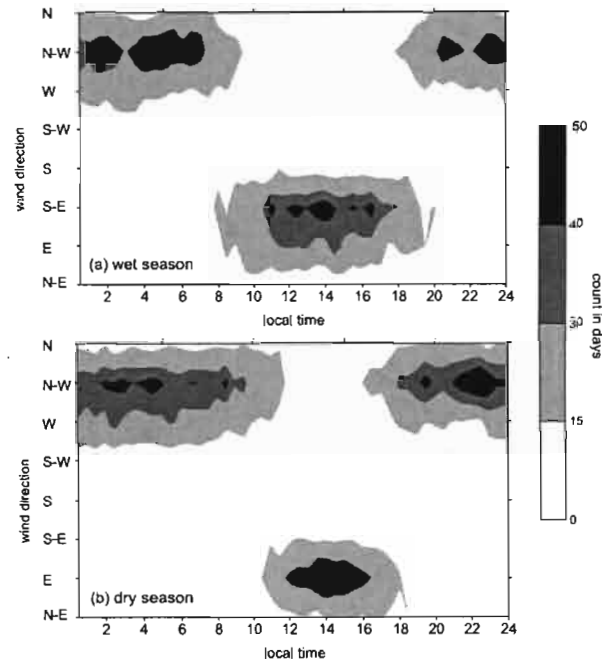


Figura 4.3. Dirección del viento a lo largo del día. Se consideran valores semi-horarios a 5150 msnm sobre el glaciar durante el año hidrológico 1999-2000. Fuente: [Sicart et al. 2003].

4.2.2 Radiación de onda corta incidente, de salida y albedo

En la figura 4.4 a, presentamos la radiación solar incidente teórica en el tope de la atmósfera para los 16° de latitud sur, R_{extra} , (Paltridge & Platt, 1976) que presenta una marcada estacionalidad anual, al comparar ésta con la radiación medida en los instrumentos MEVIS, ORE y SAMA observamos que en el verano austral SW_{extra} es máxima, sin embargo, a causa de la frecuente presencia de nubes en este periodo, la absorción por la atmósfera y la sombra de montañas de alrededor, cerca de la mitad de la radiación solar extra-terrestre es medida por los instrumentos (225 de 450 W/m^2) (figura 4.4a). Por otra parte, en el invierno austral los instrumentos registran el mismo promedio que en la estación húmeda (lo que representa $\frac{3}{4}$ de SW_{extra} en este periodo (225 de 300 W/m^2). Debido a que un cielo sin nubes atenúa menos la radiación solar.

Es importante indicar aquí que los valores de radiación de onda corta medidos por los tres instrumentos son similares (MEVIS: $\text{prom}=199.0 \text{ W/m}^2$, $s=21.7 \text{ W/m}^2$; ORE: $\text{prom}=221.1 \text{ W/m}^2$, $s=27.9$; SAMA: $\text{prom}=213.5$, $s=21.3$), de manera que los errores porcentuales relativos a la estación SAMA son en promedio de -5% y 6% para las estaciones MEVIS y ORE respectivamente en el periodo 2004-2008; atribuimos este hecho a la cobertura local de cada estación. Estos resultados vienen a bien validar los datos mensuales de la estación sama así como el de poder establecer una serie temporal más larga con los datos de la estación MEVIS.

Con respecto a los valores mensuales de la radiación de onda corta de salida en la figura 4.4.b puede observarse que los valores registrados en la estación fuera del glaciar son inferiores a aquellos registrados sobre el glaciar. también se observa mayor variabilidad en la estación SAMA (SAMA: promedio igual a 115.46 W/m^2 , $s=33 \text{ W/m}^2$; ORE: promedio igual a 76.81 W/m^2 , $s=20.78 \text{ W/m}^2$), hecho que está directamente relacionado con las características de las superficies medidas por las respectivas estaciones: el glaciar a la altura de la línea de equilibrio presenta un albedo promedio mensual de 0.56 ($s=0.18$) con una variabilidad importante determinada principalmente por la nieve fresca o hielo "sucio" en su superficie. Por otra parte en la morrena se tiene un albedo promedio de 0.36 ($s=0.12$) con una menor variabilidad a causa de la rápida fusión de la nieve fresca.

Los valores mensuales de SW_{out} para los meses abril-julio del año 2006 donde $\text{SW}_{\text{out}}(\text{SAMA}) < \text{SW}_{\text{out}}(\text{ORE})$ no corresponden a la explicación anterior y son atribuibles a un error del instrumento o el estado de hielo sucio y agua de fusión en la superficie considerada para la medición (En la hoja de visitas figuran estos aspectos). La anomalía para estos meses es también reflejada en los valores del albedo.

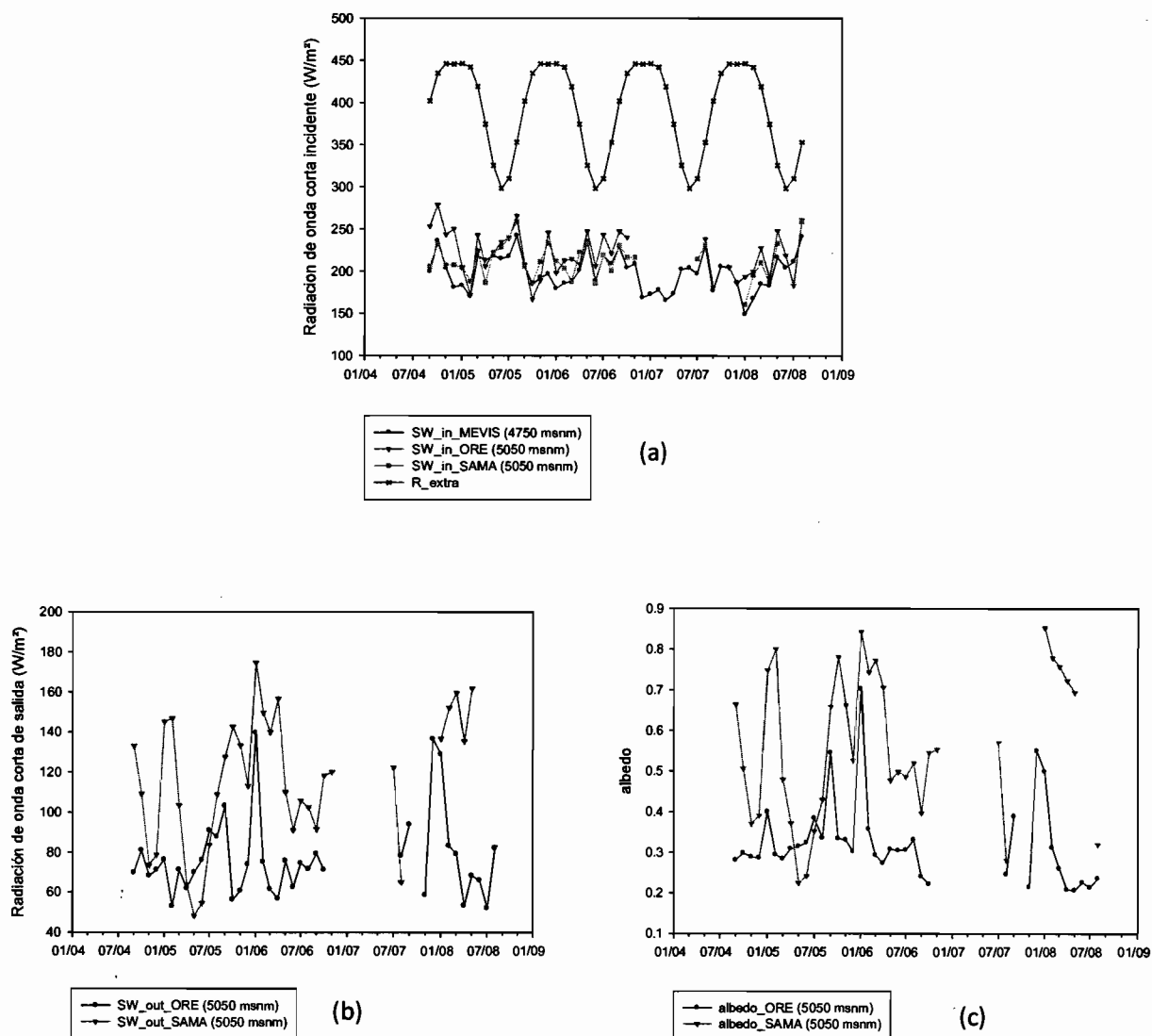


Figura 4.4. Promedios mensuales de la radiación de onda corta medidas a diferentes altitudes durante el periodo 2004-2008. (a) Radiación incidente, SW_in. (b) Radiación de salida, SW_out. (c) albedo.

4.2.3 Radiación de onda larga

Los promedios mensuales de la radiación de onda larga incidente LW_{in} medida en los instrumentos sobre y fuera del glaciar muestran un comportamiento muy parecido (SAMA: $prom=238.12W/m^2$, $s=41.71W/m^2$; ORE: $prom=241.78$, $s=41.03$). Así mismo se observa una marcada estacionalidad que ilustra la dependencia de LW_{in} con la cantidad de vapor de agua, la temperatura y la cobertura de nubes. Los valores anteriores al 2/2/2005 en la estación ORE presentan un problema en el programa de obtención de datos que no es bien comprendido (figura 4.5a).

La figura 4.5b muestra una marcada diferencia en los valores de LW_{out} medidos por las estaciones SAMA y ORE (SAMA: $promedio= 305.30W/m^2$, $s=14.84 W/m^2$; ORE: $promedio=325.57$, $s=7.41$). La principal diferencia entre ambos instrumentos es la temperatura en la superficie (la emisividad del hielo y el granito son parecidas: 0.97 y 0.96 respectivamente [Hooke, 2005]). Los valores mensuales febrero-marzo/2006 presentan un comportamiento bastante inusual en la estación SAMA, los valores semi-horarios presentan valores inusualmente elevados y en las hojas de visita se hace referencia al estado "sucio" del hielo.

La figura 4.6 muestra la temperatura de la superficie del glaciar a escala horaria y la LW durante el año hidrológico 1999-2000. A 5060 msnm la superficie alcanzó las condiciones de fusión casi todos los días del año (figura 4.6.a). La superficie glaciar permaneció cercana a las condiciones de fusión durante el día y la noche, de enero a marzo. En la estación seca, la amplitud diaria de la temperatura en la superficie fue máxima (10-15°C) y la fusión en la superficie ocurrió solamente durante pocas horas en la tarde. En las noches un incremento de LW_{in} debido a la presencia de nubes causa un incremento de la temperatura superficial del glaciar. Un déficit en la radiación nocturna ($LW<0$) prolongado en la estación seca es balanceado por la energía incidente de los flujos turbulentos y/o por el enfriamiento debajo de la superficie [Sicart et al., 2005] (figura 4.6.b). En las noches la temperatura superficial fluctúa considerablemente en comparación a la radiación neta de onda larga, mientras que una vez que la temperatura de la superficie alcanza su límite superior a 0°C durante el día, como se dijo anteriormente la radiación neta de onda larga varía con SW_{in} y esta con la cobertura nubosa. Como resultado, LW es máxima durante las tardes nubosas de la estación húmeda (figura 4.6 b). LW es mínima en la estación húmeda, cuando LW_{in} es débil y en las tardes cuando la temperatura de emisión es máxima.

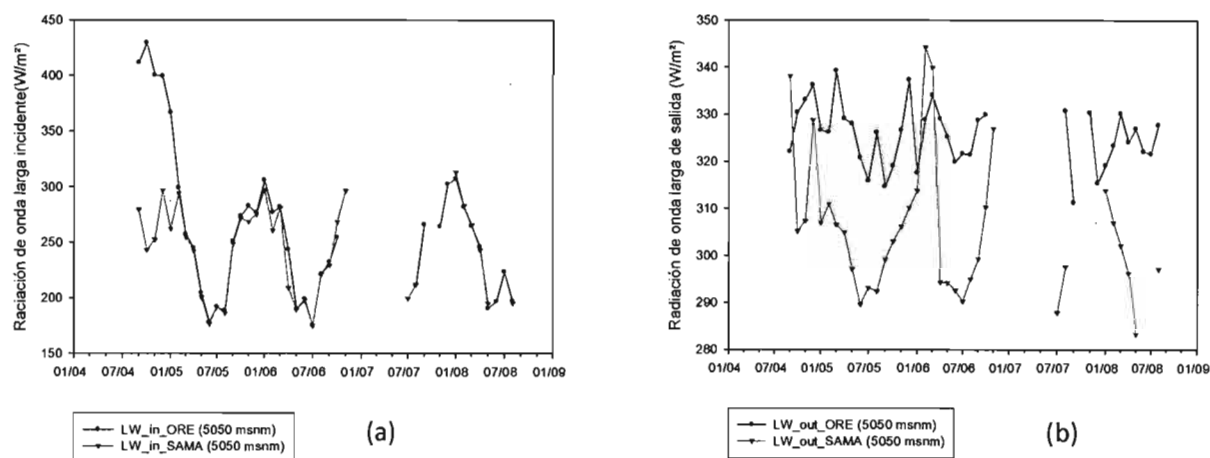


Figura 4.5. Promedios mensuales de la radiación de onda larga medidas a diferentes altitudes durante el periodo 2004-2008. (a) Radiación incidente, SW_in. (b) Radiación de salida, SW_out.

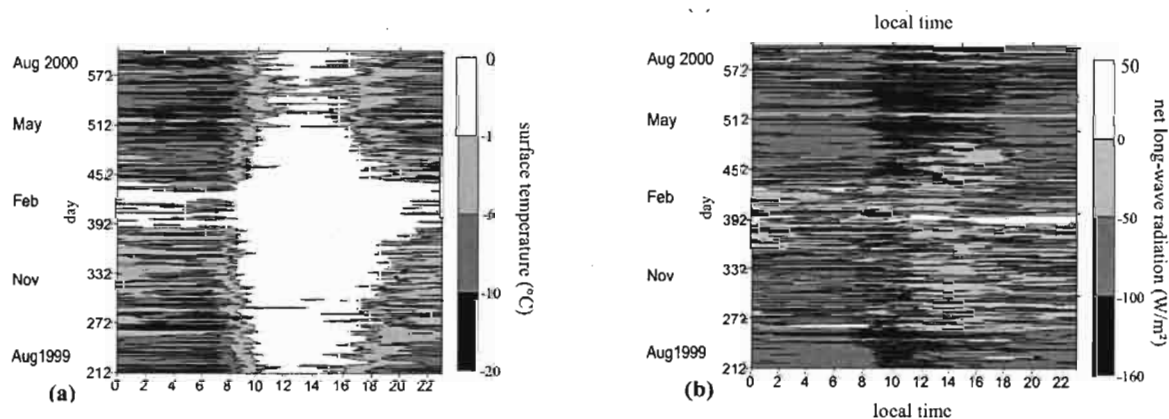


Figura 4.6. Valores diarios de (a) temperatura de la superficie y (b) radiación de onda larga neta medida a 5060 msnm desde agosto de 1999 hasta agosto del 2000. En el eje X se muestra el tiempo local y en el eje Y se muestra los días del año. Fuente: Sicart et al. [2005]

4.3 Conclusiones del capítulo.

Sobre el glaciar Zongo a nivel mensual el año hidrológico presenta de septiembre a noviembre por un establecimiento progresivo del régimen de precipitaciones (periodo de transición). A continuación de diciembre a marzo, se tiene un periodo de frecuentes e intensas precipitaciones (periodo húmedo) que antecede al periodo seco (mayo-agosto). Este resultado es consistente con trabajos previos.

Se calcula un gradiente altitudinal negativo de temperatura entre 4750 y 5165 msnm en el periodo 2004-2008 igual a $-0.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ que presenta un error porcentual de 29% con respecto al teórico [Brasseur, 1982].

Se observan gradientes altitudinales positivos de la humedad relativa y el viento.

Las estaciones SAMA y ORE a pesar de localizarse a la misma altitud (5050 msnm) presentan diferencias en las mediciones de temperatura, humedad relativa y viento este hecho pareciera indicar un efecto directo de las condiciones locales.

En los cuatro años hidrológicos estudiados a nivel mensual la temperatura, la humedad relativa y el viento presentan una marcada estacionalidad con valores elevados en la estación húmeda y de transición y valores bajos en la estación seca (el viento presenta un comportamiento inverso).

La radiación de onda corta incidente presenta una estacionalidad más no un gradiente altitudinal. La estacionalidad de SW_{in} en cada año está determinada principalmente por la cobertura nubosa.

Los valores mensuales de la radiación de onda corta de salida registrados en la estación fuera del glaciar (Morrena lateral derecha) son inferiores a aquellos registrados sobre el glaciar. también se observa mayor variabilidad mensual en la estación SAMA (SAMA: promedio igual a 115.46 W/m^2 , $s=33 \text{ W/m}^2$; ORE: promedio igual a 76.81 W/m^2 , $s=20.78 \text{ W/m}^2$), hecho que está directamente relacionado con las características de las respectivas superficies. El glaciar a la altura de la línea de equilibrio presenta un albedo promedio mensual de 0.56 ($s=0.18$) con una variabilidad importante determinada principalmente por la nieve fresca o hielo "sucio" en su superficie. Por otra parte en la morrena se tiene un albedo promedio de 0.36 ($s=0.12$) con una menor variabilidad a causa de la rápida fusión de la nieve fresca.

Los valores mensuales de LW_{out} muestran que $LW_{out_SAMA} < LW_{out_ORE}$. Esto se debe principalmente a la diferencia de la temperatura en las superficies ($T_{glaciar} < T_{morrena}$) más no a la emisividad de las mismas.

En el periodo húmedo la superficie de ablación glaciar se mantiene a 0°C . Sin embargo, en la estación seca el área de ablación es cercano a condiciones de fusión solo por algunas horas en la tarde y las temperaturas superficiales nocturnas son bajas (-10 a 15°C).

Capítulo 5

5 Cálculo del balance de masa

En el presente capítulo se describe la metodología utilizada para el cálculo del balance de masa. La metodología se aplica al año hidrológico 2007-2008 y se hace extensivo a los restantes 14 años. En la primera parte del capítulo se describe la metodología anual y en la segunda parte se establece la metodología mensual del cálculo del balance de masa.

5.1 Balance de masa anual

5.1.1 Balance de masa glaciológico

5.1.1.1 Zona de acumulación

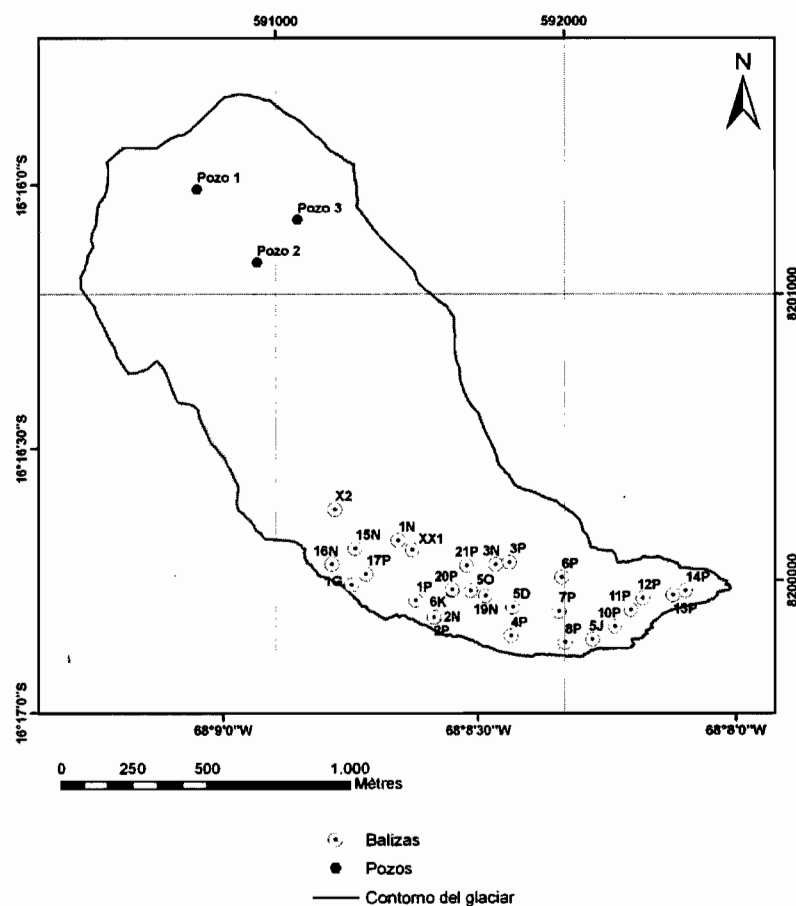


Figura 5.0. Sistema de medición del glaciar Zongo para el año hidrológico 2007-2008 (Fuente: Ginot et al.[2010])

Normalmente la medición de la acumulación se realiza en tres lugares diferentes y una o dos veces al año debido al difícil acceso a la zona. En el año hidrológico 2007-2008 se realizaron tres pozos (o sondeos), los cuales se detallan a continuación (véase la figura 5.0 para la ubicación en el mapa):

Tabla 5.1. Características generales de los sondeos realizados para la medición de la acumulación en el año hidrológico 2007-2008.

	Descripción	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Fecha
pozo 1	pie de la ruta francesa	16°16'2.9" S	68°09'3.1" O	5800	07/05/2008
pozo 2	antigua sama	16°16'14" S	68°08'55.3" O	5600	07/05/2008
pozo 3	campo argentino	16°16'4.9" S	68°08'50.1" O	5606	07/05/2008

Los resultados de los sondeos realizados son los gráficos de profundidad vs. Densidad (figuras 5.1-5.3). Es importante aclarar aquí que estos gráficos son de suma importancia para la identificación de la capa basal, que no siempre puede identificarse visualmente en la muestra de hielo. Véase en los gráficos 5.1 a 5.3 que las elecciones realizadas para identificar la capa basal (círculo naranja) tienen en común el pico de densidad más elevado entre los anteriores y posteriores, sin embargo la experiencia y la observación cuidadosa de las muestras in situ también deben ser consideradas. Finalmente la altura de hielo/nieve acumulada es transformada a su equivalente en agua. Este resultado se sintetiza en la tabla 5.2.

En promedio, la profundidad a la cual se encuentra la capa basal es 208 cm con una densidad de 0,57g/cm³. Los errores² obtenidos en las mediciones de densidades son aceptables (7.4%, 5.4% y 8.2% en los sondeos 1, 2 y 3 respectivamente). El promedio de la altura equivalente de agua es de 882 mm eq.a. con errores también aceptables (10.3%, 10.0%, 9.3% en los sondeos 1, 2 y 3 respectivamente).

Tabla 5.2. Densidad y profundidad a la que se encuentra la capa basal en los tres sondeos efectuados. También se indica la altura equivalente de agua a esa profundidad. Resultados para el año hidrológico (2007-2008)

Sondeos	Densidad (g/cm ³)	Profundidad(cm)	altura equivalente de agua(mm eq.a)
sondeo 1	0.54±0.04	239±16	934±96
sondeo 2	0.56±0.03	182±11	807±81
sondeo 3	0.61±0.05	201±11	905±84

² Los errores en el documento son calculados mediante la aproximación de diferenciales a incrementos, considerando la precisión de los instrumentos y las fórmulas respectivas (cf. anexo, sección A4).

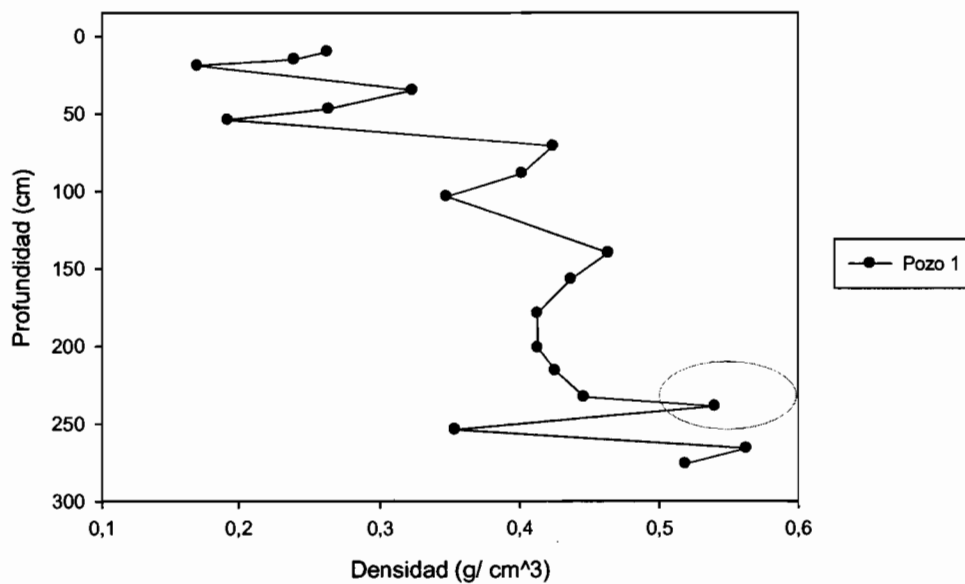


Figura 5.1. Pozo 1. Densidad en función de la profundidad.

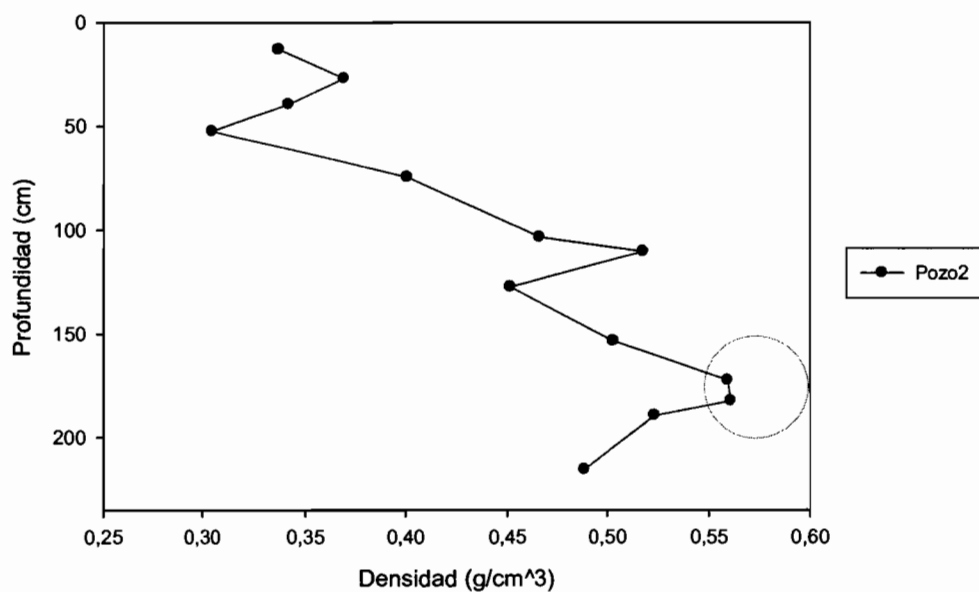


Figura 5.2. Pozo 2. Densidad en función de la profundidad.

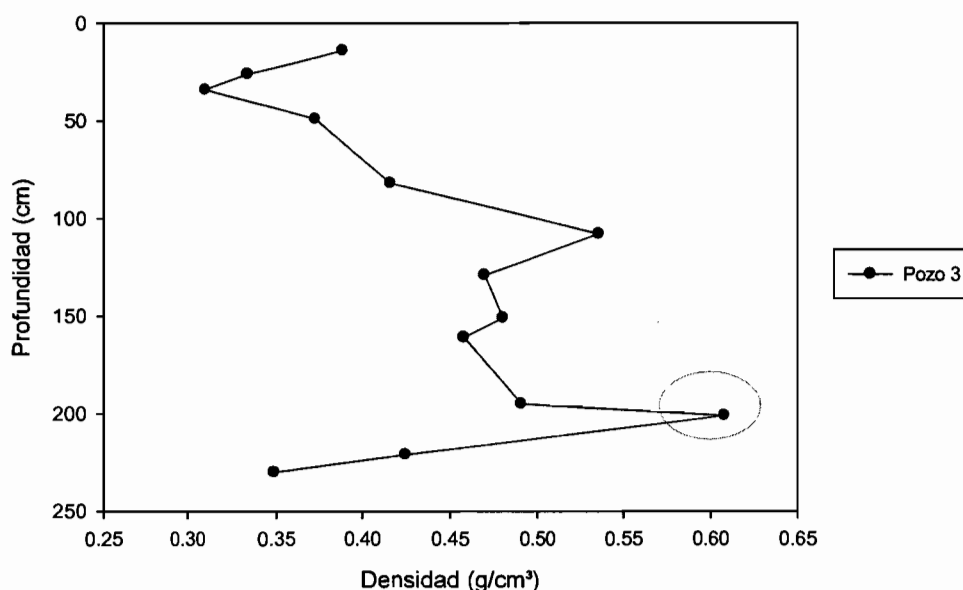


Figura 5.3. Pozo 3. Densidad en función de la profundidad.

5.1.1.2 Zona de Ablación

La zona de ablación cuenta con una red de balizas distribuidas entre el rango altitudinal 4900 y 5300 msnm (figuras 3.1 y 3.3.b). Por su fácil acceso e importancia se realizan mediciones mensuales. Sin embargo para el cálculo del balance anual se consideran únicamente las mediciones del principio y final del año hidrológico, así, para el año en cuestión (2007-2008) se consideran las mediciones de agosto 2007 y septiembre 2008. Como puede verse en la tabla 5.3 un total de 28 balizas son utilizadas para el cálculo del balance de masa anual del año hidrológico 2007-2008.

En esta zona, para este año hidrológico, el 86% de las balizas presenta un balance negativo, observándose claramente un gradiente altitudinal positivo del balance de masa. El error de medición asociado al balance de masa de cada baliza es de 4.4 mm eq.a. que porcentualmente equivale a 4%.

Tabla 5.3. Balizas utilizadas en el balance de masa anual para el año hidrológico 2007-2008

Altura de la baliza (m)	balizas	Balance anual (mm)
4914	14P	-4683
4922	13P	-4354
4960	12P	-5033
4972	11P	-3876
4987	10P	-3825
5005	5J	-1770
5015	8P	-1846
5023	7P	-1892
5026	6P	-820
5040	4P	-1010
5041	5D	-881
5045	3P	-534
5048	19N	-1067
5055	3N	-983
5055	5O	-649
5065	2N	-3560
5065	2P	-1135
5067	6K	-505
5067	20P	-667
5074	21P	-861
5079	1P	-1027
5107	XX1	504
5121	1N	623
5139	17P	-274
5141	1G	-360
5145	15N	-476
5145	16N	5
5188	X2	108

5.1.1.3 Balance neto y parámetros del glaciar

Para el cálculo del balance masa de todo el glaciar, éste se divide en 11 rangos altitudinales (100 m cada uno), de los cuales cuatro corresponden a la región donde se encuentran las balizas (entre 4900

y 5300 msnm) y siete a los sondeos en la parte alta del glaciar e interpolaciones lineales (entre 5300 y 6000). Véase la tabla 5.4 donde se precisan las áreas correspondiente a cada rango altitudinal y el modo de cálculo para el año hidrológico 2007-2008.

Tabla 5.4. Detalle del modo de cálculo de los balances de masa para el año hidrológico 2007-2008.

Rango Altitudinal	Área	Área Relativa	Nº de baliza o pozo y modo de cálculo del balance de masa por rango altitudinal
(m)	(km ²)		
5900-6000	0.0357	0.0191	Pozo 1
5800-5900	0.0785	0.0419	Pozo1
5700-5800	0.1386	0.0741	Pozo1
5600-5700	0.2345	0.1254	Promedio entre Pozo 1 y Pozo 2
5500-5600	0.2621	0.1401	Promedio entre Pozo 2 y Pozo 3
5400-5500	0.2336	0.1249	Promedio entre 5300-5400 y 5500-5600
5300-5400	0.1787	0.0955	Promedio entre 5200-5300 y 5500-5600
5200-5300	0.1594	0.0852	X1
5100-5200	0.2226	0.1190	1G, X2, XX1, 1N, 15N, 16N, 17P
5000-5100	0.2694	0.1440	6K, 2N, 3N, 19N, 5D, 5O, 5J, 1P, 2P, 3P, 4P, 6P, 7P, 8P, 20P, 21P
4900-5000	0.0577	0.0308	10P, 11P, 12P, 13P, 14P

Luego de calculadas las áreas y definido el modo de cálculo se multiplica el área relativa de cada rango altitudinal j (=área del rango altitudinal j /área total) por su correspondiente balance de masa (b_j) obteniéndose así el balance de masa específico para el rango altitudinal j : $Bn_j = b_j \cdot s_j / S$ (cf. Ecuación 4). El detalle de estos cálculos se tabulan en la tabla 5.5. A partir de esta información es posible obtener el ELA y el AAR (cf. Sección 2.6) que son dos parámetros representativos del glaciar (figura 5.4, tabla 5.6). Para este año hidrológico se obtiene un balance positivo de $Bn = 257 \pm 105$ mm eq.a.

El año hidrológico 2007-2008 presenta un balance anual específico neto positivo ($B_n=257\pm56$ mmeq.a.) con un error del 23%. Es interesante observar que el error del balance anual neto (no ponderado por el área) presenta un error del 79%, lo que indica la importancia de ponderar las áreas en el cálculo del balance de masa. Los errores en los diferentes rangos altitudinales son del orden del 10%.

Tabla 5.5. Balance de masa por rango altitudinal para el año hidrológico 2007-2008. dZ es el rango altitudinal, bn es el balance de masa, s/S es el área relativa y $bn*s/S$ es el balance de masa específico.

dZ (m)	Prom dZ (m)	bn (mm)	bn (m)	s/S 2007-2008	$bn*s/S$ (mm eqa)	$bn*s/S$ (meqa)
4900-5000	4950	-4354 ± 4	-4,35	0,0278	-121 ± 1	-0,12
5000-5100	5050	-1200 ± 4	-1,20	0,1445	-173 ± 1	-0,17
5100-5200	5150	19 ± 4	0,02	0,1193	2 ± 1	0,00
5200-5300	5250	437 ± 43	0,44	0,0855	37 ± 4	0,04
5300-5400	5350	647 ± 63	0,65	0,0958	62 ± 6	0,06
5400-5500	5450	751 ± 73	0,75	0,1252	9 ± 9	0,09
5500-5600	5550	856 ± 83	0,86	0,1405	120 ± 12	0,12
5600-5700	5650	870 ± 89	0,87	0,1257	109 ± 11	0,11
5700-5800	5750	934 ± 96	0,93	0,0743	69 ± 7	0,07
5800-5900	5850	934 ± 96	0,93	0,0421	39 ± 4	0,04
5900-6000	5950	934 ± 96	0,93	0,0191	18 ± 2	0,02
suma		827 ± 651	0,83	1	257 ± 56	0,26

Con la información de la tabla 5.5 se determinan los dos parámetros importantes en el estudio de glaciares tropicales el ELA y AAR (cf. Sección 2.6). La figura 5.6 y la tabla 5.6 detallan estos resultados.

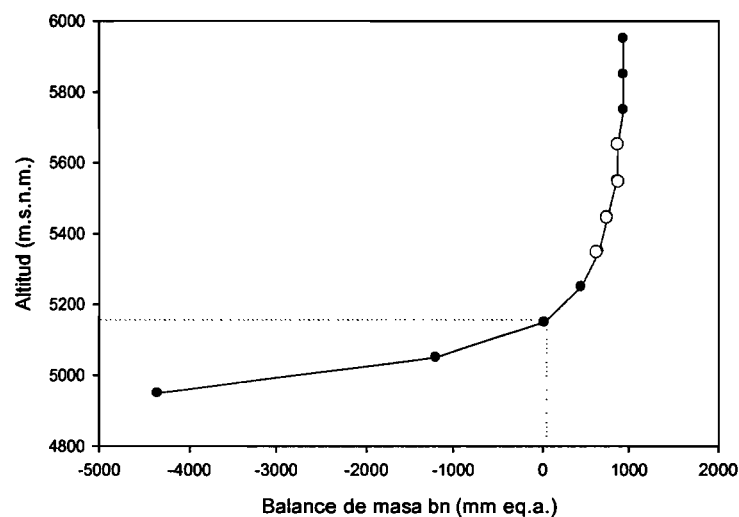


Figura 5.4. Altitud promedio en función del balance de masa neto para el año hidrológico 2007-2008. Los círculos blancos corresponden a balances de masa interpolados.

Tabla 5.6. ELA y AAR, 2007-2008.

año hidrológico	ELA(msnm)	AAR(%)
2007-2008	5148±45	77±19

5.1.2 Balance de masa hidrológico.

El balance de masa por el método hidrológico se calcula según la ecuación (6). Los detalles del cálculo se sintetizan en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Balance de masa hidrológico para el año 2007-2008. Sg representa el área del glaciar, S el área total de la cuenca glaciar, P la precipitación, Q el caudal y Bh el balance hidrológico.

Variable	Magnitud
Sg[km²]	1,86±0.01
S-Sg[km²]	1,26±0.02
P prom[mm]	1024±12
Q[m³/s]	1,26±0.01
Q[km²*mm]	3268±26
Aporte morrena[mm]	1028± 99
Aporte glaciar[mm]	1201±80
Bh[mm]	-177±27

5.1.3 Comparación con los años precedentes

Si bien B_n y B_h muestran una variabilidad similar, los valores de B_h parecen estar por debajo del esperado (Figura 5.9). Según Larson & Peck [1974] la precipitación sólida medida en los pluviómetros es deficiente. Adicionalmente, Sicart y otros [2007] realizan una comparación entre las diferentes mediciones pluviométricas en la cuenca glaciar y establecen una subestimación de las mismas entre 30 y 50 %. Finalmente en un trabajo reciente Soruco y otros [2009] calculan el balance de masa anual por el método fotogramétrico y obtienen una buena concordancia con B_h que es corregido en +37%. A partir de los trabajos anteriormente mencionados se considerará una subestimación de las mediciones pluviométricas en los pluviómetros totalizadores de 40%.

La figura 5.5 y 5.6 muestran que ambos métodos reproducen variaciones inter-anales similares, con la tendencia general al retroceso (balances de masa negativos) con eventuales periodos estacionarios y escasos periodos con balance positivo. Los periodos 1996-1997 y 1997-1998 presentan los valores de balance de masa más bajo y elevado respectivamente en todo el periodo estudiado.

Se obtiene una buena correlación entre ambos métodos ($B_h = 0.95B_n + 443.01$, $r^2 = 0.86$, $n = 15$) y la subestimación de B_h es disminuida considerando la corrección en la precipitación ($B_{h_corr} = 0.86B_n - 121.03$, $r^2 = 0.85$, $n = 15$). El balance de masa correspondiente al periodo 2004-2005 presenta un curioso resultado en ambos métodos pues se observa que $B_h > B_n$ y en la corrección esto se hace más evidente. Este dato tiene un importante efecto en la comparación integral pues omitiendo el punto se obtiene una mejor correlación y una menor subestimación en los métodos ($B_h = 0.81B_{n_corr} - 81.13$, $r^2 = 0.92$). En una revisión integral de los datos para el mencionado periodo no se encontró un factor que explique tal diferencia.

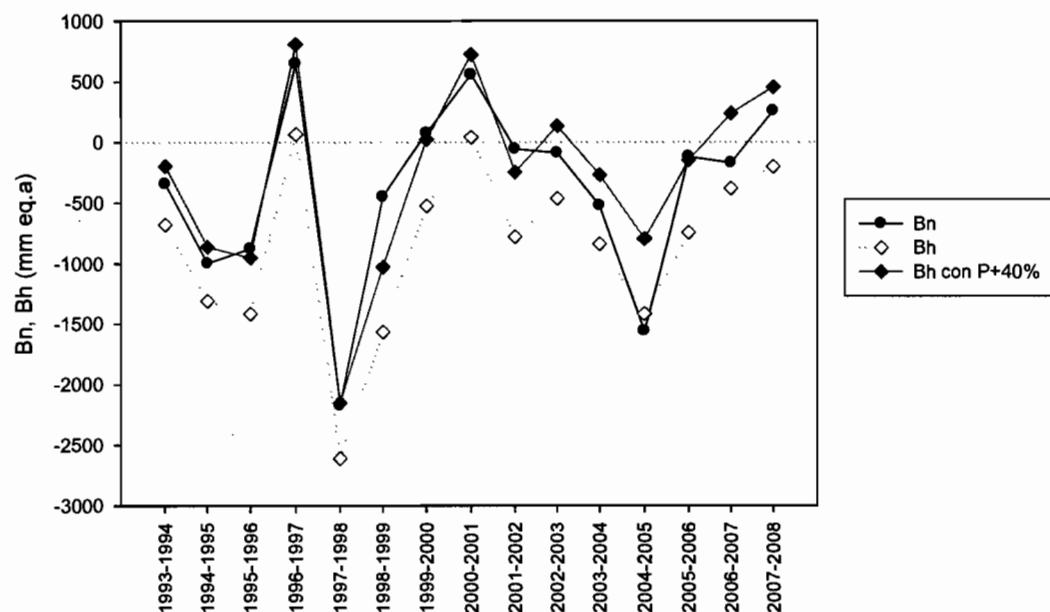


Figura 5.5. Comparación de los balances de masa glaciológico (Bn) e hidrológico (Bh). "Bh con P+40%" representa el balance de masa obtenido también por el método hidrológico pero considerando una subestimación del 40% en las mediciones mensuales de la precipitación (pluviómetros totalizadores).

Los promedios anuales del balance de masa específico Bn y Bh (corregido con el 40% de P) son -283 mm eq.a. con $s=672$ mm eq.a. y -249 mm eq.a. con $s=791$ respectivamente. Lo que indica un mayoritario registro de balances negativos pero también una notable variabilidad de un año a otro.

En promedio, para el balance acumulado se calcula una razón de cambio de -213 mm eq.a./año, sin embargo se observan periodos de muy fuerte ablación como el periodo 1993-1996, donde se registra -905mm eq.a./año o el periodo 1996-1998 con -2000 mm eq.a./año. Finalmente El periodo 2000-2005 con una razón de cambio más moderada: -126 mm eq.a./año. Dos periodos con una razón de cambio positiva: del 1998 al 2002 y del 2006 al 2008 con +190mm eq.a./año y +185 mm eq.a. respectivamente.

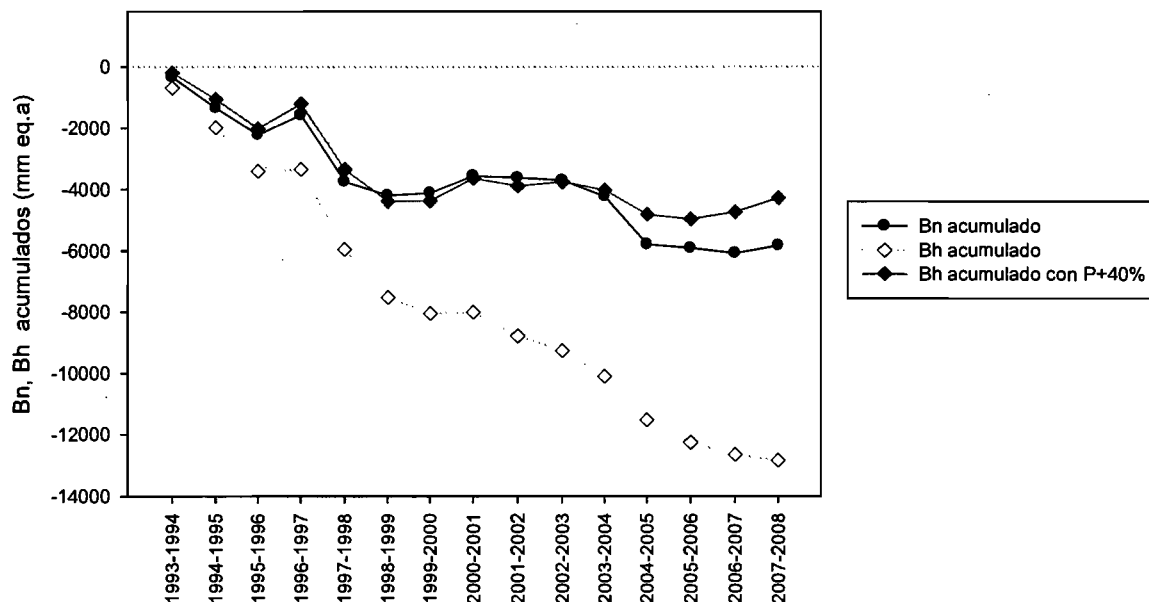


Figura 5.6. Comparación de los balances de masa acumulados obtenidos por los dos métodos estudiados.

A fin de corroborar el comportamiento del balance de masa anteriormente descrito con las variables de precipitación y temperatura, en las figuras 5.7 y 5.8 se observa que los años con balance de masa muy negativo coinciden con valores muy bajos de las diferencias de precipitación anuales y con valores muy elevados de las diferencias de temperaturas anuales. Particularmente el año 1997-1998 es el más representativo de la anterior observación. Por otra parte, los años con balance positivo se corresponden a años con diferencias de precipitación también positivas y diferencias de temperatura negativas (excepto el año 2000-2001). Por lo tanto, si un evento Niño/Niña a escala anual tiene efectos notorios en la precipitación y la temperatura, evidentemente los tendrá en el balance de masa.

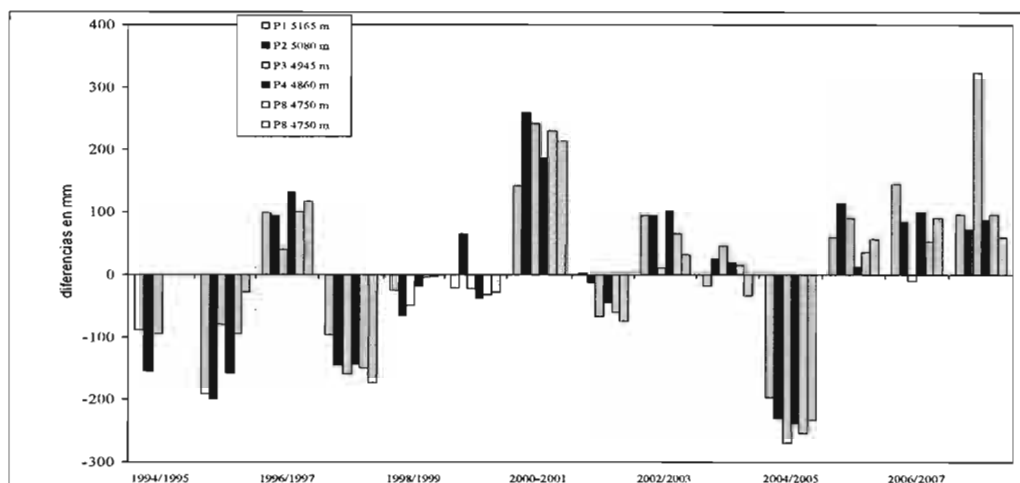


Figura 5.7. Diferencias de las precipitaciones anuales (mm) en los diferentes pluviómetros totalizadores respecto al promedio calculado en los últimos 14 ciclos hidrológicos. Fuente: Ginot, [2009]

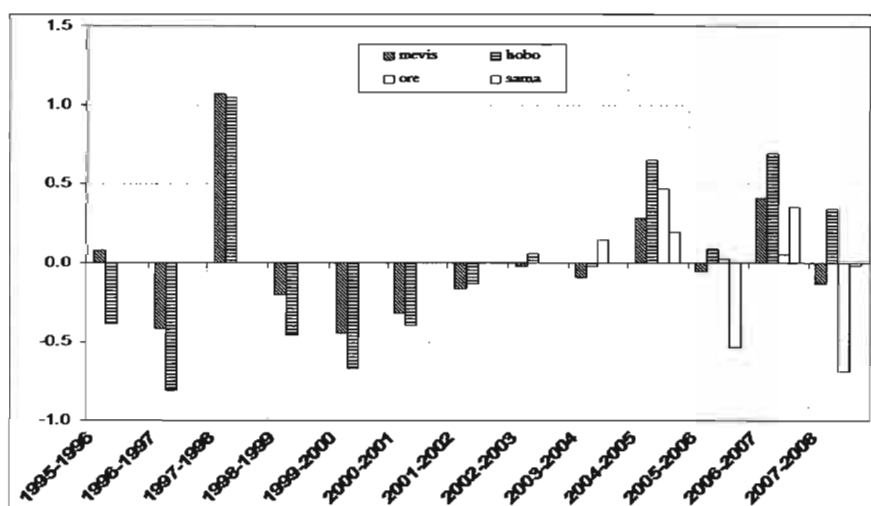


Figura 5.8. Diferencia de la temperatura promedio anual, con la temperatura promedio de los últimos 10 años hidrológicos. Fuente: Ginot [2009]

Para finalizar esta parte En las figuras 5.9 y 5.10 se muestran los parámetros del glaciar (a escala anual) en función del balance de masa. Así, la ELA muestra un mejor comportamiento lineal con el

balance de masa a escala anual que el AAR. Colateralmente puede observarse que la mayor parte de los balances de masa obtenidos para el periodo 1993-2008 son negativos; para el caso de la ELA, la relación es de inversa proporcionalidad y se tiene una $ELA=5222$ msnm para una situación estacionaria del glaciar ($B_n=0$). La proporción a la cual la ELA aumenta es de 0.18 m/mm eq.a. La AAR por su parte presenta una relación lineal de directa proporcionalidad con el balance de masa, una $AAR=64\%$ para una situación estacionaria del glaciar y una razón de disminución de la AAR igual a $1.8\%/100$ mm eq.a.

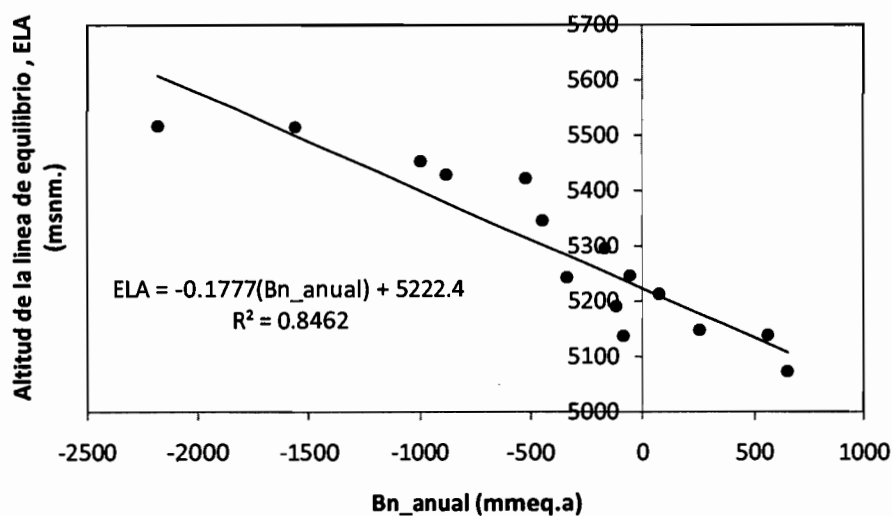


Figura 5.9. Recopilación de la línea de equilibrio altitudinal en función del balance de masa específico desde 1993.

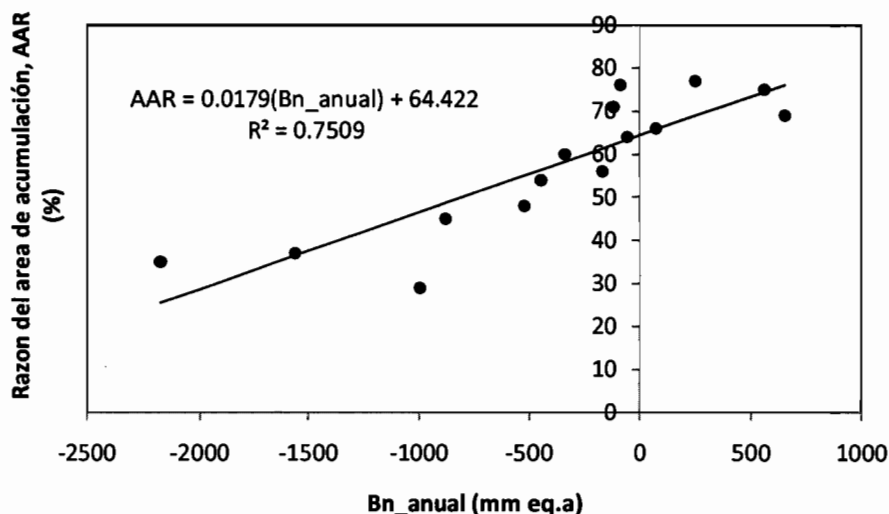


Figura 5.10. Recopilación del AAR versus el balance de masa específico desde 1993.

5.2 Balance de masa mensual

En esta sección se describe el procedimiento para el cálculo del balance de masa de todo el glaciar a escala mensual para el año hidrológico 2007-2008. Para tal efecto se considera la misma metodología que a escala anual además de algunas consideraciones en el cálculo de la acumulación y la hipsometría.

5.2.1 Balance de masa glaciológico

A escala mensual, en cuanto el cálculo de balance de masa concierne, únicamente se cuentan con datos de las balizas y pluviómetros para poder aplicar la metodología anual serán necesarios datos mensuales de los pozos y una hipsometría mensual. Con respecto a los pozos, se propone un cálculo a partir de la acumulación neta anual (sondeos anuales) dividida proporcionalmente a distribución mensual de precipitación. Con respecto a la hipsometría, se considerará la hipsometría anual constante a nivel mensual.

A escala mensual se considerarán La Zona Alta (5300-6000 msnm.) y la Zona baja del glaciar (4900-5300 msnm) definidas en la sección 2.6. Para la parte alta del glaciar se considerará la reconstrucción mencionada anteriormente. En la parte baja del glaciar se utilizan los datos de las balizas.

5.2.1.1 Zona alta

El área de esta zona representa el 58% de todo el glaciar (promedio del periodo 1993-2008) y solo se disponen de tres valores anuales de balance de masa obtenidos mediante diversos sondeos en la zona. Por otra parte existen un total de 6 pluviómetros totalizadores distribuidos en la parte baja de la cuenca glaciar. Debido a que no se aprecia un gradiente de precipitación con la altura [Sicart et al. 2007] se considera un promedio de los pluviómetros como el valor representativo sobre el glaciar. A partir de esta información se propone la reconstrucción mensual de balance de masa en los sitios donde se realizan los sondeos. Este procedimiento se explica a continuación.

Las figuras 5.11 a y b muestran la distribución mensual y acumulada de precipitación en el año hidrológico 2007-2008 respectivamente. Ese año se registra una importante precipitación en el mes de septiembre (50% más que el promedio de los 15 años estudiados). La precipitación acumulada para este año, en el mes de agosto, es de 1024 mm (8% más que el promedio de los 15 años estudiados). En 5.11.b, en el mes de agosto, se observa que los resultados de los pozos efectuados son inferiores a la precipitación acumulada en el mismo mes lo que parecería confirmar la ausencia de un gradiente de precipitación altitudinal, pero podría también ser a causa de la ablación neta.

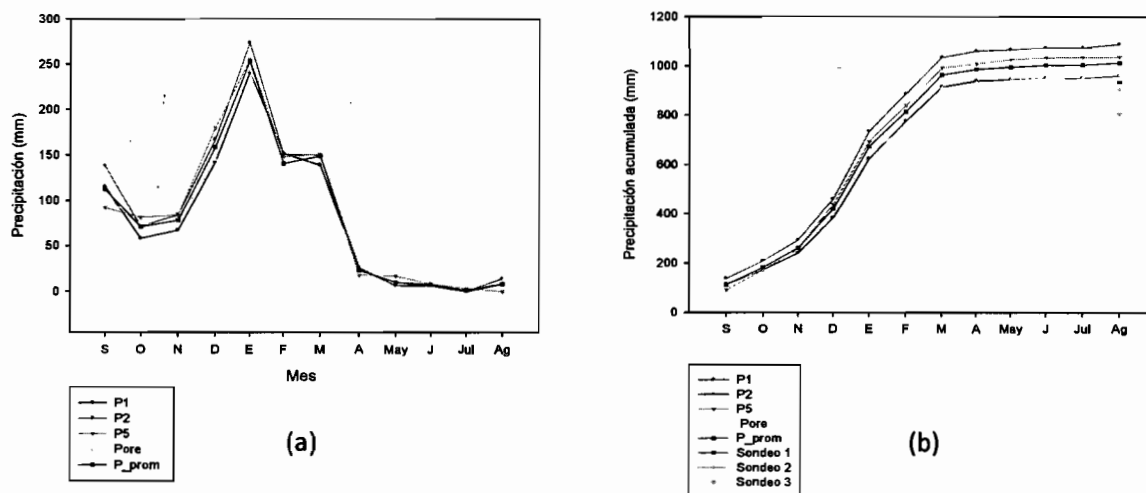


Figura 5.11. (a) Precipitación mensual de los pluviómetros totalizadores P1, P2, P5, P_ORE y del promedio de estos, P_prom, para el año hidrológico 2007-2008. (b) Precipitación mensual acumulada en los pluviómetros totalizadores, también se muestran los resultados de los pozos (en mm eq.a.) al final del año hidrológico.

A partir de la distribución mensual de precipitación (figura 5.11 a) se obtiene la distribución porcentual de la misma (figura 5.12). Es esta distribución porcentual que se utiliza para la reconstrucción mensual del los pozos y no precisamente la precipitación. Así, considerando como el 100% acumulado los valores de los pozos en agosto (figura 5.11b) se obtiene la distribución mensual de los sondeos (figura 5.13). De esta manera se cuentan con los datos mensuales de balance de masa en la parte alta del glaciar. Similarmente como se procedió en el cálculo anual se realiza una interpolación lineal para los rangos altitudinales entre 5300 -5700 msnm. Finalmente se adicionan los balances de los rangos altitudinales 5300-6000 msnm y de esta manera se obtiene el balance de de masa específico en la zona alta del glaciar (Bn_{alta}).

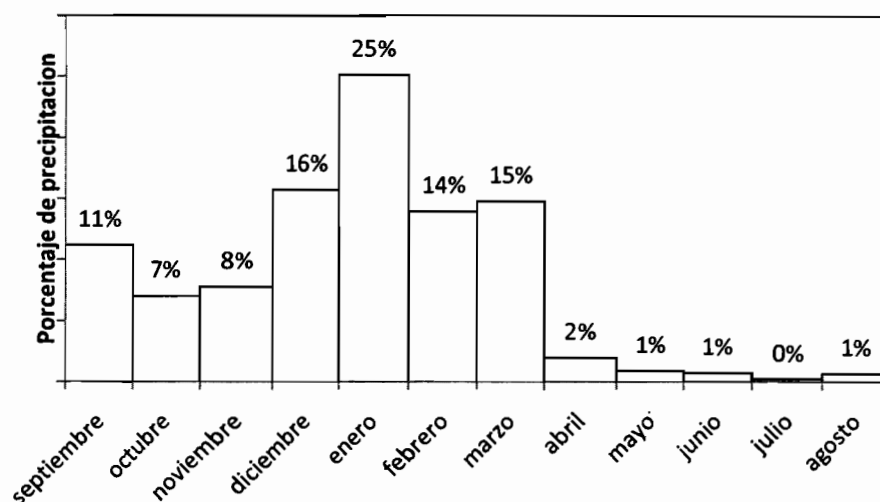


Figura 5.12. Distribución porcentual de la precipitación para el año hidrológico 2007-2008.

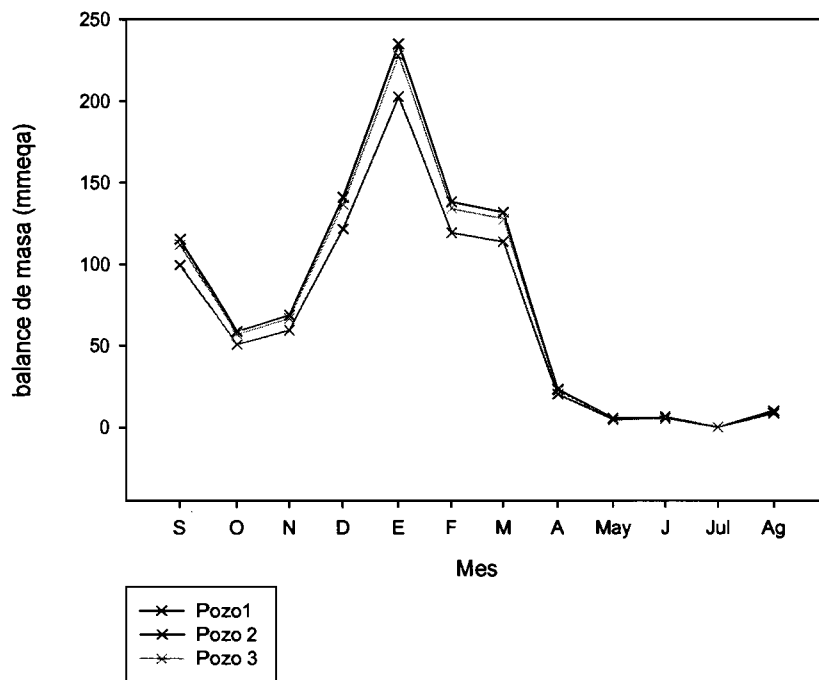


Figura 5.13. Balance de masa mensual de los pozos obtenidos mediante la distribución porcentual de los sondeos hechos al final del año hidrológico.

A partir de la reconstrucción propuesta se obtiene el balance de masa mensual en la parte alta del glaciar (figura 5.14) que para el año hidrológico 2007-2008 concentra la mayor parte de la acumulación en los meses de dic-mar. Obsérvese que a pesar de considerarse las interpolaciones lineales con la zona baja (entre 5300-5500 msnm), la distribución es muy parecida a aquella de la precipitación.. Si se adicionan los balances mensuales para este año se obtiene: $Bn_alta = 512 \pm 238$ mm eq.a.

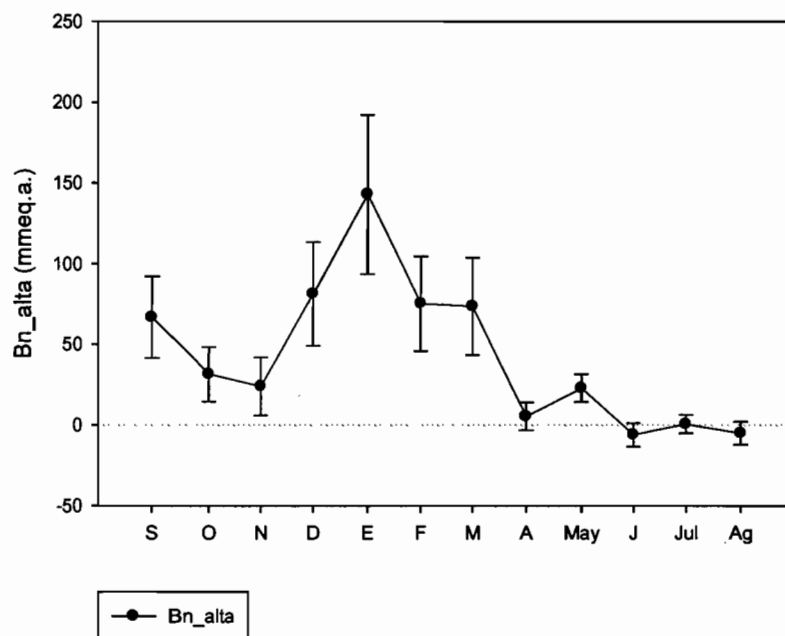


Figura 5.14. Balance de masa mensual en la parte alta del glaciar (5300-6000 msnm) para el año hidrológico 2007-2008.

5.2.1.2 Zona baja

Para esta zona (4900-5300 msnm), se recopilan y validan los balances de masa obtenidos mediante el uso de balizas. En la figura 5.15 se observa una marcada estacionalidad con balances mensuales mayoritariamente negativos. Obsérvese que en los meses dic-marzo y mayo se registran balances positivos, esta característica parece ser normal en años con balances de masa muy positivos (cf sección 7.1) donde las precipitaciones muy intensas y/o eventualmente con un periodo húmedo adelantado. Los errores calculados en esta zona son bajos comparados con aquellos obtenidos en la zona de acumulación. Adicionando los balances mensuales para esta zona se obtiene: $Bn_{baja} = -305 \pm 131$ mm eq. a.

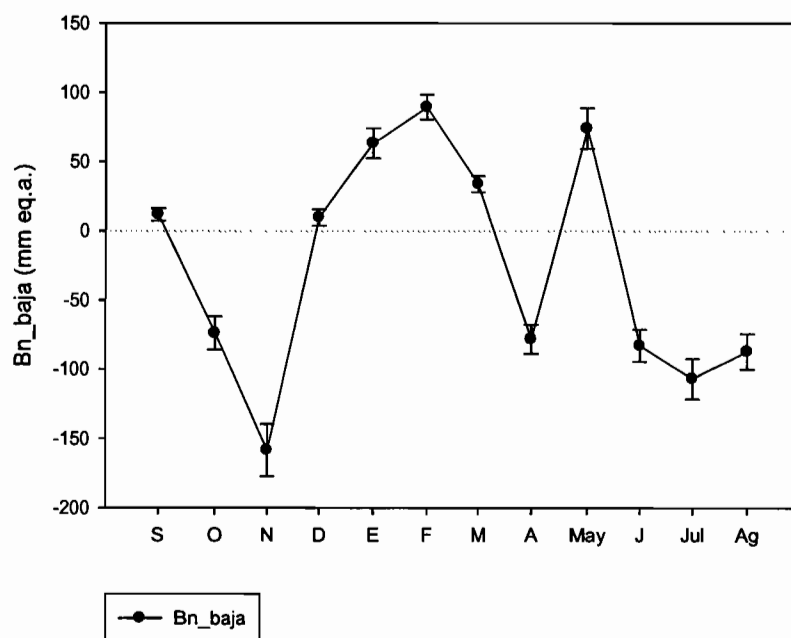


Figura 5.15. Balance de masa mensual en la parte baja del glaciar (4900-5300 msnm) para el año hidrológico 2007-2008.

5.2.1.3 Balance neto y parámetros del glaciar

El balance específico neto para el año 2007-2008 se muestra en la figura 5.16. Este año se registran balances negativos en los periodos de transición y seco, así como balances positivos en la estación húmeda. Los balances positivos son más intensos y los balances negativos son modulados principalmente por la zona baja del glaciar. La incertidumbre es mayor en la estación húmeda debido a la incertidumbre que zona alta aporta en este periodo. El balance neto del glaciar para este año es $Bn = Bn_{alta} + Bn_{baja} = 207 \pm 369 \text{ mm eq.a.}$, que en comparación al balance anual obtenido directamente ($Bn = 257 \pm 56 \text{ mmeq.a.}$) presenta un error relativo del 24%. Los errores son notablemente más elevados en el cálculo mensual debido principalmente al aporte de la zona alta.

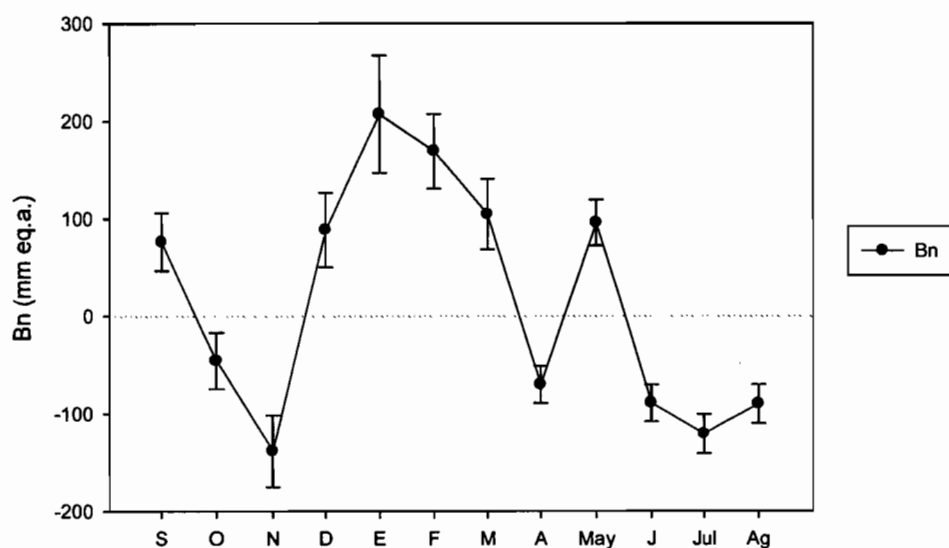


Figura 5.16. Balance de masa específico mensual del glaciar Zongo para el año 2007-2008. En el gráfico se detallan las barras de error.

El cálculo de los parámetros del ELA y AAR es realizada de manera similar al cálculo anual (cf. Sección 2.6) y para sistematizar el mismo se desarrolló un programa en MatLab (el script se muestra en el apéndice, sección A3). Las curvas obtenidas se muestran en la figura 5.17, y los valores se tabulan en la tabla 5.11.

Los meses que registran un balance positivo tienden a presentar un ELA bajo contrariamente a los meses con balance negativo. Así, mediante una regresión lineal se obtiene la siguiente relación lineal: $ELA = -1.7b_n + 5292$, donde $r^2 = 0.87$. Para el caso de $b_n = 0$, obtenemos un $ELA = 5292$ (que es aproximadamente el caso de octubre). En el caso de AAR, similarmente al ELA, se encuentra la siguiente relación lineal: $AAR = 0.19b_n + 63$, con $r^2 = 0.85$.

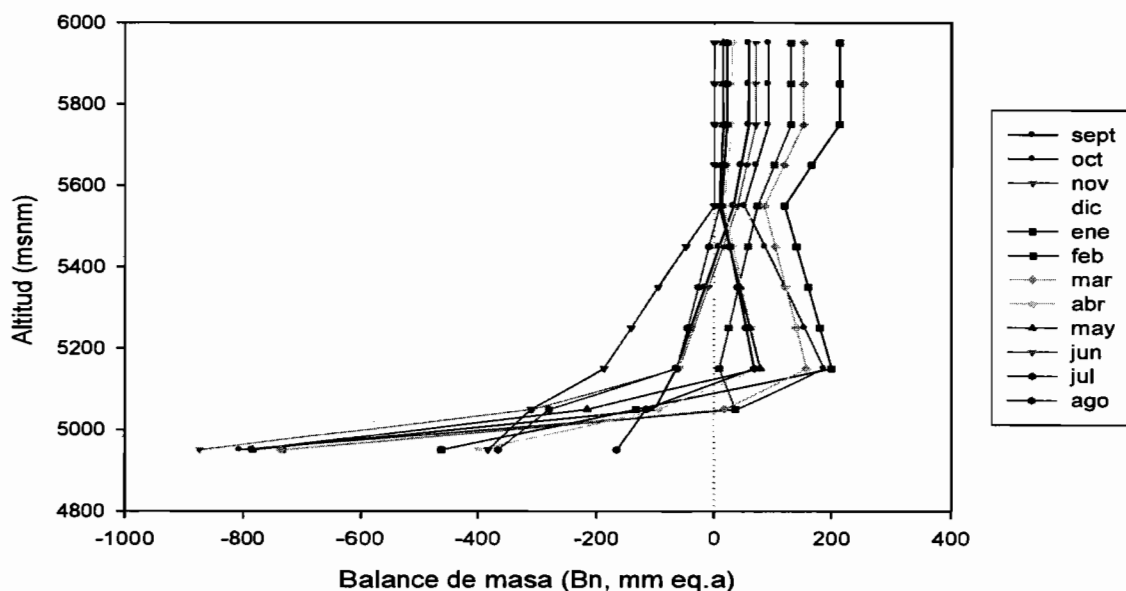


Figura 5.17. Altitud en función del balance de masa para los diferentes meses del año hidrológico 2007-2008.

Tabla 5.8. Valores mensuales de los parámetros ELA y AAR e año hidrológico 2007-2008.

mes	sept	oct	nov	dic	ene	Feb	mar	abr	may	jun	jul	ago
ELA(msnm)	5106.6	5314.1	5451.6	5036.8	5067.8	4958	5198.8	5433.3	5035.3	5531.3	5531.3	5517.9
AAR(%)	82	61	46	92	87	98	71	49	92	36	36	38

5.2.2 Balance de masa hidrológico

El cálculo de balance hidrológico mensual se realiza de manera muy similar al cálculo anual: se utiliza la ecuación (8), con los correspondientes valores mensuales de las variables y se mantiene la hipsometría constante durante todo el año. En los cálculos del balance hidrológico mensual se toman en cuenta las subestimación de la precipitación y se corrige los valores de precipitación en un 40%. Entonces, a partir de este momento al referirnos a Bh nos referiremos al balance de masa hidrológico con un 40% adicional en las mediciones mensuales de precipitación.

Bn y Bh mensuales presentan una estacionalidad muy parecida excepto en el mes de mayo donde Bn registra un balance positivo (en los doce meses $r^2=0.71$, en los meses correspondientes a los periodos de transición y húmedo $r^2=0.89$). Bh anual es igual a 453 ± 201 mm eq.a. y representa un error porcentual de 43% relativo a Bn(anual).

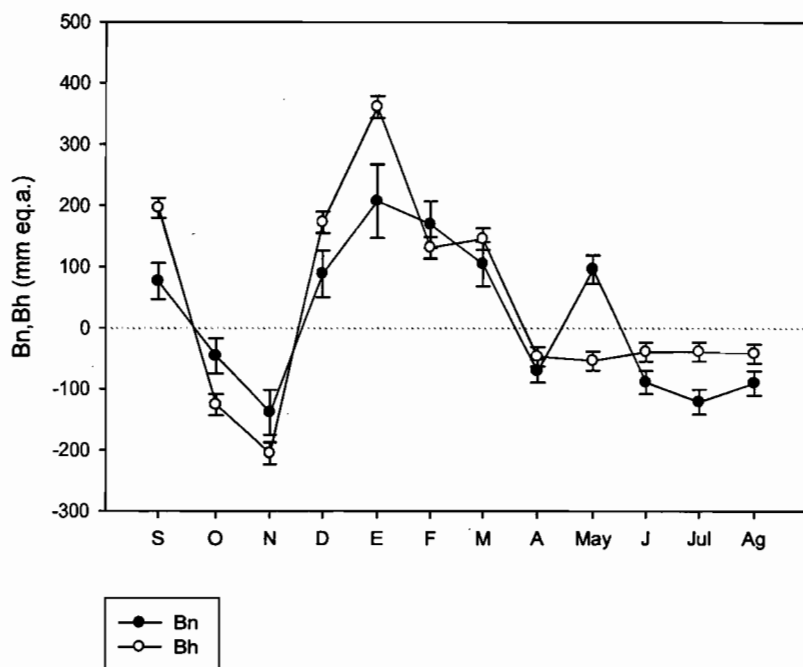
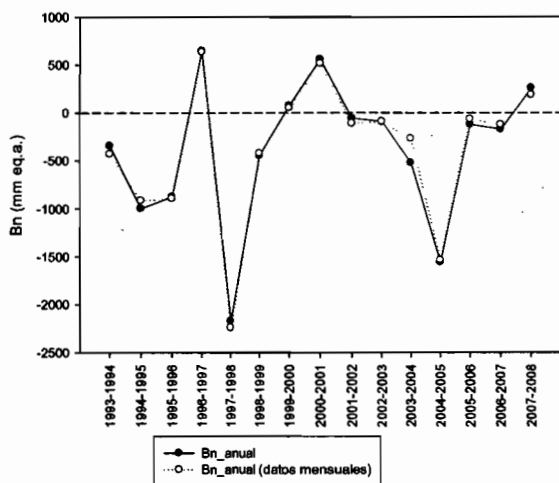


Figura 5.18. Balance de masa hidrológico(Bh) y glaciológico (Bn) mensual del glaciar Zongo para el año 2007-2008.

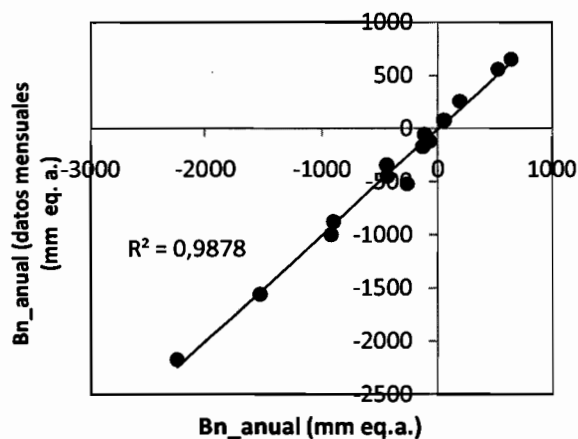
5.3 Validación de resultados

La validación de resultados se realiza comparando los balances anuales (Bn_anual, Bh_anual) obtenidos directamente (Bn_anual) con aquellos obtenidos a partir de los datos mensuales (adición de los balances de cada mes del año hidrológico). Estos resultados se muestran en la figura 5.15. En (a) se muestra la serie temporal para los 15 años estudiados y en (b) se grafica Bh anual (datos mensuales) versus Bn_anual. La diferencia encontrada se debe a que no todo el tiempo se tienen las mismas condiciones de medición. Dos razones vienen a puntualizar este hecho: la primera es que las balizas están en un permanente desplazamiento junto con la superficie del glaciar y la segunda es que a escala mensual algunas veces no se disponen de todas las balizas debido a eventos casuales: cobertura nival, cercanía a grietas o caída de rocas.

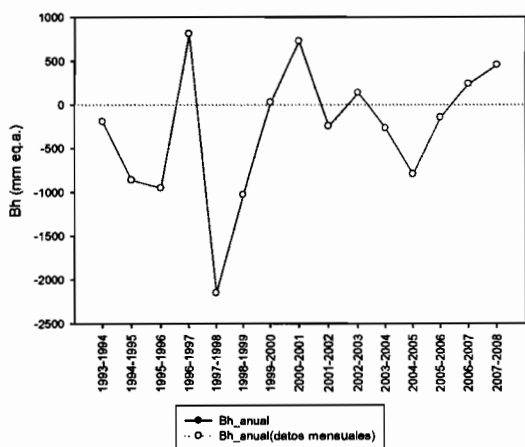
En el caso del balance hidrológico (figuras c y d) se tiene el resultado esperado pues las condiciones de medición son invariantes ($r^2=1$).



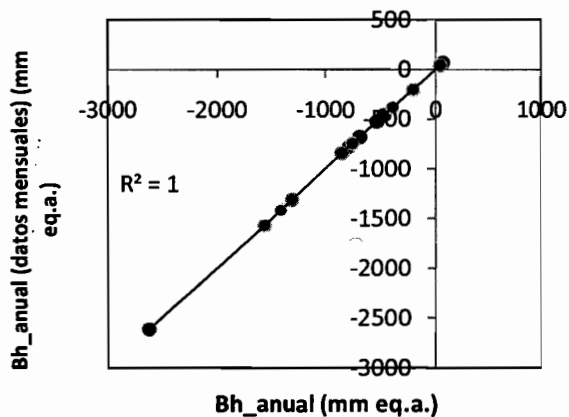
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.16. Validación de Resultados. (a) muestra los valores anuales del balance de masa glaciológico obtenidos directamente (Bn_{anual}) y aquellos obtenidos con los datos mensuales (Bn_{anual} (datos mensuales)). Similarmente, en (c) y (d) se muestran los resultados para el balance hidrológico anual.

5.4 Consideraciones importantes

Es apropiado al final de este capítulo realizar una discusión sobre las fuentes de error en el cálculo de los balances de masa. Pues, a pesar de cuantificar los errores de medición (relativa a la precisión de los instrumentos y las fórmulas utilizadas) existen un conjunto de errores de tipo sistemático que son difíciles de cuantificar con precisión pero que deben mencionarse.

errores en la zona de acumulación

Los sondeos efectuados cada año para medir la acumulación (tres a cinco sondeos) son realizados en el rango altitudinal 5600-5800 msnm. Para completar la información en la zona alta del glaciar (5300- 6000 msnm) se realizan interpolaciones lineales y en los últimos tres rangos altitudinales se consideran los valores del sondeo 1 (a 5800 msnm). La zona alta del glaciar representa 2/3 del mismo y si bien se procuran interpolaciones lineales no parece ser suficiente considerando tal representatividad. Sin duda, los cálculos mensuales de Bn_{alta} presentan las mismas observaciones que a escala anual.

errores en la zona de ablación

Sicart [2007] realiza una muy buena síntesis con respecto a las incertitudes en las zonas de ablación. Según Sicart en la zona de ablación son la evolución del relieve de la superficie, el no paralelismo de las líneas de corriente del glaciar, la presencia de séracs y grietas, la exposición (pendiente) de la superficie a la radiación solar y la localización de las balizas los factores que contribuyen a una subestimación o sobreestimación de las mediciones y que al final parecen compensar las incertitudes.

Otras fuentes de error

No se encuentra un gradiente de precipitación altitudinal en la cuenca glaciar debido posiblemente a efectos locales. Los pluviómetros totalizadores reciben principalmente precipitación sólida que debido a la turbulencia del viento es sobreestimada entre un 30 y 50 % [Sicart et al., 2007]. Por otra parte no se miden precipitaciones por encima de los 5165 msnm que representa más del 60% del glaciar. Sin duda la precipitación sólida a gran altitud es difícil y su estudio requiere de equipos de medición más elaborados.

Asumir las áreas mensuales (por rangos altitudinales) constantes a lo largo del año hidrológico es algo "osado" pero justificable. Para el año hidrológico 2007-2008 como una primera aproximación se realizó una interpolación lineal mensual del área a lo largo del año hidrológico y los resultados mostraron diferencias porcentuales menores al 4% relativas a los balances de masa específicos con hipsometría fija.

5.5 Conclusiones del capítulo

En el cálculo del balance de masa anual para el año hidrológico 2007-2008 se observa que en promedio, la profundidad a la cual se encuentra la capa basal es de 208 cm con una densidad de $0,57 \pm 0.16 \text{ g/cm}^3$. El promedio de la altura equivalente de agua es de 882 mmeq.a. con errores aceptables (10.3%, 10.0%, 9.3% en los sondeos 1, 2 y 3 respectivamente).

El error de medición asociado al balance de masa de cada baliza es de 4.4 mmeq.a.

El año hidrológico 2007-2008 presenta un balance anual específico neto positivo ($B_n = 257 \pm 56$ mmeq.a.) con un error del 23%. Los parámetros obtenidos para este año son: $ELA = 5148 \pm 45$ msnm y $AAR = 77\% \pm 19\%$. Este año registra unos de los tres cuatro balances de masa positivos en la serie de 15 años hidrológicos.

Para el año hidrológico 2007-2008 se considera la subestimación en la medición de la precipitación en un 40% y se obtiene $B_h = 453 \pm 51$ mmeq.a. que presenta un error porcentual de 43% relativo a B_n (Sin no se considera la corrección el error porcentual es de 245%).

La consideración de la subestimación de la precipitación en 40% permite una leve mejora en la correlación entre ambos métodos (de 0.85 a 0.86) y reduce la diferencia de los mismos (de 443 a 121 mm eq.a.). Si se omite el periodo 2004-2005 se obtiene $r^2 = 0.92$ y una diferencia de 81 mmeq.a.

Los promedios de los balances anuales en ambos métodos indican un registro mayoritario de balances negativos y una importante variabilidad de un año a otro ($B_n = -283$ mmeq.a., $s = 672$ mmeq.a.; $B_h = -249$ mmeq.a., $s = 791$ mmeq.a.).

El balance acumulado anual para el periodo 1993-2008, en promedio, indica una razón de cambio de -213 mmeq.a./año. Los periodos con razones de cambio negativas son más extensos y más frecuentes.

Los parámetros anuales (ELA y AAR) para el periodo 1993-2008, presentan una buena correlación con el balance de masa neto (bn): $r^2=0.85$ y 0.75 respectivamente.

Los balances anuales (sondeos) distribuidos en proporción a la distribución de la precipitación permiten el cálculo mensual de los balances en la zona alta del glaciar. Así, para el año 2007-2008 se obtiene un $Bn_alta=512\pm238$ mm eq.a.

El cálculo del balance de masa en la zona baja del glaciar para el año 2007-2008, utilizando exclusivamente los datos de las balizas, nos proporciona el siguiente resultado: $Bn_baja=-305\pm131$ mm eq. a.

El balance neto específico del glaciar para el año 2007-2008 obtenido a partir de los balances mensuales es $Bn=207\pm369$ mm eq.a., el mismo que presenta un error porcentual de 24% respecto al balance anual obtenido directamente.

Los parámetros mensuales del glaciar, ELA y AAR, presentan una buena correlación con el balance neto mensual ($r^2=0.87$ y 0.85) respectivamente.

Bn y Bh mensuales presentan una estacionalidad muy parecida ($r^2=0.71$), más aún en las estaciones de transición y húmeda ($r^2=0.89$). Bh anual es igual a 453 ± 201 mm eq.a. y representa un error porcentual de 43% relativo a Bn (anual).

Según la validación, el cálculo del balance a nivel mensual es coherente con los resultados anuales.

Las incertitudes en la zona alta son de tomar en cuenta, pues representa 2/3 de todo el glaciar. A escala mensual las incertitudes son las mismas y más aún al considerarse una hipsometría invariante.

Capítulo 6

6 Análisis de los balances de masa glaciológico e hidrológico

En el presente capítulo se analizan las series de tiempo de balances de masa obtenidos en el capítulo anterior. Para tal efecto, se divide el capítulo en tres partes: En la primera parte se analizan los promedios y las variabilidades asociadas. En la segunda parte se analizan las series temporales mensuales de Bn_alta, Bn_baja, Bn y Bh. Finalmente, en la tercera parte se analizan las series de balance de masa con otras series procuradas para el mismo periodo de nuestro interés (series de temperatura, precipitación, caudal e índices ENSO).

6.1 Valores promedios de balance de masa

La figura 6.1 muestra los diferentes balances de masa mensuales para todos los años hidrológicos comprendidos en el periodo 1993-2008, obtenidos por el método indicado en el capítulo anterior; así mismo, se precisa el promedio y las barras de error correspondientes.

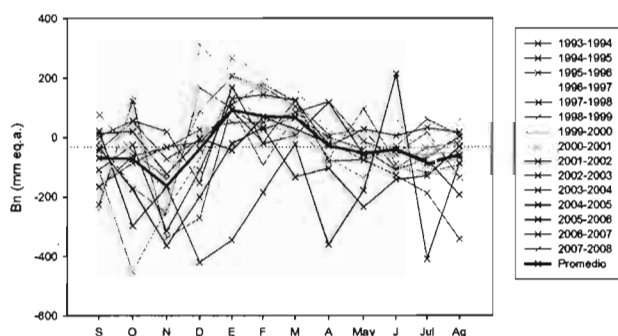
Con respecto a Bn, en la figura 6.1.a, puede apreciarse que principalmente la variabilidad de un año a otro ocurre en los meses octubre-abril que coincide con la estaciones de transición y húmeda. Este hecho sugiere el control del balance anual por el balance en los meses de octubre-abril y se confirma con la fuerte correlación respectiva ($r^2=0,92$); ó también la correlación entre oct-feb y el balance anual ($r^2=0.89$). Estos resultados son consistentes con aquellos de estudios previos que indican que el balance de masa anual de los glaciares en Bolivia dependen fuertemente del inicio de la temporada de precipitaciones (Wagnon et al., 1999; Sicart, 2002; Francou et al., 2003). Los otros balances mostrados en la figura 6.1 (Bn_abl, Bn_acum y Bh) presentan un comportamiento semejante a Bn. Adicionalmente se encuentra una buena correlación entre los balances glaciológico e hidrológico entre los meses oct-mar (0.96).

En la figura se observa que los años con mayor ablación corresponden a los años hidrológicos 1997-1998 y 2004-2005 (líneas azules), inversamente los años 1996-1997 y 2000-2001 (líneas amarilla y gris respectivamente). Un análisis más detallado de los años indicados es realizado en el capítulo 7.

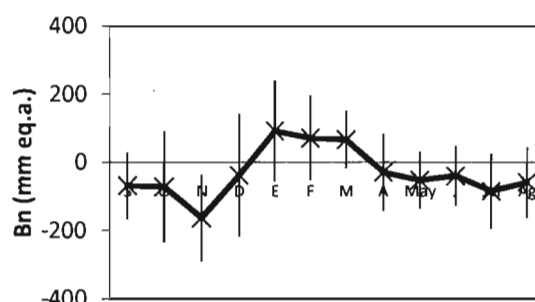
En la tabla 5.13 se resumen las (mejores) correlaciones encontradas (nótese que estos resultados tienen una buena concordancia con los gráficos respectivos de la derecha). Conocer esta variabilidad es importante porque ante una buena correlación y sabiendo la relación funcional de las variables será posible realizar alguna reconstrucción anual conociendo solamente el balance de un número determinado de meses.

Tabla 5.13. Buenas correlaciones encontradas entre los diferentes balances de masa y los balances entre octubre y abril, octubre y febrero u octubre y marzo.

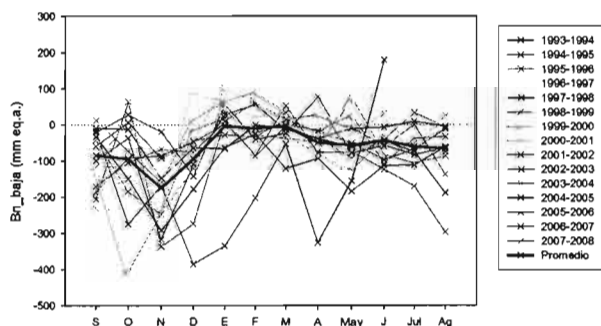
	Bn, Bn(oct-abr)	Bn_abl, Bn_abl(oct-feb)	Bn_acum, Bn_acum(oct-mar)	Bh, Bh (oct-mar)
r^2	0.92	0.86	0.96	0.96



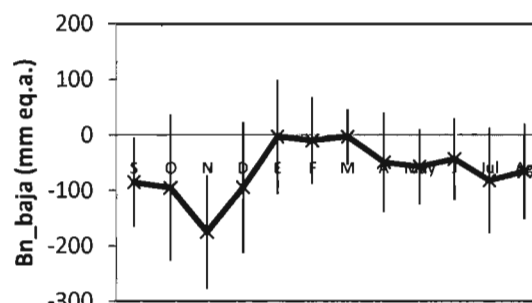
(a)



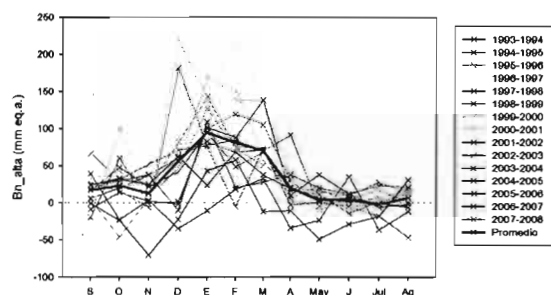
(b)



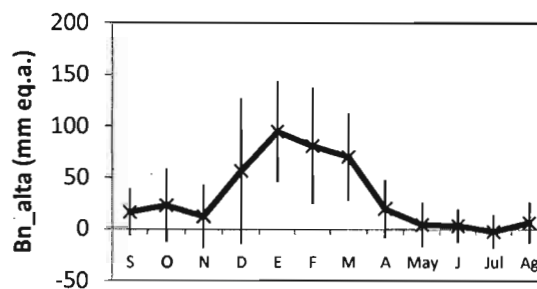
(c)



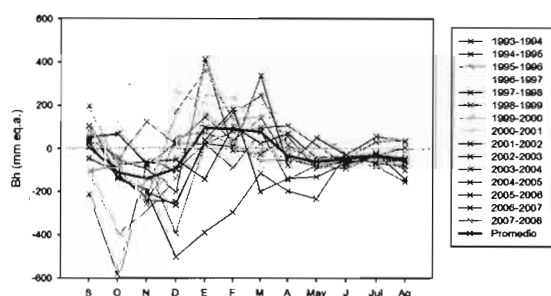
(d)



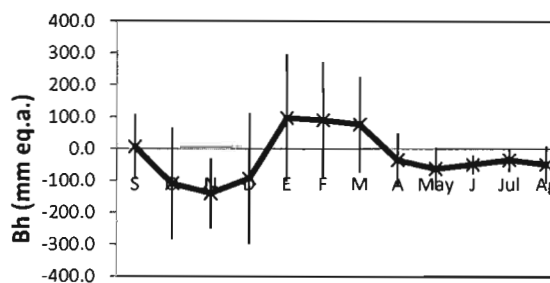
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 6.1. Balances de masa mensual del glaciar Zongo entre septiembre y agosto (año hidrológico) desde 1993 hasta 2008. La línea gruesa muestra el promedio mensual para los 15 años. (a) y (b) muestran el balance de masa glaciológico (Bn) y la variabilidad del promedio respectivamente; (c) y (d) muestran el balance de masa glaciológico en la zona baja (Bn_baja) y la variabilidad respectiva; (e) y (f) muestran el balance de masa glaciológico en la zona alta (Bn_alta) y las barras de error del promedio respectivamente; (g) y (h) muestran el balance de masa hidrológico (Bh) y las barras de error del promedio respectivamente.

Para concluir esta parte relacionada con los promedios, en la figura 6.2 se muestran los promedios de diferentes balances obtenidos para el periodo de los 15 años estudiados.

En Bn y Bh se observan tres periodos: uno de fuerte ablación (sep-dic), otro de acumulación (ene-mar) y el último de ablación moderada (abr-ago). Sin embargo, se encuentra una discrepancia en el mes de septiembre donde Bh=7mm eq.a., s=183 mm eq.a. y Bn=-69 mm eq.a., s=98 mm eq.a, discrepancia que puede ser aceptable dentro de los márgenes de variabilidad.

En una comparación de Bn, Bn_baja y Bn_alta observamos que la ablación (fuerte y moderada) está completamente determinada por Bn_abl, por otra parte, la acumulación está determinada por Bn_alta.

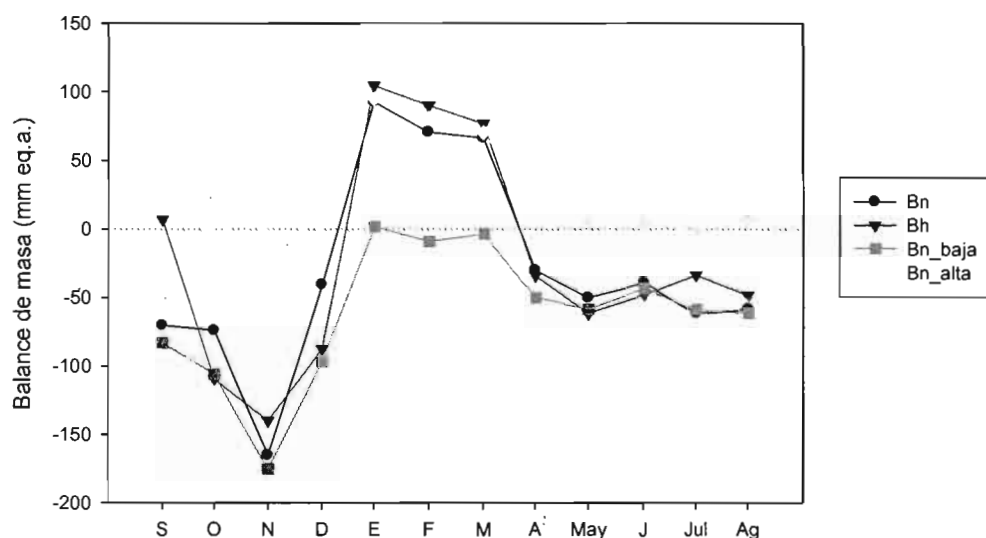


Figura 6.2. Promedios mensuales de los balances obtenidos para el periodo de 15 años estudiados (1993-2008).

6.2 Series temporales mensuales

6.2.1 Series de balance de masa

En la serie temporal mensual de Bn_baja (figura 6.3) se observa que los meses donde Bn_baja<0 son muy frecuentes, también se observan eventuales meses con balances de masa menores a 200 mm eq.a, y eventuales meses donde Bn_baja>0. En promedio, en todo el periodo de estudio, la tasa de ablación es de -64mm eq.a./mes, lo que representaría -768mm eq.a/año. Análogamente para la serie temporal mensual de Bn_alta se observan frecuentes meses donde Bn_alta>0 y eventuales meses

con $Bn_alta < 0$. La tasa de acumulación, en todo el periodo de estudio, es $+33 \text{ mm eq.a./mes}$. Según las tasas de cambio anteriormente descritas, sobre el glaciar se tendría una predominancia del proceso de ablación a un ritmo de -31 mm eq.a./mes . Este hecho puede ser corroborado en la figura 6.5 donde se observa que el proceso de ablación es predominante para el balance neto (principalmente el términos de estacionalidad e intensidad). En adición, se encuentra una alta correlación entre los datos mensuales del balance neto y los de la zona baja ($r^2 = 0.93$). Para el caso del balance en la zona alta se tiene una relativa buena correlación ($r^2 = 0.70$) (Véase la figura 6.6 para el detalle de las correlaciones).

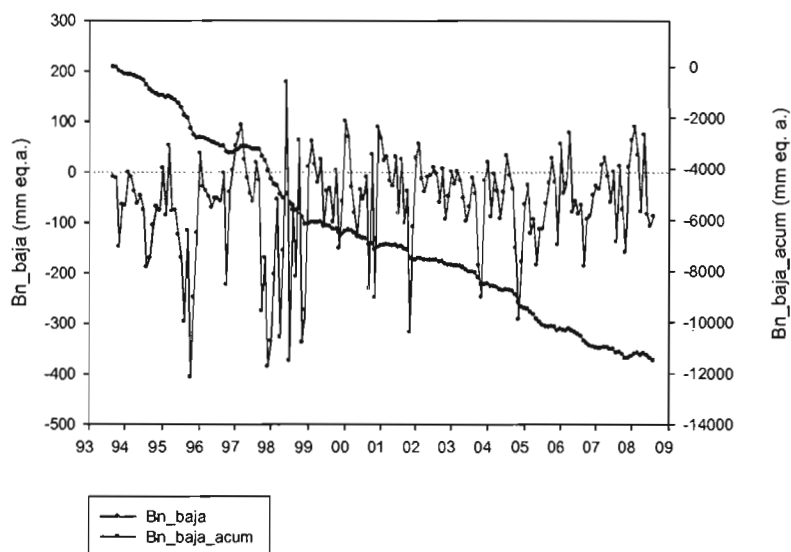


Figura 6.3 Serie temporal mensual del balance de masa (Bn_baja) y balance de masa acumulado (Bn_baja_acum) en la zona alta del glaciar.

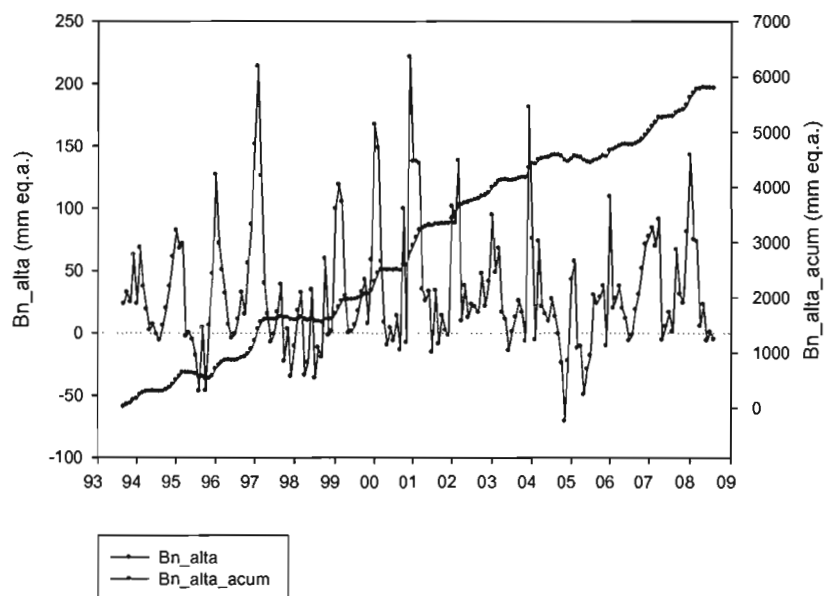


Figura 6.4 Serie temporal mensual del balance de masa (Bn_{alta}) y balance de masa acumulado (Bn_{alta_acum}) en la zona alta del glaciar.

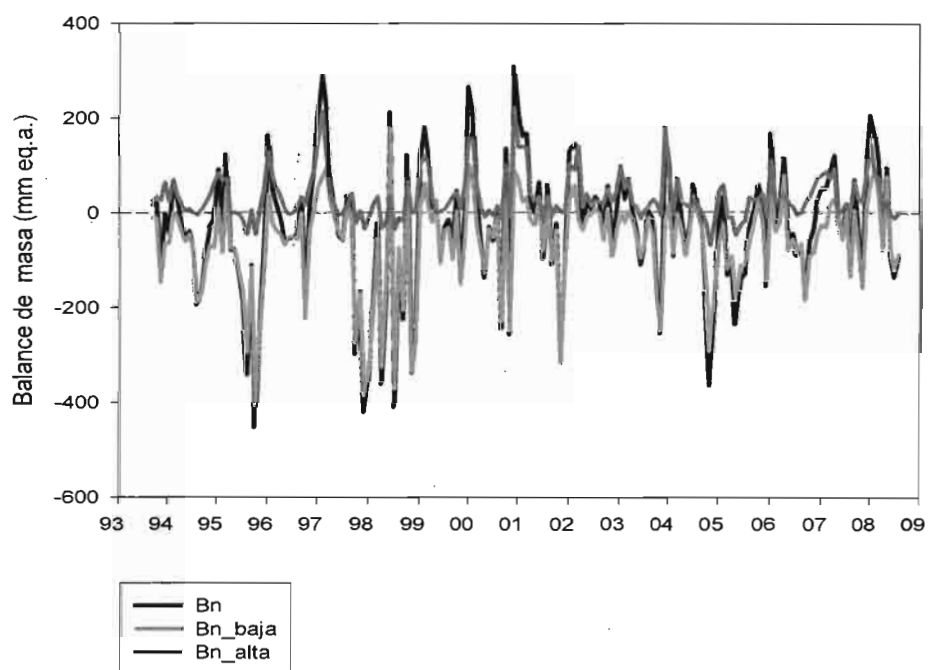


Figura 6.5. Series temporales mensuales de Balance neto (Bn), balance en la zona baja (Bn_{baja}) y balance en la zona alta (Bn_{alta}), todos superpuestos en el gráfico.

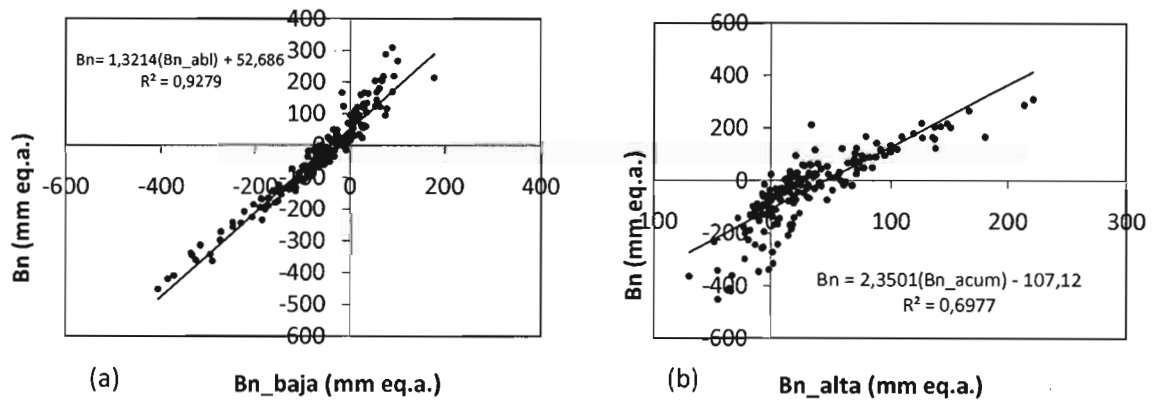


Figura 6.6. (a) correlación mensual entre el balance de masa neto (Bn) y el balance de masa en la zona de baja (Bn_baja). (b) correlación entre el balance de masa neto (Bn) y el balance de masa en la zona alta (Bn_alta).

Cuando se superponen los resultados de ambos métodos (Bn y Bh) se observa una buena respuesta simultánea, especialmente en periodos donde se tiene una fuerte ablación (figura 6.7). Para precisar mejor la diferencia entre ambos resultados se realizaron correlaciones directas en todo el periodo de estudio y de forma estacional (figura 6.8). Estos resultados indican una correlación baja en los diferentes años hidrológicos. Sin embargo, en la estación húmeda los métodos presentan una variabilidad similar ($r^2=0,83$). En las estaciones seca y de transición también se tiene una correlación mediocre.

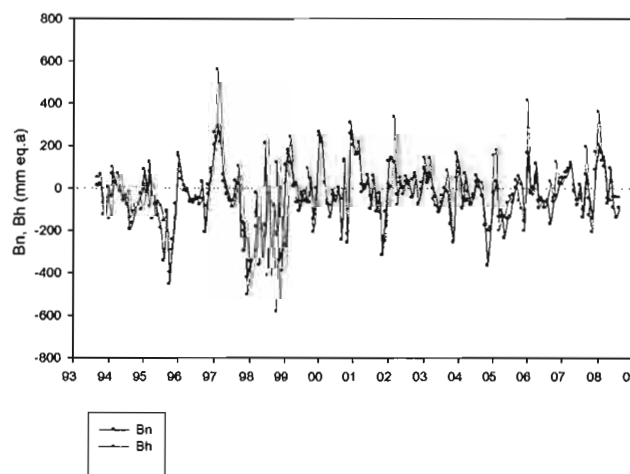


Figura 6.7. Series temporales mensuales de balances de masa glaciológico e hidrológico (Bn, Bh) para el periodo 1993-2008.

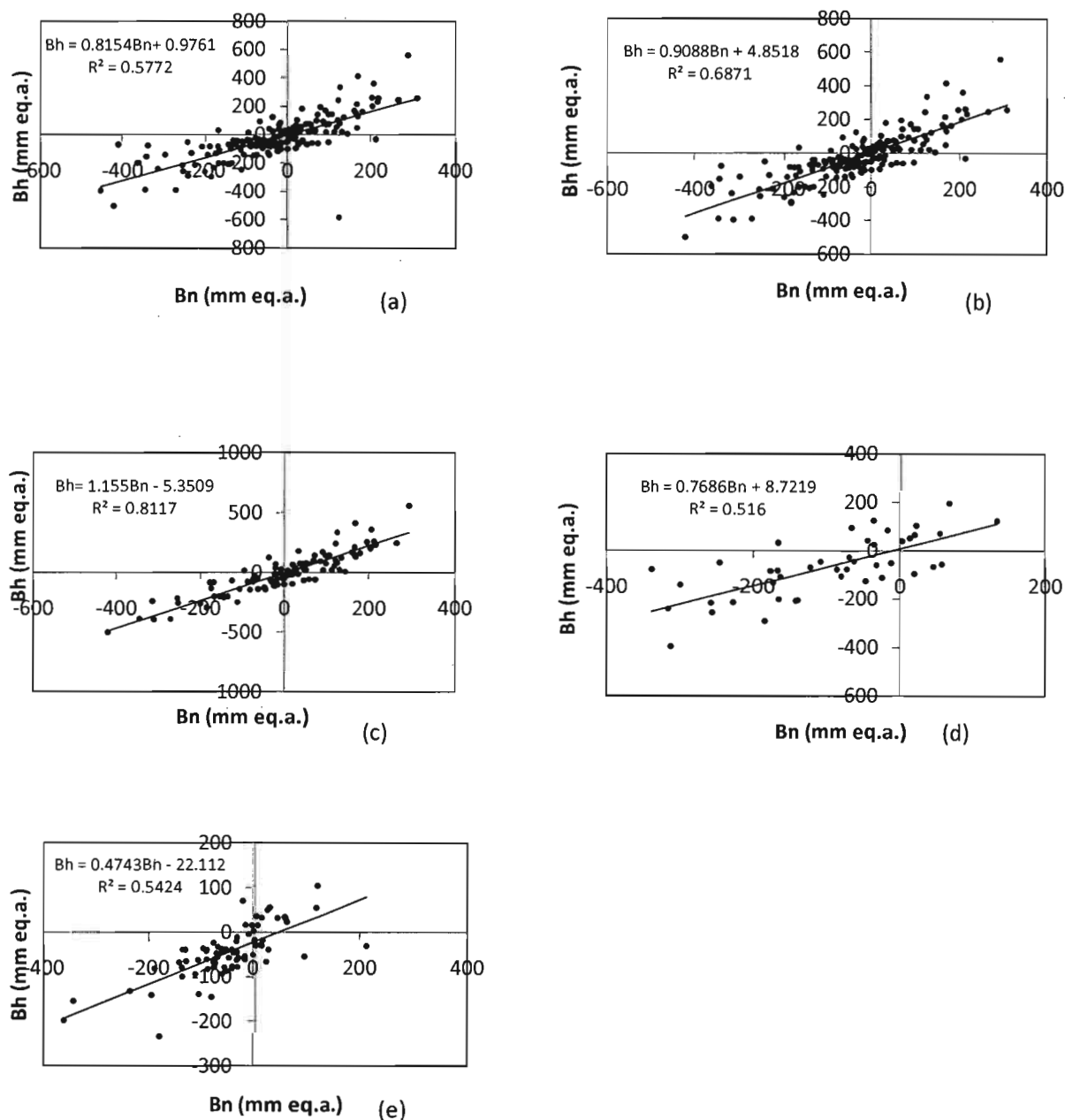


Figura 6.8. Correlaciones de balance de masa mensual de ambos métodos (Bh y Bn). En (a) se considera ambas series con todos sus datos; en (b) se quitan dos datos en Bn (jul/98 y oct/98). En (c) se considera la correlación entre diciembre y marzo. (d) correlacionen el periodo de transición (sept-nov). (e) correlación en la estación seca (abril-agosto).

Con respecto a los balances acumulados la figura 6.9 muestra los balances acumulados mensuales obtenidos por ambos métodos. Si bien la tendencia es la misma, Bh presenta una notable ablación (pendiente muy negativa) que corresponde a los periodos 5/95 – 12/95, 8/97 – 12/98 y 9/04 – 8/05 donde Bn se registra -220, -167 y -137 mm eq.a./mes respectivamente. Bh por su parte presenta -200, -253 y -111 mm eq.a./mes en los mismos periodos.

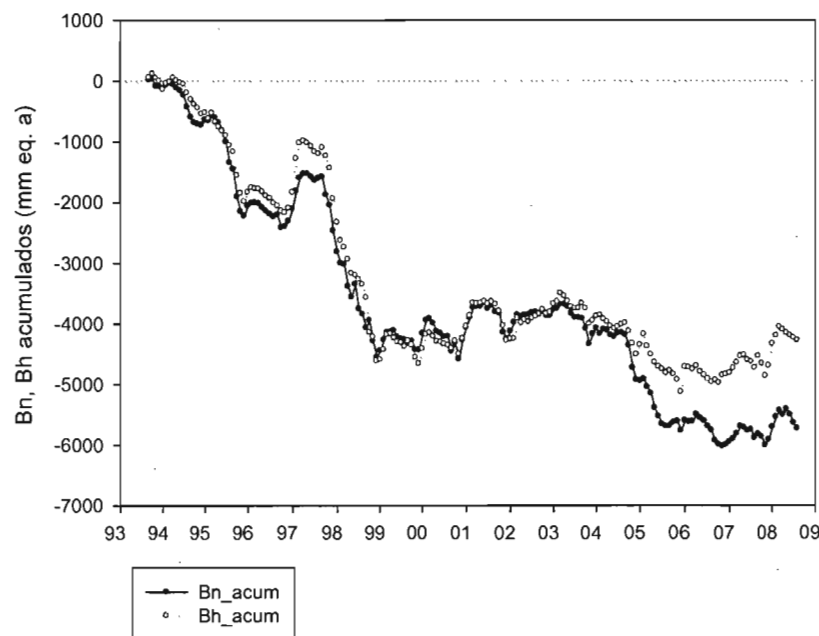


Figura 6.9. Balance de masa mensual acumulado en el periodo (1993-2008).

6.2.2 Series de índice ENSO y meteorología local

El análisis previo está dedicado a los balances de masa y los métodos utilizados. En esta sección se quiere aprovechar la serie temporal mensual de los 15 años estudiados y ver su relación (lineal) con otras series procuradas para el mismo periodo de nuestro interés (series de temperatura, precipitación, caudal e índices ENSO).

Las series temporales locales más extensas relativas al periodo de estudio corresponden a la temperatura del aire, precipitación, y caudal medidas en la estación MEVIS, en los pluviómetros

totalizadores y en la estación tubo respectivamente. Para el análisis se toma en cuenta tanto la intensidad como las anomalías (Véase en Anexos, tablas 10.15-10.19.)

Con respecto a la precipitación Los resultados indican que a lo largo del año hidrológico hay un buen control de la precipitación sobre la acumulación (Bn_alta) ($r^2=0.74$) y un control pobre sobre Bn y Bh ($r^2=0.32, 0.13$ respectivamente), lo que confirma el hecho de que la precipitación es la forma más importante de acumulación en la parte alta del glaciar, así mismo, en la integridad del glaciar el proceso de ablación es el predominante. Por las correlaciones hechas en la estación húmeda, se tiene un control más significativo de la precipitación sobre Bn y Bh ($r^2=0.55, 0.33$ respectivamente) lo que indica una relativa importancia (que no es significativa) de la precipitación en los balances de masa en el periodo húmedo (periodo donde el 66% de la precipitación anual ocurre).

Con respecto al caudal, en el periodo húmedo, la ablación (Bn_baja) parece explicar buena parte de las mediciones de caudal ($r^2=0.67$). De la misma forma hay una buena correlación entre el balance hidrológico y el caudal ($r^2=0.77$) aunque debe recordarse que ambas variables no son independientes.

A nivel mensual, la temperatura no parece indicar relación (lineal) con los balances calculados.

De la misma forma que con algunas variables locales (P , Q y T), a continuación se consideran algunos índices ENSO (de significancia regional) para determinar su influencia sobre los balances de masa medidos. La figura 6.10 muestra los balances masa en la zona de ablación (Bn_baja) y la anomalía de los índices NIÑO 1+2. Las franjas más gruesas corresponden valores en el periodo húmedo que es donde se halla la mejor correlación ($r^2=0.37$). Algo similar ocurre con los índices MEI y Bn_baja ($r^2=0.31$). Dos puntualizaciones finales: T y Q presentan correlaciones de 0.22 y 0.37 con índice EL NIÑO 1+2 y con la anomalía del índice NIÑO 1+2 respectivamente.

Es difícil encontrar una muy buena correlación lineal de las variables con los índices ENSO. El siguiente paso para el análisis pienso que es el análisis de las variables con un desfase de 1, 2 y 3 meses. Al trabajar con esto un poco obtenemos una mejora en la correlación de Bn_baja y la anomalía del Niño 1+2 donde se obtiene una correlación de 0.45 en el periodo húmedo.

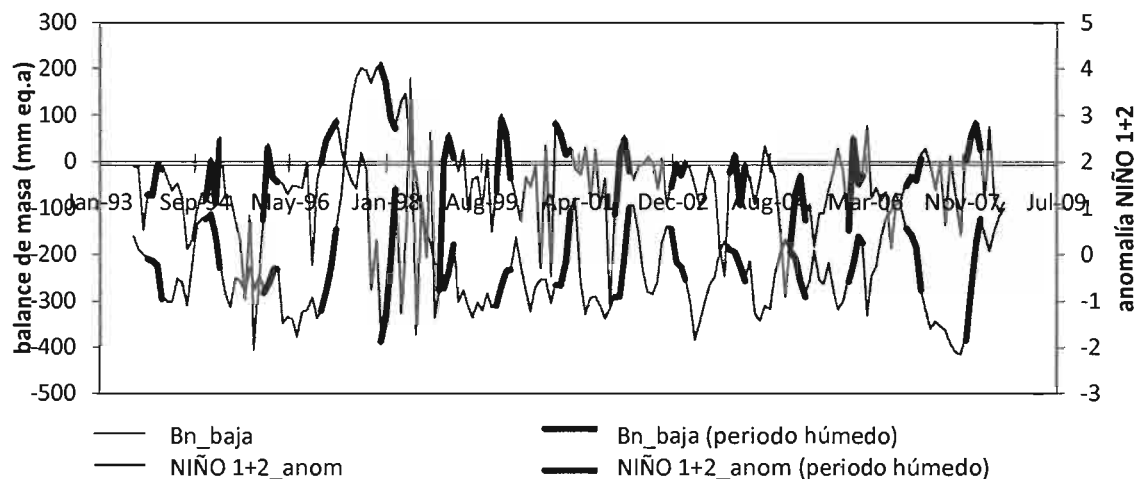


Figura 6.10. Balance de masa en la zona baja y anomalía de índice NIÑO 1+2. Los segmentos más gruesos corresponden a la estación húmeda.

De todas maneras, cuando graficamos los índices ENSO y la serie de balances acumulados observamos que los periodos con balance notoriamente negativo (áreas rojas) se corresponden con eventos Niño particularmente el periodo mayo/97 -diciembre/98 donde todos los índices coinciden en indicar la existencia de un evento niño muy fuerte (figura 6.11). Los periodos con balance de masa notoriamente positivos (áreas azules) no se corresponden con eventos Niño en todos los índices estudiados a excepción del Índice ENSO Multivariante (MEI) donde se aprecia una buena respuesta. Sin embargo, no se observa una respuesta absoluta en todos los casos, es decir, si hay un periodo Niño no implica necesariamente un balance de masa negativo a excepción de los periodos Niño/Niña muy fuertes esto viene a respaldar las bajas correlaciones lineales encontradas entre los diversos índices ENSO y los balances de masa.

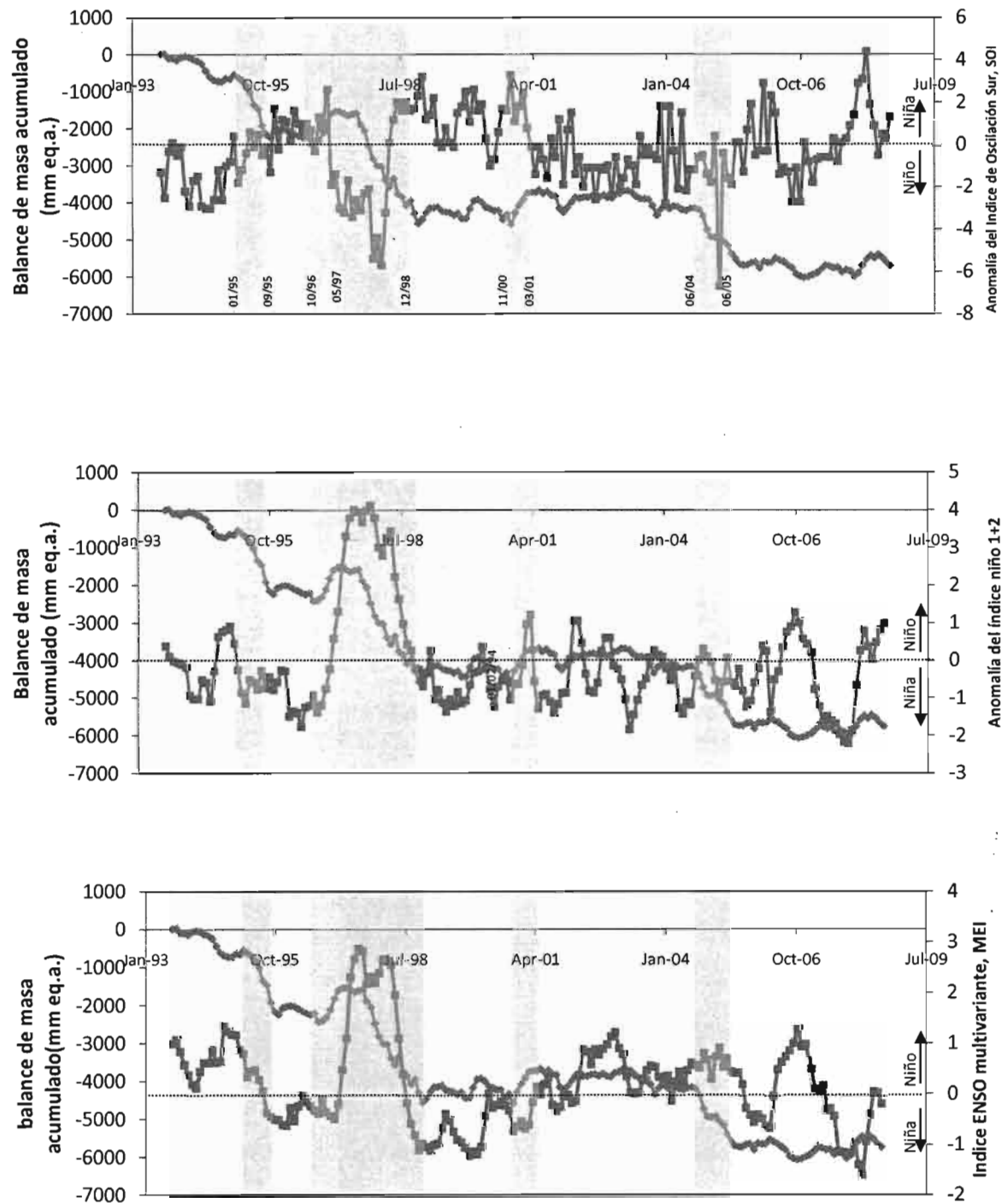


Figura 6.11. Diferentes índices (o anomalías de estos) y balance de masa acumulado para el periodo estudiado (1993-2008).

6.3 Conclusiones del capítulo

Para el periodo estudiado (1993-2008), la variabilidad de los balances de masa (B_n , B_{n_baja} , B_{n_alta} , B_h) de un año a otro ocurre principalmente en los meses octubre-abril que coincide con la estaciones de transición y húmeda. Particularmente para B_n , este hecho sugiere el control anual del mismo por el balance en los meses oct- abril ($r^2=0.92$) o tal vez, oct-feb ($r^2=0.96$). Así mismo, en los meses oct-abr se encuentra una muy buena correlacion entre B_n y B_h ($r^2=0.96$).

Los promedios mensuales de B_n y B_h para todo el periodo estudiado (1993-2008) muestran el año hidrológico dividido en tres periodos: uno de fuerte ablación (sep-dic), otro de acumulación (ene-mar) y el último de ablación moderada (abr-ago).

En una comparación de B_n , B_{n_baja} y B_{n_alta} observamos que la ablación (fuerte y moderada) está determinada por B_{n_abl} y la acumulación está determinada por B_{n_alta}

En las series temporales mensuales de B_{n_baja} y B_{n_alta} se observan que los meses con $B_{n_baja}<0$ y $B_{n_alta}>0$ respectivamente son muy frecuentes. Con ayuda de los gráficos de balance de masa acumulados se determina que la tasa de balance de masa mensual es de -64mm eq.a/mes y +33 mm eq.a/mes en las zonas baja y alta respectivamente.

Se encuentra una alta correlación entre los datos mensuales del balance neto y los de la zona baja ($r^2=0.93$).

Ambos métodos (B_n y B_h) presentan una correlación fuerte en la estación húmeda ($r^2=0.83$) (lo que sin duda podría revelar la dependencia de ambos métodos de la distribución de precipitación). Así mismo, correlaciones mediocres en las estaciones de transición ($r^2=0.51$) y húmeda ($r^2=0.51$) pudiendo intervenir procesos diferentes relativos a ambos métodos utilizados (sublimación mayoritaria en el caso glaciológico y fusión en el caso hidrológico)

Con respecto a la precipitación Los resultados indican que a lo largo del año hidrológico hay un buen control de la precipitación sobre la B_{n_alta} ($r^2=0.74$) y un control pobre sobre B_n y B_h ($r^2=0.32$, 0.13 respectivamente). Sin embargo, en la estación húmeda se tiene un control más significativo de la precipitación sobre B_n y B_h ($r^2=0.55$, 0.33 respectivamente).

En el periodo húmedo la ablación (B_{n_abl}) explica buena parte ($r^2=0.67$) del caudal medido.

La temperatura no parece indicar relación con los balances medidos.

Las correlaciones encontradas entre los índices ENSO y las series temporales de Bn y Bn_baja son muy deficientes. La única correlación considerable es aquella entre Bn_abl y la anomalía del índice NIÑO 1+2 : $r^2=0.37$.

Los índices ENSO estudiados tienen una relativa buena correspondencia con los balances de masa, de manera que periodos Niño/Niña se corresponden con balances de masa negativo/positivo. Los años con balance de masa muy negativos o positivos muestran una respuesta más evidente a los índices ENSO estudiados.

Capítulo 7

7 Análisis mensual de periodos determinados

En el presente capítulo se busca comprender las diferencias de tipo glaciológico y meteorológico de cinco años hidrológicos: dos de ellos caracterizados por una acumulación ($\text{balance} > 0$) fuerte y moderada, los dos siguientes por una ablación ($\text{balance} < 0$) fuerte y moderada y un último con balance de masa casi nulo. En la última parte de este capítulo se busca identificar cuáles son las principales variables “forzantes” del balance de masa medido.

Los dos años extremos seleccionados corresponden a 1996-1997 y 1997-1998 donde los balances anuales son máximo y mínimo respectivamente. Los años moderados son 2000-2001 y 2004-2005 y finalmente el año con balance de masa casi cero es 2005-2006 (figura 7.1).

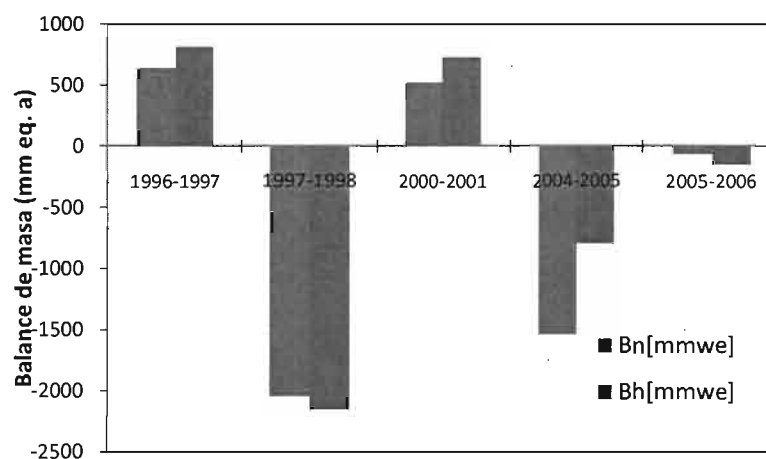


Figura 7.1. Balances de masa glaciológicos (Bn) e hidrológicos (Bh) anuales de los años seleccionados para el análisis.

7.1 Comparación simultanea

7.1.1 Balance de masa

La figura 7.3(a) muestra los diferentes balances mensuales obtenidos para los cinco periodos estudiados. En (b) se muestra solamente el balance en la zona de ablación y en el tramo altitudinal 5000-5100 (Bn_abl_“5050”) porque pensamos que las mediciones meteorológicas sobre el glaciar tienen una representatividad local, de esta manera Bn_abl_5050 hace referencia al tramo altitudinal en el cual se encuentra la estación SAMA. Debe puntualizarse que en los dos primeros periodos la estación SMA se encuentra a 5150 msnm y en los tres restantes la estación se encuentra a 5050 msnm. De allí el uso de las comillas en la altitud (“5050”).

En los periodos donde se registran acumulación (balance de masa >0) hay una mejor correlación entre ambos métodos (Bn y Bh) que en los periodos donde se registra ablación (balance de masa <0) ($r^2=0.80$ y $r^2=0.59$ respectivamente), este hecho podría estar relacionado con la dependencia de la distribución de la precipitación en ambos métodos que ante elevadas intensidades (también en los sondeos) se hace más evidente. Por otra parte, en los periodos de ablación, Bn_baja es quien principalmente controla la estacionalidad de Bn ($r^2=0.98$).

En los 5 años, Bn_baja_“5050” presenta una buena correlación con Bn_baja (en promedio $r^2=0.91$) y Bn_abl controla Bn. Con respecto a la acumulación, la precipitación ejerce un buen control de Bn_alta en los periodos de acumulación ($r^2=0.97$) y un mal control en periodos de ablación ($r^2=0.37$), debido a que el proceso de ablación, en años con balance muy negativo, supera los 5300 msnm y llega a modular el balance en la zona alta.

Con respecto a los balances de masa obtenidos por diferentes métodos en la figura 7.3.a se observa que para los años con balance positivo (periodos 1 y 3), el periodo de mayor acumulación se registra en los meses de diciembre-febrero; y periodos de ablación moderada se registran en las estaciones de transición y seca. Así mismo, para los años con balance negativo, son los meses de octubre-diciembre y abril-mayo los meses de mayor ablación y no hay un periodo marcado de acumulación. Para el periodo con balance casi cero la acumulación se da en la estación húmeda y la ablación en las estaciones de transición y seca (distribución parecida al promedio de los 15 años estudiados. Cf. capítulo 6). En la zona baja, donde se encuentran las balizas, en los años de balance positivo se observa una acumulación neta de enero a marzo. Por otra parte, en los años de balance negativo no existen periodos de acumulación sobre el glaciar en esta zona (figura 7.3.b).

Los parámetros ELA y AAR obtenidos mensualmente (figura 7.3.c) presentan una mejor correlación con Bn en años con balances positivos ($r^2_{ELA}=0.71, r^2_{AAR}=0.77$) que en años con balances negativos ($r^2_{ELA}=0.49, r^2_{AAR}=0.51$). El promedio de los parámetros de todos los meses de un año hidrológico presenta un bajo error porcentual relativo a los parámetros anuales. (tabla 7.1).

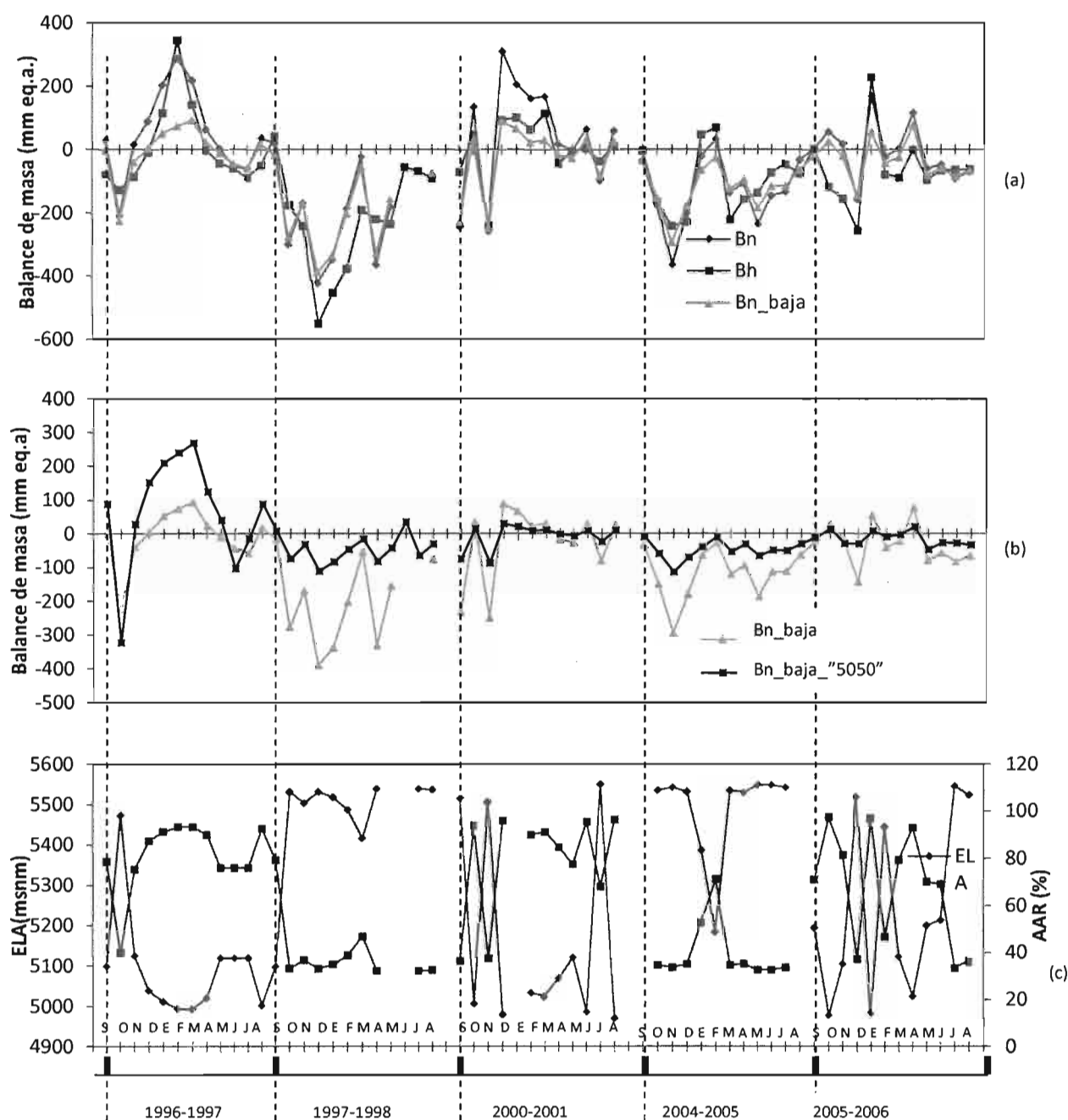


Figura 7.3. (a) el balance de masa glaciológico (Bn), el balance hidrológico (Bh) y el balance en la zona baja (Bn_baja). (b) Balance de masa en la zona baja (Bn_baja) y el balance en la zona baja a una altitud de 5050 (Bn_abl_5050). (c) Parámetros mensuales ELA y AAR del glaciar. La línea segmentada vertical refiere al primer mes del año hidrológico correspondiente.

Tabla 7.1. Promedios de los parámetros (ELA, AAR) de todos los meses de un respectivo año hidrológico. También se muestra los errores porcentuales relativos a los valores obtenidos directamente a escala anual.

Año hidrológico	ELA (msnm)		AAR (%)	
	Promedio anual	erp(%)	Promedio anual	erp(%)
1996-1997	5093	0.4	81	17
1997-1998	5470	0.9	40	14
2000-2001	5160	0.4	79	5
2004-2005	5488	0.5	40	7
2005-2006	5238	0.9	68	5

7.1.2 Precipitación

Como puede observarse en la figura 7.4 la precipitación mensual tiene una notable variación de un año a otro y las principales diferencias son: la cantidad de precipitación anual (tabla 7.3), los eventos máximos y mínimos y el retraso o adelanto del "corazón" de la estación húmeda (enero-marzo) respecto de un promedio (figura 7.5). En este sentido la precipitación juega un rol importante en la superficie del glaciar de manera que si hay un retraso, no hay una cobertura de nieve fresca en la superficie del glaciar y el albedo es bajo justamente en el verano austral cuando la radiación solar incidente (flujo energético incidente mayoritario) es máxima. Adicionalmente, si la intensidad de precipitación es reducida el proceso de ablación se hace más pronunciado (figura 7.4). Como puede observarse en la tabla 7.2 los años con balance positivo (1996-1997 y 2000-2001) presentan una precipitación anual excedente con respecto al promedio de los 15 años estudiados contrariamente a lo que sucede en los años con balance negativo. En el año con balance casi cero no presenta una gran diferencia de precipitación anual relativa al promedio de los 15 años.

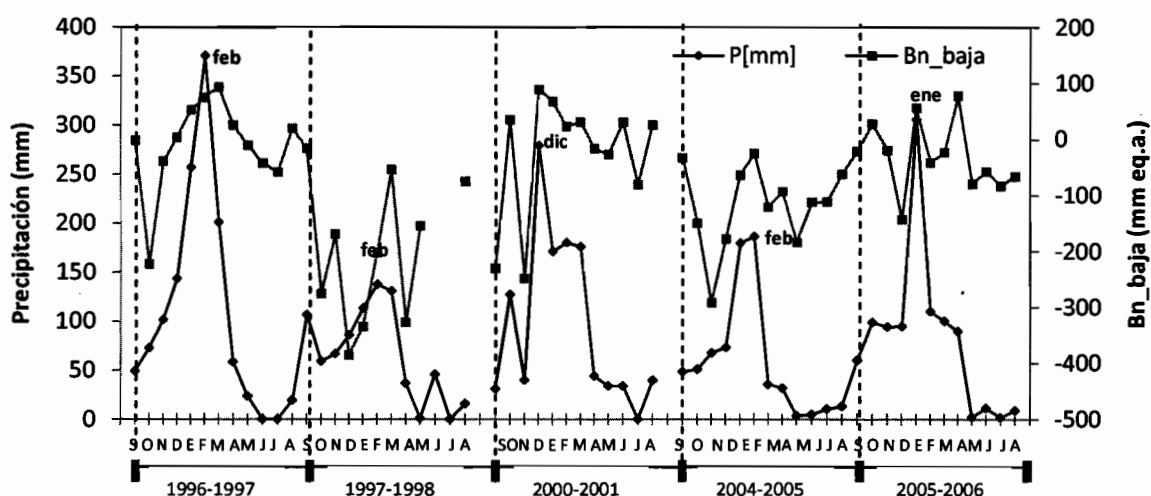


Figura 7.4. Precipitación (P) y balance de masa en la zona baja (Bn_baja) mensuales de los cinco periodos estudiados. Las líneas segmentadas verticales corresponden al inicio del año hidrológico (septiembre). El mes escrito corresponde al máximo de precipitación en el año hidrológico respectivo.

Tabla 7.2. Precipitación anual y diferencia porcentual (erp) relativa al promedio de los 15 años (1993-2008).

	Prom (15 años)	1996-1997	1997-1998	2000-2001	2004-2005	2005-2006
Precip. Anual (mm)	679	1015	530	914	506	635
erp (%)	0	38	-15	23	-25	4

La figura 7.5 permite realizar un análisis comparativo de las distribuciones con respecto al promedio de los 15 años. En los periodos 1996-1997 y 2004-2005 se observa una distribución mensual similar al promedio pero con intensidades superiores e inferiores respectivamente; en el primer caso (1996-1997), esto determina una importante acumulación a lo largo del año hidrológico y principalmente en la estación húmeda (incluso en la zona baja Figura 7.3(b)). En el segundo caso (2004-2005) el glaciar experimenta una acumulación débil y una importante ablación. En un análisis similar, los

periodos 1997-1998 y 2000-2001 presentan una diferencia importante en cuanto al desfase de los máximos de precipitación (aunque las intensidades tampoco son despreciables); en el primer caso (1997-1998) es entre febrero y marzo que se tiene el máximo de precipitación, en el segundo caso (2000-2001) se tiene una distribución bastante irregular en comparación al promedio pero con precipitaciones importantes en los meses de octubre y diciembre. Queremos hacer énfasis en el año 1997-1998, donde el retraso del máximo de precipitación asociado a una baja intensidad de precipitación procura los registros más elevados de ablación en toda la serie de datos estudiada.

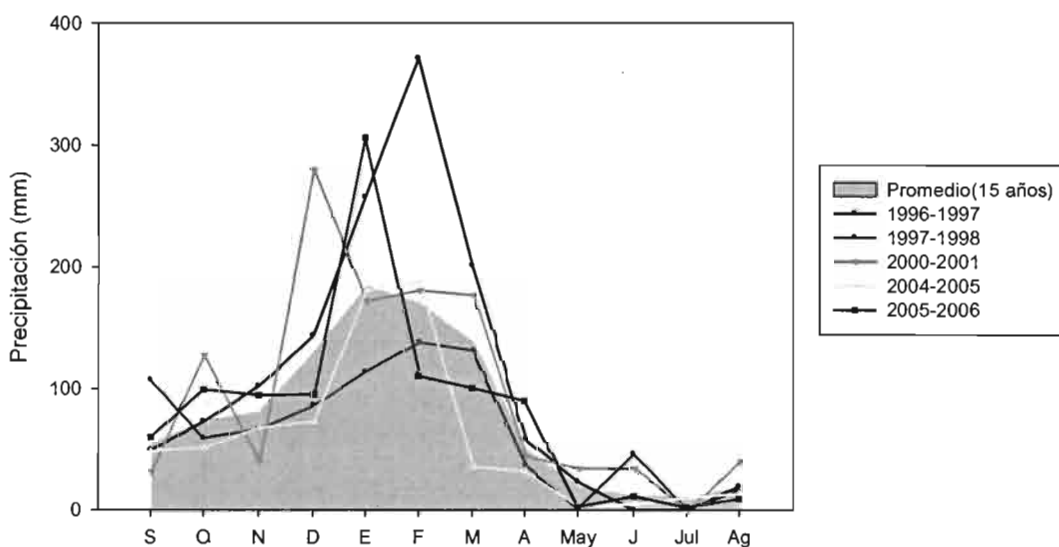


Figura 7.5. Precipitación mensual de los años extremos y del promedio de 15 años (1993-2008).

7.1.3 Temperatura, humedad relativa y viento

En la figura 7.6 se muestran las temperaturas mensuales sobre el glaciar (a 5150 msnm para los periodos 1 y 2 y a 5050 msnm para los tres periodos restantes) y sobre la morrena (a 5165 msnm). De manera general se puede ver que cada año presenta un periodo de máxima temperatura correspondiente al periodo húmedo; un periodo de mínima temperatura correspondiente al periodo seco y un periodo de transición. Las temperaturas de la morrena coinciden con aquellas sobre el glaciar en los tres primeros meses de transición. En cambio, en el periodo húmedo hay un

comportamiento singular en cada año hidrológico. En gran parte del periodo seco se observa una diferencia de ambas temperaturas, siendo la temperatura de la morrena mayor que la del glaciar. Esta diferencia en la estación seca (y eventualmente la húmeda) posiblemente se deba a que el viento catabático es máximo en la estación seca pero para precisar esto sería necesario ver en detalle las medidas diarias sobre un periodo de tiempo más extenso hecho que escapa a las expectativas del presente trabajo.

Sobre el glaciar los promedios anuales de temperatura más bajos corresponden a los periodos 1996-1997, 2000-2001 y 2005-2006 (tabla 7.5), los mismos que corresponden a los balances positivos (exceptuando el último que es cercano a cero). Los periodos 1997-1998 y 2004-2005 presentan las temperaturas más elevadas y corresponden a balances negativos aunque no proporcionales. De manera estacional, en los cinco periodos, las temperaturas en la estación húmeda son las más elevadas, por el contrario, en la estación seca se registran las temperaturas más bajas.

Tabla 7.3. Promedios anuales y estacionales de la temperatura (en °C) de los cinco periodos estudiados.

	1996-1997	1997-1998	2000-2001	2004-2005	2005-2006
Prom. anual	-1,8	-0,5	-0,8	-0,4	-1,1
Prom. Periodo de transición	-1,4	-0,2	-0,5	-0,3	-1,2
Prom. Periodo húmedo	-0,3	1,1	-0,1	0,5	0,4
Prom. Periodo seco	-3,8	-2,6	-2,0	-1,2	-2,6

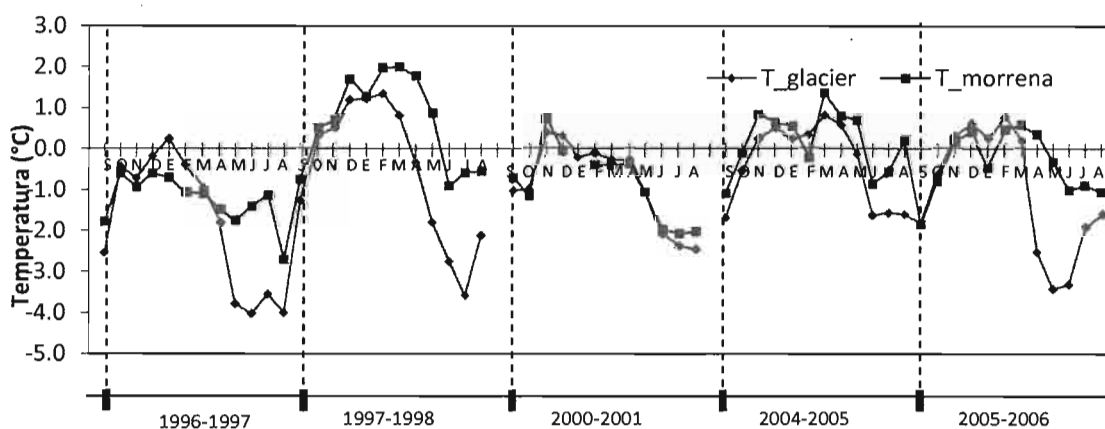


Figura 7.6. Promedios mensuales de temperatura sobre el glaciar (5150 msnm) y sobre la morrena (5165 msnm).

La figura 7.7 presenta los promedios mensuales de humedad relativa de los 5 años estudiados, aquí puede apreciarse que no hay una gran variación de un año a otro (en promedio, la humedad relativa para los 5 periodos es de 65%, $s = 5\%$). Los promedios estacionales (tabla 7.6) tampoco presentan una marcada variación, (excepto en la estación seca del periodo 1996-1997 donde se registra una humedad relativa del 32%). La estacionalidad marcada en todos los años tienen relación con la estacionalidad de la temperatura ($r^2 = 0.65$ en promedio) (una parcela de aire más caliente puede contener más vapor de agua).

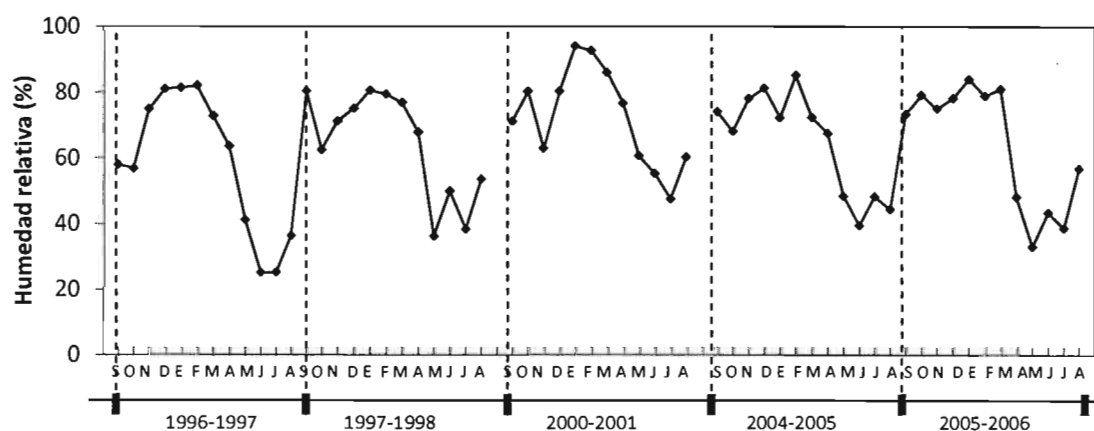


Figura 7.7. Promedios mensuales de la humedad relativa sobre el glaciar(5150 msnm).

Tabla 7.6. Promedios anual y estacional de la humedad relativa (en %) sobre el glaciar.

	1996-1997	1997-1998	2000-2001	2004-2005	2005-2006
Prom. anual	58	64	72	65	64
Prom. Periodo de transición	63	70	73	72	69
Prom. Periodo húmedo	79	78	88	78	81
Prom. Periodo seco	31	45	56	45	43

El viento sobre el glaciar presenta una estacionalidad que está en inversa proporción a las dos variables estudiadas previamente (figura 7.8). Así los valores más elevados de viento se registrarán en la estación seca y los menores en la húmeda (tabla 7.7) registrándose correlaciones promedio de $r^2=0.62$ con la temperatura y 0,78 con la humedad relativa.

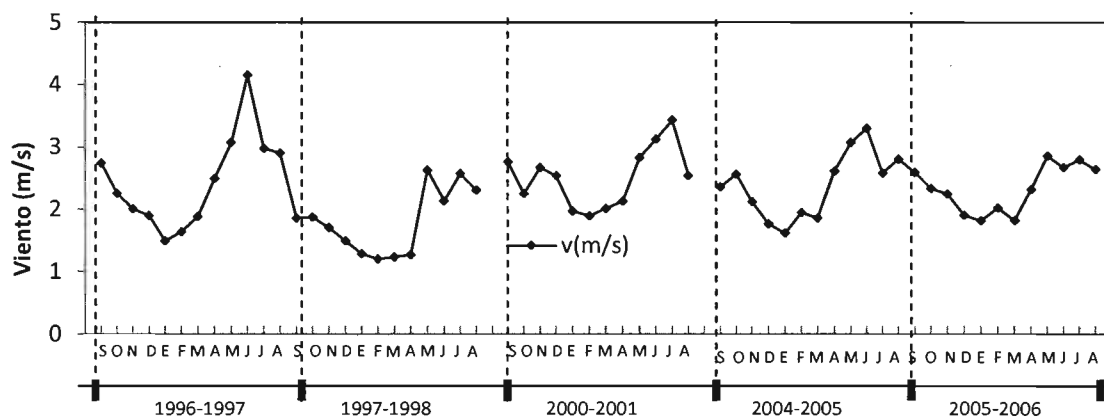


Figura 7.8. Promedios mensuales de viento sobre el glaciar.

Tabla 7.5. Promedios anual y estacional de viento (en m/s) sobre el glaciar

	1996-1997	1997-1998	2000-2001	2004-2005	2005-2006
Prom. anual	2.5	1.8	2.5	2.4	2.3
Prom. Periodo de transición	2.4	1.7	2.5	2.4	2.4
Prom. Periodo húmedo	1.7	1.3	2.1	1.8	1.9
Prom. Periodo seco	3.3	2.4	3.0	2.9	2.7

7.1.4 Radiación de onda corta

La distribución de SW_{in} medida sobre el glaciar (5150 msnm) en los 5 años es muy variable (figura 7.9, tabla 7.6). Sin embargo, los promedios anuales no presentan una gran diferencia (promedio de los 5 años igual a 212 W/m^2 , $s=6 \text{ W/m}^2$). Los factores que controlan la radiación solar incidente son la radiación solar potencial en la superficie externa de la atmosfera (SW_{extra}) y la frecuencia y tipo de nubes. En los años de balance positivo la correlación mensual de SW_{in} y Bn_{baja} "5050" es importante ($r^2=0.51$ y 0.62 para los periodos 2006-2007 y 2000-2001 respectivamente), contrariamente, en los años de balance negativo las correlaciones encontradas son malas ($r^2=0.07$ y 0.19 para los periodos 1997-1998 y 2004-2005 respectivamente). Para el caso del año estacionario la correlación es mala ($r^2=0.10$). Similares valores de r^2 se obtienen para los casos SW_{in} , Bn_{baja} , y SW_{in} , Bh . Los promedios de SW_{in} en las estaciones de transición y seca son mayores a aquellas registradas en la estación húmeda (tabla 7.6).

Por su parte SW_{out} presenta una notable variabilidad de un año a otro (promedio de $SW_{out} = 123.6 W/m^2$ y $s = 21.3 W/m^2$), determinando así la variabilidad de S . Los promedios anuales indican que para los periodos con balance negativo los valores anuales de SW_{out} son menores que en los años de balance positivo; lo que es consistente con la alta probabilidad de encontrar una superficie desprovista de nieve fresca y elevadas cantidades de radiación de onda corta incidente en años de balance negativo. De manera estacional y de manera mensual es difícil establecer una relación inmediata de SW_{in} con la ablación o la precipitación (tabla 7.7), sin embargo, no se descarta la débil correlación mensual encontrada entre SW_{out} y la precipitación ($r^2=0.50$, exceptuando el año 1997-1998 de muy baja correlación) y la correlación entre SW_{out} y Bn_{baja_5050} ($r^2=0.46$, igualmente exceptuando el año 1997-1998 de muy baja correlación).

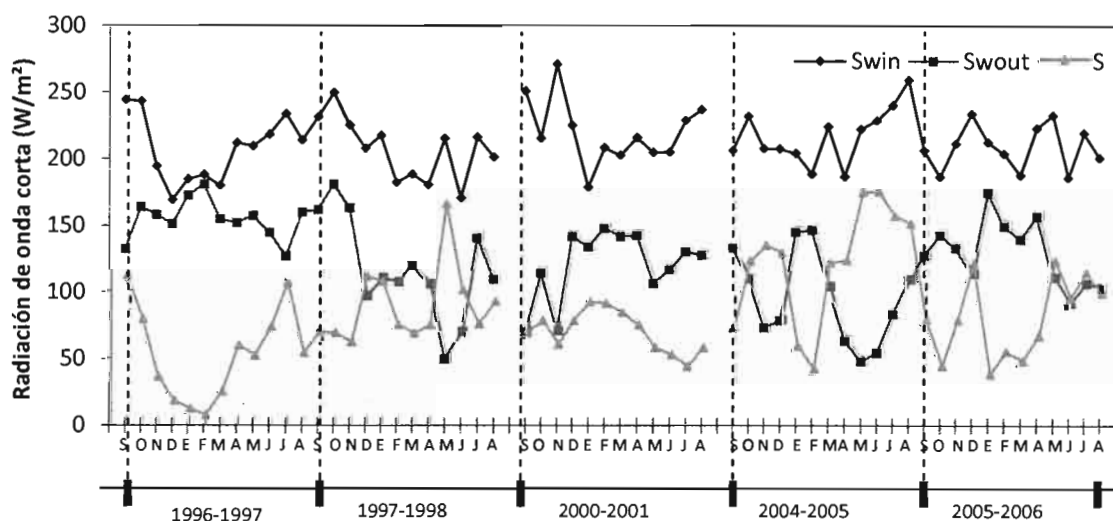


Figura 7.9. Promedios mensuales de radiación de onda corta incidente (SW_{in}), de salida (SW_{out}) y neta (S).

Tabla 7.6. Promedios anual y estacional de la radiación de onda corta incidente (SW_{in}, en W/m²).

	1996-1997	1997-1998	2000-2001	2004-2005	2005-2006
Prom. anual	207.7	207.2	220.5	217.5	208.8
Prom. Periodo de transición	223.6	221.8	238.5	208.3	206.9
Prom. Periodo húmedo	180.6	199.0	203.8	206.3	209.6
Prom. Periodo seco	219.0	201.0	219.2	237.8	209.9

Tabla 7.7. Promedios anual y estacional de la radiación de onda corta de salida (SW_{out}, en W/m²).

	1996-1997	1997-1998	2000-2001	2004-2005	2005-2006
Prom. anual	154.7	117.9	120.5	95.7	128.9
Prom. Periodo de transición	151.8	153.0	99.4	94.8	140.1
Prom. Periodo húmedo	164.9	108.4	141.5	118.5	144.3
Prom. Periodo seco	147.4	92.5	120.6	73.8	102.3

7.1.5 Radiación de onda larga

LW_{in} presenta una marcada estacionalidad (promedio de los 5 años igual a 253.2 W/m², $s=12.1\text{W/m}^2$) con valores elevados en la estación húmeda y valores mínimos en la estación seca (figura 7.10, tabla 7.8). Los años con balance de masa positivo presentan un promedio anual de LW_{in} mayor a los años con balance negativo, este hecho se debe a una mayor frecuencia en la formación de nubes en años de intensa precipitación (correlación promedio de LW_{in} y N igual a $r^2=0.85$).

La radiación emitida por la nieve/hielo, LW_{out}, no presenta una notable variabilidad de un año a otro (promedio de los 5 años igual a 308.9 W/m², $s = 5.2 \text{ W/m}^2$, este promedio corresponde a una temperatura igual a -1.5°C). Los promedios estacionales de temperatura obtenidos a partir de las radiaciones térmicas emitidas por la superficie (tablas 7.9 y 7.10) revelan que en los años con balance negativo la superficie del glaciar alcanza las condiciones de fusión ($T>0^\circ\text{C}$) en el periodo húmedo, aunque en el caso del año 1996-1997 esta situación se extiende también al periodo de transición. Finalmente, indicar que L está controlada por LW_{in}.

El pico del mes de febrero se debe a un error del instrumento y a un problema de batería (Perroy et al., 2007).

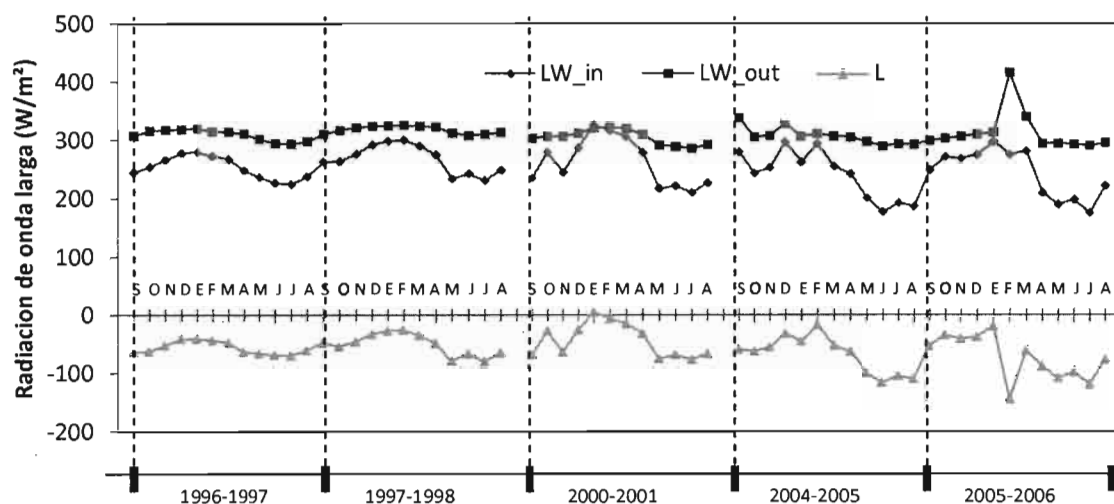


Figura 7.10. Promedios mensuales de radiación de onda larga incidente (LW_in), de salida (LW_out) y neta (L).

Tabla 7.8. Promedios anual y estacional de la radiación de onda larga incidente (LW_in, en W/m²).

	1996-1997	1997-1998	2000-2001	2004-2005	2005-2006
Prom. anual	267.9	253.0	262.6	240.1	242.6
Prom. Periodo de transición	269.3	253.3	259.7	254.3	249.4
Prom. Periodo húmedo	295.4	274.5	309.5	276.9	282.3
Prom. Periodo seco	238.9	231.1	218.7	189.0	196.0

Tabla 7.9. Promedios anual y estacional de la radiación de onda larga de salida (LW_out, en W/m²).

	1996-1997	1997-1998	2000-2001	2004-2005	2005-2006
Prom. anual	309.1	317.8	305.3	306.8	312.8
Prom. Periodo de transición	313.2	317.8	306.9	313.9	300.6
Prom. Periodo húmedo	317.2	324.9	319.2	313.3	344.9
Prom. Periodo seco	296.8	310.9	289.8	293.1	293.0

Tabla 7.10. Promedios anual y estacional de la temperatura de la superficie nieve/hielo (En °C).

	1996-1997	1997-1998	2000-2001	2004-2005	2005-2006
Prom. anual	-1.5	0.5	-2.3	-2.0	-2.3
Prom. Periodo de transición	-0.5	0.5	-1.9	-0.4	-3.3
Prom. Periodo húmedo	0.3	2.0	0.8	-0.5	1.5
Prom. Periodo seco	-4.2	-1.0	-5.8	-5.0	-5.0

7.1.6 Radiación neta, albedo e índice de nubes

En los 5 años estudiados la radiación neta presenta una gran variabilidad de un año a otro y de manera estacional. La radiación neta presenta una correlación mediocre con el albedo ($r^2=0.5$). Sin embargo, la correlación en 8 meses (estación de transición y húmeda) es más significativa ($r^2=0.72$) estableciendo así una relación lineal e inversa (Figura 7.11). La correlación entre la radiación neta y el índice de nubes es mala ($r^2=0.1$).

De acuerdo a la tabla 7.11, los valores de máxima radiación corresponden a los años con balance negativo, para estos años también se registran los máximos en las estaciones húmeda y de transición. Por otra parte en los años con balance positivo se registra un máximo en las estaciones de transición. El caso estacionario registra el máximo de radiación neta en la estación de transición (valor muy cercano al de la estación húmeda).

En los cinco años considerados se encuentra una correlación importante en las estaciones de transición y húmedas para las variables R_{neta} y albedo ($r^2=0.72$). Por otra parte, la correlación de R_{neta} y N en las estaciones de transición y húmeda es mala ($r^2=0.27$).

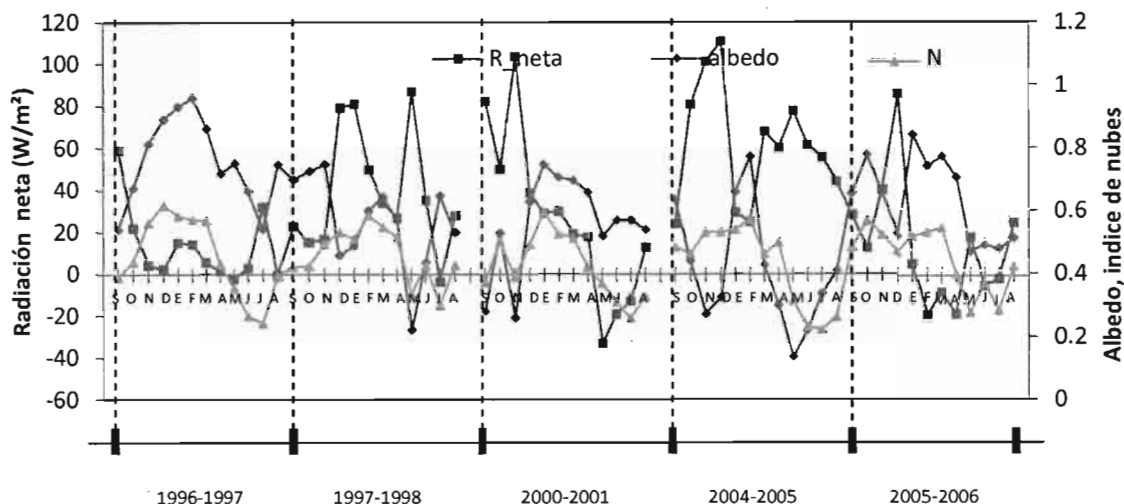


Figura 7.11. Promedios mensuales de la radiación neta, albedo e índice de nubes.

Tabla 7.11. Promedios estacionales de la radiación neta.

	1996-1997	1997-1998	2000-2001	2004-2005	2005-2006
Prom. anual	13.1	39.3	26.5	61.6	13.6
Prom. Periodo de transición	21.7	20.4	63.3	66.6	15.8
Prom. Periodo húmedo	9.4	61.1	29.4	58.3	15.9
Prom. Periodo seco	8.1	36.6	-13.2	59.8	9.3

7.2 Influencia de los parámetros meteorológicos locales sobre la ablación

A continuación se muestran las variables forzantes (SW_in, LW_in, albedo y P) y la respuesta del glaciar (Bn_b_5050) para los cinco periodos estudiados.

1996-1997

Este año hidrológico presenta una distribución de precipitación parecida al promedio de los 15 años estudiados con un periodo de transición (sept-nov y abr), un periodo húmedo bastante intenso (dic-mar) y un periodo seco (may-ago). En los primeros tres meses del periodo de transición se observa un aumento progresivo de la precipitación, lo que procura una cobertura progresiva de nieve

fresca en la superficie del glaciar reflejada en un incremento también progresivo del albedo. Por otra parte, un aumento en la frecuencia de precipitaciones está relacionado con un aumento en la frecuencia de formación de nubes (cumulus y cumulonimbus en el periodo de transición y húmedo y altostratus o cirrustratus en el periodo seco, Sicart et al., 2005) las cuales tienen una correlación importante con la radiación solar incidente($r^2=0.96$). Al mismo tiempo, las cada vez más frecuentes formaciones nubosas en los periodos de transición y húmedo procuran un ingreso minoritario de radiación de onda corta pues ésta es reflejada y dispersada en la parte alta de las nubes. Así, en los primeros tres meses se observa el decremento de SW_in. En estas condiciones en los primeros tres meses esperaríamos el incremento el balance de masa, sin embargo el primer mes evade tal explicación.

En el periodo húmedo (dic-mar) se registran los valores más elevados de precipitación y de albedo. Por otra parte LW_in presenta los valores más elevados y SW_in los valores más bajos, lo que es razonable si se considera una cobertura nubosa importante en este periodo. El balance de masa para este periodo muestra una importante acumulación a pesar de considerarse mediciones entre 5100 y 5200 msnm.

En el periodo seco se registran precipitaciones muy bajas (próximas a cero), así, se desprovee al glaciar de una cobertura nival superficial y el albedo así como la cobertura nubosa disminuyen procurándonos un LW_in decreciente con valores más bajos en los meses de junio y julio, meses en los que la SW_in presenta valores altos en este periodo se registran balances de masa negativos en los dos meses mencionados anteriormente.

En este periodo, en general puede observarse un importante control de la precipitación sobre el albedo y la acumulación y un importante control de SW_in sobre el balance de masa en el tramo altitudinal respectivo. La distribución de la intensidad de precipitación está acompañada de una cobertura nubosa que controla los dos tipos de Radiación incidentes.

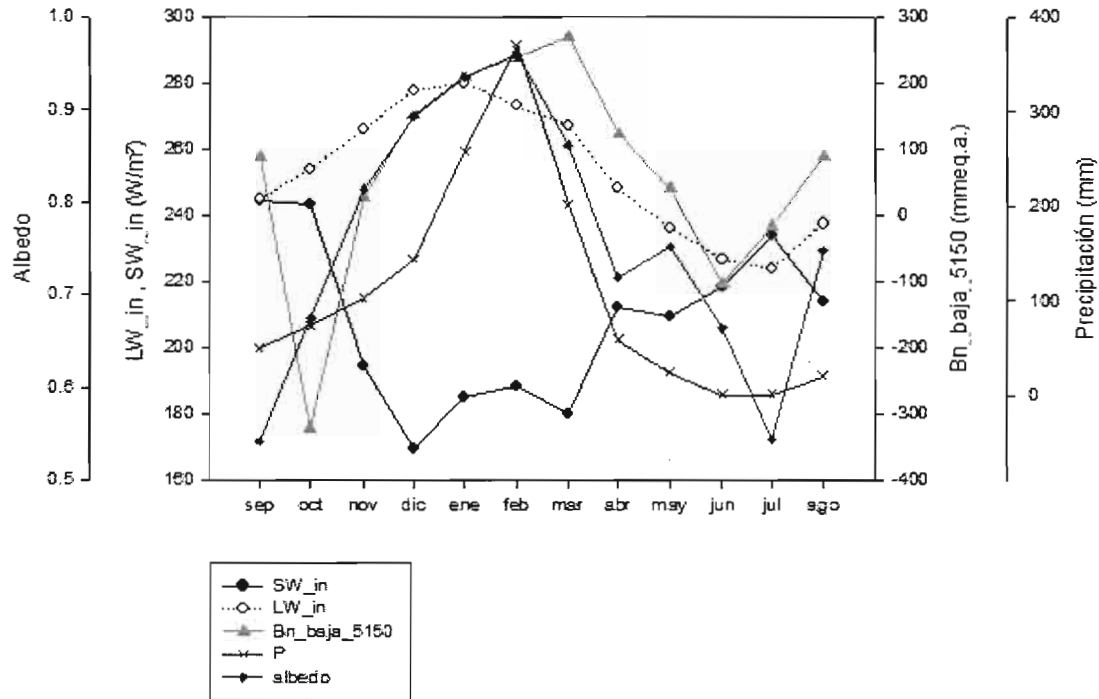


Figura 7.12 Variables mensuales (radiación de onda corta incidente, SW_in; Radiación de onda larga incidente, LW_in; Precipitación, p; albedo y balance de masa específico en el rango altitudinal 5100-5200, Bn_bajo_5150) para el año hidrológico 1996-1997.

1997-1998

Este año hidrológico presenta los valores más negativos de balance de masa de toda la serie de datos y son los periodos de transición y húmedos donde se observa una importante ablación, este hecho está relacionado sin duda a un retraso en la precipitación y una baja intensidad de precipitación (máximo de precipitación en febrero), estos hechos están acompañados de un retraso y una débil cobertura nubosa, por tanto de una importante cantidad de SW_in. En el mes de diciembre donde la ablación es de 110 mm eq.a, el albedo es bajo (0.45) y SW_in es de 210 W/m² (condiciones similares al mes de noviembre del año 2004-2005 donde se registra una fuerte ablación). En los meses de febrero y marzo se observa un aumento del balance de masa a causa de un aumento de precipitación y un aumento del albedo superficial, sin embargo, esto no es suficiente para procurarnos un balance positivo, principalmente debido a la débil intensidad de precipitación (bajo albedo). En el periodo seco un pico de precipitación en el mes de junio (50mm) que está

acompañado de un aumento en la cobertura nubosa y un importante disminución de SW_in procuran rápidamente un valor positivo de balance (+40 mm eq.a.).

En general, en este periodo, el retraso en el establecimiento de una estación húmeda acompañado de una baja intensidad de precipitación procuran una tardía y débil cobertura de nieve fresca en el glaciar y un importante ingreso de SW_in que parece modular el balance de masa. De este modo, bajo estas condiciones se registran balances de masa muy negativos en la mayor parte de los meses del presente año hidrológico.

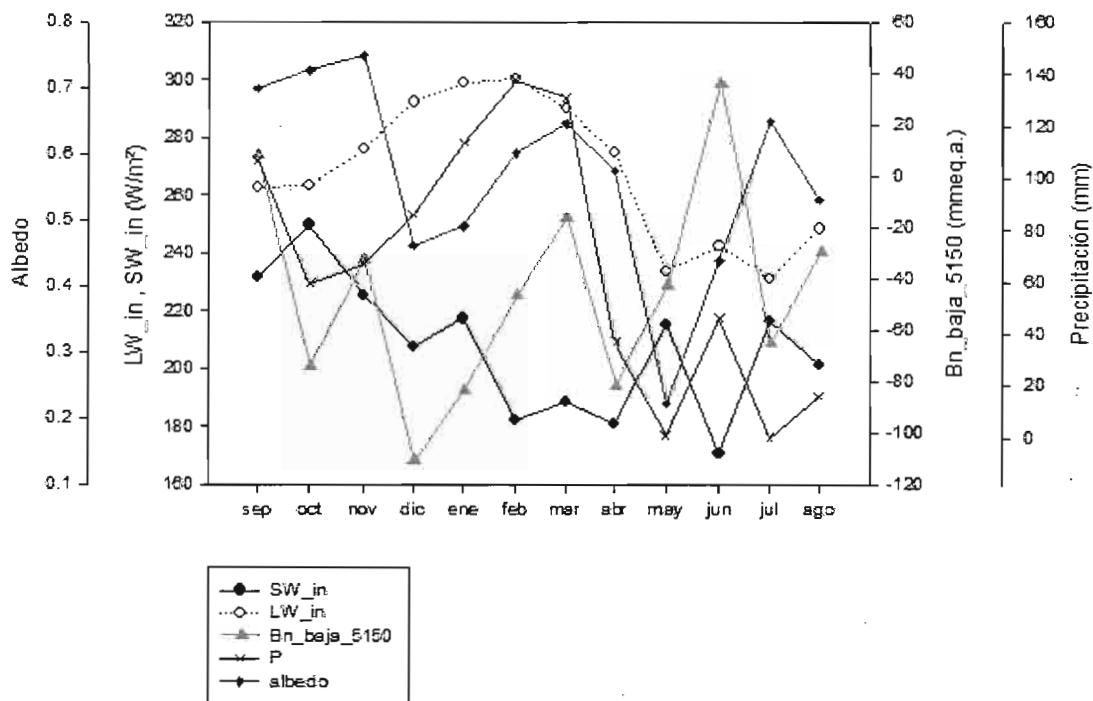


Figura 7.13 Variables mensuales (radiación de onda corta incidente, SW_in; Radiación de onda larga incidente, LW_in; Precipitación, p; albedo y balance de masa específico en el rango altitudinal 5100-5200, Bn_bajo_5150) para el año hidrológico 1997-1998.

2000-2001

En este año hidrológico se observa un adelanto de la estación húmeda (máximo en diciembre) y una intensidad de precipitación importante en el mismo periodo. En el periodo de transición, en los meses de septiembre y noviembre, es donde se registran los balances de masa más negativos, debido a una débil precipitación, bajo albedo y una importante cantidad de SW_in. Por otra parte, en el mes de octubre se observa un balance positivo debido a la inversión de las condiciones anteriormente mencionadas. En la estación húmeda, similarmente al caso de año 1996-1997, se observa una importante cantidad de precipitación que está acompañada de una importante cobertura nubosa, esto procura un alto albedo y una baja cantidad de SW_in en la superficie del glaciar, así, el balance de masa es positivo para todo el periodo. En la estación seca se observa una reducida precipitación (40 mm), con un mínimo en julio (0 mm) donde justamente se observa una disminución de LW_in y un importante aumento de SW_in aunque el albedo parece presentar cierta inercia debido posiblemente a una permanencia de la cobertura de nieve en esta estación.

En general, en este periodo se observa el adelanto de la estación húmeda y una importante intensidad de precipitación registrada en el periodo húmedo que está acompañada de manera proporcional por la cobertura nubosa (asociada a LW_in) y de manera inversa por SW_in. Los periodos de mayor ablación son los periodos de transición y húmedos.

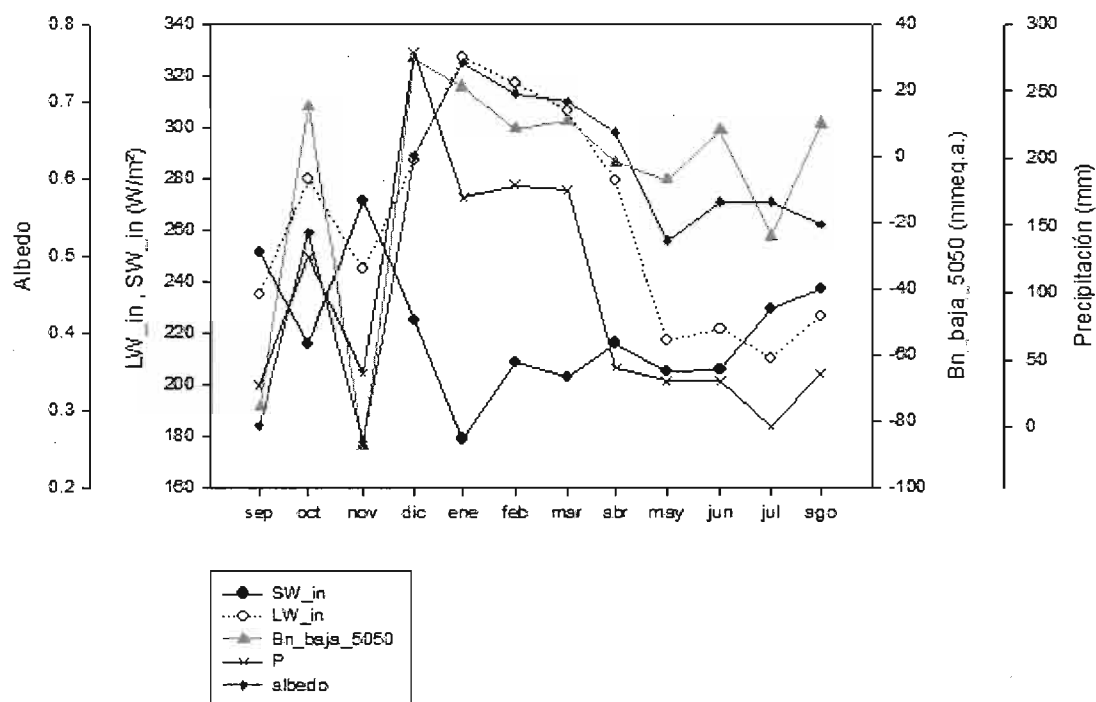


Figura 7.14 Variables mensuales (radiación de onda corta incidente, SW_in; Radiación de onda larga incidente, LW_in; Precipitación, p; albedo y balance de masa específico en el rango altitudinal 5100-5200, Bn_bajo_5050) para el año hidrológico 2000-2001.

2004-2005

Es interesante comenzar el análisis de este periodo indicando que la distribución de precipitación es similar a aquella del año 2006-2007 (cuando se registra un balance positivo) con una notable disminución en la intensidad de precipitación, este hecho en general procura una cobertura nival escasa (albedo bajo) y un ingreso de radiación de onda corta importante.

En el periodo de transición se observa un leve aumento de precipitación, una baja cobertura nubosa y un aumento importante en la SW_in, así, el balance de masa es muy negativo. En el periodo húmedo se registran los valores más elevados de precipitación que debido a la débil intensidad no parece establecerse una nubosidad importante, de manera que LW_in y SW_in se muestran poco variables. Debido al bajo albedo y la intensa radiación incidente, en este periodo se observa un balance negativo con valores próximos a cero. En el periodo seco la precipitación es casi nula con cierta

tendencia al incremento, la cobertura nubosa es baja y la SW_in muestra una tendencia al incremento, en estas condiciones se observa un balance de masa moderado.

En general en este periodo se observa que la baja intensidad de precipitación está relacionada a una débil cobertura nubosa y a un bajo albedo, lo que procura un incremento importante de SW_in a lo largo del año hidrológico y por tanto un balance negativo.

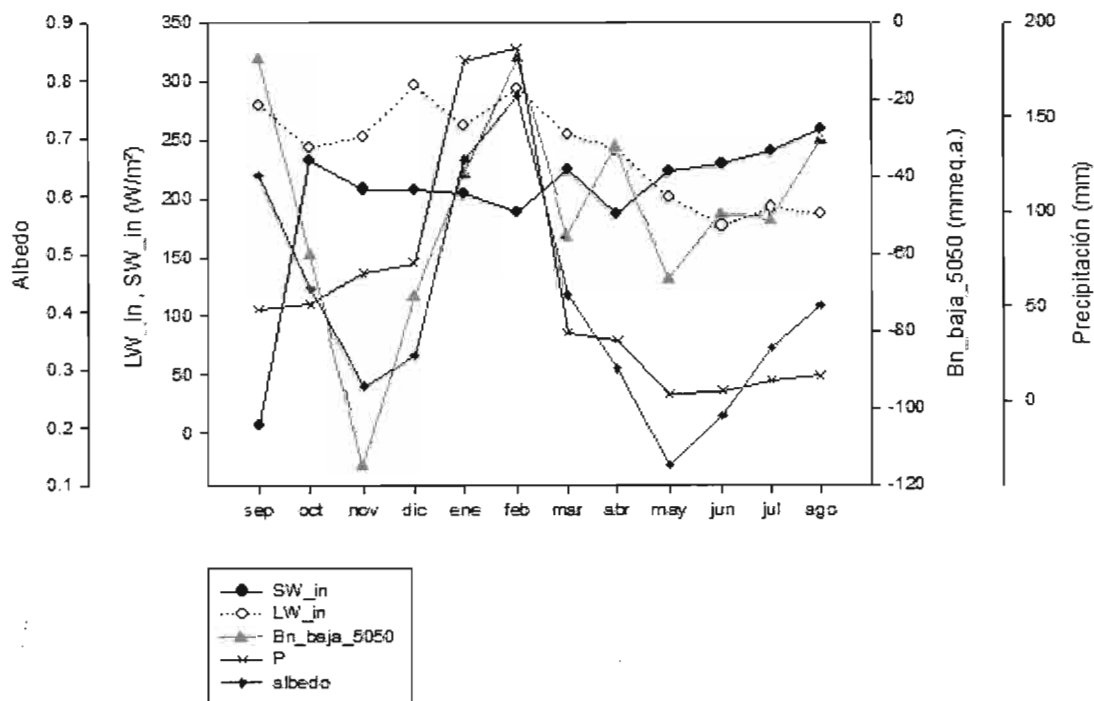


Figura 7.15 Variables mensuales (radiación de onda corta incidente, SW_in; Radiación de onda larga incidente, LW_in; Precipitación, p; albedo y balance de masa específico en el rango altitudinal 5100-5200, Bn_bajo_5050) para el año hidrológico 2004-2005.

2005-2006

Este año hidrológico la distribución de precipitación es parecida al promedio de los 15 años pero con una estación húmeda intensa (enero) y débil a la vez (dic, feb y mar). En el periodo de transición un aumento en la precipitación en el mes de septiembre procura un importante aumento de albedo, la cobertura nubosa establece un reducido ingreso de SW_in, así, en estas condiciones se registra un balance positivo. En la estación húmeda el pico de precipitación en enero (300 mm)

procura un balance positivo, por otra parte en los meses de diciembre y enero-marzo donde se registran precipitaciones del orden de 100 mm se registran balances negativos pero de diferente intensidad, debido principalmente a la variabilidad del albedo y SW_{in} . En el periodo seco, donde la precipitación es prácticamente nula y la cobertura nubosa pobre, se miden los balances más negativos que están sin duda relacionados a un aumento de SW_{in} .

De manera general puede observarse que la distribución de precipitación y la intensidad de precipitación determinan la cobertura superficial y el ingreso de radiación respectivamente, por tal razón se observa una alternancia de los balances de masa con balances más negativos en la estación seca debido a una ausencia de precipitación.

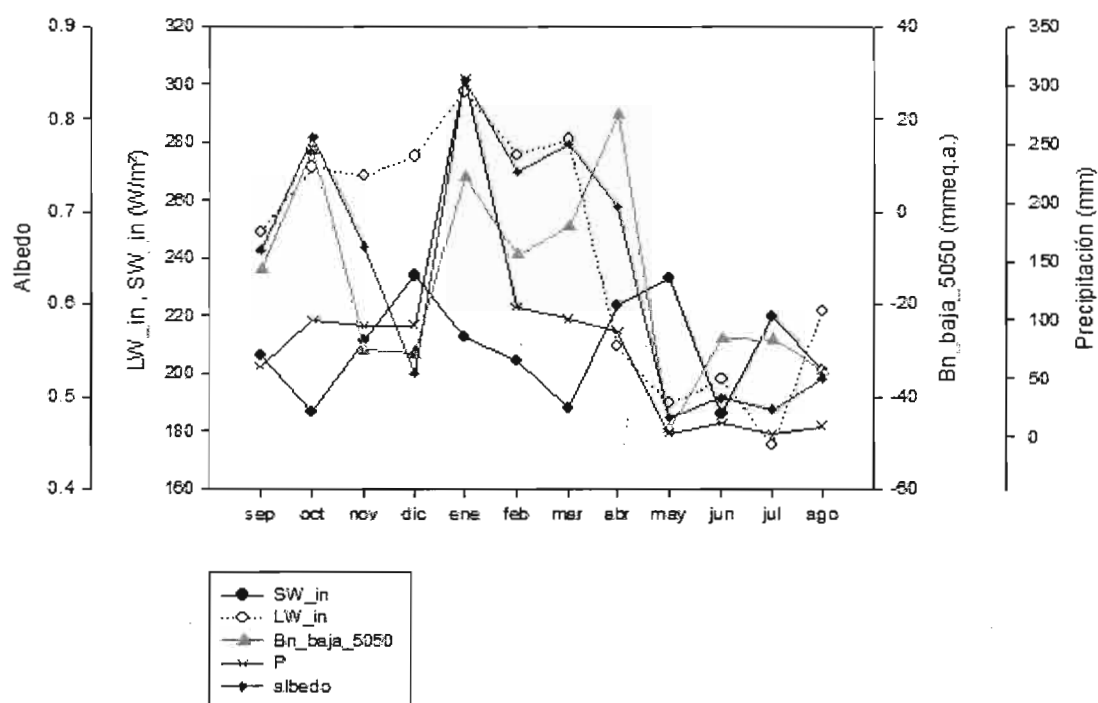


Figura 7.16 Variables mensuales (radiación de onda corta incidente, SW_{in} ; Radiación de onda larga incidente, LW_{in} ; Precipitación, p ; albedo y balance de masa específico en el rango altitudinal 5100-5200, Bn_{bajo_5050}) para el año hidrológico 2005-2006.

7.3 Conclusiones del capítulo

En los periodos donde se registran acumulación (balance de masa >0) hay una mejor correlación entre los balances glaciológico e hidrológico que en los periodos donde se registra ablación (balance de masa <0) ($r^2=0.80$ y $r^2=0.59$ respectivamente), este hecho podría evidenciar la dependencia de la distribución de la precipitación en ambos métodos que ante elevadas intensidades de precipitación se hace más evidente. Por otra parte, en los periodos de ablación, Bn_baja es quien principalmente controla la estacionalidad de Bn ($r^2=0.98$).

Para los años con balance positivo, el periodo de mayor acumulación en el glaciar se registra en los meses de dic-feb; y periodos de ablación (moderada) se registran en las estaciones de transición y seca. Para los años con balance negativo, son los meses de oct-dic y abr-may los meses de mayor ablación y no hay un periodo de acumulación significativo. El año con balance casi cero presenta una distribución similar al promedio mensual de los 15 años estudiados con acumulación en la estación húmeda y la ablación en las estaciones de transición y seca.

En la zona baja, donde se encuentran las balizas, en los años de balance de masa positivo se observa una acumulación neta de enero a marzo. Por otra parte, en los años de balance negativo no existen periodos de acumulación sobre el glaciar en esta zona

Los parámetros ELA y AAR obtenidos mensualmente presentan una mejor correlación con Bn en años con balances positivos ($r^2_{ELA}=0.71, r^2_{AAR}=0.77$) que en años con balances negativos ($r^2_{ELA}=0.49, r^2_{AAR}=0.51$). El promedio de los parámetros de todos los meses de un año hidrológico presenta un bajo error porcentual (erp.) relativo al parámetros anuales.

Con respecto a la precipitación, se realiza una comparación de los cinco años con el promedio mensual de los 15 años estudiados y se observa que las principales diferencias son: la cantidad de precipitación anual, los eventos máximos y el retraso o adelanto del "corazón" de la estación húmeda (enero-marzo). En los años con balance positivo se observa una precipitación anual excedente con respecto al promedio de los 15 años contrariamente a lo que sucede en los años con balance negativo. El año con balance casi nulo no parece presentar una marcada diferencia con el promedio de los 15 años.

Los periodos con balance negativo (1997-1998 y 2004-2005) presentan anualmente, las temperaturas más elevadas. De manera estacional, en los cinco periodos, las temperaturas en la estación húmeda son las más elevadas. Por el contrario, en la estación seca se registran las temperaturas más bajas.

Con respecto a la humedad relativa, no hay una gran variación de un año a otro (en promedio, la humedad relativa para los 5 periodos es de 65%, $s=5\%$).

EL viento sobre el glaciar presenta una estacional que está anticorrelacionado a las dos variables estudiadas previamente. Así los valores más elevados de viento se registrarán en la estación seca y los menores en la húmeda (tabla 7.7) registrándose correlaciones promedio de $r^2=0.62$ con la temperatura y 0,78 con la humedad relativa.

La distribución de SW_{in} medida sobre el glaciar (5150 msnm) en los 5 años es muy variable Sin embargo, los promedios anuales no presentan una gran diferencia (promedio de los 5 años igual a 212 W/m^2 , $s=6 \text{ W/m}^2$). Los factores que controlan la radiación solar incidente son la radiación solar potencial en la superficie externa de la atmosfera (SW_{extra}) y la frecuencia y tipo de nubes.

Por su parte SW_{out} presenta una notable variabilidad de un año a otro (promedio de $SW_{out} = 123.6 \text{ W/m}^2$ y $s = 21.3 \text{ W/m}^2$), determinando así la variabilidad de S. Los promedios anuales indican que para los periodos con balance negativo los valores anuales de SW_{out} son menores que en los años de balance positivo lo que indica que una superficie "sucia" está relacionada con una ablación más pronunciada.

LW_{in} presenta una marcada estacionalidad de un año a otro (promedio de los 5 años igual a 253.2 W/m^2 , $s=12.1 \text{ W/m}^2$) con valores elevados en la estación húmeda y valores mínimos en la estación seca. Los años con balance de masa positivo presentan un promedio anual de LW_{in} mayor a los años con balance negativo, este hecho se debe a una mayor frecuencia en la formación de nubes en años de intensa precipitación (correlación promedio de LW_{in} y N igual a $r^2=0.85$).

La radiación emitida por la nieve/hielo, LW_{out} , no presenta una notable variabilidad de un año a otro (promedio de los 5 años igual a 308.9 W/m^2 , $s = 5.2 \text{ W/m}^2$). Los promedios estacionales de temperatura obtenidos a partir de las radiaciones térmicas emitidas por la superficie revelan que en los años con balance negativo la superficie del glaciar alcanza las condiciones de fusión ($T>0^\circ\text{C}$) en

el periodo húmedo, aunque en el caso del año 1996-1997 esta situación se extiende también al periodo de transición.

Con respecto a la influencia de los parámetros meteorológicos sobre el glaciar se observa que la precipitación es la variable más interesante e importante al momento de explicar la variabilidad del balance de masa a nivel mensual. Así, un aumento en la frecuencia de precipitaciones está relacionado con un aumento en la frecuencia de formación de nubes (cumulus y cumulonimbus en el periodo de transición y húmedo y altostratus o cirrustratus en el periodo seco, Sicart et al., 2005) las cuales tienen una correlación importante con la radiación de onda larga incidente ($r^2=0.96$). Al mismo tiempo, las cada vez más frecuentes formaciones nubosas en los periodos de transición y húmedo procuran un ingreso minoritario de radiación de onda corta pues SW_extra es reflejada y dispersada en la parte alta de las nubes (sin olvidar la variabilidad de SW_extra). Al mismo tiempo, en la superficie del glaciar, la presencia de nieve fresca procura de un “escudo” contra la radiación de onda corta incidente que es el flujo mayoritario en la radiación neta y que eventualmente parece modular el balance de masa. Adicionalmente, ocurrencia la intensidad de precipitación juegan un rol también importante en términos de balance de masa.

Los años hidrológicos 1996-1997 ($B_n > 0$) y 2004-2005 ($B_n < 0$) están relacionados con precipitaciones excedentarias y deficitarias respecto del promedio de los 15 años. Por otra parte, Los años 1997-1998 ($B_n < 0$) y 2000-2001 ($B_n > 0$) están relacionados con un retraso y un adelanto del periodo húmedo respecto del promedio de los 15 años. En año 2005-2006 ($B_n \approx 0$) presenta una distribución e intensidades de precipitación similares al promedio de los 15 años.

Conclusiones generales y perspectivas

Debido a que la realización del presente trabajo fue acompañado de mediciones in situ considero que todos los trabajos previos, llámense artículos, reportes, libros, tesis, etc. implicaron un esfuerzo inagotable tanto en procura de la instalación y mantenimiento de los equipos como en procura de una mejor comprensión de la física del glaciar.

Considerando todos los pluviómetros de la cuenca glaciar en todo el periodo de estudio se estableció la estacionalidad siguiente: estación de transición (sep-nov y abr), estación húmeda (dic-mar) y estación seca (may-ago).

Considerando las diferentes estaciones meteorológicas e instrumentos en la cuenca glaciar se estudió la meteorología local en el periodo 2004-2008: se determinó un gradiente de temperatura altitudinal ($-0.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 29% de error respecto al teórico). Las variables de temperatura, humedad relativa y viento presentan una marcada estacionalidad a nivel mensual con valores elevados en la estación húmeda y de transición y valores bajos en la estación seca (el viento presenta un comportamiento inverso). La radiación de onda corta y onda larga incidentes no presentan un gradiente altitudinal. el albedo es menor en la superficie de la morrena (albedo=0.36, promedio mensual en el periodo 2004-2008) que en la superficie del glaciar (albedo =0.56). La radiación de onda larga de salida es mayor en la superficie de la morrena que en la superficie del glaciar debida a la diferencia de temperaturas en ambas superficies.

Se describió la metodología para el cálculo del balance de masa anual y se calcularon los balances de masa y parámetros anuales en el periodo 1993-2008.

A partir de la corrección realizada en las mediciones mensuales de precipitación (debido a una subestimación) se obtiene una mejor correlación entre ambos métodos y se concluye que en los 15 años son frecuentes los balances anuales negativos y se determina una tasa de balance promedio igual a -213mm eq.a./año .

Se utilizó la misma metodología de cálculo de balance de masa anual a una escala mensual considerando una hipsometría constante y procurándonos datos mensuales de balance en la zona de acumulación a partir de la acumulación anual y la distribución mensual de precipitación. En este afán se definieron dos zonas sobre el glaciar: la zona baja (4900-5300) y la zona alta (5300-6000)

diferenciados por los tipos de mediciones (medición balizas, sondeos) y los tipos de cálculos (interpolaciones y reconstrucciones mensuales). Así, los resultados del balance de masa a nivel mensual para los 13 años estudiados (B_n , B_h , B_{n_baja} , B_{n_alta}) muestran una importante variabilidad en las estaciones de transición y húmeda (el balance de masa anual depende fuertemente de las estaciones de transición y húmeda). Por otra parte los promedios mensuales muestran que el balance en la zona baja y el balance en la zona alta determinan la ablación ($B_n < 0$) y la acumulación ($B_n > 0$) del glaciar respectivamente. Por lo tanto, en promedio, las zonas definidas son bastante representativas de las zonas de ablación y acumulación. Finalmente, las tasas de balance de masa mensual son de -64mm eq.a./mes y +33 mm eq.a./mes en las zonas baja y alta respectivamente.

A escala mensual, los parámetros mensuales del glaciar (ELA y AAR) presentan una buena correlación con B_n y también son representativos a escala anual (si se considera un promedio de todos los meses del respectivo año)

Luego de la comparación de cinco años representativos se determina que los años con balance negativo presentan, radiación de onda corta reflejada, albedo y precipitaciones, inferiores a los años con balance positivo.

Con respecto a la influencia de los parámetros meteorológicos sobre el glaciar se observa que la precipitación es la variable más interesante e importante al momento de explicar la variabilidad del balance de masa a nivel mensual. Así, un aumento en la frecuencia de precipitaciones está relacionado con un aumento en la frecuencia de formación de nubes (cúmulus y cúmulonimbus en el periodo de transición y húmedo y altostratus o cirrustratus en el periodo seco, Sicart et al., 2005) las cuales tienen una correlación importante con la radiación de onda larga incidente ($r^2=0.96$). Al mismo tiempo, las cada vez más frecuentes formaciones nubosas en los periodos de transición y húmedo procuran un ingreso minoritario de radiación de onda corta pues SW_extra es reflejada y dispersada en la parte alta de las nubes (sin olvidar la variabilidad de SW_extra). Al mismo tiempo, en la superficie del glaciar, la presencia de nieve fresca procura de un “escudo” contra la radiación de onda corta incidente que es el flujo mayoritario en la radiación neta y que eventualmente parece modular el balance de masa. Adicionalmente, ocurrencia la intensidad de precipitación juegan un rol también importante en términos de balance de masa.

En cuanto a las perspectivas, propongo realizar un estudio más detallado de medición y análisis de la precipitación por la importancia de la misma en la estacionalidad del balance de masa. También hacer extensivo el capítulo 5 a los restantes 9 años hidrológicos.

Como una extensión del presente trabajo se podría regionalizar el estudio mensual de los balances de masa con el objetivo de comprender mejor fenómenos regionales (ENSO, "pacific shift", etc.). Finalmente, en la medida de lo posible y a partir de los esfuerzos realizados hasta la fecha mejorar los modelos de balance de masa y energía en el glaciar Zongo.

Referencias

Artículos, libros, tesis

Baird, D.C. *Experimentation: An Introduction to Measurement Theory and Experiment Design*, 3rd. ed. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, 1995

Brasseur, G., *Physique et chimie de l'Atmosphère moyenne*, Masson, Paris, 1982

CAN, PNUMA, IRD, Agencia Española de Cooperación Internacional; 2007; ¿El Fin de las Cumbres Nevadas?, Glaciares y Cambio Climático en la comunidad Andina; CAN.

Dyrgerov, M. (2002). Glacier Mass Balance and Regime: Data of Measurements and Analysis. Occasional Paper No. 55, Editors: Mark Meier (INSTAAR), Richard Armstrong (NSIDC), Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder: 85 p + Apéndice (en 1 CD)

Francou, B., Ribstein, P., & Saravia, R., 1995. Monthly Balance and Water discharge on an intertropical glacier. The Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16°S. *Journal of Glaciology*, 42, 61-67.

Francou, B., Vuille, M., Wagnon, P., Mendoza, J. & Sicart J.E., 2003. Tropical Climate Change Recorded by a Glacier of the Central Andes During the Last Decades of the 20th century: Chacaltaya Bolivia, 16°S. *Journal of Geophysical Research*, 108, 41-54.

Francou, B., Pouyaud, R., Bucher, B., Cáceres, J.P., Chazarin, P., Chevallier, Y., L'Hôte, A., Machaca, L., Maisincho, J., Mendoza, J., Ramírez, A., Soruco, J.D., Taupin & P. Wagnon 2004 *Métodos de Observación de Glaciares en los Andes Tropicales. Mediciones de Terreno y Procesamiento de Datos*. France, IRD.

Francou, B., Ribstein, P., Wagnon, P., Ramirez, E., Pouyaud, B., 2005. Glaciers of the tropical Andes: indicators of global climate variability. In: Huber, U., Bugmann, H.K.M., Reasoner, M.A. (Eds.), *Global Change and Mountain Regions: An Overview of Current Knowledge*, vol. 23. Springer, Dordrecht, pp. 197-204.

Hardy, D. R., M. Vuille, C. Braun, F. Keimig, et R. S. Bradley, Annual and Daily Meteorological Cycles at High Altitude on a Tropical Mountain, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(9), 1899-1913, 1998.

Hastenrath, S., *Climate Dynamics of the Tropics*, 1^{ère} ed., 488 pp., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.

Hooke, R., *Principles of Glacier Mechanics*, 2005, Cambridge University Press, New York.

Kaser, G. & Osmaston H., 2002. *Tropical Glaciers*, Cambridge University Press, Cambridge-United Kingdom.

Kraus, H. (1973), energy exchange at air-ice interface, *IAHS Publ.*, 107, 128-164.

Larson, L. W., et E. L. Peck, Accuracy of precipitation measurement for hydrological modelling, *Water Resources Research*, 10, 857-863, 1974.

- Lliboutry, L., *Traité de glaciologie, tome I et II*, 1ère ed., 1040 pp., Masson, Paris, 1964.
- Oerlemans, J. & J.P.F. Fortuin, Sensitivity of glaciers and small ice caps to Greenhouse warming, *Science*, 258, 115-117, 1992.
- Paltridge G.W. and Platt C.M.R., 1976 -Radiative Processes in Meteorology and Climatology. *Elsevier Scientific Publishing Company*. 315 p.
- Paterson, W. S. B., *The physics of glaciers*, 3ième ed., 480 pp., Pergamon, New York, 1994.
- Pouyaud, B., B. Francou, et P. Ribstein, Un réseau d'observation des glaciers dans les Andes tropicales, *Bulletin de l'institut français d'études andines*, 24(3), 707-714, 1995.
- Ribstein, P., E. Tiriau, B. Francou, et R. Saravia, Tropical climate and glacier hydrology: A case study in Bolivia, *Journal of Hydrology*, 165, 221-234, 1995.
- Ronchail, J. 1999. 'Variabilité' pluviométrique lors des phases extrêmes de l'oscillation australe du Pacifique en Bolivie (1950–1993)', *Bull. Inst. fr. études andines* (in press).
- Soruco, A. Etude du Retrait des Glaciers Depuis Cinquante Ans dans les Bassins Hydrologiques Alimentant en Eau la Ville de La Paz-Bolivia (16°S). PhD Thesis, Université Joseph Fourier-Grenoble I.
- Sicart, J. E. (2002), Contribution à l'étude des flux d'énergie, du bilan de masse et du débit de fonte d'un glacier tropical: Le Zongo, Bolivie, Ph.D. thesis, Univ. Paris VI, 333 pp., Paris.
- Sicart, J. E., Ribstein, P., Francou, B. & Gallaire, R. Etude des précipitations et de la fonte sur un glacier tropical: le glacier du Zongo, Bolivie, 16°S,; *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 48(5) octobre 2003.
- Sicart, J.E., Wagnon, P., Ribstein, P. Atmospheric controls of the heat balance of Zongo Glacier (16°S, Bolivia). 2005. *Journal of Geophysical research*, 110(D12), D12106.(10.1029/2004JD005732).
- Sicart, J.E., Ribstein, P., Francou, B., Pouyaud B., Condom, T. Hydrological and Glaciological Mass Balances of a tropical glacier : Zongo, Bolivia, 2007, *Global Planet change*, 59(1-4), 27-36.
- Singh, P. & Singh, V.P. 2001. *Snow and Glacier Hydrology*. Kluwer Academic Publishers.
- Trenberth, K.E. 1997. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12): 2771-2777.
- Vuille, M., D. R. Hardy, C. Braun, F. Keimig, et R. S. Bradley, Atmospheric circulation anomalies associated with 1996/1997 summer precipitation events on Sajama Ice Cap, Bolivia, *Journal of Geophysical Research*, 103(D10), 11191-11204, 1998.

Vuille, M. , Atmospheric Circulation Over the Bolivian Altiplano During Dry and Wet Periods and Extreme Phases of the Southern Oscillation, *International Journal of Climatology*, 19:1579-1600 (1999)

SITIOS WEB

MEI:

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data>

INFORMES

Ginot, P. Ramallo, C., Rojas, F., Fuertes, R. Perroy, E., Mendoza, J., Litt, M. 2009 : Glaciares Zongo – Chacaltaya – Charquini Sur – Bolivia 16°S. Mediciones Glaciológicas, Hidrológicas & Meteorológicas, Año Hidrológico 2007-2008. *Informe Great Ice, Bolivia, IRD-IHH-SENMAHI*, 181 p.

Perroy E, Rojas F, Mendoza J, Ramallo C, Flores M, Garreta P, Machaca A, Ginot P, Fuertes R, Francou B, 2007. Glaciares Zongo – Chacaltaya – Charquini Sur – Bolivia 16°S. Mediciones Glaciológicas, Hidrológicas & Meteorológicas, Año Hidrológico 2005-2006. *Informe Great Ice, Bolivia, IRD-IHH-SENMAHI-COBEE* : 226 p.

Perroy E., Mendoza J., Rojas F., Garreta P, Ginot P, Fuertes R, 2008 : Glaciares Zongo – Chacaltaya – Charquini Sur – Bolivia 16°S. Mediciones Glaciológicas, Hidrológicas & Meteorológicas, Año Hidrológico 2006-2007. *Informe Great Ice, Bolivia, IRD-IHH-SENMAHI-COBEE* : 190 p.

Anexos

A1 Sonda a vapor de perforación para hielo Heucke

1. Parrilla de transporte
2. Cobertor de aluminio
3. Recipiente circular
4. Tanque resistente al calor
5. Protector de viento
6. Cobertor del tanque (resistente al calor)
7. Manómetro
8. Iluminación piezo-eléctrica
9. Grifo de vapor
10. Mechero a gas
11. Regulador de presión del gas
12. Conexión de la tubería del gas
13. Tubería del gas
14. Botella de gas
15. Estuche de la botella de gas
16. Apoyos regulables en altura
17. Tubería de drenaje
18. Tubería flexible de perforación
19. Sonda de perforación
20. Cabeza de perforación
21. Tubo de accesorios
22. Pala
23. Seguro de la sonda de perforación
24. Cartucho de recarga
25. Lugar para una segunda cabeza de perforación

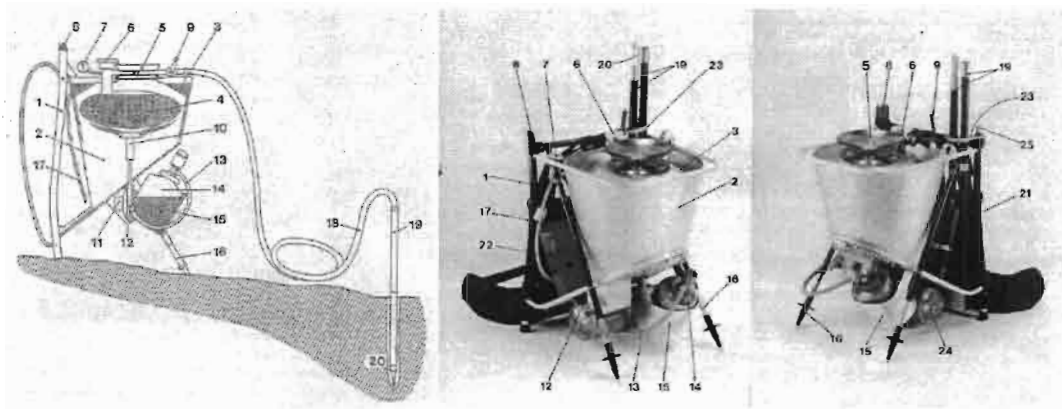


Figura A1. Figuras de la sonda a vapor, donde se indican las partes constituyentes del mismo y el modo de empleo.

A2 Detalle de las Estaciones Meteorológicas

	Magnitud	unidad	Tipo de instrumento	Altura (cm)	Precisión (según el cosntructor)
SAMA	temperatura del aire	°C	Termómetro vaisala(termistancia)	100	±0.2°C
	humedad relativa	%	higrómetro valisala(captor capacitivo)	100	±0.2% de 0 a 90%, ±10% de 90 a 100%
	velocidad del viento	m/s	Anemómetro 05103-Young	250	±5%
	dirección del viento	°	veleta 05103-Young	250	±3 deg
	radiación de corta longitud de onda incidente	Wm ⁻²	Piranómetro Kipp&Zonen CM3, 0.3<λ<2.8 μm	100	±10% en suma diaria
	radiación de corta longitud de onda reflejada por la superficie	Wm ⁻²	Piranómetro Kipp&Zonen CM3, 0.3<λ<2.8 μm	100	±10% en suma diaria
	radiación de grande longitud de onda incidente	Wm ⁻²	"pyergéomètre" Kipp&Zonen CG3, 5<λ<50 μm	100	±10% en suma diaria
ORE	radiación de grande longitud de onda emitida por la superficie	Wm ⁻²	"pyergéomètre" Kipp&Zonen CG3, 5<λ<50 μm	100	±10% en suma diaria
	medición por pesada	mm	Geonor, T-200B	175	±0.2 mm
	medición por báscula	mm	HOBO, event logger	160	±0.25 mm
	totalizadores	mm	Pluviometro de fabricación local	140	~±10 mm
	altura de nieve, medición por ultrasonidos	cm	Sonda a ultrasonido,Campbell UDG01	115	±1 cm
	Temperatura del aire	°C	Termómetro vaisala, HMP45C	100	±0.2°C a 20 °C
	humedad relativa	%	higrómetro vaisala, HMP45C	100	±1% a 20 °C
	velocidad del viento	m/s	Anemómetro 05103-Young	205	0.3 m/s
	dirección del viento	deg	veleta 05103-Young	205	±3 deg
	radiación de corta longitud de onda incidente	Wm ⁻²	Piranómetro Kipp&Zonen CM3, 0.3<λ<2.8 μm	100	±10% en suma diaria
	radiación de corta longitud de onda reflejada por la superficie	Wm ⁻²	Piranómetro Kipp&Zonen CM3, 0.3<λ<2.8 μm	100	±10% en suma diaria
	radiación de grande longitud de onda incidente	Wm ⁻²	"pyergéomètre" Kipp&Zonen CG3, 5<λ<50 μm	100	±10% en suma diaria
	radiación de grande longitud de onda emitida por la superficie	Wm ⁻²	"pyergéomètre" Kipp&Zonen CG3, 5<λ<50 μm	100	±10% en suma diaria
MEVIS	Temperatura del aire	°C	Higrotermómetro THIESS (termistor)	190	no mencionado
	humedad relativa	%	Higrotermómetro THIESS (captor capacitivo)	190	no mencionado
	velocidad del viento	m/s	anemómetro Windgeber	230	no mencionado
	radiación de corta longitud de onda incidente	Wm ⁻²	"pyergéomètre" Kipp&Zonen CG3, 0.3<λ<2.8 μm	155	±10% en suma diaria
HOBO	Temperatura del aire	°C	HOBO XT	150	± 0.2 °C
	humedad relativa	%	STOW AWAY RH	150	± 0.5 %

A3 Script en MatLab para el cálculo del ELA y AAR mensual

```

• function [v]=parametros(b)
• for k=5:16
• %CALCULO DE ELA
•   for i=1:10,
•     if b(i,k)*b(i+1,k)<0
•       m=(b(i+1,3)-b(i,3))/(b(i+1,k)-b(i,k));
•       ela=-m*b(i,k)+b(i,3);
•     elseif b(i,k)>0
•       m=0.000;
•     end
•   end
• %CALCULO DE AAR
•   for i=1:11,
•     if ((ela > b(i,1)) & (ela < b(i,2))),
•       x=(b(i,2)-ela)*b(i,4)/100;
•       y0=b(i+1,4);
•       for j=i+2:11
•         y=y0+b(j,4);
•         y0=y;
•       end
•     end
•   end
• %IMPRESION
•   p(1,k-4)=m;
•   p(2,k-4)=ela;
•   p(3,k-4)=(x+y)*100;
•
•   s0=b(1,k);
•
•   for l=1:10
•     s=s0+b(l+1,k);
•     s0=s;
•   end
•   p(4,k-4)=s;
• end
•
• %ela
• %REGRESION LINEAR
• c=polyfit(p(4,:),p(2,:),1);
•
• %grafico
• ycorr=polyval(c,p(4,:))
• plot(p(4,:),ycorr)
• hold on
• plot(p(4,:),p(2,:),'o');
• xlabel('balance de masa,[mmeqa]');
• ylabel('ela, [m]')
• %COEFICIENTE DE CORRELACION
• R=corrcoef(p(4,:),p(2,:));
• R(1,2);

```

A4 Formulas de errores

Balance de masa glaciológico

Zona de ablación

Error del balance de masa para la baliza j en el instante i:

$$\Delta b_{i,j} = \rho_0(\Delta z_{i-1,j} + \Delta z_{i,j}) + \rho(\Delta y_{i,j} + \Delta y_{i-1,j})$$

ρ_0 : densidad del hielo

$\Delta z_{i-1,j}$, $\Delta z_{i,j}$: errores de medición de la emergencia para la baliza j en los instantes i-1 e i respectivamente.

ρ : densidad de la nieve

$\Delta y_{i-1,j}$, $\Delta y_{i,j}$: errores de medición de la altura de nieve para la baliza j en los instantes i-1 e i respectivamente.

Error del balance de masa para el rango altitudinal k en el instante i:

$$\Delta b_i^k = \left(\frac{1}{m}\right) \sum_{j=1}^m b_{i,j}$$

m: número de balizas correspondientes al rango altitudinal k

Error del balance de masa neto:

$$\Delta b_n = \sum_k \Delta b_i^k$$

Error del balance de masa específico por rango altitudinal k para el instante i:

$$\Delta B_i^k = \left(\frac{s_k}{S}\right) \Delta b_i + b_i \Delta \left(\frac{s_k}{S}\right)$$

s_k : área del rango altitudinal k

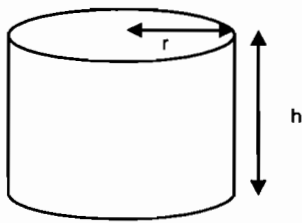
S : área total del glaciar

Error del balance de masa específico neto:

$$\Delta B_n = \sum_k \Delta B_i^k$$

Zona de acumulación

Error del volumen



$$\Delta V = \pi \bar{V} \left(2 \frac{\Delta r}{\bar{r}} + \frac{\Delta h}{\bar{h}} \right)$$

Error de la densidad

$$\Delta \rho = \bar{\rho} \left(2 \frac{\Delta m}{\bar{m}} + \frac{\Delta V}{\bar{V}} \right)$$

Error del balance de masa en el pozo j:

$$\text{balance de masa del pozo } j = \sum_i [(\Delta \rho_i) h_i + \rho_i (\Delta h_i)]$$

Balance hidrológico

$$\Delta B_h = \Delta P + \frac{1}{S_g} \left\{ \Delta Q + \frac{Q}{S_g} \Delta S_g + ce \left[P(\Delta S - \Delta S_g) + (S - S_g) \Delta P + \frac{S - S_g}{S_g} \Delta S_g P \right] \right\}$$

P : precipitación
 Q : caudal
 S_g : área del glaciar
 S : área total de la cuenca
 ce : coeficiente de escurrimiento

A5 Datos mensuales

Tabla A.1 Balance de masa neto específico mensual (Bn) obtenido por el método glaciológico (en mm eq.a.).

Año hidrológico	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto
1993-1994	14	20	-123	-2	-43	68	27	-19	-60	-40	-76	-194
1994-1995	-165	-86	-31	-15	90	-17	124	-80	-75	-129	-189	-343
1995-1996	-112	-453	-242	-73	164	43	13	-16	-63	-56	-54	-46
1996-1997	30	-208	17	90	204	288	219	65	4	-50	-60	36
1997-1998	22	-298	-167	-420	-346	-185	-22	-361	-179	213	-410	-88
1998-1999	-226	122	-339	-272	110	180	120	9	25	-106	-31	-15
1999-2000	-66	45	-144	1	267	217	28	-72	-137	-30	-60	3
2000-2001	-244	134	-256	310	205	160	166	18	-2	63	-96	59
2001-2002	-109	-24	-315	-110	130	143	124	-29	27	5	32	17
2002-2003	-43	55	-72	-6	96	26	70	0	-40	-112	-68	1
2003-2004	-16	-168	-254	167	96	-94	71	-15	-77	-30	60	7
2004-2005	-34	-174	-364	-201	-20	33	-134	-105	-235	-143	-131	-31
2005-2006	3	57	19	-154	168	-21	5	116	-59	-46	-90	-68
2006-2007	-168	-62	-35	26	50	51	84	119	-14	-55	17	-136
2007-2008	76	-46	-139	88	207	169	104	-70	96	-89	-121	-90
promedio	-69	-72	-163	-38	92	71	67	-29	-53	-58	-62	-59

Tabla A.2 Balance de masa neto específico mensual (Bh) obtenido por el método hidrológico (en mm eq.a.).

Año hidrológico	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto
1993-1994	19.0	17.0	-116.0	-141.7	-175.4	8.8	-27.8	20.9	-53.7	-49.9	-33.7	-148.0
1994-1995	-130.3	-119.8	-103.2	-175.2	-72.0	-168.5	8.5	-151.6	-86.4	-71.3	-84.0	-156.7
1995-1996	-134.3	-414.2	-334.9	-201.8	31.0	3.1	-65.3	-37.2	-62.9	-70.0	-42.9	-87.2
1996-1997	-78.5	-126.0	-85.5	-9.1	115.4	345.1	142.6	-1.2	-42.3	-57.8	-87.3	-49.6
1997-1998	42.5	-174.4	-239.9	-550.7	-454.3	-375.5	-190.1	-218.5	-233.9	-56.7	-68.5	-92.2
1998-1999	-226.1	-617.9	-151.7	-444.0	-70.8	56.2	126.3	-17.6	-66.5	-63.6	-26.9	-66.5
1999-2000	43.3	-102.2	-238.1	-162.5	113.9	107.8	-32.9	-78.5	-89.8	-19.1	-37.0	-29.1
2000-2001	-68.7	47.9	-239.4	93.2	101.0	63.7	112.4	-44.1	-4.3	3.7	-35.9	11.6
2001-2002	-56.1	-137.1	-298.8	-265.6	-71.1	-70.6	182.6	-91.3	15.8	-37.6	34.3	12.1
2002-2003	5.7	12.8	-122.6	-52.6	4.6	-47.9	44.0	-69.0	-91.1	-94.0	-42.6	-10.5
2003-2004	43.7	-131.3	-277.9	-87.2	-31.2	-57.3	-125.2	-78.1	-73.4	-51.5	12.5	14.5
2004-2005	-3.5	-163.4	-240.8	-306.3	-70.0	68.3	-222.1	-158.5	-134.3	-70.8	-45.6	-70.3
2005-2006	3.2	-116.8	-152.6	-258.2	227.9	-77.9	-89.9	0.2	-94.6	-64.2	-62.2	-60.8
2006-2007	-11.6	-89.5	45.4	-70.5	-71.1	-21.7	18.9	43.3	-9.1	-78.8	-36.6	-100.6
2007-2008	96.4	-156.1	-248.1	83.5	195.8	21.3	63.3	-71.4	-53.1	-43.1	-36.0	-55.1
promedio	-30.3	-151.4	-186.9	-169.9	-15.1	-9.7	-3.6	-63.5	-72.0	-55.0	-39.5	-59.2

Tabla A.3. Balance de masa glaciológico anual (Bn_anual) por rango altitudinal obtenido a partir de los datos mensuales (en mm eq.a.).

Rango altitudinal	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008
4900-5000	-5940	-5279	-6353	-3201	-9401	-7551	-6084	-4829	-5370	-6740	-5878	-7034	-5327	-6185	-3902
5000-5100	-1403	-3374	-2731	-428	-5436	-1660	-806	-628	-1712	-1650	-2460	-4002	-1238	-2735	-1199
5100-5200	-140	-1469	-1797	795	-4135	-905	-217	11	-260	346	-1483	-3254	-385	-389	-533
5200-5300	11	-957	-1143	939	-3003	-446	82	432	11	385	869	-2170	421	67	468
5300-5400	162	-445	-490	1083	-1872	13	382	852	282	424	792	-1992	419	434	509
5400-5500	313	68	164	1227	-740	471	681	1273	552	462	753	-554	418	617	682
5500-5600	464	580	818	1371	392	930	980	1693	823	501	714	198	417	800	856
5600-5700	747	980	907	1371	566	961	1065	1570	927	705	725	401	577	961	870
5700-5800	832	970	965	1371	692	992	1150	1367	933	910	779	520	639	1202	934
5800-5900	832	970	965	1371	692	992	1150	1367	933	910	779	520	639	1202	934
5900-6000	832	970	965	1371	692	992	1150	1367	933	910	779	520	639	1202	934
suma	-3290	-6986	-7730	7270	-21554	-5210	-467	4474	-1949	-2838	-3631	-16848	-2783	-2825	552

Tabla A.4 Balance masa mensual (bn) en la zona alta del glaciar (en mm eq.a.) para el año hidrológico 2007-2008. Se indica también el modo de cálculo para cada rango altitudinal.

Rango altitudinal	Modo de cálculo	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	agosto
5300-5400	promedio entre 5200-5300 y 5500-5600	87	14	-64	106	256	119	81	-15	120	-58	-89	-48
5400-5500	promedio entre 5300-5400 y 5500-5600	97	34	-1	117	236	123	101	3	63	-26	-45	-19
5500-5600	promedio entre pozo2 y pozo 3	106	54	63	129	215	127	121	21	5	6	0	9
5600-5700	promedio entre pozo1 y pozo2	107	55	64	131	219	129	123	22	5	6	0	9
5700-5800	pozo1	115	59	69	141	235	138	132	23	5	6	0	10
5800-5900	pozo1	115	59	69	141	235	138	132	23	5	6	0	10
5900-6000	pozo1	115	59	69	141	235	138	132	23	5	6	0	10
suma		743	334	269	906	1631	911	821	101	209	-53	-134	-19

Tabla A.5 Balance masa en la zona baja del glaciar para el año hidrológico 2007-2008 (no ponderado con las áreas). Se indica las balizas utilizadas para el cálculo.

rango altitudinal	Balizas utilizadas	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
4900-5000	X1	-28	-622	-601	-275	164	-42	-86	-363	-517	-400	-601	-533
5000-5100	1G, X2, XX1, 1N, 16P, 17P	-43	-291	-515	42	-82	483	258	-340	89	-218	-326	-257
5100-5200	6K, 2N, 3N, 6N, 7N, 8N, 19N, 5D, 5O, 6O, 5J, 1P, 2P, 3P, 4P, 6P, 7P, 8P, 9P, 18P, 20P, 21P	33	-105	-447	36	379	95	-39	-123	465	-250	-358	-219
5200-5300	9N, 10N, 10O, 11O, 12O, 13O, 14O, 10P, 11P, 12P, 13P, 14P	69	-25	-192	82	297	111	41	-51	235	-122	-179	-105
suma		30	-1043	-1755	-114	759	648	174	-877	273	-990	-1464	-1114

Tabla A.6 Balance de masa específico por rango altitudinal para el año hidrológico 2007-2008. La suma indica el balance de masa correspondiente a un mes determinado (valores en mm eq.a.).

rango altitudinal	s/S	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
4900-5000	0,02781291	-1	-17	-17	-8	5	-1	-2	-10	-14	-11	-17	-15
5000-5100	0,14447558	-6	-42	-74	6	-12	70	37	-49	13	-31	-47	-37
5100-5200	0,11934793	4	-13	-53	4	45	11	-5	-15	55	-30	-43	-26
5200-5300	0,08546814	6	-2	-16	7	25	9	3	-4	20	-10	-15	-9
5300-5400	0,09583513	8	1	-6	10	25	11	8	-1	12	-6	-9	-5
5400-5500	0,12524698	12	4	0	15	30	15	13	0	8	-3	-6	-2
5500-5600	0,14054086	15	8	9	18	30	18	17	3	1	1	0	1
5600-5700	0,12574549	14	7	8	17	28	16	15	3	1	1	0	1
5700-5800	0,07430953	9	4	5	10	17	10	10	2	0	0	0	1
5800-5900	0,04207611	5	2	3	6	10	6	6	1	0	0	0	0
5900-6000	0,01914135	2	1	1	3	4	3	3	0	0	0	0	0
suma	1	67	-46	-141	88	207	169	104	-70	96	-89	-136	-90

Tabla A.7 Balance de masa hidrológico para el año 2007-2008. Los valores están dados en mm eq.a.

	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
P prom[mm]	113	71	78	159	253	141	149	20	9	7	2	7
D[m ³ /s]	0,055	0,190	0,264	0,115	0,139	0,140	0,119	0,073	0,048	0,039	0,08	0,047
D[km ² *mm]	143,0	494,0	686,4	299,0	361,4	364,0	309,4	189,8	124,8	101,4	72,8	122,2
Aporte morrena[mm]	113	71	78	159	254	141	150	20	9	7	2	7
aporte glaciar[mm]	16	227	326	75	57	119	86	91	62	50	38	62
Bh[mm]	96	-156	-248	84	196	21	63	-71	-53	-43	-36	-55

Tabla A.8 Hipsometría anual del Glaciar Zongo (todo en km²).

Rango alt.	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997	1996	1995	1994	1993
4800-4900							0.0032	0.0082	0.0119	0.0168	0.0247	0.0348	0.0396	0.0478	0.0546	0.0581
4900-5000	0.0460	0.0577	0.0628	0.0669	0.0771	0.0747	0.0873	0.0907	0.0914	0.0940	0.0994	0.1065	0.1073	0.1115	0.1184	0.1196
5000-5100	0.2694	0.2694	0.2761	0.2757	0.2811	0.2832	0.2852	0.2882	0.2846	0.2856	0.2906	0.2916	0.2916	0.2981	0.3069	0.3004
5100-5200	0.2226	0.2226	0.2211	0.2233	0.2391	0.2418	0.2433	0.2474	0.2415	0.2633	0.2636	0.2637	0.2637	0.2742	0.2788	0.2780
5200-5300	0.1594	0.1594	0.1594	0.1594	0.1593	0.1593	0.1593	0.1593	0.1593	0.1636	0.1636	0.1636	0.1636	0.1636	0.1636	0.1636
5300-5400	0.1787	0.1787	0.1787	0.1787	0.1787	0.1787	0.1787	0.1787	0.1787	0.1787	0.1787	0.1787	0.1787	0.1787	0.1787	0.1787
5400-5500	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336	0.2336
5500-5600	0.2621	0.2621	0.2621	0.2621	0.2621	0.2621	0.2621	0.2621	0.2621	0.2621	0.2621	0.2621	0.2621	0.2621	0.2621	0.2621
5600-5700	0.2345	0.2345	0.2345	0.2345	0.2345	0.2345	0.2345	0.2345	0.2345	0.2345	0.2345	0.2345	0.2345	0.2345	0.2345	0.2345
5700-5800	0.1386	0.1386	0.1386	0.1386	0.1386	0.1386	0.1386	0.1386	0.1386	0.1386	0.1386	0.1386	0.1386	0.1386	0.1386	0.1386
5800-5900	0.0785	0.0785	0.0785	0.0785	0.0785	0.0785	0.0785	0.0785	0.0785	0.0785	0.0785	0.0785	0.0785	0.0785	0.0785	0.0785
5900-6000	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357
total (S)	1.8591	1.8707	1.8809	1.8870	1.9182	1.9207	1.9400	1.9555	1.9504	1.9850	2.0035	2.0219	2.0275	2.0569	2.0840	2.0813

Tabla A.9 Promedio mensual de precipitación de los pluviómetros P1, P2, P3, P4, P5, P8 y P_ORE (valores en mm).

	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto
1993-1994	84	123	118	227	83	229	130	123	25	28	25	17
1994-1995	54	105	107	182	231	194	180	17	19	14	5	7
1995-1996	68	46	109	154	299	179	130	81	41	0	12	26
1996-1997	69	102	142	201	360	519	281	82	33	0	0	27
1997-1998	149	83	93	120	159	193	183	51	1	64	0	22
1998-1999	32	87	181	129	218	260	283	80	0	3	17	13
1999-2000	123	84	73	151	316	297	140	45	25	20	0	28
2000-2001	43	178	56	391	239	252	246	62	48	48	0	55
2001-2002	25	57	138	43	222	184	363	31	81	19	51	49
2002-2003	87	138	106	189	329	199	232	44	22	0	23	32
2003-2004	96	114	49	318	249	172	152	56	15	15	45	50
2004-2005	68	71	95	102	252	261	50	44	5	7	15	18
2005-2006	84	139	132	133	428	154	140	126	3	16	2	13
2006-2007	102	103	181	207	209	225	173	141	58	0	16	2
2007-2008	177	90	106	216	361	212	202	36	8	10	0	15
2008-2009	21	77	98	189	203	182	192	97	13	0	14	0

Tabla A.10 Valores promedios del caudal (Q, en m³/s)

	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto
1993-1994	0.052	0.085	0.187	0.295	0.207	0.176	0.126	0.082	0.063	0.062	0.047	0.132
1994-1995	0.147	0.179	0.168	0.285	0.242	0.289	0.137	0.134	0.084	0.068	0.071	0.130
1995-1996	0.160	0.362	0.350	0.281	0.214	0.140	0.155	0.094	0.082	0.055	0.043	0.089
1996-1997	0.116	0.179	0.180	0.167	0.197	0.145	0.113	0.066	0.059	0.045	0.068	0.060
1997-1998	0.086	0.201	0.260	0.522	0.478	0.444	0.293	0.210	0.182	0.095	0.053	0.089
1998-1999	0.199	0.543	0.260	0.443	0.228	0.164	0.128	0.077	0.051	0.051	0.034	0.061
1999-2000	0.065	0.144	0.238	0.243	0.165	0.154	0.136	0.095	0.088	0.030	0.028	0.044
2000-2001	0.086	0.105	0.224	0.240	0.114	0.152	0.111	0.082	0.041	0.035	0.027	0.035
2001-2002	0.062	0.148	0.333	0.233	0.229	0.199	0.151	0.093	0.052	0.043	0.015	0.030
2002-2003	0.065	0.100	0.175	0.189	0.257	0.193	0.151	0.086	0.085	0.070	0.050	0.033
2003-2004	0.044	0.187	0.244	0.316	0.220	0.178	0.213	0.102	0.066	0.050	0.026	0.029
2004-2005	0.056	0.176	0.251	0.305	0.250	0.156	0.202	0.151	0.102	0.057	0.045	0.066
2005-2006	0.064	0.194	0.215	0.292	0.173	0.178	0.176	0.099	0.071	0.059	0.047	0.054
2006-2007	0.089	0.146	0.110	0.214	0.216	0.193	0.123	0.080	0.052	0.057	0.039	0.074
2007-2008	0.055	0.190	0.264	0.115	0.139	0.140	0.119	0.073	0.048	0.039	0.028	0.047
promedio	0.088	0.195	0.233	0.275	0.214	0.188	0.158	0.105	0.081	0.054	0.040	0.061

Tabla A.11 Datos mensuales de la Estación MEVIS para el periodo 2004-2008.

mes	T_aire_4750	HR	viento	SW
Sep-04	0.78	67.85	1.45	121.32
Oct-04	2.02	61.01	1.87	143.81
Nov-04	2.49	72.24	1.49	124.01
Dec-04	2.49	75.92	1.37	109.67
Jan-05	2.57	75.97	1.61	111.13
Feb-05	1.86	81.62	1.43	103.12
Mar-05	3.16	67.44	1.42	132.72
Apr-05	2.95	61.13	1.88	129.51
May-05	2.65	40.61	2.19	132.74
Jun-05	1.29	33.09	2.24	130.68
Jul-05	1.87	35.73	2.15	132.37
Aug-05	1.50	37.77	2.02	147.63
Sep-05	0.63	65.94	1.94	124.71
Oct-05	1.44	73.56	1.58	111.85
Nov-05	2.34	69.39	1.67	117.05
Dec-05	2.49	73.15	1.43	119.52
Jan-06	1.66	80.15	1.38	108.77
Feb-06	2.47	74.29	1.49	112.79
Mar-06	2.80	75.15	1.31	114.29
Apr-06	2.37	60.07	1.37	122.16
May-06	1.77	34.36	1.96	143.42
Jun-06	1.04	44.06	2.00	114.44
Jul-06	1.30	31.37	1.96	132.92
Aug-06	1.35	49.87	1.95	126.94
Sep-06	1.51	51.77	2.03	139.29
Oct-06	2.50	64.06	1.92	124.23
Nov-06	3.29	66.35	1.44	127.13
Dec-06	2.53	81.01	1.23	102.15
Jan-07	3.03	76.11	1.51	104.65
Feb-07	2.34	76.36	1.79	107.72
Mar-07	1.83	79.29	1.27	100.14
Apr-07	2.48	65.20	1.42	104.94
May-07	2.36	47.20	2.27	123.10
Jun-07	2.46	37.07	1.86	124.01
Jul-07	0.69	42.51	2.46	119.79
Aug-07	2.23	42.92	2.04	140.36
Sep-07	0.29	74.47	1.49	107.10
Oct-07	1.92	66.73	1.61	125.02
Nov-07	2.24	66.32	1.77	124.42
Dec-07	2.21	71.65	1.62	113.20
Jan-08	1.82	81.91	1.52	89.89
Feb-08	1.97	75.20	1.43	101.38
Mar-08	1.87	70.58	1.25	112.15
Apr-08	1.69	62.83	1.50	110.71
May-08	1.59	38.54	2.25	131.84
Jun-08	1.93	35.51	2.15	124.11
Jul-08	1.29	35.11	2.05	128.54
Aug-08	1.78	40.56	2.13	147.01

Tabla A.12 Datos mensuales de la Estación ORE para el periodo 2004-2008

mes	T_aire_5050	HR	viento	albedo	LW_in	LW_out	Rneta	SW_in	SW_out
Sep-04	-0.29	76.53	2.73	0.28	388.48	322.08	204.01	337.95	69.69
Oct-04	0.93	70.17	2.98	0.30	403.93	330.40	221.85	372.02	80.94
Nov-04	1.53	80.85	2.79	0.29	382.56	333.08	180.99	325.04	68.17
Dec-04	1.70	84.56	2.59	0.29	382.43	336.23	180.73	334.21	71.00
Jan-05	1.37	87.68	2.29	0.40	357.08	326.59	127.11	273.55	76.12
Feb-05	0.96	91.12	2.81	0.29	305.45	326.19	68.33	229.11	52.87
Mar-05	2.30	74.48	2.53	0.28	276.72	339.20	66.42	324.39	71.15
Apr-05	1.78	69.76	2.89	0.31	265.82	329.13	44.81	274.99	61.85
May-05	1.41	45.79	3.26	0.31	235.10	328.02	20.95	295.89	69.84
Jun-05	0.24	32.46	3.24	0.32	214.29	320.77	12.48	313.10	75.95
Jul-05	0.06	38.69	3.55	0.38	224.23	315.89	19.65	319.37	90.87
Aug-05	0.36	39.44	3.10	0.34	222.60	326.11	29.76	354.38	87.81
Sep-05	-0.98	76.80	3.11	0.54	267.78	314.66	31.78	277.77	103.23
Oct-05	-0.01	48.26	2.58	0.33	285.52	319.03	49.45	222.75	56.25
Nov-05	1.13	85.74	2.59	0.33	293.65	326.62	63.82	253.27	60.68
Dec-05	1.53	83.19	2.64	0.30	290.64	337.31	82.31	328.17	73.88
Jan-06	0.24	96.58	2.37	0.70	310.66	317.60	36.96	264.51	139.69
Feb-06	1.38	85.56	2.56	0.36	290.16	328.87	64.61	284.11	75.11
Mar-06	1.62	86.41	2.52	0.29	293.92	334.01	74.85	286.65	61.50
Apr-06	1.36	65.79	2.52	0.27	264.54	329.08	49.32	278.37	56.72
May-06	0.61	38.00	2.78	0.31	223.69	325.20	27.08	329.98	75.74
Jun-06	-0.01	46.70	2.78	0.30	229.36	319.90	17.65	275.97	62.48
Jul-06	0.15	31.37	3.10	0.31	212.00	321.65	16.99	324.77	74.45
Aug-06	-0.13	58.33	3.18	0.33	246.13	321.43	36.93	295.15	71.47
Sep-06	0.16	60.08	3.19	0.24	255.18	328.80	52.36	330.03	79.28
Oct-06	1.10	72.94	3.16	0.22	272.94	329.92	69.79	320.67	71.20
Nov-06									
Dec-06									
Jan-07									
Feb-07									
Mar-07									
Apr-07									
May-07									
Jun-07									
Jul-07									
Aug-07	0.63	50.39	3.14	0.25	240.41	330.77	29.69	318.03	78.20
Sep-07	-1.79	89.86	2.54	0.39	278.54	311.24	32.47	241.41	93.98
Oct-07									
Nov-07	0.56	76.57	2.76	0.21	279.78	330.35	59.05	273.39	58.65
Dec-07	-1.36	91.90	2.10	0.55	307.20	315.40	28.92	248.32	136.63
Jan-08	0.27	93.30	2.45	0.50	312.39	319.14	41.71	258.32	128.95
Feb-08	0.51	85.16	2.46	0.31	293.32	323.38	57.35	266.83	83.36
Mar-08	0.58	77.17	2.40	0.26	280.74	330.17	61.97	303.89	79.15
Apr-08	0.30	70.14	2.37	0.21	265.64	324.16	45.41	256.29	53.41
May-08	0.42	37.62	3.20	0.21	224.71	326.93	32.40	330.80	68.33
Jun-08	0.28	40.91	3.31	0.23	228.60	322.10	21.23	292.27	65.99
Jul-08	-1.22	61.64	3.28	0.21	247.14	321.60	23.60	244.16	52.15
Aug-08	0.30	41.98	3.24	0.24	229.58	327.74	36.06	348.58	82.16

Tabla A.13 Datos mensuales de la Estación SAMA para el periodo 2004-2008.

mes	T_aire	HR	viento	SW_in	SW_out	albedo	LW_in	LW_out	Rneta
Sep-04	-1.63	73.57	2.34	206.39	133.14	0.66	279.44	338.08	14.61
Oct-04	-0.55	68.58	2.59	232.16	109.14	0.51	243.06	305.15	60.93
Nov-04	0.25	77.73	2.14	207.96	73.44	0.37	252.60	307.37	79.75
Dec-04	0.41	81.79	1.71	207.74	78.63	0.39	296.85	328.80	97.16
Jan-05	2.93	68.46	1.55	204.42	145.14	0.75	262.00	306.94	14.34
Feb-05	0.35	85.15	1.87	188.64	146.75	0.80	294.02	310.96	24.94
Mar-05	0.86	72.42	1.85	224.37	103.38	0.48	254.68	306.53	69.14
Apr-05	0.59	67.40	2.61	186.82	63.65	0.37	242.13	304.92	60.38
May-05	-0.12	48.38	3.07	222.40	48.18	0.22	200.77	297.18	77.81
Jun-05	-1.65	39.47	3.29	228.89	54.55	0.24	176.76	289.60	61.49
Jul-05	-1.57	48.29	2.58	240.34	83.67	0.35	192.29	293.15	55.81
Aug-05	-1.60	44.46	2.80	259.41	108.83	0.43	186.35	292.42	44.51
Sep-05	-1.81	73.26	2.59	206.42	127.67	0.66	248.78	299.12	28.41
Oct-05	-0.64	79.24	2.34	186.71	142.58	0.78	271.38	303.01	12.49
Nov-05	0.30	75.02	2.25	211.52	133.22	0.66	268.29	306.13	40.47
Dec-05	0.60	78.22	1.90	233.94	113.14	0.53	275.20	310.15	85.85
Jan-06	0.28	83.62	1.85	212.57	174.64	0.84	297.33	313.77	20.27
Feb-06	0.76	78.94	2.02	204.17	149.57	0.74	260.53	344.25	-19.69
Mar-06	0.21	80.28	1.81	187.88	139.82	0.77	280.90	339.87	-9.92
Apr-06	-2.52		2.35	223.15	156.76	0.71	209.23	294.30	-18.68
May-06	-3.42	33.40	2.85	233.01	110.04	0.48	189.57	294.21	18.33
Jun-06	-3.31	43.45	2.67	186.11	91.04	0.50	197.80	292.61	-6.34
Jul-06	-1.93	39.03	2.80	219.41	105.69	0.49	175.16	290.30	-1.41
Aug-06	-1.57	56.30	2.65	201.00	102.51	0.52	221.40	295.01	24.89
Sep-06	0.96	56.90	2.85	231.09	91.64	0.40	229.09	299.25	69.28
Oct-06	0.92	69.04	2.54	216.97	118.20	0.54	268.36	310.25	56.88
Nov-06	1.21	74.22	1.84	216.83	119.98	0.55	296.60	326.92	66.54
Dec-06									
Jan-07									
Feb-07									
Mar-07									
Apr-07									
May-07									
Jun-07									
Jul-07	2.14	48.97	3.24	214.66	122.30	0.57	199.51	287.91	3.97
Aug-07	1.43	56.13	2.47	231.63	64.97	0.28	212.47	297.62	81.50
Sep-07									
Oct-07									
Nov-07									
Dec-07									
Jan-08	0.66	86.02	1.82	160.39	136.71	0.85	313.39	313.91	23.16
Feb-08	0.34	79.89	1.89	195.40	152.27	0.78	282.71	306.98	18.86
Mar-08	-0.01	72.94	1.69	210.73	159.65	0.76	265.52	302.10	14.50
Apr-08	-0.40	65.97	2.28	187.39	135.49	0.72	243.15	296.26	-1.21
May-08	-1.02	40.14	3.46	233.32	161.90	0.69	194.85	283.33	-17.05
Jun-08									
Jul-08									
Aug-08	-0.47	47.43	2.82	258.75	82.73	0.32	195.27	297.15	74.14

Tabla A.14 Datos mensuales para los años hidrológicos 1996-1997, 1997-1998, 2000-2001, 2004-2005 y 2005-2006.

Año hidrológico	fecha	Bn (mm eq.a.)	Bh (mm eq.a.)	Bn_baja (mm eq.a.)	Bn_abl_5050 (mm eq.a.)	ELA (msnm)	AAR (msnm)	T(5150m)glacie r[C]	T morrena[C]	P[mm]	Q[m³/s]	HR(%)	v(m/s)	SW_in (W/m²)	SW_out (W/m²)	s (W/m²)	albedo	Rextra (W/m²)	N	LW_in (W/m²)	LW_out (W/m²)	L (W/m²)	R_neta (W/m²)
1996-1997	Sep-96	30	-79	-2	88	5099	79	-2.5	-1.8	49	0.116	58	2.7	244	132	112	0.5	402	0.39	245	308	-63	59
	Oct-96	-208	-126	-223	-322	5473	40	-0.4	-0.6	73	0.179	57	2.3	243	164	79	0.7	435	0.44	254	316	-62	22
	Nov-96	17	-85	-39	28	5125	75	-0.7	-0.9	102	0.180	75	2.0	195	158	36	0.8	446	0.56	266	318	-52	4
	Dec-96	90	-9	3	152	5039	87	-0.2	-0.6	143	0.167	81	1.9	169	151	18	0.9	446	0.62	278	318	-41	3
	Jan-97	204	115	52	210	5011	91	0.2	-0.7	257	0.197	81	1.5	185	173	12	0.9	446	0.59	280	321	-40	15
	Feb-97	288	345	75	239	4994	93	0.4	-1.1	371	0.145	82	1.6	188	181	7	1.0	442	0.57	273	316	-43	14
	Mar-97	219	143	93	268	4994	93	-1.0	-1.1	201	0.113	73	1.9	180	155	25	0.9	419	0.57	267	314	-47	6
	Apr-97	65	-1	25	124	5021	90	-1.8	-1.5	58	0.066	64	2.5	212	152	60	0.7	375	0.43	248	311	-63	2
	May-97	4	-42	-11	40	5120	76	-3.8	-1.8	23	0.059	41	3.1	210	158	52	0.8	326	0.36	236	301	-65	-2
	Jun-97	-50	-58	-43	-104	5120	76	-4.0	-1.4	0	0.045	25	4.2	218	145	73	0.7	298	0.27	226	295	-68	3
1997-1998	Jul-97	-60	-87	-59	-16	5120	76	-3.5	-1.1	0	0.068	25	3.0	234	127	107	0.5	310	0.24	224	293	-69	32
	Aug-97	36	-50	19	88	5002	93	-4.0	-2.7	19	0.060	36	2.9	214	160	54	0.7	353	0.39	237	298	-60	0
	Sep-97	22	43	-16	8	5098	79	-1.3	-0.7	107	0.086	80	1.9	231	162	70	0.7	402	0.42	263	310	-47	23
	Oct-97	-298	-174	-275	-75	5531	33	0.3	0.5	59	0.201	62	1.9	250	181	69	0.7	435	0.43	263	317	-54	15
	Nov-97	-167	-240	-170	-32	5504	37	0.5	0.7	67	0.260	71	1.7	225	163	62	0.7	446	0.49	276	322	-45	17
	Dec-97	-420	-551	-385	-111	5531	33	1.2	1.7	86	0.522	75	1.5	208	96	111	0.5	446	0.53	292	325	-32	79
	Jan-98	-346	-454	-335	-84	5518	35	1.2	1.3	113	0.478	81	1.3	217	110	107	0.5	446	0.51	299	325	-26	81
	Feb-98	-185	-376	-203	-47	5487	39	1.3	2.0	138	0.444	79	1.2	182	107	75	0.6	442	0.59	300	326	-25	50
	Mar-98	-22	-190	-54	-17	5417	47	0.8	2.0	131	0.293	77	1.2	189	120	69	0.6	419	0.55	290	325	-34	34
	Apr-98	-361	-218	-327	-82	5539	32	-0.3	1.8	37	0.210	68	1.3	181	106	75	0.6	375	0.52	275	323	-48	27
2000-2001	May-98	-179	-234	-156	-43			-1.8	0.9	1	0.182	36	2.6	215	50	165	0.2	326	0.34	234	312	-79	87
	Jun-98		-57		35			-2.7	-0.9	46	0.095	50	2.1	171	70	101	0.4	298	0.43	242	308	-66	35
	Jul-98		-68		-65	5539	32	-3.6	-0.6	0	0.053	38	2.6	216	141	75	0.6	310	0.30	231	310	-79	-4
	Aug-98	-88	-92	-76	-30	5537	32	-2.1	-0.5	16	0.089	54	2.3	201	109	92	0.5	353	0.43	249	313	-64	28
	Sep-00	-244	-69	-231	-59	5515	36	-1.0	-0.7	31	0.086	71	2.8	251	70	68	0.3	402	0.38	235	303	-68	82
	Oct-00	134	48	35	15	5006	94	-1.0	-1.1	127	0.105	80	2.3	216	114	78	0.5	435	0.50	280	307	-27	50
	Nov-00	-256	-239	-248	-60	5507	37	0.4	0.7	40	0.224	63	2.7	271	71	60	0.3	446	0.39	245	308	-63	103
	Dec-00	310	93	89	37	4979	96	0.3	-0.1	279	0.240	80	2.5	225	142	78	0.6	446	0.49	287	312	-25	39
	Jan-01	205	101	67	26			-0.2		171	0.114	94	2.0	179	134	92	0.8	446	0.60	327	321	6	29
	Feb-01	160	64	22	16	5033	90	-0.1	-0.4	180	0.152	93	1.9	208	148	91	0.7	442	0.53	317	323	-6	30
	Mar-01	166	112	30	18	5026	91	-0.3	-0.4	176	0.111	86	2.0	203	142	84	0.7	419	0.52	306	321	-14	19
	Apr-01	18	-44	-17	7	5069	85	-0.3	-0.4	44	0.082	77	2.1	216	143	75	0.7	375	0.42	279	310	-31	17
	May-01	-2	-4	-27	2	5122	77	-1.0	-1.0	34	0.041	61	2.8	205	107	58	0.5	326	0.37	217	292	-75	-33
	Jun-01	63	4	30	15	4987	96	-2.1	-2.0	34	0.035	55	3.1	205	117	52	0.6	298	0.31	221	289	-68	-19
	Jul-01	-96	-36	-81	-26	5550	68	-2.4	-2.1	0	0.027	48	3.4	229	131	44	0.6	310	0.26	210	286	-76	-13
	Aug-01	59	12	25	10	4970	96	-2.5	-2.1	39	0.035	60	2.5	237	128	58	0.5	353	0.33	227	292	-66	12

Análisis mensual de los balances de masa glaciológico e hidrológico del glaciar tropical Zongo (Bolivia)

2004-2005	Sep-04	-34	-3	-33	-9			-1.7	-1.1	48	0.056	74	2.4	206	133	73	0.6	402	0.49	279	338	-59	24
	Oct-04	-174	-163	-150	-60	5535	35	-0.5	-0.1	51	0.176	68	2.6	232	109	123	0.4	435	0.47	243	305	-62	81
	Nov-04	-364	-241	-292	-114	5542	34	0.2	0.8	68	0.251	78	2.1	208	73	135	0.3	446	0.53	253	307	-55	101
	Dec-04	-201	-228	-178	-71	5531	35	0.5	0.6	73	0.248	81	1.8	208	79	129	0.3	446	0.53	297	329	-32	111
	Jan-05	-20	48	-64	-39	5386	53	0.2	0.5	180	0.164	72	1.6	204	145	59	0.7	446	0.54	262	307	-45	30
	Feb-05	33	68	-26	-9	5186	71	0.3	-0.2	186	0.156	85	1.9	189	147	42	0.8	442	0.57	294	311	-17	25
	Mar-05	-134	-222	-121	-55	5534	35	0.8	1.4	36	0.202	72	1.9	224	103	121	0.4	419	0.46	255	307	-52	68
	Apr-05	-105	-156	-94	-32	5531	35	0.6	0.8	32	0.149	67	2.6	187	64	123	0.3	375	0.50	242	305	-63	60
	May-05	-235	-134	-184	-66	5549	33	-0.1	0.7	3	0.102	48	3.1	222	48	174	0.1	326	0.32	201	297	-96	78
	Jun-05	-143	-71	-113	-49	5548	33	-1.6	-0.9	5	0.057	39	3.3	229	55	174	0.2	298	0.23	177	290	-113	61
2005-2006	Jul-05	-131	-46	-112	-51	5542	34	-1.6	-0.6	11	0.045	48	2.6	240	84	157	0.3	310	0.22	192	293	-101	56
	Aug-05	-31	-74	-62	-31			-1.6	0.2	13	0.069	44	2.8	259	109	151	0.4	353	0.27	186	292	-106	44
	Sep-05	3	3	-21	-13	5194	71	-1.8	-1.8	60	0.064	73	2.6	206	128	79	0.7	402	0.49	249	299	-50	28
	Oct-05	57	-117	27	13	4977	97	-0.6	-0.8	99	0.194	79	2.3	187	143	44	0.8	435	0.57	271	303	-32	12
	Nov-05	19	-153	-20	-30	5105	81	0.3	0.2	95	0.215	75	2.2	212	133	78	0.7	446	0.53	268	306	-38	40
	Dec-05	-154	-258	-143	-31	5519	37	0.6	0.4	95	0.292	78	1.9	234	113	121	0.5	446	0.48	275	310	-35	86
	Jan-06	168	228	55	7	4985	97	0.2	-0.5	306	0.173	84	1.8	213	175	38	0.8	446	0.52	297	314	-16	5
	Feb-06	-21	-78	-42	-9	5446	47	0.8	0.4	110	0.178	79	2.0	204	150	55	0.7	442	0.54	276	416	-140	-20
	Mar-06	5	-90	-23	-3	5123	79	0.2	0.6	100	0.176	81	1.8	188	140	48	0.8	419	0.55	281	340	-59	-8
	Apr-06	116	0	77	21	5025	93	-2.5	0.4	90	0.099	48	2.3	223	157	66	0.7	375	0.40	209	294	-85	-18
	May-06	-59	-95	-79	-47	5200	70	-3.4	-0.3	2	0.071	33	2.9	233	110	123	0.5	326	0.28	190	294	-105	18
	Jun-06	-46	-64	-58	-28	5213	69	-3.3	-1.0	11	0.059	43	2.7	186	91	95	0.5	298	0.38	198	293	-95	-5
	Jul-06	-90	-62	-83	-28	5546	33	-1.9	-0.9	2	0.047	39	2.8	219	106	114	0.5	310	0.29	175	290	-115	-1
	Aug-06	-68	-61	-66	-34	5523	37	-1.6	-1.0	9	0.054	57	2.6	201	103	98	0.5	353	0.43	221	295	-74	25

A6 Tablas de Correlaciones

Tabla A.15. Correlaciones mensuales de balances de masa y variables meteorológicas locales para el año hidrológico 1996-1997.

Bn	Bn_baja	Bn_baja_5150	Bn_alta	Bh	T(5150m)	T morrena	P	P1	Q	HR	V(5150)	Swin	Swout	LW_in	LW_out	S	L	albedo	Rneta(medida)	N	ELA	AAR	
1.0000	0.8416	0.8907	0.7780	0.7952	0.1712	0.0035	0.6600	0.5706	0.0444	0.4073	0.3454	0.5654	0.2183	0.3965	0.1767	0.5379	0.5732	0.5525	0.0271	0.4121	0.6684	0.7176	Bn
	1.0000	0.9365	0.3864	0.4900	0.0066	0.0568	0.2640	0.1909	0.0146	0.1431	0.0917	0.4296	0.0413	0.1214	0.0157	0.3043	0.2656	0.2840	0.0442	0.1571	0.9207	0.9317	Bn_baja
		1.0000	0.5066	0.5131	0.0699	0.0082	0.3712	0.2932	0.0048	0.2930	0.2521	0.5078	0.0565	0.2593	0.0899	0.3683	0.4202	0.3593	0.0201	0.3018	0.8382	0.8649	Bn_baja_5150
			1.0000	0.8580	0.5158	0.1592	0.9814	0.9397	0.3110	0.6533	0.6371	0.4955	0.4608	0.6835	0.4611	0.6248	0.7742	0.6921	0.0056	0.6306	0.2238	0.2750	Bn_alta
				1.0000	0.2040	0.0356	0.8219	0.7643	0.0511	0.3267	0.3120	0.3799	0.3961	0.3349	0.1509	0.5000	0.4657	0.5439	0.0239	0.3110	0.3139	0.3679	Bh
					1.0000	0.6007	0.5767	0.6586	0.8277	0.8491	0.8135	0.2812	0.3154	0.8749	0.9337	0.3808	0.6687	0.4378	0.0000	0.7831	0.0025	0.0001	T(5150m)
						1.0000	0.2189	0.3092	0.5297	0.3006	0.2890	0.1101	0.0445	0.3578	0.4261	0.1061	0.2417	0.1263	0.0025	0.2451	0.1011	0.0904	T morrena
							1.0000	0.9784	0.3795	0.6518	0.6457	0.4306	0.5186	0.6962	0.5017	0.5998	0.7523	0.6769	0.0033	0.6237	0.1269	0.1693	P
								1.0000	0.4242	0.6744	0.6793	0.4483	0.5531	0.7320	0.5641	0.6304	0.7519	0.7042	0.0142	0.6554	0.0755	0.1121	P1
									1.0000	0.6344	0.6594	0.1327	0.2377	0.7153	0.7852	0.2187	0.5303	0.2731	0.0244	0.6114	0.0499	0.0333	Q
										1.0000	0.8351	0.4421	0.3351	0.9402	0.9176	0.5181	0.7867	0.5673	0.0034	0.9244	0.0585	0.0851	HR
											1.0000	0.3402	0.3443	0.8421	0.7908	0.4428	0.7310	0.5019	0.0000	0.8133	0.0305	0.0562	V(5150)
												1.0000	0.2649	0.5438	0.2867	0.8641	0.7189	0.8193	0.3572	0.6049	0.3782	0.4100	Swin
													1.0000	0.4132	0.3484	0.6313	0.3946	0.6780	0.2206	0.4103	0.0052	0.0201	Swout
														1.0000	0.8900	0.6379	0.9114	0.6928	0.0188	0.9649	0.0492	0.0772	LW_in
															1.0000	0.4007	0.6431	0.4506	0.0018	0.8446	0.0004	0.0012	LW_out
																1.0000	0.7580	0.9903	0.3909	0.6827	0.2176	0.2646	S
																	1.0000	0.8045	0.0436	0.8923	0.1749	0.2203	L
																		1.0000	0.3127	0.7198	0.1895	0.2377	albedo
																			1.0000	0.0316	0.0611	0.0712	R_neta
																				1.0000	0.0768	0.1109	N
																					1.0000	0.9878	ELA
																						1.0000	AAR

Tabla A.16. Correlaciones mensuales de balances de masa y variables meteorológicas locales para el año hidrológico 1997-1998.

Bn	Bn_baja	Bn_baja_5150	Bn_alta	Bh	T(S150m)	T morrena	P	P1	Q	HR	V(S150)	Swin	Swout	LW_in	LW_out	S	L	albedo	Rneta(medida)	N	ELA	AAR	
1.0000	0.9866	0.9672	0.6891	0.5726	0.2065	0.2422	0.0208	0.0452	0.3586	0.0006	0.0840	0.0002	0.0439	0.1028	0.2611	0.0604	0.0559	0.0731	0.1747	0.0553	0.4571	0.4764	Bn
	1.0000	0.9514	0.5775	0.6209	0.2946	0.2881	0.0010	0.0115	0.4405	0.0169	0.1466	0.0006	0.0284	0.1751	0.3334	0.0352	0.1158	0.0457	0.1726	0.1013	0.4117	0.4274	Bn_baja
		1.0000	0.7027	0.5133	0.2009	0.3169	0.0013	0.0005	0.3333	0.0186	0.0753	0.0715	0.0055	0.1376	0.3335	0.0138	0.0787	0.0023	0.0900	0.0353	0.5084	0.5254	Bn_baja_5150
			1.0000	0.1423	0.0030	0.0339	0.3313	0.2588	0.0139	0.1457	0.0505	0.0718	0.0038	0.0279	0.0163	0.0884	0.0712	0.0517	0.0157	0.0783	0.5554	0.5903	Bn_alta
				1.0000	0.5567	0.5927	0.1468	0.1411	0.9045	0.1690	0.3022	0.0053	0.0727	0.4936	0.6478	0.0887	0.4048	0.0806	0.5071	0.3542	0.2534	0.2434	Bh
					1.0000	0.6729	0.5969	0.6349	0.7612	0.6798	0.7455	0.0048	0.0339	0.8856	0.8381	0.0352	0.8302	0.0471	0.1626	0.7315	0.0104	0.0064	T(S150m)
						1.0000	0.2567	0.2997	0.6448	0.2627	0.5610	0.0538	0.0287	0.5907	0.8461	0.0014	0.4647	0.0054	0.2305	0.5427	0.1190	0.1033	T morrena
							1.0000	0.9332	0.4222	0.8176	0.6784	0.0082	0.0503	0.7437	0.3997	0.1361	0.8279	0.1194	0.0486	0.6313	0.1715	0.1940	P
								1.0000	0.3997	0.7582	0.6390	0.0013	0.0857	0.7383	0.4588	0.1732	0.7911	0.1653	0.0255	0.6260	0.1029	0.1227	P1
									1.0000	0.4105	0.5298	0.0081	0.0216	0.7510	0.7635	0.0148	0.6855	0.0139	0.4353	0.5708	0.0831	0.0738	Q
										1.0000	0.8052	0.0000	0.1294	0.8317	0.4934	0.2223	0.9025	0.2067	0.0206	0.7179	0.1785	0.1940	HR
											1.0000	0.0705	0.0236	0.9024	0.7480	0.1734	0.8860	0.1068	0.0373	0.8887	0.0001	0.0012	V(S150)
												1.0000	0.4296	0.0161	0.0226	0.0039	0.0128	0.1110	0.0185	0.1512	0.0527	0.0462	Swin
													1.0000	0.0226	0.0025	0.6314	0.0326	0.8613	0.4632	0.0001	0.1236	0.1202	Swout
														1.0000	0.8370	0.0903	0.9786	0.0703	0.1160	0.8725	0.0009	0.0001	LW_in
															1.0000	0.0347	0.7156	0.0246	0.1312	0.7350	0.1538	0.1355	LW_out
																1.0000	0.1085	0.9191	0.6241	0.1062	0.0967	0.1034	S
																	1.0000	0.0860	0.1015	0.8520	0.0109	0.0160	L
																		1.0000	0.5960	0.0461	0.1311	0.1359	albedo
																			1.0000	0.1763	0.0165	0.0147	Rneta
																				1.0000	0.0060	0.0028	N
																					1.0000	0.9985	ELA
																						1.0000	AAR

Tabla A.17. Correlaciones mensuales de balances de masa y variables meteorológicas locales para el año hidrológico 2000-2001.

Bn	Bn_baja	Bn_baja_5150	Bn_alta	Bh	T(5150m)	T morrena	P	P1	Q	HR	V(5150)	Swin	Swout	LW_in	LW_out	S	L	albedo	Rneta(medida)	N	ELA	AAR	
1.0000	0.9128	0.8970	0.8194	0.7993	0.0434	0.0036	0.6533	0.6493	0.0350	0.3497	0.2712	0.5296	0.6670	0.4150	0.1969	0.7149	0.5108	0.7144	0.1225	0.3948	0.7473	0.8236	Bn
	1.0000	0.9958	0.5466	0.7700	0.0016	0.0985	0.3584	0.3610	0.0067	0.1662	0.1528	0.6241	0.7225	0.2203	0.0507	0.8048	0.3182	0.7655	0.3162	0.1940	0.8026	0.9734	Bn_baja
		1.0000	0.5233	0.7817	0.0037	0.1106	0.3372	0.3466	0.0128	0.1615	0.1507	0.6236	0.7362	0.2095	0.0446	0.8127	0.3068	0.7680	0.3314	0.1827	0.7845	0.9676	Bn_baja_5150
			1.0000	0.6017	0.2831	0.1014	0.9632	0.9461	0.2962	0.5804	0.3906	0.2730	0.4082	0.6295	0.4728	0.4057	0.6689	0.4463	0.0001	0.6382	0.4482	0.4046	Bn_alta
				1.0000	0.0000	0.0767	0.4665	0.4822	0.0085	0.3181	0.2021	0.6423	0.5741	0.3157	0.1340	0.7235	0.4002	0.6757	0.1926	0.3067	0.5352	0.6627	Bh
					1.0000	0.9388	0.3950	0.3614	0.7243	0.5003	0.4056	0.0003	0.0005	0.5008	0.6892	0.0005	0.4015	0.0079	0.3067	0.5498	0.0021	0.0290	T(5150m)
						1.0000	0.2008	0.1703	0.7360	0.3307	0.2738	0.1061	0.0398	0.3307	0.5684	0.0761	0.2216	0.0377	0.4621	0.3958	0.0179	0.1369	T morrena
							1.0000	0.9804	0.4414	0.6190	0.3892	0.1572	0.2747	0.6540	0.5602	0.2558	0.6604	0.3020	0.0296	0.6751	0.2789	0.2245	P
								1.0000	0.4086	0.6114	0.3624	0.1508	0.2899	0.6378	0.5291	0.2597	0.6523	0.3034	0.0314	0.6446	0.2598	0.2239	P1
									1.0000	0.2455	0.1524	0.0782	0.0037	0.2783	0.4169	0.0327	0.2120	0.0085	0.4675	0.3063	0.0003	0.0283	Q
										1.0000	0.8558	0.2204	0.1637	0.9367	0.9028	0.2265	0.8996	0.2688	0.1030	0.9379	0.2056	0.0823	HR
											1.0000	0.1603	0.1750	0.8146	0.8014	0.2003	0.7752	0.2490	0.0812	0.7776	0.2802	0.1123	V(5150)
												1.0000	0.4563	0.2509	0.0849	0.8741	0.3358	0.7317	0.3828	0.2496	0.4894	0.6072	Swin
													1.0000	0.2704	0.1011	0.8509	0.3536	0.9050	0.2920	0.1345	0.4288	0.6953	Swout
														1.0000	0.9133	0.3114	0.9831	0.3832	0.0727	0.9167	0.2147	0.1332	LW_in
															1.0000	0.1112	0.8267	0.1664	0.2125	0.8525	0.0690	0.0092	LW_out
																1.0000	0.4117	0.9781	0.3985	0.2211	0.5319	0.7666	S
																	1.0000	0.4829	0.0315	0.8942	0.2959	0.2318	L
																		1.0000	0.3086	0.2564	0.4945	0.7277	albedo
																			1.0000	0.1271	0.1596	0.3578	R_neta
																				1.0000	0.2251	0.0964	N
																					1.0000	0.8359	ELA
																						1.0000	AAR

Tabla A.18. Correlaciones mensuales de balances de masa y variables meteorológicas locales para el año hidrológico 2004-2005.

Bn	Bn_baja	Bn_baja_5150	Bn_alta	Bh	T(5150m)	T morrena	P	P1	Q	HR	V(5150)	SwIn	Swout	LW_in	LW_out	S	L	albedo	Rneta(medida)	N	ELA	AAR	
1.0000	0.9695	0.9001	0.8810	0.6506	0.0455	0.1472	0.1789	0.1538	0.2045	0.0012	0.0218	0.0731	0.5065	0.0223	0.0112	0.2504	0.0237	0.5719	0.7909	0.0479	0.5312	0.5517	Bn
	1.0000	0.9592	0.7463	0.6279	0.0910	0.2145	0.0881	0.0680	0.3090	0.0020	0.0013	0.1174	0.4034	0.0067	0.0120	0.2758	0.0037	0.4743	0.8063	0.0525	0.4041	0.4173	Bn_baja
		1.0000	0.6418	0.5738	0.0842	0.2346	0.0606	0.0431	0.3213	0.0003	0.0012	0.1875	0.3274	0.0135	0.0311	0.3245	0.0058	0.4204	0.7589	0.0891	0.4110	0.4115	Bn_baja_5150
			1.0000	0.5785	0.0004	0.0366	0.4010	0.3787	0.0424	0.0360	0.1264	0.0106	0.6362	0.0719	0.0079	0.1644	0.1051	0.6727	0.6250	0.0317	0.7262	0.7605	Bn_alta
				1.0000	0.1514	0.3721	0.2519	0.2260	0.3385	0.0063	0.0002	0.0895	0.3946	0.0001	0.0001	0.2387	0.0004	0.4662	0.8133	0.0267	0.5577	0.5767	Bh
					1.0000	0.6694	0.2095	0.2219	0.7064	0.4432	0.3903	0.0291	0.0001	0.3501	0.0440	0.0168	0.5030	0.0035	0.1209	0.0264	0.0711	0.0783	T(5150m)
						1.0000	0.0045	0.0071	0.4986	0.0826	0.1586	0.1759	0.0458	0.0353	0.0067	0.1705	0.0869	0.0706	0.2309	0.0201	0.0358	0.0287	T morrena
							1.0000	0.9821	0.1693	0.4866	0.5500	0.0221	0.5313	0.4820	0.1179	0.1705	0.6188	0.6152	0.1365	0.1762	0.7626	0.8073	P
								1.0000	0.1857	0.4383	0.5025	0.0042	0.4792	0.4364	0.0834	0.1108	0.5871	0.5517	0.1009	0.1183	0.7766	0.8167	P1
									1.0000	0.5466	0.4672	0.0308	0.0006	0.4122	0.1127	0.0160	0.5169	0.0003	0.3635	0.0495	0.0032	0.0047	Q
										1.0000	0.7203	0.1630	0.2538	0.9461	0.5618	0.2694	0.9535	0.3202	0.0039	0.5389	0.2592	0.2678	HR
											1.0000	0.0283	0.3664	0.6884	0.3267	0.1426	0.7476	0.3616	0.0003	0.2577	0.2052	0.2340	V(5150)
												1.0000	0.1328	0.2533	0.6249	0.8555	0.1004	0.1951	0.1627	0.8081	0.3343	0.3412	SwIn
													1.0000	0.2930	0.1639	0.4775	0.3016	0.9469	0.4560	0.2899	0.6167	0.6564	Swout
														1.0000	0.7162	0.3741	0.9378	0.3736	0.0001	0.6282	0.2986	0.3101	LW_in
															1.0000	0.6066	0.4716	0.2055	0.0003	0.8287	0.0614	0.0664	LW_out
																1.0000	0.2209	0.5477	0.3466	0.8419	0.7512	0.7904	S
																	1.0000	0.3867	0.0000	0.4295	0.3959	0.4089	L
																		1.0000	0.5144	0.3529	0.7662	0.7985	albedo
																			1.0000	0.0660	0.4987	0.5186	R_neta
																				1.0000	0.2441	0.2624	N
																					1.0000	0.9951	ELA
																						1.0000	AAR

Tabla A.19. Correlaciones mensuales de balances de masa y variables meteorológicas locales para el año hidrológico 2005-2006.

Bn	Bn_baja	Bn_baja_5150	Bn_alta	Bh	T(5150m)	T morena	P	P1	Q	HR	V(5150)	Swin	Swout	LW_in	LW_out	S	L	albedo	Rneta(medida)	N	ELA	AAR	
1.0000	0.9458	0.6326	0.7966	0.5561	0.0119	0.0032	0.4965	0.5099	0.0012	0.0981	0.1176	0.0480	0.7009	0.1283	0.0007	0.6589	0.1338	0.6482	0.2336	0.1669	0.6998	0.7352	Bn
	1.0000	0.7225	0.5820	0.4372	0.0007	0.0012	0.3172	0.3249	0.0016	0.0586	0.0644	0.0770	0.6197	0.0680	0.0000	0.6443	0.0818	0.5971	0.3008	0.1450	0.6656	0.7017	Bn_baja
		1.0000	0.3155	0.2151	0.0648	0.0299	0.3591	0.3293	0.0425	0.1973	0.2467	0.0956	0.6532	0.1811	0.0362	0.7014	0.0833	0.6999	0.2209	0.2894	0.3891	0.4316	Bn_baja_5150
			1.0000	0.6231	0.0626	0.0081	0.7488	0.7713	0.0301	0.1606	0.2122	0.0050	0.6391	0.2395	0.0060	0.4883	0.2128	0.5453	0.0781	0.1572	0.5508	0.5742	Bn_alta
				1.0000	0.0130	0.0912	0.3432	0.3382	0.1343	0.0024	0.0068	0.0112	0.2878	0.0062	0.0018	0.2511	0.0154	0.2133	0.2598	0.0010	0.1853	0.1975	Bh
					1.0000	0.2603	0.3917	0.3838	0.7003	0.7914	0.7287	0.0069	0.2748	0.7849	0.3730	0.2289	0.1629	0.3468	0.0693	0.6451	0.0016	0.0003	T(5150m)
						1.0000	0.0832	0.0803	0.4157	0.0687	0.4354	0.0625	0.1558	0.1314	0.2579	0.0352	0.0051	0.0847	0.0016	0.0702	0.0029	0.0055	T morena
							1.0000	0.9927	0.2910	0.4880	0.6152	0.0001	0.7162	0.5868	0.0877	0.4942	0.3156	0.6361	0.0019	0.3860	0.2430	0.2727	P
								1.0000	0.2912	0.4762	0.5931	0.0000	0.6953	0.5766	0.0627	0.4729	0.3557	0.6123	0.0002	0.3797	0.2620	0.2911	P1
									1.0000	0.5646	0.6639	0.0100	0.1716	0.6365	0.1472	0.0821	0.2663	0.1899	0.2296	0.4639	0.0141	0.0190	Q
										1.0000	0.6909	0.0904	0.3672	0.9615	0.2476	0.4435	0.3725	0.5628	0.0567	0.9155	0.0565	0.0654	HR
											1.0000	0.0064	0.4691	0.7734	0.3027	0.3713	0.2044	0.5120	0.0075	0.5920	0.0540	0.0672	V(5150)
												1.0000	0.0003	0.0554	0.0363	0.3195	0.0066	0.1344	0.1765	0.2310	0.0724	0.0692	Swin
													1.0000	0.4253	0.1670	0.6954	0.1120	0.8559	0.1018	0.3806	0.3684	0.4100	Swout
														1.0000	0.2641	0.4462	0.3801	0.5852	0.0541	0.8735	0.0924	0.1041	LW_in
															1.0000	0.1956	0.1286	0.2066	0.0989	0.2502	0.0301	0.0229	LW_out
																1.0000	0.1030	0.9325	0.2451	0.5996	0.4216	0.4535	S
																	1.0000	0.1725	0.2935	0.3113	0.2401	0.2401	L
																		1.0000	0.1198	0.6517	0.4232	0.4578	albedo
																			1.0000	0.0098	0.0796	0.0863	R_neta
																				1.0000	0.1320	0.1455	N
																					1.0000	0.9968	ELA
																						1.0000	AAR

Tabla A.20. Correlaciones mensuales de anomalías e índices de eventos ENSO para los 15 años estudiados (1994-2008).

Bn_en om	Bn_baja_a nom	Bn_alta_a nom	Bh_en om	Q_an om	P_an om	T_an om	SOI	NIÑO 1+2	NIÑO1+2_a nom	MEI	NIÑO 03	NIÑO03_a nom	NIÑO 04	NIÑO04_a nom	NIÑO 3.4	NIÑO3.4_a nom
1.0000	0.9278	0.6969	0.4869	0.050 0	0.324 9	0.016 9	0.05 65	0.0491	0.0337	0.07 88	0.00 06	0.0667	0.06 87	0.0324	0.044 5	0.05 62
	1.0000	0.4309	0.4627	0.142 5	0.130 3	0.003 5	0.03 20	0.0262	0.0442	0.05 64	0.00 03	0.0598	0.03 29	0.0198	0.013 7	0.04 00
		1.0000	0.3212	0.020 7	0.739 4	0.058 6	0.09 13	0.0831	0.0073	0.09 27	0.01 12	0.0511	0.13 48	0.0487	0.125 5	0.06 68
			1.0000	0.437 4	0.155 6	0.000 6	0.03 35	0.0059	0.0482	0.04 69	0.00 01	0.0520	0.01 49	0.0100	0.009 7	0.03 17
				1.000 0	0.183 9	0.074 7	0.00 01	0.0557	0.0709	0.00 59	0.00 19	0.0256	0.01 87	0.0000	0.027 6	0.00 49
					1.000 0	0.096 2	0.04 56	0.1439	0.0029	0.02 98	0.00 43	0.0066	0.09 49	0.0114	0.103 4	0.01 65
						1.000 0	0.00 06	0.1922	0.0065	0.00 04	0.06 01	0.0005	0.00 95	0.0018	0.000 1	0.00 61
							1.00 00	0.0295	0.1495	0.54 59	0.24 62	0.3873	0.43 76	0.4442	0.490 5	0.51 32
								1.0000	0.3362	0.08 09	0.61 36	0.1467	0.01 75	0.0000	0.113 2	0.04 48
									1.0000	0.49 08	0.38 59	0.6682	0.05 07	0.0740	0.257 3	0.34 04
										1.00 00	0.39 74	0.7913	0.56 57	0.5809	0.700 4	0.82 44
											1.00 00	0.4981	0.11 30	0.1334	0.668 3	0.38 74
												1.0000	0.36 61	0.4071	0.662 9	0.84 11
													1.00 00	0.9318	0.603 7	0.69 45
														1.0000	0.549 8	0.74 22
															1.000 0	0.79 80
																1.00 00

Tabla A.21. Correlaciones mensuales de anomalías e índices de eventos ENSO para los 15 años estudiados (1994-2008). Periodos húmedo y de transición.

Bn_en om	Bn_baja_a nom	Bn_alta_a nom	Bh_en om	Q_en om	P_en om	T_en om	SOI	NIÑO 1+2	NIÑO1+2_a nom	MEI	NIÑO3 O3	NIÑO3_a nom	NIÑO4 O4	NIÑO4_a nom	NIÑO 3.4	NIÑO3.4_a nom	
1.0000	0.9467	0.7715	0.5566	0.152 7	0.431 3	0.052 0	0.09 68	0.0534	0.0735	0.11 55	0.00 17	0.1108	0.09 72	0.0568	0.066 0	0.09 52	Bn_enom
	1.0000	0.5541	0.5193	0.234 4	0.252 3	0.031 9	0.07 48	0.0399	0.0907	0.10 24	0.00 02	0.1089	0.06 77	0.0404	0.040 7	0.08 01	Bn_baja_a nom
		1.0000	0.4435	0.016 6	0.736 7	0.083 3	0.11 16	0.0632	0.0270	0.10 48	0.00 85	0.0800	0.13 35	0.0761	0.107 7	0.09 55	Bn_alta_a nom
			1.0000	0.575 2	0.333 4	0.002 4	0.05 54	0.0206	0.0582	0.06 32	0.00 00	0.0674	0.03 04	0.0174	0.020 6	0.04 64	Bh_enom
				1.000 0	0.008 6	0.047 4	0.01 74	0.0093	0.0947	0.04 10	0.00 01	0.0572	0.00 01	0.0028	0.000 1	0.02 38	Q_enom
					1.000 0	0.115 6	0.03 96	0.1145	0.0000	0.02 19	0.00 05	0.0126	0.06 82	0.0195	0.056 5	0.02 18	P_enom
						1.000 0	0.00 24	0.1286	0.0000	0.00 02	0.02 74	0.0010	0.00 60	0.0001	0.000 2	0.00 30	T_enom
							1.00 00	0.0502	0.2497	0.61 52	0.28 15	0.4522	0.42 55	0.4488	0.520 3	0.53 72	SOI
								1.0000	0.2828	0.06 94	0.66 31	0.1326	0.01 47	0.0002	0.152 9	0.05 14	NIÑO 1+2
									1.0000	0.51 90	0.46 59	0.7399	0.10 20	0.1244	0.418 0	0.46 09	NIÑO1+2_a nom
										1.00 00	0.40 06	0.8255	0.60 78	0.6405	0.759 7	0.87 72	MEI
											1.00 00	0.10 69	0.5258	0.1570	0.681 2	0.41 84	NIÑO3
												1.0000	0.43 18	0.4617	0.776 2	0.88 19	NIÑO3_ano m
													1.00 00	0.592 6	0.72 30		NIÑO4
														1.0000	0.610 2	0.75 60	NIÑO4_ano m
															1.000 0	0.86 64	NIÑO3.4
																1.00 00	NIÑO3.4_a nom

Tabla A.22. Correlaciones mensuales de anomalías e índices de eventos ENSO para los 15 años estudiados (1994-2008). Periodo húmedo.

Bn_an om	Bn_baja_a nom	Bn_alta_a nom	Bh_an om	Q_an om	P_an om	T_an om	SOI	NIÑO 1+2	NIÑO1+2_a nom	MEI	NIÑO 3	NIÑO3_a nom	NIÑO 4	NIÑO4_a nom	NIÑO 3.4	NIÑO3.4_a nom	
1.0000	0.9387	0.8168	0.8022	0.512 3	0.507 8	0.002 9	0.22 80	0.0064	0.2399	0.29 28	0.12 48	0.3364	0.14 99	0.1316	0.231 3	0.27 57	Bn_anom
	1.0000	0.5925	0.7876	0.668 4	0.327 9	0.002 2	0.21 04	0.0035	0.3079	0.30 11	0.11 47	0.3850	0.14 73	0.1249	0.227 9	0.29 32	Bn_baja_a nom
		1.0000	0.6015	0.189 1	0.713 9	0.003 0	0.19 22	0.0109	0.0936	0.20 20	0.10 68	0.1807	0.11 36	0.1068	0.173 3	0.17 64	Bn_alta_a nom
			1.0000	0.706 3	0.552 8	0.000 2	0.17 95	0.0000	0.2257	0.27 72	0.07 40	0.3033	0.12 36	0.1011	0.177 2	0.23 61	Bh_anom
				1.000 0	0.069 3	0.000 0	0.14 98	0.0000	0.3750	0.33 39	0.05 52	0.3934	0.13 81	0.1114	0.172 3	0.28 46	Q_anom
					1.000 0	0.002 2	0.07 78	0.0001	0.0099	0.05 37	0.03 95	0.0481	0.02 77	0.0229	0.058 4	0.04 62	P_anom
							1.000 0	0.00 58	0.2169	0.00 15	0.07 94	0.0064	0.10 97	0.0869	0.001 1	0.00 16	T_anom
							1.00 00	0.0976	0.2617	0.62 35	0.36 63	0.4946	0.43 88	0.4535	0.558 0	0.56 29	SOI
								1.0000	0.4099	0.11 50	0.71 50	0.2165	0.00 07	0.0118	0.255 4	0.12 44	NIÑO 1+2
									1.0000	0.43 46	0.56 61	0.7359	0.10 20	0.1112	0.471 7	0.47 27	NIÑO1+2_a nom
										1.00 00	0.50 26	0.8125	0.66 60	0.6821	0.835 5	0.90 40	MEI
										1.00 00	0.20 86	0.6527	0.20 86	0.2594	0.752 2	0.56 54	NIÑO3
												1.0000	0.46 62	0.4749	0.845 7	0.89 24	NIÑO3_ano m
													1.00 00	0.9882	0.664 6	0.75 23	NIÑO4
														1.0000	0.698 1	0.76 59	NIÑO4_ano m
															1.000 0	0.94 05	NIÑO3.4
																1.00 00	NIÑO3.4_a nom

Tabla A.23. Correlaciones mensuales de anomalías e índices de eventos ENSO para los 15 años estudiados (1994-2008). Periodo de transición.

Bn_an om	Bn_abl_a nom	Bn_acum_a nom	Bh_an om	Q_an om	P_an om	T_an om	SOI	NIÑO 1+2	NIÑO1+2_a nom	MEI	NIÑO 3	NIÑO3_a nom	NIÑO 4	NIÑO4_a nom	NIÑO 3.4	NIÑO3.4_a nom	
1.0000	0.9796	0.7026	0.2896	0.219 7	0.071 5	0.002 1	0.00 50	0.0007	0.0437	0.01 46	0.00 76	0.0120	0.00 00	0.0003	0.008 6	0.00 08	Bn_anom
	1.0000	0.5651	0.2815	0.246 5	0.029 5	0.000 6	0.00 22	0.0030	0.0403	0.01 07	0.01 55	0.0088	0.00 06	0.0001	0.017 2	0.00 01	Bn_abl_anom
		1.0000	0.2091	0.071 3	0.337 4	0.012 3	0.02 21	0.0088	0.0427	0.02 79	0.00 66	0.0239	0.01 37	0.0143	0.006 6	0.01 21	Bn_acum_anom
			1.0000	0.896 4	0.083 5	0.020 8	0.02 08	0.0039	0.0029	0.02 18	0.04 92	0.0148	0.06 00	0.0477	0.094 8	0.04 55	Bh_anom
				1.000 0	0.004 3	0.044 0	0.02 38	0.0220	0.0032	0.01 49	0.08 79	0.0092	0.05 38	0.0398	0.116 9	0.03 21	Q_anom
					1.000 0	0.012 6	0.00 07	0.0652	0.0019	0.00 25	0.04 14	0.0031	0.00 27	0.0043	0.006 4	0.00 95	P_anom
						1.000 0	0.00 39	0.2347	0.0057	0.00 10	0.12 44	0.0001	0.03 72	0.0286	0.017 0	0.00 51	T_anom
							1.00 00	0.1277	0.3004	0.63 62	0.27 04	0.4270	0.44 44	0.4430	0.497 0	0.51 40	SOI
								1.0000	0.3303	0.16 37	0.86 13	0.2256	0.00 49	0.0075	0.462 3	0.11 73	NIÑO 1+2
									1.0000	0.64 22	0.40 01	0.7757	0.16 51	0.1682	0.439 5	0.50 43	NIÑO1+2_a nom
										1.00 00	0.37 26	0.8423	0.59 14	0.5932	0.686 1	0.84 68	MEI
											1.00 00	0.4698	0.11 22	0.1178	0.783 8	0.36 94	NIÑO3
												1.0000	0.45 42	0.4588	0.728 9	0.88 12	NIÑO3_ano m
													1.00 00	0.9963	0.498 1	0.73 64	NIÑO4
														1.0000	0.502 0	0.74 15	NIÑO4_ano m
															1.000 0	0.78 81	NIÑO3.4
																1.00 00	NIÑO3.4_a nom