

INFORME N° 56
ORSTOM - BOLIVIE



El Glaciar de Chacaltaya en 1940 (Archivo Club Andino Boliviano)

EL GLACIAR DE CHACALTAYA
(Cordillera Real, Bolivia)
Investigaciones glaciológicas
(1991 - 1997)

B. FRANCOU (ORSTOM)
E. RAMIREZ (IHH)
J. MENDOZA (IHH)
J. GUERECA (IGM)
G. MIRANDA (IE)
L. NORIEGA (SENAMHI)

ENERO 1998

ORSTOM

L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION

EL GLACIAR DE CHACALTAYA
(Cordillera Real, Bolivia)

Investigaciones glaciológicas
(1991-1997)

B.Francou¹, E.Ramirez², J.Mendoza²
J.Guereca³, G. Miranda⁴ & L.Noriega⁵

¹ORSTOM, La Paz, Bolivia, ²IHH (UMSA, La Paz, Bolivia), ³IGM (La Paz, Bolivia),
⁴IE (UMSA, La Paz, Bolivia), ⁵SENAMHI (La Paz, Bolivia).

INDICE

1.	PRESENTACION DEL PROGRAMA DE MONITOREO	1
1.1	Un Programa de monitoreo de glaciares extendido a los Andes Centrales	1
1.2.	El programa de monitoreo en Bolivia:	1
1.3.	Objetivo de este informe:	1
2.	GENERALIDADES.	2
2.1.	Como estudiar el funcionamiento de un glaciar?	2
2.2.	El Glaciar de Chacaltaya: un glaciar ideal para un estudio	2
2.3.	Características del Glaciar de Chacaltaya.	3
3.	BALANCE DE MASA	6
3.1.	Definiciones y metodología	6
3.1.1.	<i>Balance neto específico del balance</i>	6
3.1.2.	<i>Métodos de estimación del balance</i>	6
3.1.3.	<i>Gradiente vertical del balance, línea de equilibrio, razón entre el área de acumulación y area total del glaciar</i>	6
3.1.4.	<i>Dinámica del glaciar, variación de la velocidad y oscilaciones del frente</i>	7
3.2.	Sistema de medición para estimar el balance específico neto del Glaciar de Chacaltaya	8
3.2.1.	<i>Las balizas</i>	8
3.2.2.	<i>Periodicidad de lectura de las balizas</i>	10
3.3.	El método de estimación del balance específico neto a partir de la red de balizas.	10
3.4.	Los resultados del balance neto específico a nivel anual	11
3.5.	Evolución de la ELA y del AAR.	15
3.6.	El Gradiente Vertical del Balance (GVB).	17
3.7.	Comparación entre el Glaciar de Chacaltaya y el Glaciar de Zongo	18
3.8.	Evolución del balance y de la ablación a nivel mensual.	20
3.8.1.	<i>Balance mensual y ablación a 5175 msnm (baliza 20).</i>	20
3.8.2.	<i>Balance y ablaciones mensuales del glaciar entre 5250 msnm y el final.</i>	22
3.8.3.	<i>Ablación durante el periodo mayo-julio</i>	26
3.9.	La acumulación	28

3.10.	Conclusión sobre el balance de masa para el período 1991-97	29
4.	LOS CAMBIOS GEOMETRICOS OCURRIDOS EN EL GLACIAR CHACALTAYA (segunda mitad del siglo XIX a 1997)	31
4.1.	Definiciones y metodología.	31
4.1.1.	<i>El método topográfico</i>	31
4.1.2.	<i>La medición directa del frente del glaciar</i>	33
4.1.3.	<i>Otros métodos</i>	34
4.1.4.	<i>Cuantificación de áreas y volúmenes del Glaciar</i>	35
4.1.5.	<i>Definición de la Superficie Base (Bedrock)</i>	37
4.2.	Las topografías efectuadas y las áreas calculadas	37
4.2.1.	<i>El polígono de apoyo instalado en 1996 (en coordenadas absolutas)</i>	37
4.2.2.	<i>La utilización de las fotografías oblicuas de 1940 y 1982.</i>	39
4.2.3.	<i>Los límites del Siglo XIX</i>	43
4.2.3.1.	<i>Topografía de la morrena externa</i>	43
4.2.3.2.	<i>Posibles errores arriba del antiguo camino</i>	43
4.2.3.3.	<i>Superficie y volumen estimados para la mitad del siglo XIX</i>	44
4.2.4.	<i>Los límites de 1940, estimación del área y del volumen correspondientes.</i>	44
4.2.5.	<i>Los límites de 1982, estimación del área y del volumen correspondientes.</i>	44
4.2.6.	<i>La Evolución entre 1991 y 1996</i>	45
4.3.	Síntesis: evolución del glaciar de 1850 a 1996	46
4.3.1.	<i>Evolución de las superficies</i>	46
4.3.2.	<i>Pérdida de volúmenes de hielo entre 1940 y 1996</i>	51
4.4.	Escenarios de evolución futura del glaciar considerando las pérdidas anteriores	56
4.5.	El desplazamiento de las balizas y la velocidad superficial del glaciar	57
4.5.1.	<i>Metodología</i>	58
4.5.2.	<i>Los resultados</i>	59
4.6.	La determinación del espesor del glaciar por prospección geofísica	61
4.6.1.	<i>Previos intentos</i>	61
4.6.2.	<i>La sísmica refracción: las mediciones de junio 1997</i>	62
4.6.3.	<i>Extrapolación de los resultados de la sísmica refracción a todo el glaciar</i>	70

4.7.	Conclusión del capítulo 4.	71
5.	DATOS METEOROLOGICOS DEL OBSERVATORIO DE CHACALTAYA	75
5.1.	Historial e instrumentación de la estación Chacaltaya	75
5.2.	Características de las series y procedimientos efectuados	76
5.2.1.	<i>Temperaturas</i>	76
5.2.2.	<i>Precipitaciones</i>	78
5.3.	La evolución de las temperaturas: tendencia multidecenal (1952-1996)	78
5.3.1.	<i>El promedio de temperatura</i>	78
5.3.2.	<i>La temperatura máxima</i>	79
5.3.3.	<i>La temperatura mínima</i>	79
5.4.	Evolución de las precipitaciones (1963-1996)	80
5.4.1.	<i>Tendencia multidecenal</i>	80
5.4.2.	<i>Calibración del pluviómetro clásico de la estación de Chacaltaya- Observatorio sobre el totalizador 2000 m² P7 (escala mensual)</i>	81
5.4.3.	<i>Precipitaciones recogidas en los pluviómetros totalizadores: P6, P7 y P9</i>	81
5.5.	Variabilidad interanual de las temperaturas y de las precipitaciones de Chacaltaya: relación con el ENSO[Indice de Oscilación Sur (SOI) y la temperatura superficial del Pacífico (SST)].	84
5.6.	Calibración de los años de medición del balance (1991-1997)	85
5.7.	Conclusiones	86
6.	CONCLUSION	87
7.	REFERENCIAS	88
8.	AGRADECIMIENTOS	89
	ANEXOS: Los datos de precipitación y temperatura de Chacaltaya	90

1. PRESENTACIÓN DEL PROGRAMA DE MONITOREO.

1.1. Un programa de monitoreo de glaciares extendido a los Andes Centrales

El programa forma parte del estudio de monitoreo de glaciares que el ORSTOM (El Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación) desarrolla con sus contrapartes regionales en los Andes Centrales. El programa incluye dos glaciares en Bolivia, dos glaciares en el Perú y dos glaciares en el Ecuador. El objetivo de este programa es estudiar a partir de una red de extensión regional : 1) la respuesta de los glaciares ubicados en el Trópico al cambio climático global y a la variabilidad del clima en la zona ; 2) analizar las consecuencias que podría tener en el futuro la reducción acelerada de los volúmenes de hielo, tal como se ha venido observando desde el principio del año 1980, sobre los recursos hídricos.

1.2. El programa de monitoreo en Bolivia :

En Bolivia, para este programa, se han escogido 2 glaciares representativos, que sean de fácil acceso y que tengan un interés económico (Francou & Pibstein, 1995) : 1) el **Glaciar de Zongo** en el macizo del Huayna Potosí, es la fuente que permite la generación hidroeléctrica en el valle de Zongo ; 2) el **Glaciar de Chacaltaya**, que es una fuente importante de recursos hídricos en el Altiplano y en la ciudad de La Paz, constituyéndose al mismo tiempo en un atractivo turístico. Los estudios sobre el glaciar de Zongo ya han producido varias publicaciones de parte del ORSTOM y de sus contrapartes.

Este tipo de programa es pionero en Bolivia, país que cuenta con aproximadamente 562.01 km² de superficie cubierta por glaciares, lo que representa el 20.15 % de la superficie total de los glaciares ubicados entre los Trópicos (Jordan, 1991). El inventario de los glaciares de Bolivia de Jordan (1991) representa el único documento de referencia importante y es la base de la glaciología en esta parte de los Andes Centrales. Sabemos gracias a él que la casi totalidad de los glaciares bolivianos se encuentran en la Cordillera Oriental (591.6 km², con 1826 glaciares). La Cordillera Real concentra unos 964 glaciares, que representan 323.6 km² (54.7% de la superficie total de glaciares de Bolivia). La zona Huayna Potosí/Zongo/La Cumbre/Chacaltaya, donde se concentran nuestros estudios glaciológicos, cuenta con una superficie aproximada de 24.7 km² de glaciares (4.2% de la superficie total de glaciares de Bolivia).

1.3. Objetivo de este informe :

Este informe pretende presentar una primera recopilación de los estudios realizados sobre el Glaciar de Chacaltaya desde el año 1991. El objetivo es publicar los datos brutos sometidos a una revisión previa y hacer algunos comentarios a partir de ellos. El análisis de estos datos será desarrollado en estudios posteriores. Los datos son presentados en 3 grandes capítulos, que resumen las 3 grandes orientaciones del trabajo realizado en 5 años :

1. *El balance de masa del glaciar desde 1991.*
2. *Los cambios geométricos ocurridos en este glaciar desde la última glaciación producida en la Pequeña Edad de Hielo (siglos XVI- XIX), y más particularmente a partir de 1940.*
3. *Presentación y análisis de los datos de temperatura y precipitaciones de la estación meteorológica de Chacaltaya ubicada dentro los predios del Observatorio de Física.*

2. GENERALIDADES.

2.1. Como estudiar el funcionamiento de un glaciar ?

Como enfoque de este estudio glaciológico, se quiere presentar al glaciar como un objeto hidrológico cuya masa cambia a corto plazo en función de las características del clima. Así que se ha concentrado el estudio, en una primera etapa, en tres aspectos fundamentales :

- 1) el *cambio geométrico* ocurrido en el pasado (donde la escala de tiempo es del orden del siglo) y en el presente (los 20 últimos años), utilizando métodos topográficos clásicos ;
- 2) el *balance de masa*, representando, en equivalente de agua, lo que pierde o lo que gana el glaciar en un determinado año, obtenido a partir de mediciones mensuales.
- 3) con la información que se obtenga, de mediciones realizadas en forma continua en un tiempo largo de diez años de ambas variables, será posible apreciar *la reacción del glaciar* traducida en *el cambio de su volumen, su superficie y su longitud* a estos cambios de masa acumulados.

Se ha querido también en este informe presentar por primera vez una recopilación de los *datos de temperaturas y precipitaciones medidos en la estación meteorológica perteneciente al Observatorio de Física de la UMSA ubicado en Chacaltaya*. Si bien sabemos que esta información es insuficiente para explicar la evolución del glaciar. En ausencia de datos sobre los flujos de energía en la superficie del glaciar que permitirían calcular el balance energético (programa desarrollado sobre el Glaciar de Zongo), los datos del Observatorio de Física de Chacaltaya pueden ser utilizados como indicadores interesantes de la variabilidad climática a esa altitud y fuera de todo tipo de influencia urbana.

Este estudio, finalmente, pretende abrir nuevas perspectivas, proponiendo una ampliación del programa de monitoreo hacia nuevos campos.

2.2. El Glaciar de Chacaltaya : un glaciar ideal para un estudio.

El glaciar estudiado tiene un interés en si mismo. La proximidad a la ciudad de La Paz, su fácil accesibilidad durante todo el año y la simplicidad de su morfología ; lo predispone como objeto de estudio. Además, este glaciar es muy representativo de las pequeñas masas de hielo

orientadas hacia el Altiplano que se constituyen en reservorios naturales. Son estos pequeños glaciares los primeros amenazados de una desaparición completa en caso de recalentamiento atmosférico durable, como se lo prevé a escala mundial. Es una evidencia que el abastecimiento en agua potable de la aglomeración de La Paz viene, por una parte todavía no precisamente determinada, de los glaciares. Este glaciar constituye entonces un caso de estudio y los resultados de este estudio podrán ser, hasta un cierto punto, extrapolados a todas las masas de hielo del país del mismo tipo.

Finalmente se debe subrayar que Chacaltaya es un centro de esquí y un polo turístico importante para el Departamento de La Paz, que se vería seriamente afectado a corto plazo por la rápida evolución natural del glaciar. En caso que el estudio referente al Glaciar de Chacaltaya concluya en que es posible la rápida desaparición del mismo, sería oportuno el encontrar una alternativa a este glaciar para la práctica del esquí.

2.3. Características del Glaciar de Chacaltaya.

Chacaltaya es un glaciar de circo típico que debe su existencia a una exposición sud (N180). A esta altitud, menos de 5400 m, son inexistentes glaciares en exposición norte. Hay que desplazarse unos 7 kilómetros hacia la fuente de humedad del Este para ver un glaciar a una altitud comparable en una vertiente norte (Glaciar del Charquini, 5392 m). El Glaciar de Chacaltaya esta en una cuenca hidrográfica ubicada entre 5395 m (Cerro Chacaltaya) y 4730 m (Laguna Chacaltaya), que tiene 0.53 km² (foto 1 y figura 2.1.). El glaciar tiene hasta 1997 un rango altitudinal de 252 m, entre 5375 m y 5123 m. Su longitud es de 584 metros, y su anchura máxima de 234 metros a 5250 m. Su superficie total es de 0.082 km², con una distribución de superficie según el rango altitudinal que se puede apreciar en el cuadro 2.1 y la figura 2.2.

Altitud	Area (m ²)	% area	acumulado
5125	97.3	0	0
5125-50	4053.7	5	5
5150-75	8642.0	11	16
5175-5200	11846.2	14	30
5200-25	13165.3	16	46
5225-50	16197.8	20	66
5250-75	8666.8	11	76
5275-5300	5891.1	7	83
5300-25	6056.3	7	91
5325-50	4868.8	6	97
5350-75	2688.0	3	100
total	82173.1	100	

Cuadro 2.2. Glaciar de Chacaltaya : Superficie en función de la altitud

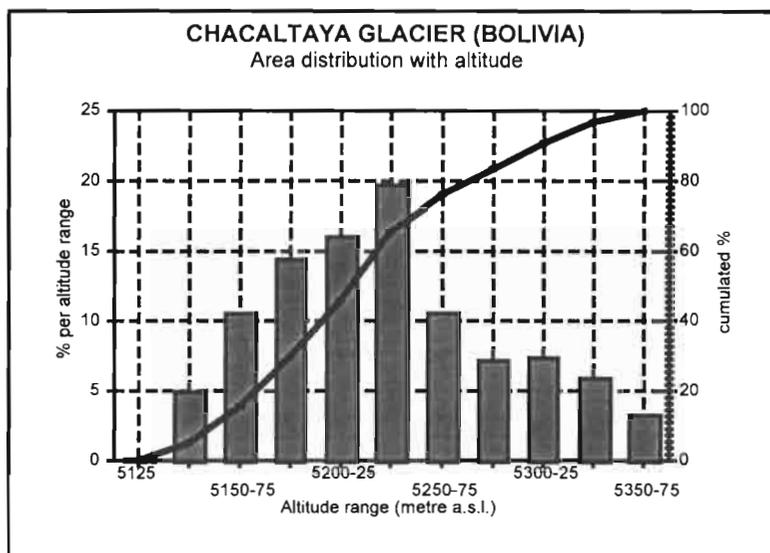
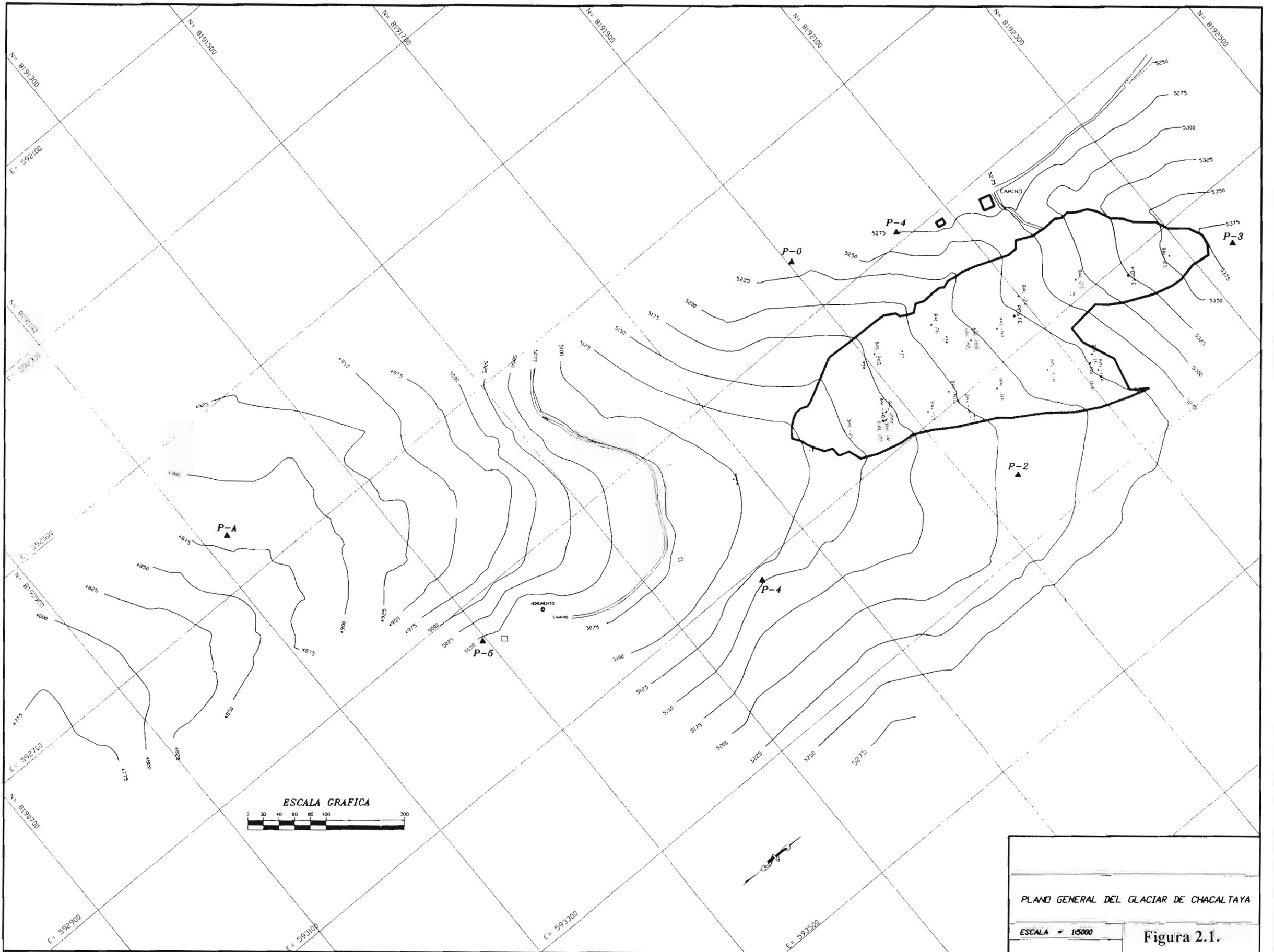


Figura 2.2 Superficie según los rangos altitudinales (mapa de 1996).

El glaciar comprende 3 partes distintas :

1. *una zona alta* muy inclinada (30°), estrecha (120 m máximo), que comprende entre 5375 y 5275 m 23%, de la superficie total del glaciar y un porcentaje menor de su volumen, debido a un espesor de hielo limitado ;
2. *una zona mediana* menos inclinada (24°), ancha (234 m máximo), entre 5275 y 5175 metros, presentando la mayor parte de la superficie del glaciar (61%) y de su volumen ;
3. *una zona frontal*, de forma biselada, que se inclina más cerca del término ($25-26^\circ$), que, entre 5175 y 5123 m, incluye 16% de la superficie total.

Se sabe, gracias a documentos fotográficos analizados, que el glaciar se encontraba unido con su vecino de izquierda (circo de las Lagunas Kellhuani) todavía hasta 1985.



PLANO GENERAL DEL GLACIAR DE CHACALTAYA

ESCALA = 1:5000

Figura 2.1.

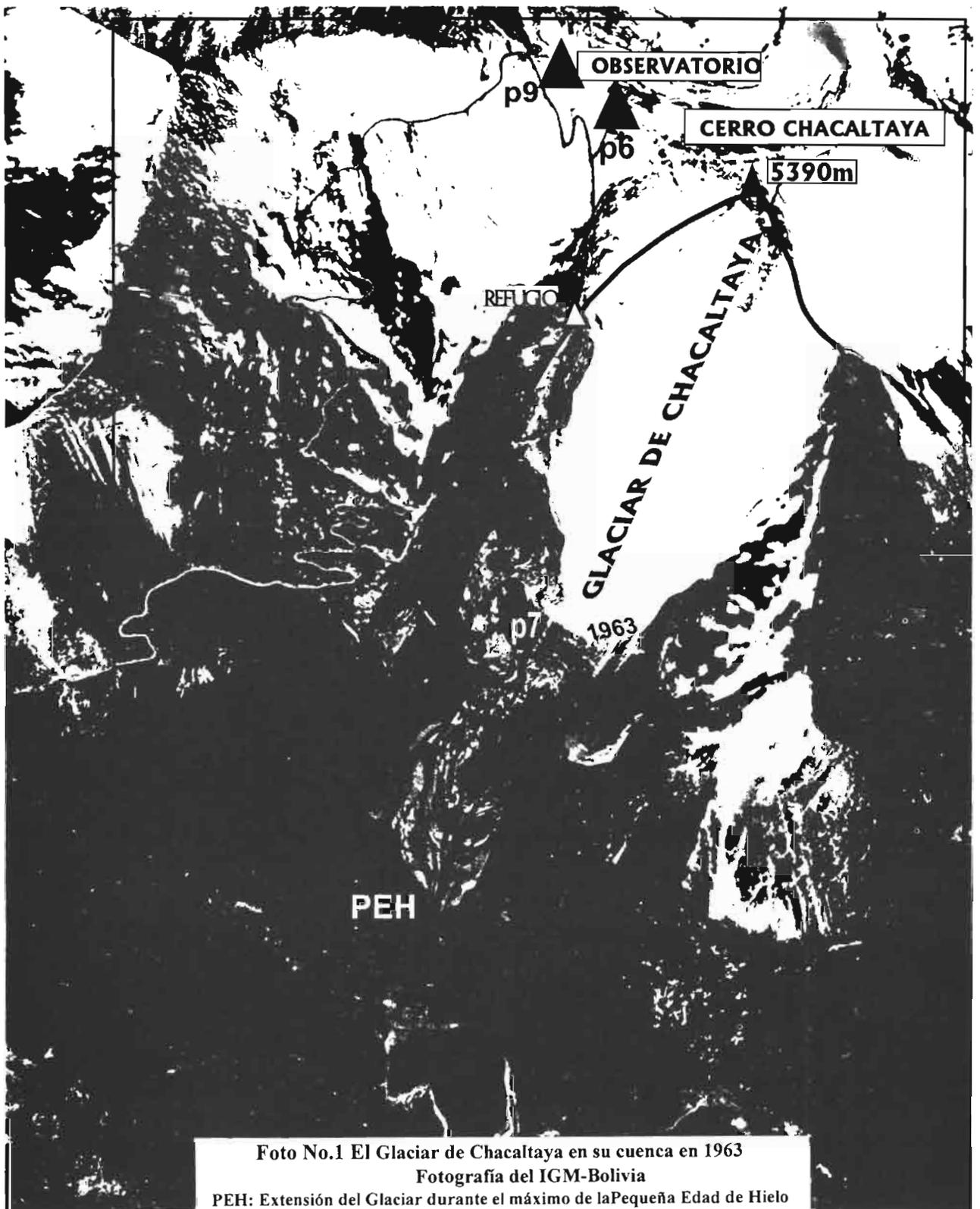


Foto No.1 El Glaciar de Chacaltaya en su cuenca en 1963
Fotografía del IGM-Bolivia
PEH: Extensión del Glaciar durante el máximo de laPequeña Edad de Hielo

3. BALANCE DE MASA

3.1. Definiciones y metodología.

3.1.1. Balance neto específico.

Un glaciar es una masa de hielo que se alimenta de agua sólida, transforma esta agua en hielo y la restituye en forma de vapor (evaporación/sublimación) o en forma líquida (agua del torrente emisario). Esta ganancia y esta pérdida de masa se analizan como un balance.

El *balance de masa* b es el resultado de la suma algébrica de la acumulación y de la ablación. Es el cambio de masa, representado en un volumen equivalente de agua, ocurrido durante un tiempo definido, fijado generalmente a la duración del año hidrológico. Este cambio de masa, en metros o milímetros de agua repartidos sobre toda la superficie del glaciar, es el *balance neto específico* (B_n) del glaciar, determinado por la siguiente relación :

$$B_n = \int_{S_C} b_n dS + \int_{S_a} b_n dS \quad (1)$$

donde S_C es el área de la zona de acumulación y S_a el área de la zona de ablación.

3.1.2. Métodos de estimación del balance

Se pueden aplicar varios métodos para estimar el balance de masa de un glaciar. Entre ellos existe un método por *restitución aerofotogramétrica* que estima el cambio de volumen de hielo entre dos fechas, separadas generalmente por varios años.

Se utiliza también el *método hidrológico* que compara a escala de tiempo anual la cantidad de hielo acumulada por precipitaciones sólidas (P) y la ablación - evaporación/sublimación (E , estimada) y fusión (R , medidas directamente con una estación limnimétrica ubicada sobre el emisario a poca distancia del frente del glaciar). El balance neto (B_n) se obtiene entonces aplicando la siguiente ecuación :

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

El método más comúnmente empleado mide directamente el cambio de masa del glaciar. Esta medición se practica a partir de estacas hincadas en el hielo (llamadas *balizas*) repartidas sobre la mayor parte del glaciar formando una red. En la parte alta del glaciar, donde generalmente la acumulación supera a la ablación, se excavan pozos donde se mide directamente por densimetría la cantidad de nieve o de hielo acumulada entre el principio y el final del año hidrológico.

3.1.3. Gradiente vertical del balance, línea de equilibrio, razón entre área de acumulación y área total del glaciar

La evolución del balance en función de la altitud sobre el glaciar corresponde al *Gradiente Vertical del Balance* ($GVB = db/dz$ [mm eq. agua m^{-1}]). Este gradiente es de valor elevado en

la zona de ablación, particularmente en los glaciares tropicales donde alcanza generalmente valores de 10 mm m^{-1} o mucho más elevados ; pero disminuye en la zona alta del glaciar donde depende sobre todo de la acumulación, la cual varía con la altura a esta altitud, pero también con la topografía (orientación a los flujos húmedos, a los vientos dominantes).

En la realidad, la relación del balance con la altura no se presenta como una recta, adoptando más bien una forma de curva más o menos regular. El nivel altimétrico donde el balance alcanza el valor de 0 mm de eq. agua corresponde a *la línea de equilibrio del glaciar*. Esta línea separa la zona de acumulación (donde $ac. > ab.$) de la zona de ablación (donde $ac. < ab.$). La altura de la línea de equilibrio del glaciar (*Equilibrium Line Altitude* en inglés, o ELA), en metros s.n.m., varía cada año con el valor del balance. La experiencia de medición del balance con el método de las balizas sobre los glaciares de montaña del mundo, ha permitido llegar a la siguiente conclusión: cada año, la curva db/dz desde la cumbre hasta el frente del glaciar tiene la misma forma. Solo el eje de esta curva se desplaza hacia los valores positivos (en caso de balance positivo) o los valores negativos (en caso de balance negativo). Este hecho permite, una vez que se conoce la curva, reconstruir el balance del glaciar, cuando se ha perdido un número importante de balizas. Se ha utilizado este método en Chacaltaya para el ciclo 1992-93 donde se han perdido 4 balizas de un total de 6. Sobre todo, este comportamiento lineal del db/dz a través de los años a servido para elaborar un modelo de estimación del balance, llamado « modelo lineal del balance », el cual, en su versión simplificada y empleando pocas balizas instaladas sobre el glaciar, describe correctamente la variabilidad del balance en función del tiempo (Lliboutry, 1974).

Una vez conocida la ELA, se puede calcular la razón de la superficie de la zona de acumulación y la superficie total del glaciar (*Accumulation Area Ratio [AAR]*, en %) que tiene, como la ELA, un comportamiento lineal respecto al valor del balance. Lo que permite después de varios años de medición del balance (un mínimo de 6 años), obtener los valores respectivos de la ELA y del AAR en caso de balance equilibrado ($B_n = 0$), denotándolos como ELA_0 y AAR_0 .

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

Debido al hecho de que el hielo tiene un cierto grado de plasticidad y se deforma bajo el efecto de su propio peso, la *dinámica del glaciar* consiste en transferir el exceso de masa generado en la parte superior del glaciar (*zona de acumulación*) hacia la parte inferior donde la ablación es mayor (*zona de ablación*). Este movimiento es variable, dependiendo del *balance neto* : en caso de *balance positivo*, resulta un fuerte exceso de masa a evacuar, en el caso contrario, este exceso es mínimo. La dinámica del glaciar puede ser estimada estudiando el desplazamiento de las balizas de balance y su cambio de altura a partir de un punto fijo. Así que un balance neto *positivo* se refleja en un aumento de la velocidad y del espesor del glaciar. Una disminución de estos dos parámetros se observa en el caso inverso. La respuesta del glaciar a un cambio ocurrido en el balance es variable, dependiendo principalmente del tamaño, espesor del glaciar y de la pendiente del lecho rocoso.

El movimiento del *frente del glaciar* (avance/retroceso/estabilidad) en un año determinado es resultado del doble efecto tanto de la ablación producida el mismo año (b_f) como de la dinámica del glaciar, esta última dependiente del efecto acumulativo de los balances de los

años precedente y del espesor máximo del glaciar (h_{max}). Es así que existe un tiempo de respuesta t_{resp} del movimiento del frente del glaciar que depende de la siguiente relación :

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

En el caso de Chacaltaya, el hecho de que sea un *pequeño glaciar* que se extiende sobre un rango altitudinal pequeño hace que tenga las siguientes características:

- 1) las zonas de acumulación y de ablación tienen una extensión muy variable según los años, y es muy posible que en ciertos años la superficie del glaciar en su totalidad sea zona de ablación o de acumulación.
- 2) el tiempo de respuesta es corto entre el balance y el cambio de volumen y de longitud del glaciar.

3.2. Sistema de medición para estimar el balance específico neto del Glaciar de Chacaltaya

3.2.1. Las balizas.

Debido a la morfología de este glaciar y a su utilización para la práctica del esquí, se ha escogido en 1991 un sistema simple que consistió en la instalación de *6 balizas repartidas entre 5250 y 5150 msnm, ubicadas en la parte izquierda del glaciar* (B16(A) a B21(A) (ver fig.3.1.). Las primeras se encuentran a unos 100 m del eje central, las últimas a menos de 20 metros (línea A). Esto debido a que el esquí se practica de una manera más intensa en el eje central (presencia del skilift) y en la parte derecha (próxima a la Cabaña).

Para que la red sea más representativa, se han agregado en 1995, 3 balizas más ubicadas en el eje central entre 5240 y 5150 msnm (18B, 18B y 20B). En setiembre 1996, 5 balizas nuevas completan la red, ubicadas sobre el eje de derecha, el más largo del glaciar (25, 23,24,26,20D). Con esta nueva red de balizas, podemos considerar que la información que se obtenga será bastante precisa sobre un 90% de la superficie total del glaciar (figura 3.1). La parte alta (5375-5250 msnm) muy inclinada (31° de pendiente en promedio) y el lado derecho hasta ahora no documentados son cubiertos por la medición. La línea original, a la izquierda, se ha desplazado poco a poco hacia el oeste, ya que el retroceso del glaciar aumenta significativamente los efectos de borde.

Una excavación de 3 a 5 pozos a nieve (*snow pits*) se hace regularmente durante la temporada de acumulación, sea de febrero a marzo/agosto. Es así que se dispone desde setiembre de 1996 de un total de 13 balizas permanentes, sumando nuevas y antiguas, y de un mínimo de 3 pozos en nieve. La ampliación de la red requiere un trabajo para evaluar la representatividad de la red básica de los años 1991-95 a partir de la nueva instalada en setiembre de 1996. Por lo tanto, si se la compara a otros glaciares del mismo tamaño (Lewis Glacier, Kenya, *in* Glacier Mass Balance Bulletin, 1-4), la red de balizas de Chacaltaya parece densa y suficiente en su estado actual.

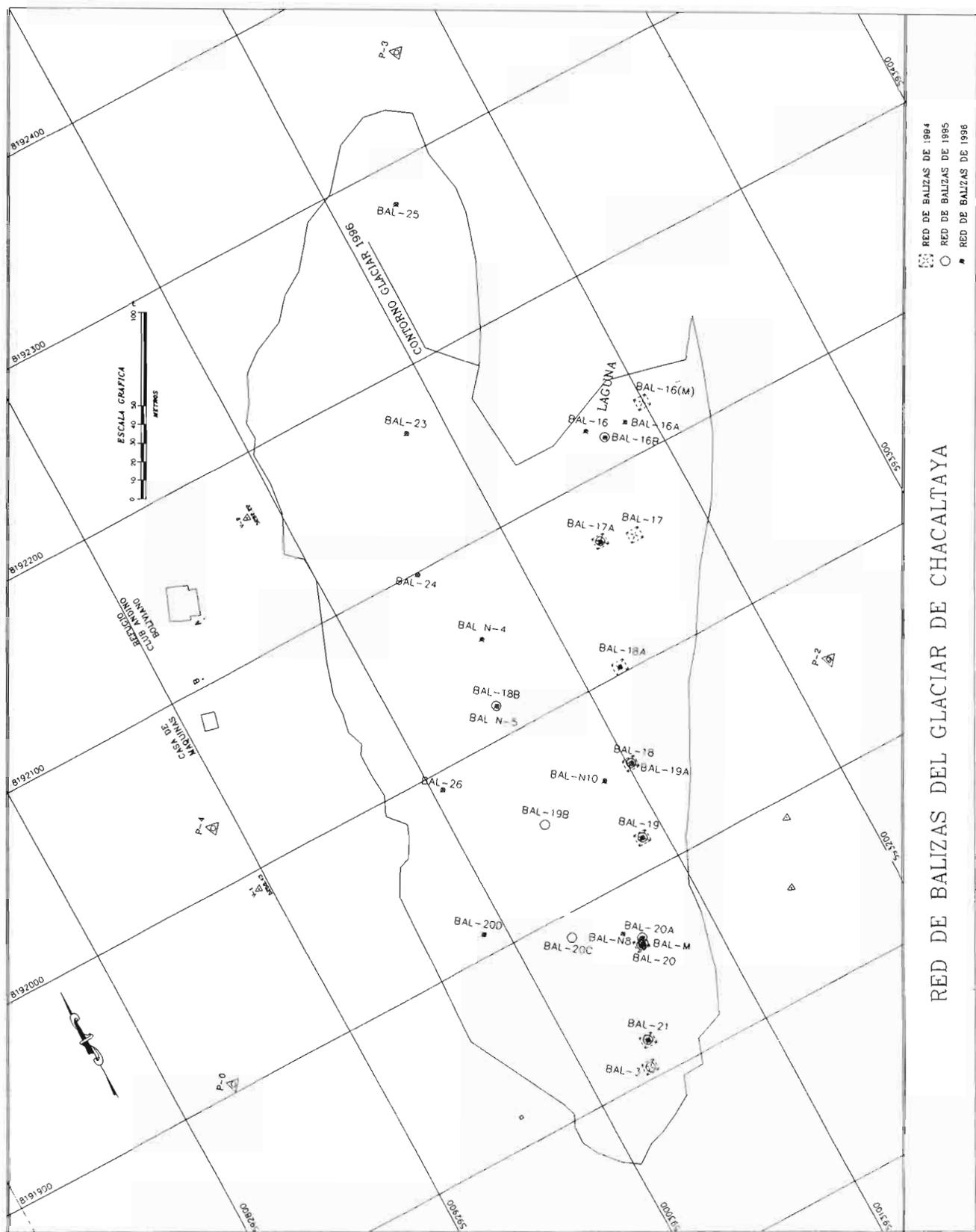


Figura 3.1. El Glaciar de Chacaltaya con su red de balizas en 1996

Cada baliza está constituida por 5 o 6 estacas de plástico PVC (reemplazando las de madera del primer año, por ser demasiado frágiles) de una pulgada de diámetro cortadas cada 2 metros. Se unen estas estacas con una cuerda resistente y se introducen en un orificio de 9-12 m de profundidad perforado previamente con una sonda al vapor de modelo *LGGE CNRS-Grenoble*. La emergencia de la baliza sobre la superficie del glaciar medida directamente con un flexómetro representa el balance puntual en milímetros de nieve o de hielo. Pasados los dos o tres años, se cambia la baliza, plantando la nueva a unos 10 metros glaciar arriba de la precedente para conservar a lo largo de los años la misma ubicación.

La red de balizas permite observar la evolución del balance en el espacio sobre la superficie del glaciar. El gráfico presentando la evolución del balance en función de la altitud y el mapa donde se han dibujado las isoclinas del balance, muestran como se reparte el balance sobre toda la superficie del glaciar.

3.2.2. Periodicidad de lectura de las balizas.

La lectura de la emergencia de las balizas se efectúa en dos periodos de tiempo:

- 1) a nivel *mensual* (primer día de cada mes) que toma en cuenta la densidad del material (nieve/hielo) para convertir la diferencia de emergencia en equivalente agua (Δh_m). Cuando no se la mide directamente, la densidad es *estimada* empleando los siguientes valores empíricos: 0.4 para una nieve recién caída, floja pero que *resiste al peso del observador* y 0.9 para un hielo duro;
- 2) *a nivel anual*, se mide la diferencia de emergencia entre el 1^{ro} de setiembre de un año y la misma fecha del año siguiente (Δh_a), con una conversión al equivalente agua utilizando la densidad del hielo (0.9), en caso que este material predomine en superficie este mes. Este segundo valor entra en el cálculo del *balance neto específico* del glaciar (b_n). En caso de terminar el año hidrológico, en fin de agosto, con una capa de *névé* sobre el hielo, se practican, además de la lectura clásica de emergencia de balizas, perforaciones en algunos puntos claves para evaluar la densidad del *névé*.

3.3. El método de estimación del balance específico neto a partir de la red de balizas.

La repartición de las balizas en la superficie del glaciar exige para la determinación del balance de masa una interpretación basada sobre la extrapolación de los datos existentes para las partes que no tienen esta información.

Para este glaciar, se ha escogido el siguiente método para los ciclos 1991-97 : se considera que el balance entre las curvas de nivel de 25 m puede ser representado por el valor de una baliza, o de un grupo de balizas del mismo número (Cuadro 3.1).

Rangos altitudinales	Balizas representativas por 1991-1996	Balizas representativas por 1997
> 5275	16	25 ; 23
5275-5250	16	16 ; 24
5250-5225	17	17A
5225-5200	18	18A ; 26
5200-5175	19	19 ; 20C ; 20D
5175-5150	20	21
< 5150	21	21

Cuadro 3.1 : Balizas representativas de los rangos altitudinales del Glaciar de Chacaltaya. Datos de alturas según el mapa topográfico de 1996.

Para los 6 años, debido a la baja velocidad superficial del glaciar, la distribución de las balizas, de acuerdo a un rango altitudinal, ha quedado fija. Lateralmente, cuando han aparecido balizas más céntricas (líneas B y D) se ha hecho el promedio de las balizas ubicadas a la misma altura. Antes de 1996, la gran incertidumbre venía de la parte superior ($z > 5275$ m), que corresponde a un 24 % de la superficie total. En base a la curva del balance en función de la altitud y de los pozos excavados los 2 primeros años para evaluar el balance de acumulación, se ha decidido que las áreas superiores a la curva de nivel de 5250 msnm tengan el mismo balance que se mide en la baliza 16. Esto implica que la fuerte pendiente, la proximidad de la roca y las perturbaciones ocasionadas por los esquiadores anulan, a partir de la altitud de 5250 msnm, el efecto positivo del Gradiente vertical del balance, cuyo valor obtenido de las 6 balizas ubicadas entre 5125 y 5250 msnm, para los cinco ciclos sucesivos, se acerca a un promedio de 8 mm m^{-1} . A partir del ciclo 1996-97, disponiendo de más balizas, se ha comprobado que esta aproximación era correcta.

Comparando el balance estimado de esta manera, con el balance de los años precedentes estimados con el dispositivo restringido, se puede determinar la validez de los valores de los ciclos anteriores. Se ha encontrado un balance en función de la altitud (Gradiente Vertical del Balance) poco diferente, con sólo un valor menor de 10% que el promedio de los años anteriores.

Luego, conforme a la ecuación (1), el balance estimado en cada rango altitudinal de 25 m se pondera por la superficie del rango. Finalmente se suma el balance obtenido en cada rango para obtener el valor de balance neto específico del glaciar.

3.4. Los resultados del balance neto específico a nivel anual.

El cuadro 3.2. presenta el balance medido en cada baliza durante el periodo 1991-1997.

Balizas años	16	16A	17	17A	18	18A	18B	18C	19	19A	20	20A	20B	21A
1991-2	-970		-1000		-1290				-1420		-1520			-1290
1992-3	490		460		170				40		-60			-160
1993-4	-920		-880		-1200				-1300		-1450			-1180
1994-5		-1250		-1200		-1340			-2000		-1990	-2000		-1800
1995-6		-2000		-1340		-1760	-1750			-2070	-2320	-2220	-2270	-2030
1996-7	-1572	-924		-519	-978	-1104		-816		-1263				-699

Cuadro 3.2. Balance anual de cada baliza (en mm de agua)

Balizas años	20C	20D	23	24	26
1996-7	-1185	-753	-420	-231	-762

Italico : datos reconstitutos

Cuadro 3.2. (continuación)

El cuadro 3.3. proporciona los valores de balance representativo para cada rango altitudinal de 25 m.

balizas (1)(2) años	(23)	16 (24)	17	18 (26)	19	20	21
altitud	> 5275	5275-5250	5250-5225	5225-5200	5200-5175	5175-5150	< 5150
1991-92		-970	-1000	-1290	-1420	-1520	-1290
1992-93		490 (1)	460 (1)	170 (1)	40 (1)	-60	-160
1993-94		-920	-880	-1200	-1300	-1450	-1180
1994-95		-1250	-1200	-1340	-2000	-2000	-1800
1995-96		-2007	-1341	-1760	-2070	-2271	-2025
1996-97 (2)	-420	-577	-519	-852	-1047	-699	-699

(1) En itálico, los valores reconstituidos, utilizando el modelo lineal del balance

(2) Entre parentesis, balizas de 1996-97

Cuadro 3.3. Balance (en mm de agua) tomando las balizas representativas de cada rango altitudinal en mm de agua (no ponderado con la superficie relativa de cada rango).

En el cuadro 3.4., se presenta una síntesis de todos los parámetros importantes medidos sobre este glaciar durante los 6 ciclos.

Año hidro	B _n (1)	ΣB _n (2)	A (3)	ELA (4)	AAR (5)	Prec. (6)	Frente (7)	Frente (8)
1991-92	-1166	-1166		5371	0		-5.0	-5.0
1992-93	277	-889		5180	83		-4.7	-9.7
1993-94	-1080	-1969	1790	5359	3	710	-4.6	-14.3
1994-95	-1470	-3439	2160	5368	2	690	-17.6	-31.9
1995-96	-1874	-5313	2429	5454	0	615	-24.4	-56.3
1996-97	-659	-5972	1459	5322	10	800	0	-56.3

1. B_n : balance neto específico (mm agua)
2. ΣB_n: balance neto específico acumulado (mm agua)
3. Ablación específica (A) : A = P - B_n (mm agua)
4. Equilibrium Line Altitude (m snm)
5. Accumulation Area Ratio (%)
6. Total de precipitaciones (P) al pié del glaciar (P7) (mm). Medido desde setiembre 1993.
7. Retroceso o avance medido directamente al frente del glaciar (m). En 1997, al 31 de agosto.
8. Valor de (7) acumulado (m)

Cuadro 3.4. Resumen de la evolución del glaciar de 1991 a 1997

Se observa un balance neto específico muy negativo en 5 años de los 6, con una pérdida de más de 1000 mm de agua. Solo el ciclo 1992-93 ha registrado un balance ligeramente positivo. El ciclo más negativo fué el penúltimo, con una ablación (A) de casi 2.5 m. En todo el periodo, el balance acumulado muestra una pérdida de casi 6 metros de agua.

La figura 3.2 muestra esos resultados.

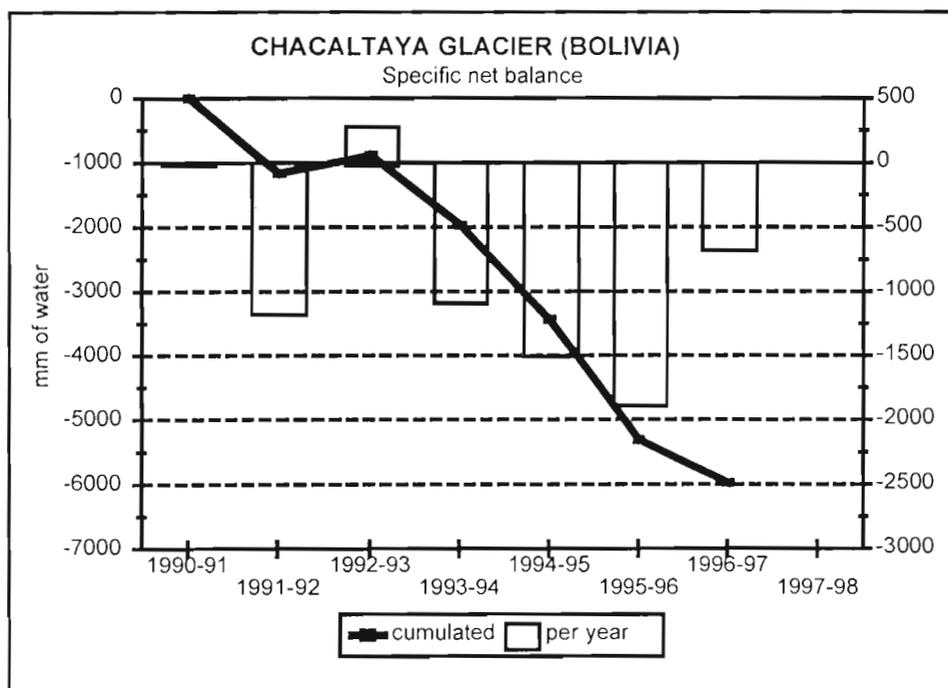
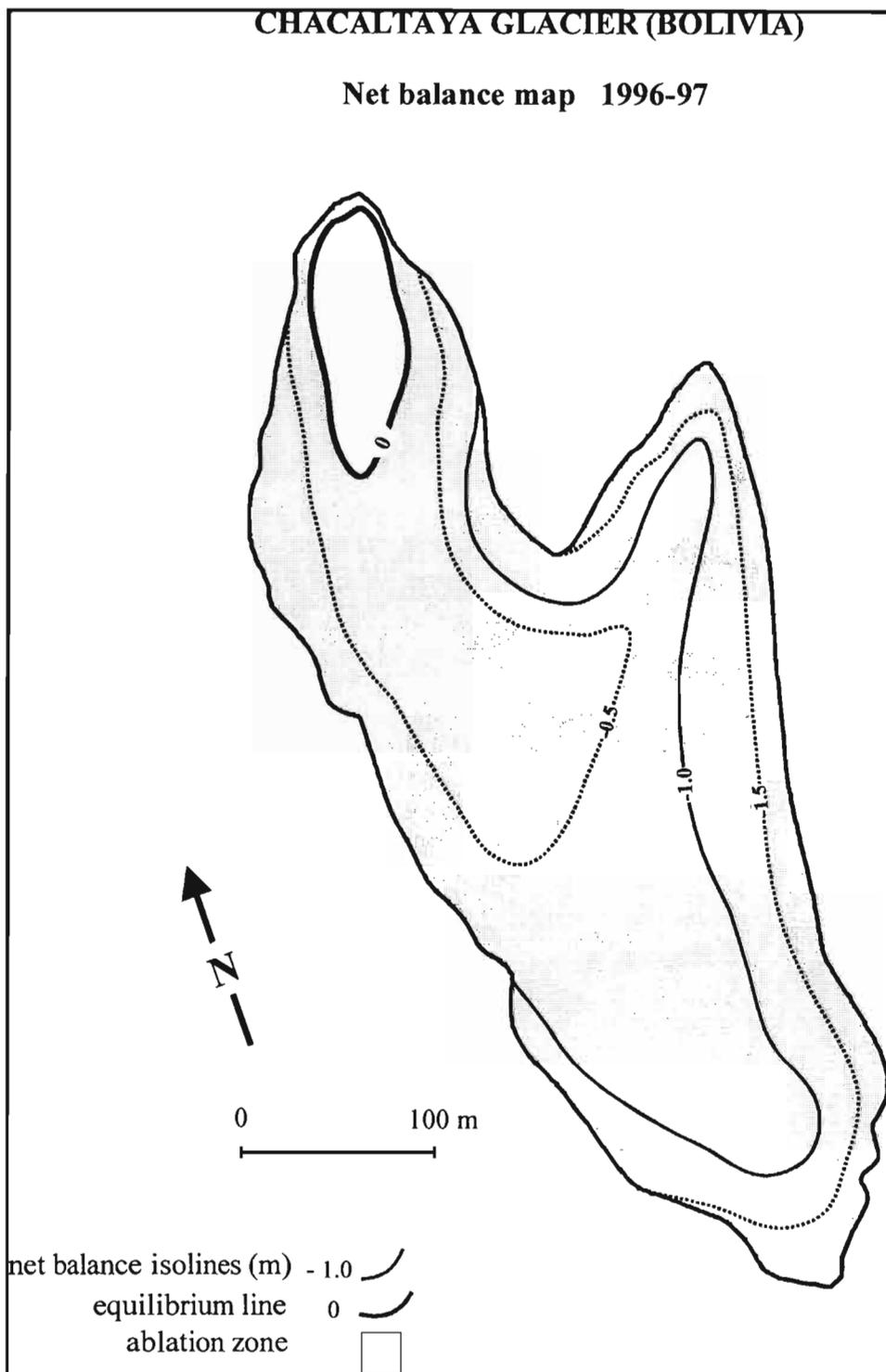


Figura 3.2. Balance neto específico anual del Glaciar de Chacaltaya

La figura 3.3. presenta la distribución del balance mediante las isoclinas trazadas para 1996-97. Se observa una evolución vertical del balance conforme al gradiente positivo, pero también una fuerte evolución lateral debida al calor sensible viniendo de los bordes del glaciar. Este efecto es particularmente evidente a partir del borde este.



3.3. Isolneas del balance en 1996-97 para el Glaciar de Chacaltaya.
 Este tipo de mapa es publicado cada año por el WGMS (Word Glacier Monitoring Service)
 para 10 glaciares del mundo.

3.5. Evolución de la ELA y del AAR.

Debido a los balances negativos, la ELA se ha ubicado muy alto, a nivel de la cumbre del glaciar (5375 m) o más alto, como en 1996. La figura 3.4. muestra las diferentes alturas alcanzadas. Se nota una fluctuación de más de 250 metros entre los extremos.

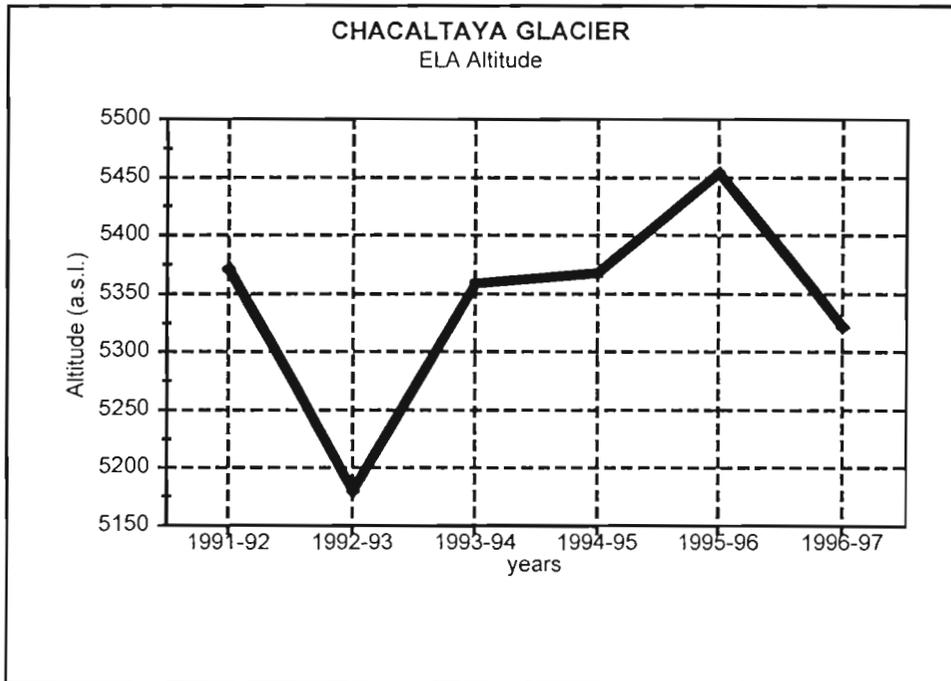


Figura 3.4. : Evolución de la ELA en Chacaltaya durante los 6 ciclos.
ELA obtenida mediante una regresión lineal a partir de las balizas ubicadas entre los 5250 (5275 en 1996-97) y 5150 m snm.

En la figura 3.5., la relación entre la ELA y el balance se ajusta a una recta. La mayoría de los glaciares en el mundo siguen esta tendencia, lo que permite determinar la altura de la ELA_0 para el caso de balance equilibrado. Se ve que la ELA_0 se ubica alrededor de los 5200 msnm.

La razón área de acumulación/área total (AAR) sigue normalmente esta misma tendencia, pero en el caso presente, faltan puntos ubicados entre los extremos para demostrarlo (figura 3.6.). Para un balance equilibrado, el área de acumulación AAR_0 podría representar aproximadamente unos 70% de la superficie total del glaciar.

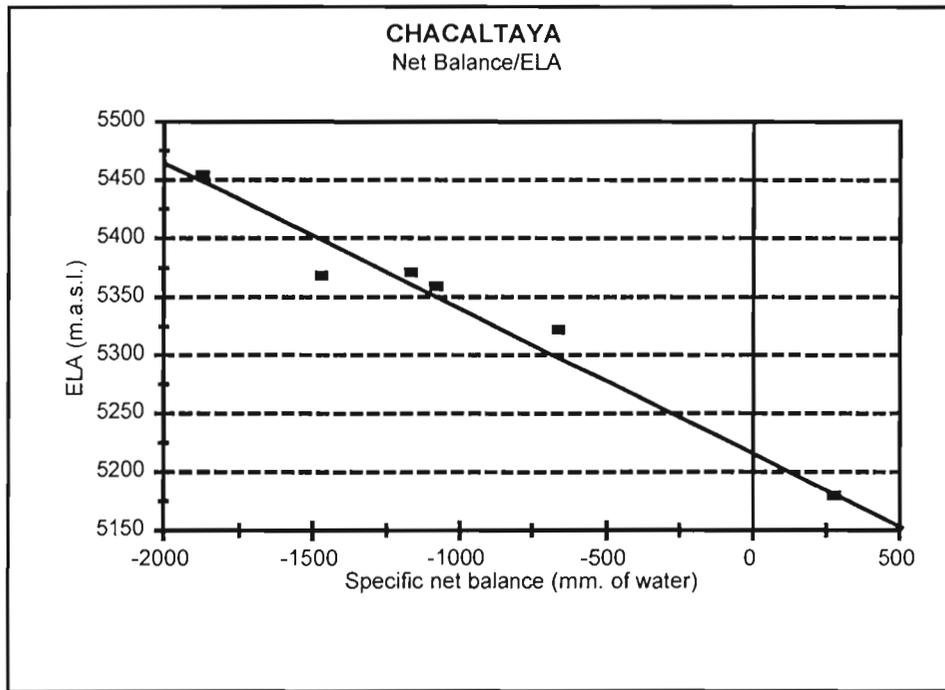


Figura 3.5. Relación balance neto/ELA en Chacaltaya para el periodo 1991-97.

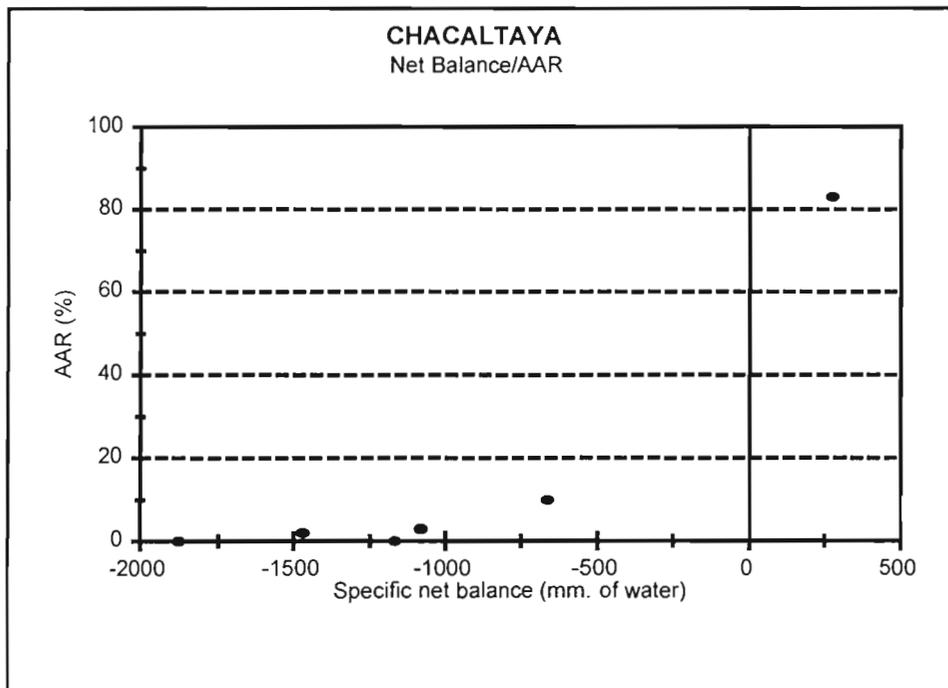


Figura 3.6. Relación balance neto/AAR en Chacaltaya para el periodo 1991-97.

3.6. El Gradiente Vertical del Balance (GVB).

La relación entre la altitud y el valor del balance de las 6 balizas proporciona una línea que no se aparta mucho de una recta. Solo, la baliza 21, la más baja de la serie, da un valor más positivo, debido a la forma del terreno : la convexidad pronunciada de la zona terminal que favorece la sobre acumulación nival. Para calcular el GVB, se ha descartado esta baliza y conservado las 5 balizas superiores. Para los 4 primeros ciclos, la regresión lineal proporciona un buen ajuste, con un $R^2 > 0.80$. Para el penúltimo ciclo (1995-96), la ubicación de la baliza 16 cerca de la roca y la formación de una fuerte convexidad entre la 16 y la 17 han provocado una fusión extraordinaria al nivel de la baliza 16, y al inverso, una sobreacumulación de nieve notable en la baliza 17. Se ha tomado como resultado el promedio de los dos valores.

La otra observación que se puede hacer sobre los valores del GVB, está relacionada con la falta de datos para alturas mayores a 5250 msnm entre 1991 y 1997, lo que ya se ha subrayado en el párrafo 3.3. Las nuevas balizas instaladas en septiembre 1996 confirman el valor del GVB para una área extendida a 90% del glaciar. El cuadro 3.5 presenta los valores del GVB para los 6 ciclos. La figura 3.7. muestra la forma de las curvas balance/altitud.

años	n (balizas)	R^2 ⁽¹⁾	GVB (mm m ⁻¹) ⁽²⁾
1991-92	5	0.95	7.78
1992-93	6 ⁽³⁾	0.96	7.14
1993-94	5	0.93	7.84
1994-95	5	0.83	9.26
1995-96	5 ⁽⁴⁾	0.67	7.58
1996-97 ⁽⁵⁾	5	0.87	7.04

(1) R^2 : coeficiente de correlación entre la altitud de las balizas (m) y el balance (mm eq. agua)

(2) Gradiente vertical del balance determinado a partir de n. balizas

(3) 2 balizas medidas, 4 con valores reconstruidos

(4) valor del balance que resulta del promedio de los balances medidos en las balizas 16A y 17A

(5) red de baliza extendida a todo el glaciar

Cuadro 3.5. Valores de la GVB y parámetro de ajuste (R^2) de los 6 ciclos

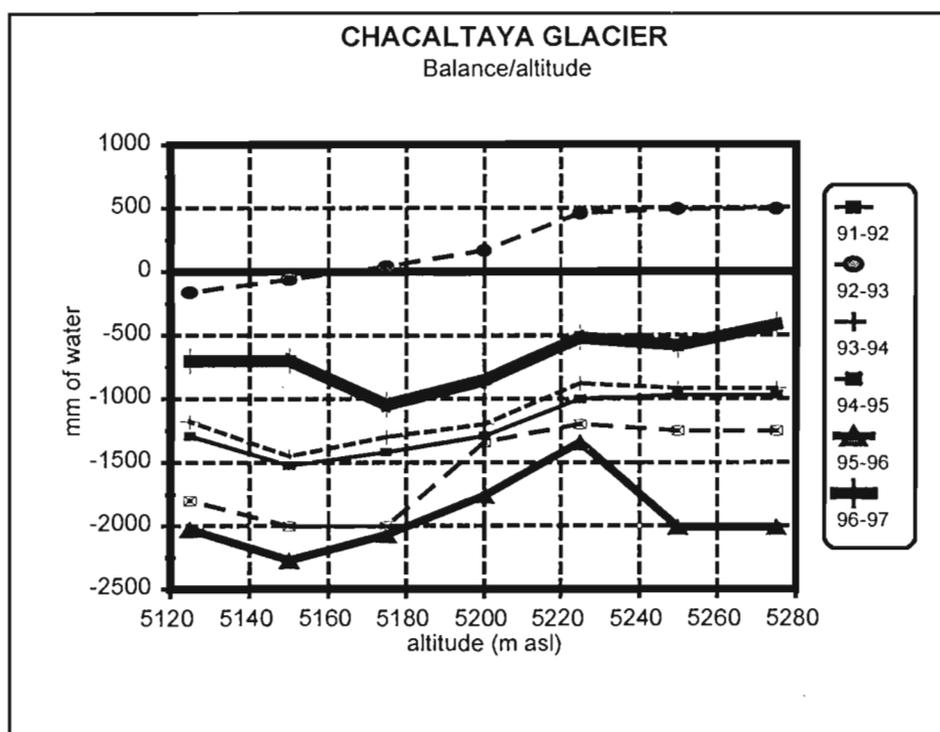


Figura 3.7. Curva del balance y de la altitud para los 6 ciclos.

La figura muestra que existe un buen paralelismo entre las curvas, que se va distorcionando sobre todo en el penúltimo ciclo por las razones estacionales ya mencionadas. Se observa también que el último ciclo, con una red de balizas extendida a todo el glaciar, tiene la misma curva. En consecuencia, se considera que se puede aplicar el *modelo lineal* del balance sobre este glaciar.

3.7. Comparación entre el Glaciar de Chacaltaya y el Glaciar de Zongo.

Estos glaciares están separados por solo 10 kilómetros, sin embargo su morfología, su rango altitudinal y su exposición son bastante diferentes. Por eso, es importante conocer las evoluciones respectivas de sus balances durante los últimos 6 años (figuras 3.8. y 3.9.).

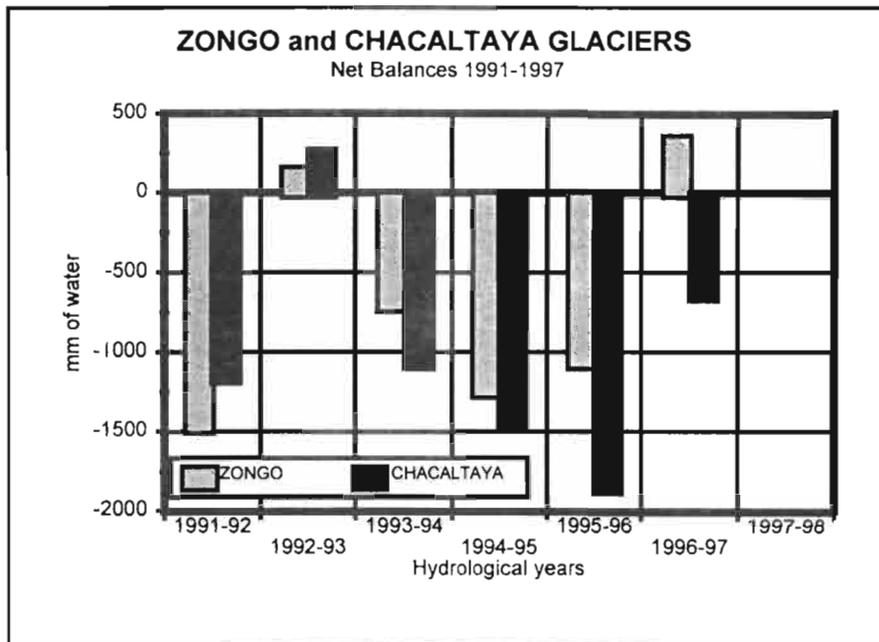


Figura 3.8. Balance neto del Glaciar de Chacaltaya y del Glaciar de Zongo para el periodo de 1991 a 1997.

Se observa una gran similitud en la evolución de estos glaciares. Sin embargo, el balance del Glaciar de Chacaltaya tiene una respuesta negativa más acentuada, con la excepción del año 1991-92 : cuando se da un balance negativo, Chacaltaya acentúa esta tendencia. Es probable que la razón de este comportamiento esté relacionado con la morfología de este glaciar, como se ha mencionado en el párrafo 3.1.4. : ya que debido a su rango altitudinal limitado, este glaciar pasa por un régimen de acumulación o de ablación sobre la casi totalidad de su superficie.

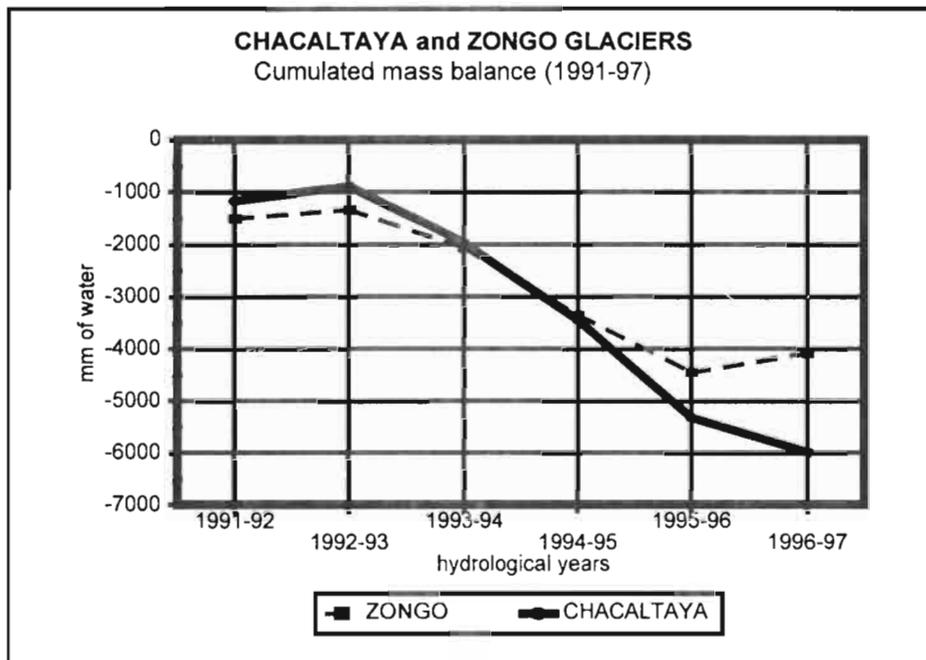


Figura 3.9. Balance neto, acumulado, de los glaciares de Chacaltaya y de Zongo de 1991 a 1997.

Esto se nota por la altitud de la línea de equilibrio (ELA), que fácilmente alcanza la parte zenital del glaciar en caso de balance netamente negativo (figura 3.10.).

En consecuencia, este tipo de glaciar muestra una sensibilidad mayor a la variabilidad climática que los glaciares que se extienden sobre un rango altitudinal importante, como es el caso del Glaciar de Zongo.

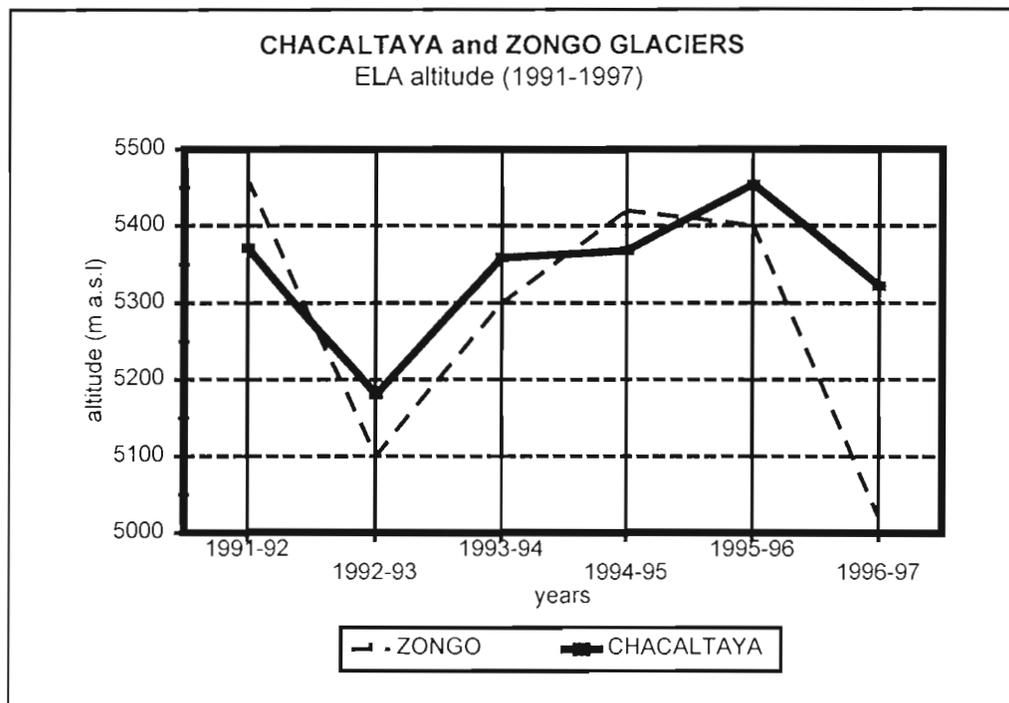


Figura 3.10. Evolución de la ELA sobre los glaciares de Chacaltaya y de Zongo de 1991 a 1997.

3.8. Evolución del balance y de la ablación al nivel mensual.

Pocos son los glaciares en el mundo en los cuales se practica una lectura mensual de las balizas de balance. En el Zongo y Chacalaya, se ha aplicado esta periodicidad por 2 razones : 1) la falta de conocimiento de la distribución de la acumulación y de la ablación a nivel anual bajo los Trópicos ; 2) la facilidad de poder realizar las observaciones durante todo el año, ya que el invierno, con bastante nieve, de las latitudes altas impide toda forma de medición.

3.8.1. Balance mensual y ablación a 5175 msnm (baliza 20).

La baliza 20 tiene la ventaja de haber sido leída durante los 72 meses de los 6 ciclos. Esta baliza es representativa del balance en la zona terminal del glaciar. En esta parte del glaciar el balance casi nunca ha sido positivo. Se observa que el balance es negativo sobre todo durante los meses de octubre, noviembre y diciembre (fig. 3.11) : es en esta época que esta vertiente, orientada hacia el Sur, recibe la máxima radiación coincidiendo con el inicio de la temporada de lluvias donde las precipitaciones no tienen aún valores altos. Los otros meses del año aparecen muy equilibrados. Notándose algunas diferencias según los ciclos.

El *primer ciclo* (1991-92) se caracteriza por un balance negativo de larga duración (5 meses), igual que el *cuarto* (1994-95); mientras que el *quinto* (1995-96) se caracteriza por una pérdida excepcional (casi 1400 mm) concentrada en los meses de octubre y noviembre. El *segundo* (1992-93) no tuvo ningún periodo negativo marcado. Cuando se observan los balances netos de los diferentes años, se ve que 4 fueron muy negativos, uno poco negativo (*el último*) y uno solo fué positivo (1992-93).

Por lo tanto las dos variables determinantes en el balance neto del año son : 1) la intensidad de la pérdida de masa que ocurre durante los meses donde se da más la ablación, es decir octubre, noviembre y diciembre ; 2) la duración del periodo de balance negativo, que puede extenderse a 5 meses, incluyendo los meses que normalmente son los más húmedos, es decir enero, febrero o marzo. Por el contrario, los meses secos y fríos que van de mayo a agosto constituyen invariablemente un periodo de balance bastante equilibrado, donde la ablación (por sublimación sobre todo : ver *infra*) compensa las precipitaciones escasas. Solo en junio, julio y agosto de 1995 se ha producido una fuerte ablación en temporada fría.

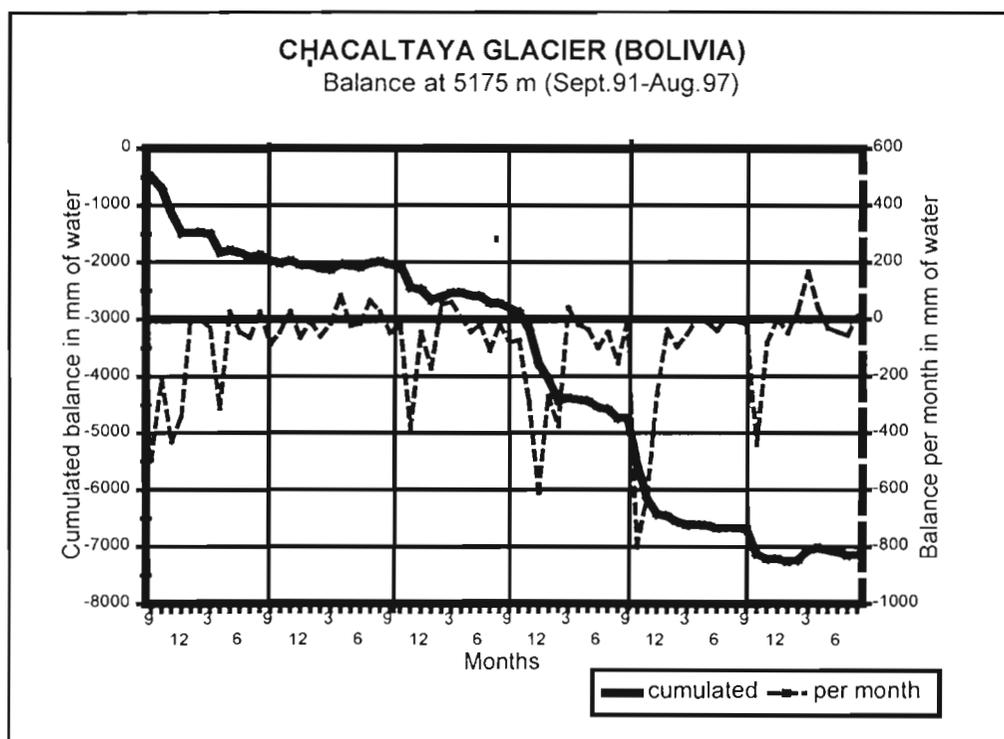


Figura 3.11. Balance (en mm de agua) a 5175 msnm (baliza 20) : parte baja del glaciar, representando 20% de su superficie.

Desde septiembre de 1993, el pluviómetro P7, ubicado al pie del glaciar, mide las precipitaciones mensuales. La cantidad de precipitaciones (P) y el balance (B_n), permiten calcular la ablación (A) según la siguiente relación:

$$A = P - B_n \quad (4)$$

La figura 3.12. muestra la evolución de la ablación al pie del glaciar (5175 m). Se ve que la ablación sigue siendo importante durante la temporada de precipitaciones, por lo menos en enero y febrero.

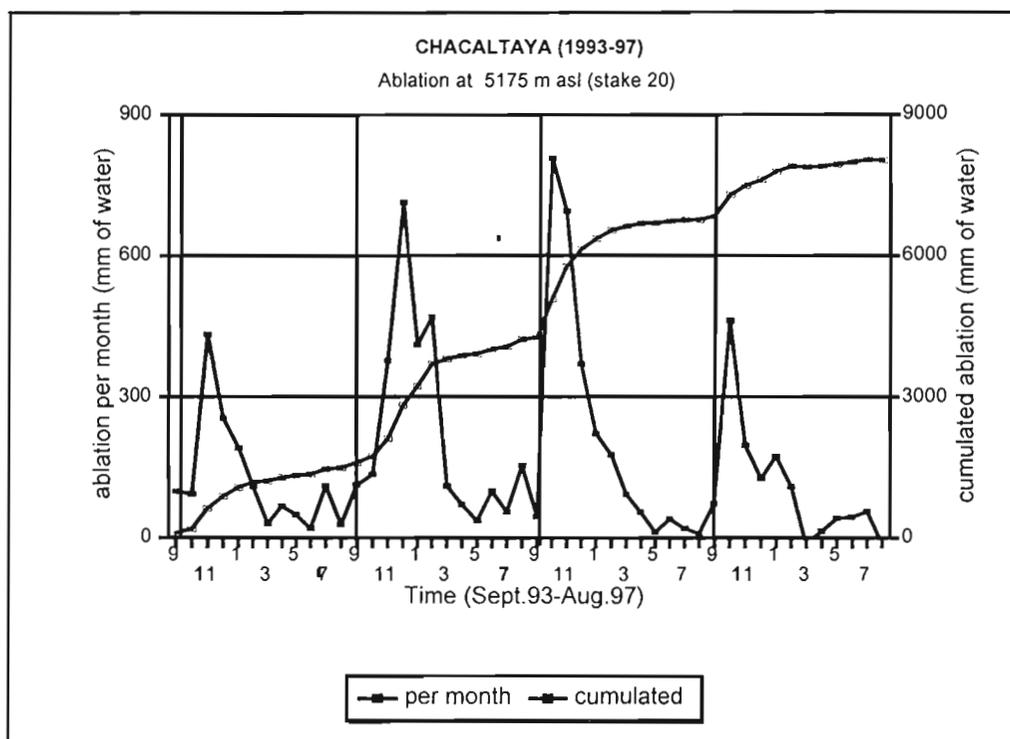


Figura 3.12. Ablación (en mm de agua) a 5175 msnm (baliza 20).

El periodo de acumulación coincide con un periodo de intensa ablación. Hay que esperar la llegada de marzo y abril para ver la formación de un manto nival más estable, por lo menos en los años marcados por una intensa ablación. Durante los años donde acumulación y ablación son más equilibrados, esto ocurre a partir de diciembre-enero. La coincidencia, en el tiempo, del proceso de acumulación y de una fuerte ablación es una de las características de los glaciares tropicales. Esto explica que durante el periodo de acumulación, el manto nival tenga una evolución rápida después de la nevada : aumento de la densidad que alcanza un valor ya bastante elevado ($d = 0.40/0.45$) en algunos días, degradación rápida del *albedo* que aumenta la fusión, etc.

3.8.2. Balance y ablaciones mensuales del glaciar entre 5250 msnm y el final.

Durante los 3 últimos años, fué posible conseguir una información continua de cada baliza. Por lo tanto se calculó el balance del glaciar a nivel mensual, utilizando el procedimiento mencionado en el párrafo 3.3.. Como se conoce también la cantidad de precipitación caída sobre el glaciar, gracias al pluviómetro P7, se ha determinado la ablación al nivel mensual, utilizando la ecuación (4). Las figuras 3.13. y 3.14. muestran esta información para el ciclo 1994-95.

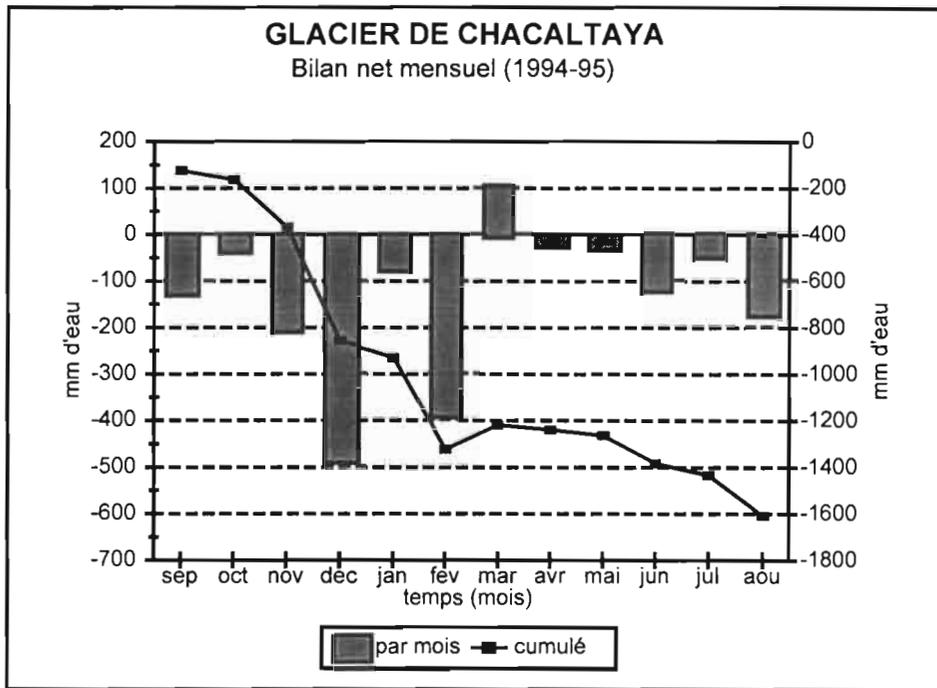


Figura 3.13. Balance mensual del Glaciar de Chacaltaya para el ciclo 1994-95.

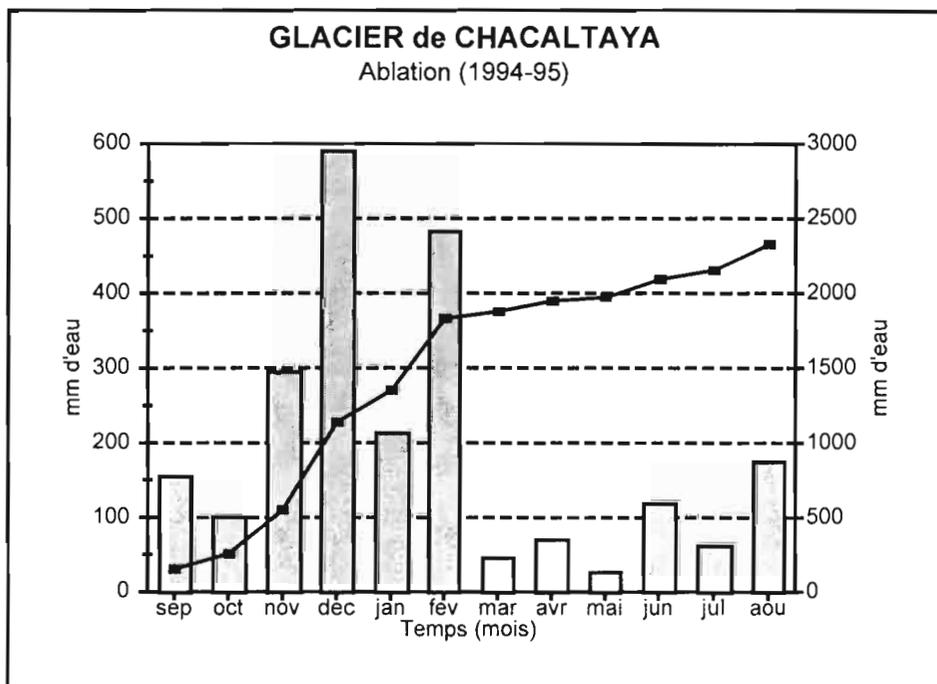


Figura 3.14. Ablación mensual estimada sobre el Glaciar de Chacaltaya para el ciclo 1994-95.

Se ha realizado el mismo procedimiento para los ciclos 1995-96 y 1996-97 (figuras 3.15., 3.16.,3.17. y 3.18.).

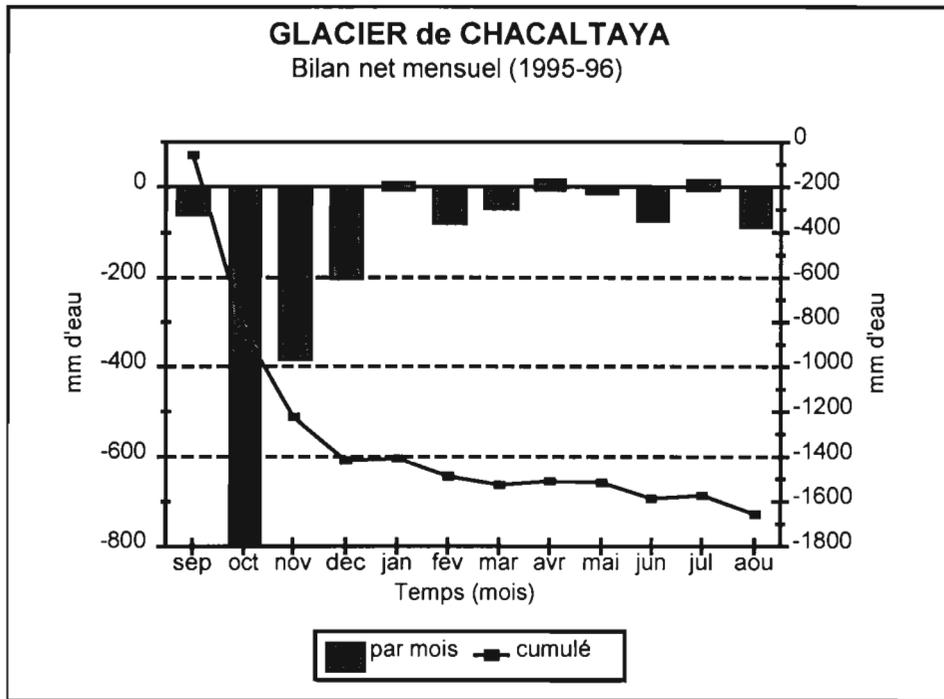
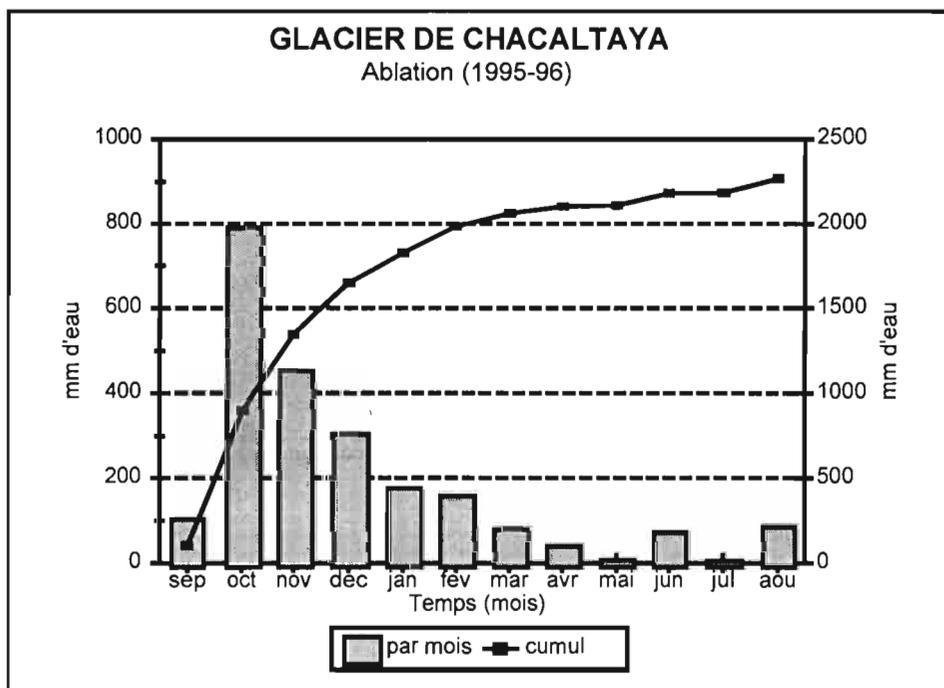


Figura 3.15. Balance mensual del Glaciar de Chacaltaya para el ciclo 1995-96.



3.16. Ablación mensual estimada sobre el Glaciar de Chacaltaya para el ciclo 1995-96.

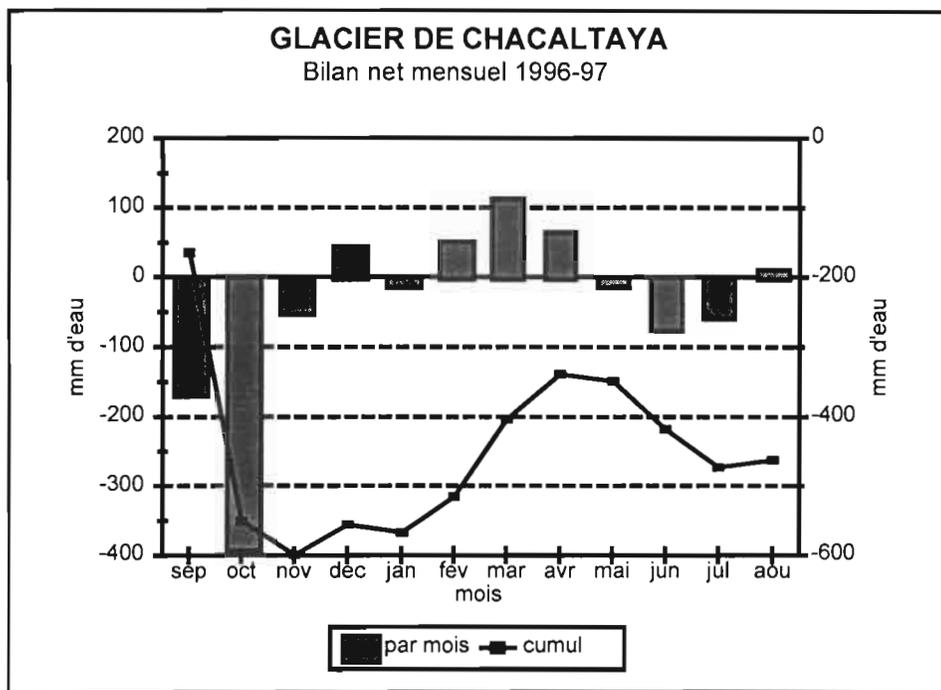


Figura 3.17. Balance mensual del Glaciar de Chacaltaya para el ciclo 1996-97.

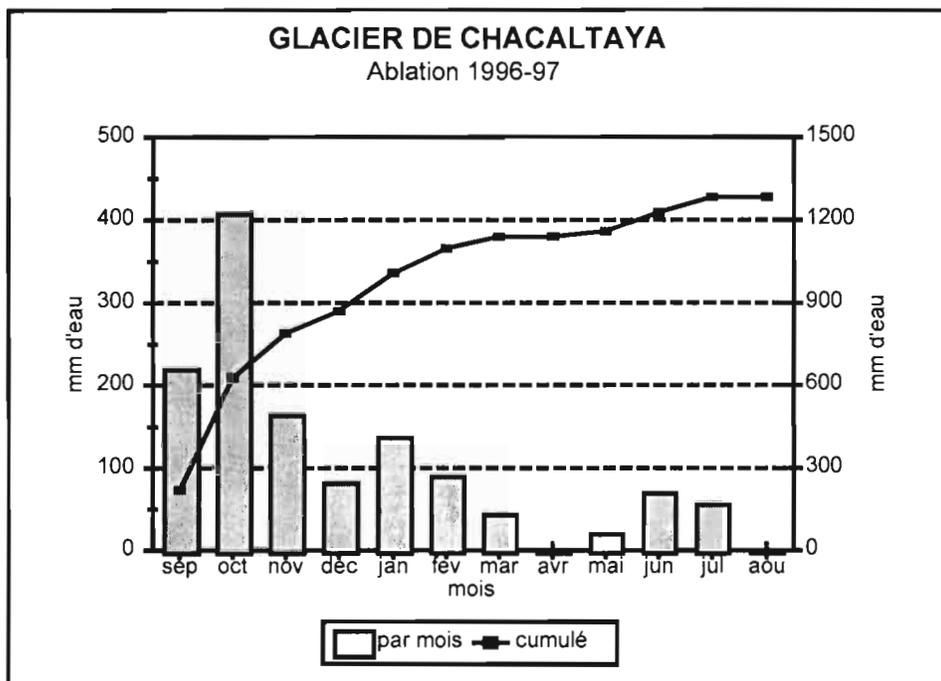


Figura 3.18. Ablación mensual estimada sobre el Glaciar de Chacaltaya para el ciclo 1996-97.

Estos datos confirman la información proporcionada por la baliza 20. El ciclo 1994-95 fué marcado por una ablación de larga duración y alta intensidad, que se ha extendido de septiembre a febrero, reanudándose notoriamente en el periodo de junio-agosto durante el

invierno. En el siguiente ciclo (1995-96), se produce un ablación muy fuerte en el periodo octubre-diciembre, bajando apreciablemente después de marzo. Un record de ablación de 800 mm fué registrado en octubre. En el último ciclo, son octubre, septiembre y noviembre los que concentran la ablación, siendo los siguientes meses de acumulación.

Con la información mensual acumulada a lo largo del año hidrológico, se calculan para el balance y la ablación valores bastante diferentes de los que se obtienen con las dos mediciones que se realizan al principio y al final del año hidrológico (Cuadro 3.6.).

Años	1994-95		1995-96		1996-97	
Procedimiento	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Balance neto	-1470	-1608	-1874	-1658	-659	-463
Ablación	2160	2328	2489	2267	1459	1263

(1) balance anual : Δh_a desde el principio de septiembre en equivalente-agua (mm)

(2) balance mensual acumulado a lo largo del año : $\Sigma \Delta h_m$ en equivalente-agua (mm)

Cuadro 3.6. Balance y ablación del Glaciar de Chacaltaya calculados empleando dos procedimientos.

El primer año, el balance mensual acumulado sobrestima el balance y la ablación, mientras que los años siguientes, los subestima. Esta incoherencia no sorprende y puede ser explicada considerando que en los procedimientos respectivos entran varias posibilidades de discrepancias, las que se citan a continuación :

- las balizas eligidas para el cálculo no son siempre las mismas (ejemplo : 20,20A o 20B), empleando siempre las que ofrecen una serie mensual continua ;
- la conversión de Δh en equivalente agua con dos tipos de densidad eligidos (cf. 3.2.2.) introduce una posibilidad de error ;
- la lectura mensual permite tomar en cuenta una serie de episodios de ablación o de acumulación que la lectura anual no registra.

3.8.3. Ablación durante el periodo mayo-julio

Es de interés conocer el comportamiento del glaciar en estos meses donde recibe muy pocas precipitaciones y donde la parte de la sublimación, en la ablación, debe ser la más importante de todo el año, debido a la sequía del aire y a los vientos del oeste.

Se observa en la figura 3.19. que los valores mayores del balance de mayo a julio generalmente se acercan o son inferiores a 50 mm de agua.

De misma manera, la ablación fué calculada para toda la superficie del glaciar para los 3 últimos ciclos. Se la puede ver representada en la figura 3.20.

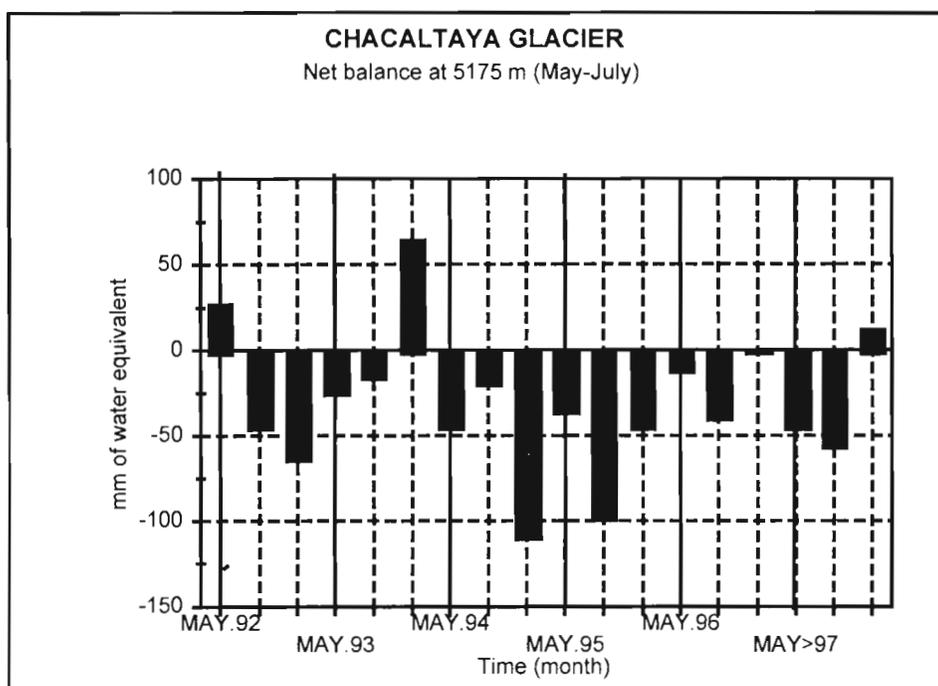


Figura 3.19. Balance neto (en mm de agua) en la parte baja del glaciar durante los meses de invierno (mayo-julio). Baliza 20 (5175 m).

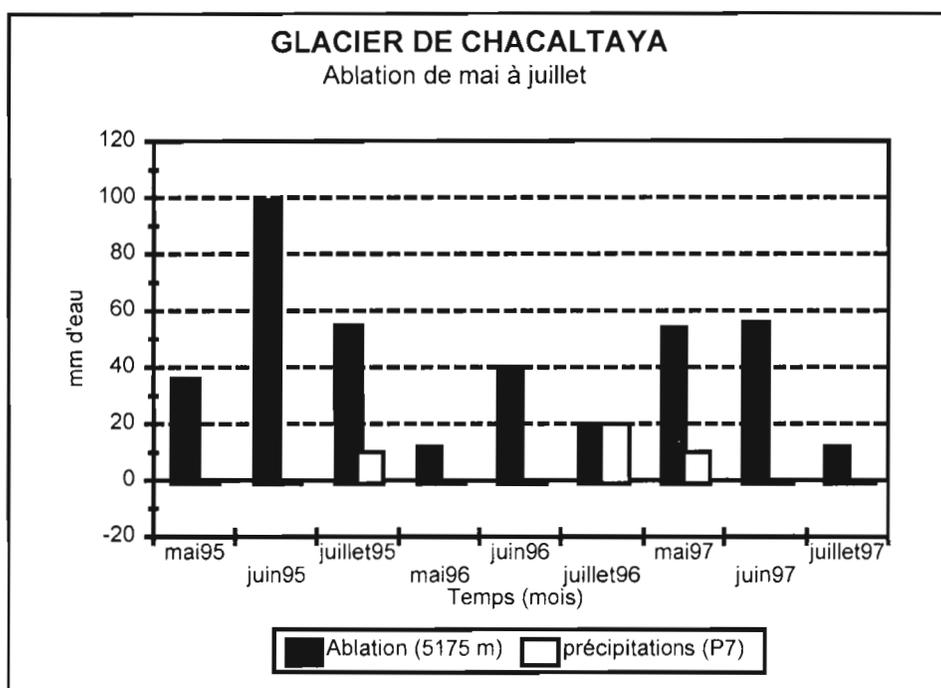


Figura 3.20. Ablación específica calculada sobre la totalidad de la red de balizas para mayo-julio 1995, 1996 y 1997. Las precipitaciones medidas en el pluviómetro P7 son representadas también.

Con la excepción de junio de 1995, donde la ablación ha sido más fuerte que la normal, se nota que el valor de ablación, característico en la temporada, está entre los 40 y 60 mm. Considerando que el glaciar en esta época tiene una fusión despreciable (la parte final del glaciar permanece congelada y sin escurrimiento visible durante todo el día), se puede en primera instancia, considerar que esta fusión es debida casi exclusivamente al efecto de la sublimación. Así que la cantidad de agua perdida por este proceso durante el periodo frio con muy escasas precipitaciones estaría cerca de los 1.3 a 2.0 mm día⁻¹. Este proceso explica la multitud de penitentes que se encuentran esos meses sobre el glaciar. Esos penitentes son mayormente inclinados hacia el norte, haciendo sobre la superficie un ángulo de ~30 grados.

3.9. La acumulación

Durante el ciclo 1996-97 se realizaron, más regularmente que durante los ciclos precedentes, mediciones de acumulación de nieve sobre la superficie del glaciar. Se eligieron 3 zonas, sobre el eje central que corresponden a las balizas 17A (5230 m), 19 (5200 m) y 20C (5175 m). En estas zonas, se ha excavado un pozo bajando hasta el nivel de hielo de los primeros meses del año hidrológico. Luego, el procedimiento consiste en medir la densidad por pesaje utilizando un pequeño cilindro de acero inoxidable que se desplaza verticalmente. Conociendo la densidad promedio del manto nival, se realizan varios sondeos utilizando una sonda a nieve graduada. Se convierte el espesor promedio de la nieve en equivalente agua. Como ejemplo, se presentan en el cuadro 3.7. los resultados del pozo 1 del 11/04/97. El cilindro en inox tiene un volumen de 524.4 cm³, con una longitud de 16.3 cm y un peso bruto de 528 g.

Nº	Longitud	Volumen	peso total	peso neto	densidad	w.e. (mm)
1	15.3	492.2	645.0	117.0	0.2	36.4
2	16.3	524.4	613.0	85.0	0.2	26.4
3	16.3	524.4	651.0	123.0	0.2	38.2
4	16.3	524.4	770.0	242.0	0.5	75.2
5	16.3	524.4	785	257.0	0.5	79.9
6	16.3	524.4	785	257.0	0.5	79.9
7	9.3	299.2	700	172.0	0.6	53.5
TOT	106.1				prom. 0.4	389.5

Cuadro 3.7 . Resultados de las mediciones densimétricas del pozo 3 (baliza 17A) del 11/04/97

Entre enero y septiembre 1997, se realizó 5 veces este tipo de perforación, lo que ofrece la posibilidad de hacer un seguimiento del manto nival con regularidad durante todo el periodo de acumulación. Los resultados se encuentran en el cuadro 3.8. Se nota que los resultados de los pozos, dando un valor puntual, son a veces bastante diferentes de los resultados obtenidos con la sonda a nieve, que ofrece una medición más extensa sobre el glaciar.

altitud	baliza	2/12/96	3/01/97	28/02/97	14/03/97	11/04/97	31/05/97	29/08/97
(1)	(2)	(3)	(3)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)
5230	17A	hielo	nieve	192 (0.5)		390 (0.4)	455 (0.4)	369 (0.4)
5200	19	hielo	nieve	102 (0.5)		441 (0.4)		263 (0.4)
5175	20c	hielo	nieve	181 (0.5)	224 (0.4)	418 (0.4)	343 (0.4)	341 (0.4)
(5)	sonda			225	280	400	350	300

(1) altitud : eje central del glaciar

(2) baliza más cerca del pozo

(3) sin medición de densidad

(4) acumulación en mm de agua (y densidad promedio)

(5) extensión a todo el glaciar (sonda a nieve)

Cuadro 3.8. Acumulación sobre el glaciar de Chacaltaya entre enero y setiembre 1997.

3.10. Conclusión sobre el balance de masa para el período 1991-97.

A pesar de algunas limitaciones metodológicas sobre la estimación del balance de masa, siendo la principal la red de balizas todavía no suficientemente extensa de 1991 a 1996, se puede destacar 3 conclusiones importantes del estudio realizado, en el Glaciar de Chacaltaya, los últimos 6 años :

- El glaciar ha sufrido importantes pérdidas durante este periodo, las cuales, acumuladas, alcanzan a casi 6 metros de agua. El glaciar ha perdido en promedio unos 1000 mm de agua cada año, lo que corresponde generalmente a más del doble de lo que ha recibido por precipitaciones. En consecuencia, la ablación ha alcanzado valores muy elevados que están alrededor de los 2000 a 2400 mm de agua. Cuando se haya realizado el análisis de toda la información (capítulo 4), se verán las consecuencias de la evolución sobre la masa total del glaciar. El glaciar ha tenido 4 años de fuerte ablación sobre la totalidad de su superficie, de los 6 estudiados ; con ELAs situadas a proximidad de la cumbre o más arriba. Este comportamiento tiene una extensión regional, ya que los datos registrados sobre el Glaciar de Zongo son bastante parecidos (Berton et al.,1997) : con una pérdida aproximada de 4.5 metros de agua en 5 ciclos, y ELA's ubicadas generalmente entre 200 m y 300 m más arriba de la posición de equilibrio (ELA₀). En el marco del programa NGT, se midieron también balances y retrocesos de lengua muy importantes en el periodo 1994-97 en el Antizana (Andes del Ecuador) (Sémiond *et al*, 1997).
- Gracias a las lecturas mensuales de las balizas, y a pesar de los acontecimientos generadores de errores, se puede conocer la distribución mensual de la acumulación y de la ablación sobre este glaciar. El periodo determinante para el balance neto del año se concentra en los meses de septiembre a marzo, y particularmente en los meses de octubre a diciembre, antes de las precipitaciones frecuentes, donde el flujo radiativo y el calor sensible están en sus valores máximos. Una ablación muy fuerte en esos meses parece suficiente para provocar un balance muy deficitario a nivel anual, pudiéndoselo observar en el último ciclo 1996-97 donde la capa de nieve de 300 mm equivalente agua que cubre el

glaciar fin de agosto 1997, no impide un resultado de balance bastante negativo ($B_n = -659$ mm de agua). Sin embargo, la permanencia de un alto nivel de ablación durante los meses de enero a marzo, periodo “normal” de acumulación, es también un parámetro importante en la determinación del balance a nivel anual (ejemplo : el ciclo 1994-95). Finalmente, hay que subrayar que durante los meses de junio a agosto, periodo frío y con poca energía de radiación incidente llegando a la superficie del glaciar, se puede registrar una ablación significativa, como se lo observó en el año 1995. Un promedio de ablación de 40 a 60 mm de agua por mes de mayo a julio puede ser provocado por la sola sublimación.

- Es cierto que este periodo 1991-1996 de “alta pérdida” para las reservas de agua del Glaciar de Chacaltaya debe ser vinculado con el contexto climático a nivel de los Andes Centrales. El periodo 1991-1996 fué marcado por una *Oscilación Sur negativa continua* ; que ha empezado a mediados de 1991 durando hasta principios de 1996, con una pequeña atenuación de 1992 a 1994. Este acontecimiento tiene muy poca similitud en este siglo precisamente por su duración. Será por lo tanto interesante determinar si este periodo ha sido excepcional para Chacaltaya, comparandolo con los precedentes mediante el análisis topográfico presentado en el capítulo 4.

4. LOS CAMBIOS GEOMETRICOS OCURRIDOS EN EL GLACIAR DE CHACALTAYA (segunda mitad del siglo XIX a 1997)

4.1 Definiciones y metodología.

4.1.1 *El método topográfico*

Una de las herramientas muy útiles empleadas para conocer los cambios en la superficie del glaciar, es la topografía, que además permite determinar la velocidad de desplazamiento de las balizas situadas sobre la superficie del glaciar y que cambian de posición a través del tiempo. El método topográfico, consiste principalmente en el levantamiento del contorno del glaciar de estudio, de tal manera de poder generar la forma en planta del mismo conociendo así sus características morfométricas. Así mismo, a través de la topografía, se define la posición de las balizas dispuestas sobre la superficie del glaciar, lo cual permite conocer a través de las mediciones realizadas periódicamente los desplazamientos sufridos en los puntos seleccionados del glaciar (puntos con baliza) para que de esta manera pueda ser posible determinar la velocidad de desplazamiento de dichos puntos.

Los glaciares, en latitudes altas, atraviesan por dos períodos marcadamente diferenciados, los cuales corresponden a un período de acumulación o ganancia de masa y un período de ablación o pérdida de masa. Sin embargo, en los glaciares tropicales como en el caso del Glaciar de Chacaltaya, estos dos períodos se presentan prácticamente de forma simultánea, lo que hace que sea más complicado aun el análisis correspondiente.

En el caso del glaciar de Chacaltaya, este período de acumulación se presenta durante el verano, temporada en la cual los valores de precipitación son mayores y consecuentemente existe mayor acumulación sobre el glaciar, sin embargo, durante esta misma época también se presentan los mayores índices de radiación solar, lo que hace que se presente de igual manera, un proceso de derretimiento. Todo éste fenómeno hace que la superficie del glaciar sufra cambios tanto en su magnitud como en su forma, siendo ésta última de lo que se encarga el análisis a través del método topográfico.

Los cambios del glaciar pueden interpretarse de forma cíclica, es decir que se considera un inicio de temporada en la cual comienza el proceso de acumulación conjuntamente con el proceso de ablación y una segunda temporada donde se presenta un estado casi estacionario con pocos cambios y donde la superficie cubierta del glaciar está constituida principalmente por hielo. Esta etapa es cuando se considera como el final de la temporada o ciclo hidrológico del glaciar y donde es importante realizar un levantamiento topográfico para poder contar con un registro anual de la extensión de la superficie del glaciar para luego realizar una evaluación o balance del período y saber si fue un año de ganancia (balance positivo) o un año de pérdida de masa (balance negativo).

A través de los registros obtenidos anualmente de los levantamientos topográficos, es posible conocer la evolución de la superficie del glaciar. Sin embargo, es importante para este proceso tener un buen control en el período en el que se realice el levantamiento, ya que éste deberá realizarse siempre al final de la temporada o año de balance. De no procederse de esta manera, o dicho de otra forma, de existir cierto desfase en la fecha indicada, podrían obtenerse como resultados cambios de volumen importantes que no reflejarían la realidad.

Para el caso del glaciar del Chacaltaya, el levantamiento topográfico del contorno del mismo y el referenciamiento de las balizas se realiza normalmente a fines del mes de agosto, mes que se considera como el final de la temporada o ciclo hidrológico del glaciar.

La determinación de la posición de las balizas, permite a su vez contar con puntos sobre la superficie del glaciar que logran definir la forma del terreno. Sin embargo, es recomendable poder realizar el levantamiento de puntos complementarios, ya que las balizas no necesariamente estarán ubicadas en aquellos puntos representativos que logran definir la forma del terreno en su cabalidad. Si bien la forma del terreno o del glaciar en este caso variará en el tiempo a consecuencia de los procesos que sufre la cobertura nival, es importante contar con este dato ya que conjuntamente con los registros de años anteriores, es posible conocer también los cambios o evoluciones en el volumen de la capa nival. Para contar con datos con características homogéneas, es recomendable que los levantamientos se realicen con el mismo equipo o por lo menos con instrumentos de similares características, para no incorporar inconsistencias de precisión en la evaluación o comparación de registros de años consecutivos. Está claro, que mientras más precisos sean los instrumentos utilizados, mayor será la confiabilidad de los análisis del cambio de masa obtenidos en el cálculo.

Otro aspecto importante, es la referenciación utilizada como base para el levantamiento, ya que si no se tiene una referencia común, los resultados obtenidos no son confiables, especialmente para el caso del análisis o evaluación de los desplazamientos de las balizas, ya que éstos pueden ser del orden de algunos centímetros solamente, lo que influiría notablemente en los cálculos de las velocidades de desplazamiento. Es necesario para ello, contar con puntos perfectamente referenciados e identificados en el terreno de tal manera de contar con una poligonal base que sirva de referencia para todos los levantamientos posteriores. De igual manera, los puntos utilizados deberán estar preferentemente ubicados respecto a coordenadas absolutas.

Para el caso del glaciar de Chacaltaya, se ha logrado consolidar una poligonal base con puntos referenciados geodésicamente a través de la utilización de equipos de posicionamiento global (GPS's) del Instituto Geográfico Militar (IGM).

Es importante mencionar que la ubicación en campo de los puntos del contorno del glaciar puede resultar en algunos casos un tanto complicada, ya que como en el caso del levantamiento del año 1997, se tuvo la presencia, en días cercanos pasados, de nevadas no comunes en la temporada que cubrieron el terreno y que la consideración de los extremos hasta donde se encontraba nieve no era una suposición real de la evaluación o balance de la temporada, ya que esta consideración podía haber dado lugar a obtener un balance muy positivo no real. Ante tales situaciones, es importante analizar desde un punto de vista mucho más crítico y en caso del levantamiento de 1997 se asumió como contorno del glaciar el mismo que se determinó el año 1996, ya que el tratar de ubicar en campo el supuesto contorno es un aspecto muy subjetivo. Sin embargo, lo que sí se tomó especial importancia fue la determinación precisa de la posición de las balizas ya que este dato permite la determinación de la velocidad de desplazamiento de los diferentes puntos del glaciar al final de la temporada.

Es necesario tomar en cuenta para los levantamientos topográficos algunos aspectos importantes de tipo logístico tales como la elección del material adecuado para tal efecto.

Es así que dadas las características y las condiciones del lugar (clima, dificultad de desplazamiento sobre el glaciar, etc) es mucho más recomendable la utilización de equipos tales como distanciómetros o estaciones totales así como radios para comunicación que permitan la obtención de mediciones rápidas y precisas sin tener que lidiar con aspectos tales como la visibilidad en la zona por el efecto de constantes apariciones de neblina o vientos que tendrían repercusión en el caso de utilizar equipos sencillos o rústicos.

De igual manera no se deben descuidar los elementos posteriores al levantamiento, tales como la metodología de procesamiento de los datos, tratando en lo posible de uniformar tanto métodos y aditamentos tales como software que son empleados en los otros programas de monitoreo. En tal sentido, se ha elegido como plataforma de diseño gráfico AUTOCAD (de Autodesk) por ser un software muy flexible y de amplia difusión así como el empleo de software especializado con plataforma también en AUTOCAD como el Civil-S7 (Acad CIVIL) de Softdesk que permite el procesamiento de la topografía y la generación de Modelos Numéricos de Terreno (DTM's).

4.1.2 La medición directa del frente del glaciar

Tal como se explicó anteriormente, los glaciares en su generalidad, vienen sufriendo un proceso de reducción o comúnmente denominado retroceso del glaciar, que se expresa a través de la disminución en la superficie el glaciar.

Una de las características donde se aprecia más claramente este proceso, es precisamente en el frente el glaciar o porción terminal del glaciar. Este frente constituye el extremo inferior del glaciar el cual sufre cambios muy notorios al final de cada temporada. Es así, que dependiendo de que si se tuvo un año con balance positivo (ganancia en masa) o un año negativo (perdida de masa), el frente del glaciar presentará una extensión de su frente o un acortamiento del mismo respectivamente. Lo más frecuente es que se tenga un acortamiento del frente o también denominado retroceso.

En la práctica, la medición de las variaciones de este frente son muy útiles para conocer la evolución del glaciar año tras año, ya que un cambio brusco en la magnitud de retroceso, da cuenta que se produjo un año de balance muy negativo y viceversa. Para tal efecto, y en el caso del glaciar de Chacaltaya, la medición de este frente o término del glaciar se realiza al final de cada temporada empleando un quíntuple decámetro, tomando como origen de medición puntos fijos de referencia. Al principio, en diciembre 1991, se colocaron 4 puntos denominados : P10, P7, P6 y P5. Posteriormente, en diciembre de 1993, se agregaron 3 puntos nuevos : P8, P11 y P12. Finalmente, debido al retroceso fuerte del frente, fué necesario en diciembre 1996 reorganizar los puntos, conservando los 5 siguientes :

P7, P8, P10, P11 y P12

El mes de diciembre ha sido escogido, para el monitoreo de estos puntos, ya que casi todos los años, es el mes donde el frente aparece sin nieve y con la mayor nitidez. La medición de este frente deberá obviamente estar siempre referenciado respecto a puntos fijos en el terreno para tener mediciones con mismo origen de referencia.

En el caso del glaciar de Chacaltaya, se han encontrado marcas de referencia colocadas años atrás por algunas personas que indican la posición en la cual se encontraba el frente del glaciar. De acuerdo a la indicación de estas marcas, la más significativa es la realizada el año 1982 (autor desconocido), punto que es actualmente utilizado por origen de referencia para las mediciones del frente. Sin embargo, la medición de una sola distancia, puede dar lugar a tener un valor no representativo del retroceso del glaciar, para lo cual se realizan alrededor de cinco mediciones desde diferentes puntos de la porción inferior del glaciar para luego obtener un promedio.

4.1.3 Otros métodos

4.1.3.1 Fotografías de archivo

Muchas veces, como es el caso en Bolivia, no se tienen registros de períodos largos ya que la disciplina de la glaciología es prácticamente reciente en nuestro medio. Este aspecto, sin embargo, puede ser subsanado a través de técnicas indirectas de reconstrucción de la información. Una herramienta muy útil, es el empleo de fotografías de archivo que permiten conocer de forma indirecta las condiciones en las que se encontraba el glaciar en determinadas épocas.

Tal es así que para el caso del glaciar de Chacaltaya, se han logrado recuperar fotografías de épocas pasadas a través de las cuales se logró identificar la extensión con que contaba el glaciar. Por otra parte, este tipo de fotografías, normalmente son de tipo oblicuas lo que impide realizar un análisis fotogramétrico (restitución). Sin embargo, el procedimiento empleado fue el tratar de ubicarse en un punto muy próximo desde el cual se habría tomado la fotografía e identificar sobre el terreno los puntos hasta donde se extendía el glaciar del cual data la fotografía. Estos puntos así marcados en el terreno y gracias al empleo de la topografía, permiten enlazar con los levantamientos topográficos más recientes y tener una referencia bastante precisa de los cambios sufridos en el glaciar a través del tiempo, es decir, conocer la evolución del mismo.

En la portada del presente documento, se muestra así una de las fotografías oblicuas más antiguas encontradas, que data del año de 1940. A esta fecha, la Cabaña actual del Club Andino no existía todavía.

4.1.3.2 Fotografías aéreas.

Otra herramienta utilizada para conocer los cambios atravesados por el glaciar es el empleo de fotografías aéreas, a través de las cuales es posible aplicar la técnica de la fotogrametría gracias a la denominada fotorestitución. Esta técnica, permite a su vez el cálculo de alturas a través de la medición de paralajes, así como la determinación de la superficie del glaciar a través de un planimetrage o cálculo del área del glaciar por medio de la transformación de la escala de la fotografía. Esta técnica, al igual que las fotografías oblicuas, permite reconstruir la información acerca de la extensión del glaciar en las épocas en que se realizaron los vuelos aéreos. Las fotografías aéreas, como es de entenderse, son fotografías del tipo planas, es decir que son tomadas respecto a un eje perpendicular o normal al terreno, lo que permite poder contar con una visión en planta de la superficie analizada.

Se han podido encontrar fotografías de vuelos realizados en la región pertenecientes a años anteriores, las cuales serán procesadas para su respectiva restitución en los laboratorios de la Universidad de Duesseldorf (Alemania) gracias a la colaboración del Dr. Ekkehard Jordan.

4.1.4 Cuantificación de áreas y volúmenes del Glaciar

Tomando en cuenta que el conocer los parámetros de área y volumen del glaciar a través del tiempo, permiten tener noción de la evolución que sufre el mismo, es importante poder contar con las herramientas necesarias que permitan dicha cuantificación.

Si bien los levantamientos topográficos se inician a partir del año 1992, la utilización de otros medios como las fotografías aéreas y oblicuas, tal como se describió anteriormente, permiten reconstruir sobre el terreno las extensiones alcanzadas por el glaciar en fechas pasadas, siendo así posibles a través de un levantamiento topográfico poder definir dichos límites que proporcionan posteriormente la información requerida.

El tratamiento gráfico utilizado, principalmente fue realizado mediante la aplicación del Software AutoCAD, programa muy flexible que permite trabajar con diferentes alternativas. Es así que la cuantificación de áreas y longitudes puede ser realizada en forma rápida y precisa. La introducción de datos fue realizada de dos maneras, la primera a través de la introducción de coordenadas X,Y,Z dentro del mismo programa y la segunda a través de la digitalización. Para ello se utilizó el siguiente equipo adicional:

- Tablero digitalizador SUMMAGRAPHICS 12x18"
- Tablero digitalizador GENIUS 12x12"

Sin embargo, la sola utilización del programa AutoCAD, no permite la cuantificación de volúmenes entre dos superficies de una manera expedita sin el empleo de un considerable tiempo y trabajo. En tal sentido dentro del programa de equipamiento del proyecto, se logró la adquisición de Software adicional especializado. Para la elección del mismo se ha considerado que habiendo utilizado como Software básico el paquete AutoCAD y por ser el mismo de amplia difusión, la utilización de Software utilitario con plataforma en AutoCAD sería lo más conveniente.

Es así que se eligió el utilitario Acad CIVIL S7 de Softdesk, el cual a través de sus diferentes módulos permite en forma rápida el procesamiento de los datos topográficos y la generación de curvas de nivel. Así mismo, dicho Software permite la generación de Modelos Numéricos de Terreno (DTM) a través de los cuales es posible la cuantificación de volúmenes entre dos superficies permitiéndose la introducción de límites o contornos que para nuestro caso corresponde a los límites del glaciar.

De esta manera, se prepararon previamente archivos ASCII de las coordenadas de los puntos levantados topográficamente bajo el siguiente formato:

<i>No.</i>	<i>Este</i>	<i>Norte</i>	<i>Cota</i>	<i>Descripción</i>
------------	-------------	--------------	-------------	--------------------

los cuales son recuperados a través del Software y a partir de lo cual se crea una *Red Integrada de Triángulos* (TIN) que permite la definición de una superficie.

Para este estudio, se creó un archivo con las siguientes superficies:

- Superficie base de la cuenca del glaciar (Bedrock)
- Superficie del glaciar (límites del siglo XIX)
- Superficie del glaciar (límites de 1940)
- Superficie del glaciar (límites de 1982)
- Superficie del glaciar (límites de 1992)
- Superficie del glaciar (límites de 1993)
- Superficie del glaciar (límites de 1994)
- Superficie del glaciar (límites de 1995)
- Superficie del glaciar (límites de 1996)

Para la evaluación de los respectivos volúmenes se aplicaron dos métodos de cuyos valores se obtuvo un resultado promedio.

Dichos métodos incluidos dentro del módulo *Earthworks* corresponden al Método de Rejilla (*Grid Method*) y al de Secciones del cual a su vez se utilizó el método Prismoidal, teniendo ambos métodos como base de cálculo la utilización de una malla cuya dimensión de celda puede ser especificada. Para la elección de la dimensión de celda se debe considerar que la misma no debe ser ni muy pequeña que complique el cálculo ni muy grande que haga que la estimación del volumen sea imprecisa. Para el caso de Chacaltaya se adoptó un tamaño de rejilla de 5x5 m, tomando en cuenta la extensión del glaciar de tal manera que se genere una malla de tamaño razonable.

El Método de Rejilla (*Grid Method*) interpola volúmenes empleando mallas sobrepuestas en las dos superficies creadas. Así, los volúmenes son calculados utilizando el volumen prismoidal creado por cada celda y cuya sumatoria total proporciona el volumen total existente entre ambas superficies.

La siguiente ilustración representa la metodología utilizada por el método de rejilla.

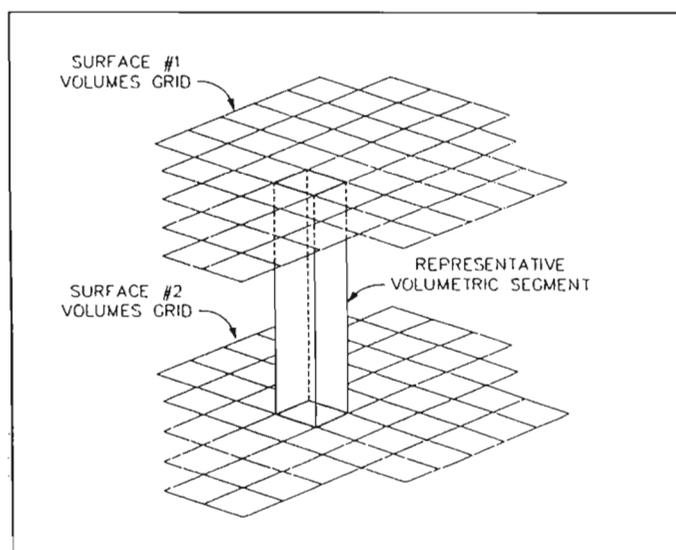


Figura 4.1 : Esquematización del cálculo de volumen entre dos superficies
Fuente: Manual de Referencia Earthworks (Softdesk)

El método de secciones (*Section Method*) realiza una interpolación de secciones transversales entre las dos superficies seleccionadas con lo cual se generan volúmenes a través de la consideración de prismas los cuales son sumados posteriormente para la obtención del volumen total.

4.1.5 Definición de la Superficie Base (Bedrock)

Tomando en cuenta que para la cuantificación de volúmenes es de gran importancia contar con la superficie de referencia o superficie base (Bedrock), se han realizado diversos análisis sobre la posible forma del lecho rocoso por debajo del Glaciar. Para el caso de las estimaciones del volumen del glaciar para la situación del Siglo XIX, de 1940 y 1982, este lecho fue obtenido a través de la topografía efectuada en 1996, ya que en la actualidad gran parte de esta superficie se encuentra sin cobertura nival.

Para el caso de la situación actual, se han realizado variados intentos en cuantificar los espesores del glaciar a fin de conocer la forma del lecho rocoso por debajo del glaciar actual, tal como se describe posteriormente en el apartado 4.5, de cuya evaluación final, se ha adoptado una posible situación del lecho rocoso, lo cual se muestra en la lámina correspondiente adjunta que expresa los espesores de hielo tomando como nivel de referencia la superficie y forma del glaciar en el año 1996 (topografía de 1996).

4.2 Las topografías efectuadas y las áreas calculadas

4.2.1 El polígono de apoyo instalado en 1996 (en coordenadas absolutas)

Así como se explicó en el acápite 4.1, uno de los aspectos importantes para la evaluación de resultados a partir de los levantamientos topográficos, es el contar con puntos de referencia comunes entre levantamiento y levantamiento. Es decir que deberán estar referenciados a puntos comunes.

Los levantamientos topográficos realizados sobre el glaciar de Chacaltaya, datan desde 1992, pero hasta el año 1996 no se consideró una poligonal base para enlazar todos ellos. En el sentido en que el programa de monitoreo del glaciar de Chacaltaya comenzó el año 1991, los primeros registros de levantamientos topográficos comenzaron a partir de 1992 de forma un tanto rústica a través de equipos convencionales de topografía. De tal manera se tiene cuenta que el primer levantamiento topográfico fue realizado por la Universidad Mayor de San Andrés el año 1992 en la cual se utilizaron equipos simples y donde se hizo el levantamiento del frente del glaciar y de la ubicación de balizas solamente.

El año 1993 se realizó un segundo levantamiento a cargo de la Universidad Mayor de San Andrés en la cual se dispusieron adicionalmente las correspondientes curvas de nivel.

El año 1994 un tercer levantamiento fue realizado por C. Sanchez a petición de la UMSA, donde tampoco se tenía una poligonal base.

En tal sentido, el año 1995 se decide realizar un levantamiento de precisión y la disposición de una poligonal de apoyo que pueda servir de referencia para futuros levantamientos, este

trabajo fue realizado por el Ing. Jaime Cari con la utilización de distanciómetro y prismas (topografía de precisión). En este levantamiento, se eligieron cuatro puntos principales considerados los puntos de la poligonal (V1, V2, V-A Y V-B). Sin embargo, hasta ese momento, todos los levantamientos realizados tenían puntos de referencia distintos, es decir que estos no estaban enlazados respecto a una misma red geodésica.

Es así, que en agosto de 1996 se dió inicio a la homogenización de resultados entre todos los levantamientos topográficos realizados hasta la fecha, de tal manera que este año marca la pauta de referencia para el procesamiento de la información. Este levantamiento tuvo el objetivo de establecer una poligonal base referenciada al Sistema Geodésico Nacional de Coordenadas Absolutas, trabajo que estuvo a cargo: del topógrafo Oscar Cáceres, ORSTOM, IHH, SENAMHI y un técnico de Hidrografía Naval.

El equipo utilizado consistió en:

Teodolito óptico mecánico Wild T-1 con precisión de dos milésimas de grado centesimal (400 gon)

Distomat DI 1001 Leica Wild Leitz

Prismas auxiliares PENTAX

Equipo de comunicación MAXON y MOTOROLA

Para el levantamiento de esta poligonal base, se utilizó un BM (*Bench Mark*) encontrado en el lugar de la Cruz, ubicada a más o menos 300 metros por debajo del Observatorio, perteneciente al GEODESICO INTERAMERICANO -IGM (Instituto Geográfico Militar) el cual fue colocado el año 1956. Este punto se encuentra a 5219.9220 msnm.

La poligonal base consistió principalmente en 5 puntos dispuestos sobre el lugar. Tal como se observa en figura referente al Sistema Topográfico de Chacaltaya. Los puntos base que conforman los vértices de la poligonal de 1996 son: P-0, P-1, P-2, P-3, P-4 y P-5 (fig. 4.2).

Estos puntos empleados, fueron dispuestos de tal manera de poderlos utilizar para ampliar el levantamiento hasta donde se encuentra ubicada una laguna aguas abajo de la cuenca. Se extendió este levantamiento topográfico con el objeto de poder conocer las características de la cuenca sobre la que se asienta el glaciar incluyendo el sector hasta donde abarcaba el mismo en años anteriores.

Gracias a una colaboración del Instituto Geográfico Militar (IGM), se pudo el mismo año 1996 enlazar la poligonal de apoyo, mediante sus puntos P-0 y P-3, a la red GPS de Bolivia.

El GPS de referencia fue ubicado en Laika Khota-La Paz (Lat.S : 16°30'19.69'' ; Long.W. = 68°07'24.50'' ; Alt. = 3627.76) y los 2 otros sobre los puntos P-0 y P-3 de la poligonal.

Las coordenadas obtenidas son las siguientes :

- P-0

Lat . S = 16°21'20.324207''

Long.W = 68°07'57.223802''

Ht = 5240.5938 m

N= 8191526.937901

E= 592645.590728

- P-3

Lat = 16°21'05.740159''

Long. = 68°07'45.851754''

Ht = 5392.9542

N= 8191973.668211

E= 592984.912796

VERTICE	NORTE (m)	ESTE (m)	COTA (m.s.n.m.)	OBSERVACIONES
P-0	8191904.514	592831.396	5237.279	
P-1	8191617.801	593117.237	5148.071	
P-2	8191953.942	593222.129	5210.917	
P-3	8192351.714	593171.287	5389.404	
P-4	8192031.415	592887.734	5274.823	
P-5	8191294.751	592949.414	5056.764	
V-1	8191990.774	592893.753	5256.426	PUNTO EN ROCA
V-2	8192169.042	592982.578	5282.215	PUNTO EN ROCA
V-A	8191889.975	593145.475	5188.572	MOJON
V-B	8191855.583	593145.475	5178.465	MOJON

Cuadro 4.1. Coordenadas de las poligonales de apoyo de 1996 y 1995

Para la definición de la superficie del glaciar (año 1996) a través de la topografía, se consideraron como puntos al interior del mismo los correspondientes a las balizas, levantadas a objeto de determinar su posición y para el posterior cálculo de velocidades de desplazamiento. Así mismo, se levantaron puntos complementarios sobre el glaciar de tal manera de poder reconstruir lo más fielmente la forma del terreno para el cálculo de volúmenes.

4.2.2. La utilización de las fotografías oblicuas de 1940 y 1982.

La topografía del año 1996, tal como se mencionó, fue aprovechada también para realizar el levantamiento de la cuenca del glaciar hasta el nivel de la laguna existente aguas abajo del glaciar, la misma que fue posteriormente utilizada para la cuantificación de áreas y volúmenes del glaciar (reconstrucción) a partir del análisis de las extensiones hasta donde abarcaba el glaciar en épocas pasadas. Para ello, se utilizaron dos fotografías muy importantes correspondientes a los años 1940 y 1982, fotografías de tipo oblicuas, que fueron de gran utilidad ya que permitieron apreciar hasta donde se extendía el glaciar en dichas fechas.

La primera fotografía (1940) corresponde a una fotografía oblicua de archivo perteneciente al Club Andino que se constituye en la fotografía más antigua actualmente existente (figura 4.3).

La segunda fotografía del tipo oblicua corresponde a 1982 (figura 4.4). Fue tomada por W. Reinhardt el 8.4.1982 desde un avión a 5400 msnm y aparece en el libro de Jordan (1991, p.199). Este mismo año también, se colocó una marca azul sobre la roca en la parte terminal del frente del glaciar (extremo inferior del glaciar) durante el mes de octubre, cuyo autor no se ha podido identificar. Tanto la fotografía y la marca concuerdan para ubicar el término del glaciar en esta fecha.

Esta información referente a la extensión del glaciar obtenida de las fotografías de 1940 y 1982, fue utilizada para los preparativos previos a la realización de la topografía de 1996 ya que inicialmente se identificaron en campo puntos coincidentes con los límites del glaciar tal como se mostraban en las fotografías definiendo de esta manera sobre el terreno los futuros puntos a ser levantados topográficamente.

Es así por ejemplo que los puntos pertenecientes a los límites de 1940 fueron pintados sobre el terreno con pintura azul, los que fueron denominados en adelante como "*los puntos azules*". Tanto los límites de 1940 como los de 1982 se muestran en el plano general, los cuales también fueron utilizados para la cuantificación de áreas y para la determinación de volúmenes de cobertura nival existentes para las correspondientes fechas.



Figura 4.3. Fotografía aérea oblicua del Glaciar de Chacaltaya del año 1940 (Club Andino Boliviano)



Figura 4.4. Fotografía aérea oblicua del Glaciar de Chacaltaya del año 1982 (W.Reinhardt).

4.2.3 Los límites del Siglo XIX

Los glaciares, a medida que sufren en el tiempo un retroceso de su extremo frontal, dejan a su paso un rastro o huella que puede posteriormente ser identificada. Esta huella es conocida como "morrena" la cual puede ser de tipo frontal o lateral. Estas morrenas normalmente son identificadas en el terreno como relieves que sobresalen en forma de arcos tal como en el caso de las morrenas frontales. Es así que sobre la cuenca del glaciar de Chacaltaya, se han podido identificar sobre el terreno la morrena que, por referencia a trabajos efectuados en el Perú, se atribuye a la mitad del siglo XIX (1850), perteneciente a la "Pequeña Edad de Hielo" (Broggi, 1943). Sin embargo, cabe señalar que esta fecha de 1850 para la morrena externa de la Pequeña Edad de Hielo es todavía hipotética en Bolivia.

4.2.3.1 Topografía de la morrena externa

Considerando que la ubicación de la morrena externa da una pauta de la extensión que abarcaba el glaciar, ésta fue levantada topográficamente de tal manera de contar con puntos específicos que permitieron posteriormente cuantificar tanto el área como el volumen del glaciar existentes para dicha época. Esta morrena así levantada muestra, sin embargo, solamente porciones de la extensión total del glaciar, es así que en las partes superiores de la cuenca es más difícil evaluar esta extensión ya que por lo general es más difícil encontrar dichas morrenas. Tal es el caso de la morrena que se atribuye a los años 1925 según Müller (1985), la cual solamente se presenta como morrena frontal y da cuenta de la posición en que se encontraba el la parte terminal del glaciar y no tanto así de la posición de sus límites laterales, lo cual impide poder estimar su extensión para dicha época (figura 4.4).

4.2.3.2 Posibles errores arriba del antiguo camino

Tal como se mencionó anteriormente, la estimación de la extensión del glaciar a partir de la ubicación de las morrenas, puede generar un error en la misma cuando se realiza la evaluación para las porciones pertenecientes a las partes altas de la cuenca. En tal sentido, las morrenas correspondientes a la Pequeña Edad de Hielo pueden ser identificadas en el terreno hasta aproximadamente el nivel donde se encuentra el antiguo camino de acceso al nevado. A partir de este punto hacia arriba, ya la identificación de la misma se complica a consecuencia de la existencia de bastante material detrítico que con el paso del tiempo fue cubriendo los rastros dejados por el glaciar.

Sin embargo, a través de la topografía, se realizó sobre el plano topográfico, una estimación de la posible extensión del glaciar para la porción superior de la cuenca arriba del camino antiguo, la cual posiblemente no coincide exactamente con la posición original que ocupaba el glaciar en dicha época pero que puede ser una muy buena aproximación de la misma.

4.2.3.3 Superficie y volumen estimados para la mitad del siglo XIX (fig. 4.5)

De acuerdo a la descripción realizada en el acápite 4.1.4 referente a la cuantificación de áreas y volúmenes, se ha podido determinar mediante la aplicación del Software AutoCAD (Autodesk) y su utilitario CIVIL-S7 (Softdesk) las correspondientes magnitudes de área y volumen, habiéndose encontrado que para el siglo XIX perteneciente a la Pequeña Edad de Hielo, el glaciar contaba con una extensión de 527 420.82 m² y ocupaba un volumen de 18 460 638.7 m³.

Estos valores pueden tener cierto error de estimación y diferir de las magnitudes reales, primero por no conocer con exactitud los límites del glaciar para dicha época y segundo, especialmente en volumen, por estar considerando que la superficie del glaciar estaba constituida como un plano que intersecta la cuenca por los puntos de los límites del glaciar definidos anteriormente. Esta estimación puede, ó bien estar en exceso o en defecto, ya que de haber tenido la superficie del glaciar una conformación cóncava se estaría en el primer caso y de haber tenido una conformación convexa se estaría en el segundo.

Sin embargo, se estima que la aproximación a los valores reales es de un 80% para el caso del área y de un 70% para el caso del volumen calculado.

4.2.4 Los límites de 1940, estimación del área y del volumen correspondientes (fig. 4.5)

Los límites establecidos para el año 1940 a través de la reconstrucción en campo de la ubicación de los mismos gracias a la fotografía oblicua de dicho año, permiten tener una buena confiabilidad de la estimación de las magnitudes correspondientes a área y volumen, considerando que dicha fotografía permite dar cuenta de una situación real y no tan aproximativa como en el caso de la definición de los límites como en el caso anterior.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la aplicación del Software especificado, se han podido determinar las siguientes magnitudes del glaciar correspondientes al año 1940:

$$\begin{aligned}\text{Área} &= 223\,109.92 \text{ m}^2 \\ \text{Volumen} &= 4\,787\,284.58 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Estimándose una confiabilidad de un 90% para el caso del área y de un 80% para el caso del volumen por las mismas razones explicadas para el caso anterior.

4.2.5 Los límites de 1982, estimación del área y del volumen correspondientes (fig. 4.5)

Los límites para 1982, definidos al igual que para el año 1940 a partir de una fotografía oblicua, presenta los mismos grados de confiabilidad ya que en ambos casos se ha realizado una identificación de puntos homólogos de la fotografía al terreno, lográndose así una reconstrucción muy próxima de los límites del glaciar para la fecha correspondiente.

Según los resultados obtenidos por el Software utilizado, se han determinado las siguientes magnitudes correspondientes a las condiciones del glaciar para el año 1982.

$$\text{Area} = 172\,601.58 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen} = 2\,844\,038.90 \text{ m}^3$$

Dadas las similares condiciones de cálculo con anterior caso (1940) se estiman los mismos grados de confiabilidad, teniendo que para el caso del area un 90% y de 80% para el caso del volumen.

4.2.6 La Evolución entre 1991 y 1996

El estudio de la evolución del glaciar a partir de la toma de datos se inició a partir del año 1991, con lo cual, los primeros registros morfométricos del glaciar a través de levantamientos topográficos aparecen al final de la primera temporada. Es así que a partir de dichas fechas se han ido realizando anualmente levantamientos topográficos, teniendo hasta ahora registros de los años 1992, 1993, 1994, 1995 y 1996.

Sin embargo tal como se mencionó anteriormente, estos trabajos no estuvieron realizados en principio bajo un mismo sistema referenciado y solamente a partir del año 1995 es donde se establece una poligonal base, siendo así que para el año 1996 se realiza la homologación de la poligonal base con el Sistema de Coordenadas Absolutas.

Gracias a un análisis realizado sobre dichas topografías (Bennehard,1997), se han logrado empalmar todas las anteriores topografías a este Sistema Absoluto, lo que permite tener noción de los cambios sufridos por el glaciar geoméricamente. Tomando en cuenta que algunas de las topografías no realizaron el total del contorno del glaciar, no se puede definir en forma exacta la magnitud de la superficie del glaciar en tales casos.

Sin embargo, analizando la tendencia que ha tenido el glaciar a través del tiempo, se ha realizado una posible interpretación de la forma que tuvo el glaciar para el año 1993 especialmente, año en el cual se realizó el levantamiento topográfico de la parte media a baja del glaciar y no así de la parte alta.

De acuerdo a ello y a partir de la información obtenida a través del software utilizado (AUTOCAD), se han determinado las siguientes magnitudes de areas:

Año	Area (m ²)
1992	103 787.55
1993	102 079.08
1994	94 806.11
1995	90 714.64
1996	82 133.64

Cuadro 4.2 : Superficie del Glaciar Chacaltaya

Por otra parte, en lo referente a las mediciones del frente del glaciar, éstas se realizaron desde cinco puntos de referencia a partir de lo cual se ha elaborado el Cuadro 4.2 donde se muestran dichas distancias así como el respectivo valor promedio para cada una de ellas.

Puntos	Instal.	12/92	12/93	10/94	9/95	12/96	12/97
P10	12/91	-5	-9.5	-12	-26.7	-42.4	-49.1
P7	12/91	-5	-9.1	-17	-34.3	-67.4	
P6	12/91	-5	-10.5	-14	-34.7		
P5	12/91	-6		-15.5			
P12/93	12/93		-0.5		-24.2		
PROM		-5.25	-9.7	-14.63	-31.9	-54.9	

Cuadro 4.3 : Distancia al Frente del Glaciar (m)

Se ha elaborado a su vez, el Cuadro 4.3 donde se muestran las distancias o retroceso del frente del glaciar correspondiente a la diferencia en dos medidas, lo que permite apreciar cuánto ha retrocedido el glaciar en cada año.

	91-92(12)	92-93(12)	93-94(11)	94-95(11)	95-96(15)	96-97 (12)
P10	-5	-4.5	-2.5	-14.7	-15.7	-6.7
P7	-5	-4.1	-7.9	-17.3	-33.1	
P6	-5	-5.5	-3.5	-20.7		
P5	-6					
PROM	-5.25	-4.7	-4.6	-17.6	-23	

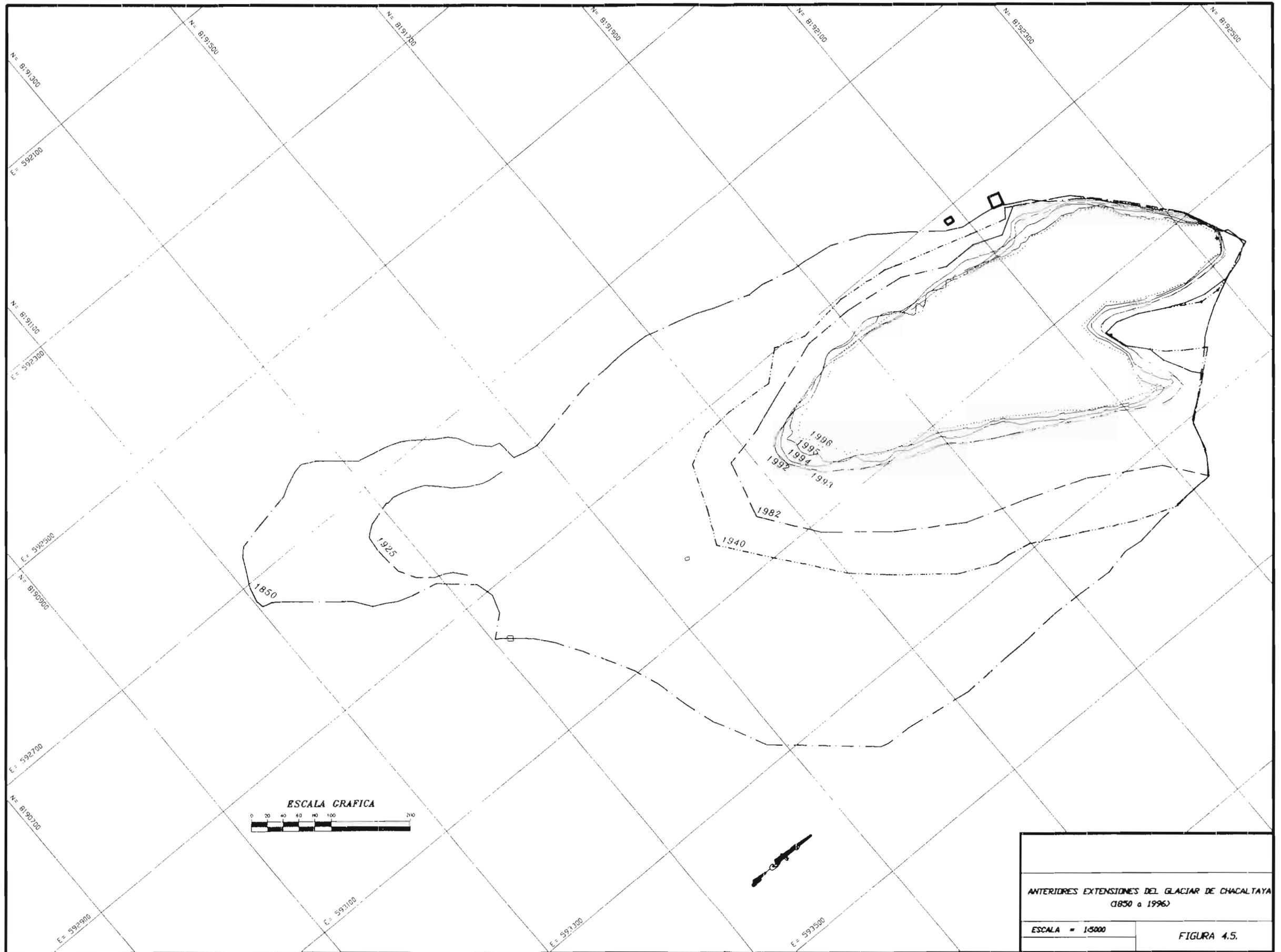
**Cuadro 4.4 : Diferencia entre 2 medidas
(n) = número de meses**

Del cuadro anterior, se puede observar que los tres primeros períodos el retroceso del frente del glaciar ha sido uniforme, sin embargo para el período 94-96, el retroceso ha sido notable ya que el mismo alcanzó algo más de 40 metros, lo que muestra una evolución acelerada.

4.3 Síntesis: evolución del glaciar de 1850 a 1996

4.3.1 Evolución de las superficies

Uno de los parámetros interesantes que nos permite apreciar la evolución del glaciar a través del tiempo, es precisamente la cuantificación de la superficie, siendo dicha técnica perteneciente al denominado "Método Topográfico" descrito anteriormente. Sin embargo, la sola observación y registro de las áreas del glaciar no permiten tener cuenta exacta de las cantidades de hielo que se pierde o se gana a en las diferentes épocas, lo cual si es posible a través de la cuantificación de volúmenes. Por otra parte, si bien se tiene esta deficiencia, la cuantificación de las áreas del glaciar es menos complicada en cuanto al trabajo de campo se refiere, ya que este proceso no requiere de grandes esfuerzos, pues puede ser suficiente con solamente la realización de un levantamiento topográfico del contorno del glaciar, o a través de la interpretación de fotografías aéreas.



ANTERIORES EXTENSIONES DEL GLACIAR DE CHACALTAYA
(1850 a 1996)

ESCALA = 15000

FIGURA 4.5.

Tal como se mencionó anteriormente, en el caso de Chacaltaya no se tiene un registro preciso sino hasta el año 1995 en que se establece una poligonal base a partir de la cual se tiene el parámetro de referencia de partida para las siguientes topografías y consecuentemente para la determinación de las áreas del glaciar para años posteriores. Sin embargo a través de la reconstrucción gráfica de las posibles posiciones que ocupaba el glaciar en diferentes años, se ha podido establecer con relativa precisión, las magnitudes de las superficies del glaciar desde el siglo pasado, desde el año 1850 aproximadamente.

Tomando en cuenta la evolución desde 1850 hasta nuestros días, se ha confeccionado una tabla que nos muestra dicha evolución y donde además se muestra una relación de las pérdidas en superficie expresada en porcentaje. Si bien existen intervalos de tiempo largos como en el caso del primer período comprendido entre 1850 a 1940 o de 1940 a 1982, el analizar estos valores en su conjunto permite tener una idea global del cambio que ha sufrido el glaciar en un período largo de tiempo. De esta manera, según el Cuadro 4.5 se observa que desde la denominada "Pequeña Edad de Hielo" hasta el año 1940 el cual se constituye en el dato inicial de los escenarios principales estudiados, el glaciar de Chacaltaya ha perdido alrededor de un 60%, y hasta el año 1982 la pérdida se incrementa hasta cerca de un 70%, teniendo finalmente que hasta nuestros días (1996-1997) la relación de pérdida alcanza hasta casi un 85% respecto a la magnitud inicial considerada desde la Pequeña Edad de Hielo.

Año	Area (m²)	%	Perdida %
1850	527 420.82	100.0	0.0
1940	223 109.92	42.3	57.7
1982	172 601.58	32.7	67.3
1992	103 787.55	19.7	80.3
1993	102 079.08	19.4	80.6
1994	94 806.11	18.0	82.0
1995	90 714.64	17.2	82.8
1996	82 133.02	15.6	84.4

Cuadro 4.5 : Evolución de la superficie de Chacaltaya desde 1850

Es importante sin embargo mencionar que éste análisis se constituye en un análisis global donde el período analizado es de alrededor de 146 años, es decir, cerca a un siglo y medio.

Así mismo, se ha confeccionado un gráfico que muestra esta evolución el cual permite apreciar objetivamente dicha evolución (figura 4.6).

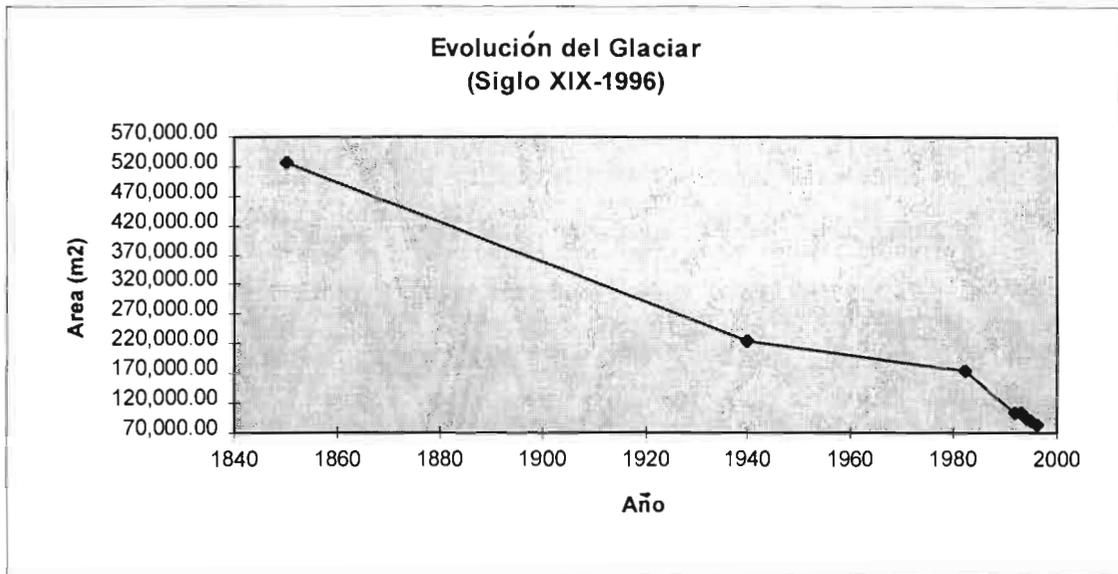


Figura. 4.6. Evolución del area del glaciar desde 1850

Se ha realizado el mismo procedimiento para los periodos más recientes : 1940-1996, 1982-1996 y 1992-1996 (cuadros 4.6, 4.7 y 4.8 ; figuras 4.7, 4.8. y 4.9).

Año	Area (m ²)	%	Perdida %
1940	223 109.92	100.0	0.0
1982	172 601.58	77.4	22.6
1992	103 787.55	46.5	53.5
1993	102 079.08	45.8	54.2
1994	94 806.11	42.5	57.5
1995	90 714.64	40.7	59.3
1996	82 133.02	36.8	63.2

Cuadro 4.6 : Evolución del Glaciar en el periodo 1940-1996

De esta manera se puede observar que desde 1940 (año de comparación) hasta 1982, es decir en 42 años, el glaciar ha perdido un 22% de su superficie original, y en 52 años (1940-1992) éste ha perdido un 53%. Finalmente en el período considerado para el primer escenario (56 años) el glaciar de Chacaltaya ha perdido hasta nuestros días un 63.2%.

En la figura 4.7 se puede apreciar en forma gráfica dicha evolución para el período comprendido entre 1940 y 1996.

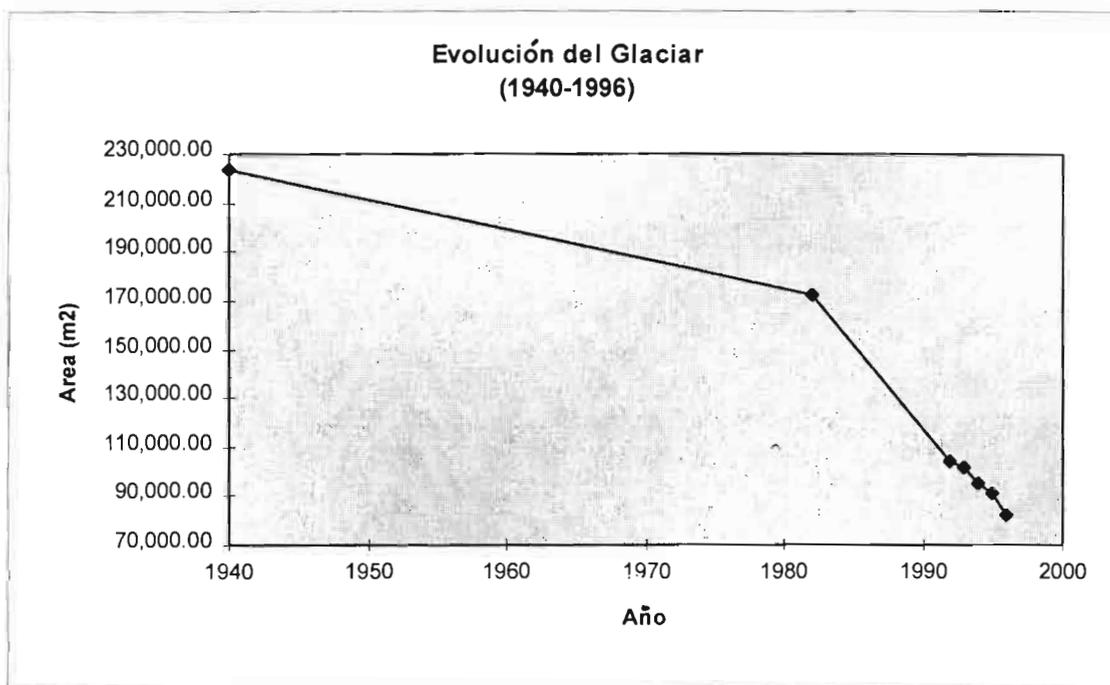


Figura 4.7. :Evolución del area del glaciar desde 1940

Año	Area (m ²)	%	Pérdida %
1982	172 601.58	100.0	0.0
1992	103 787.55	60.1	39.9
1993	102 079.08	59.1	40.9
1994	94 806.11	54.9	45.1
1995	90 714.64	52.6	47.4
1996	82 133.02	47.6	52.4

Cuadro 4.7 : Evolución del Glaciar en el periodo 1982-1996

En este cuadro se puede observar que en un período de tiempo de 10 años, el glaciar ha perdido alrededor de un 40% y para el período total de 14 años, es decir hasta nuestros días, Chacaltaya ha perdido alrededor de un 52%, lo cual nos muestra que en los últimos años se ha acelerado la pérdida en superficie del glaciar.

La figura 4.8 muestra la evolución correspondiente a esta evolución.

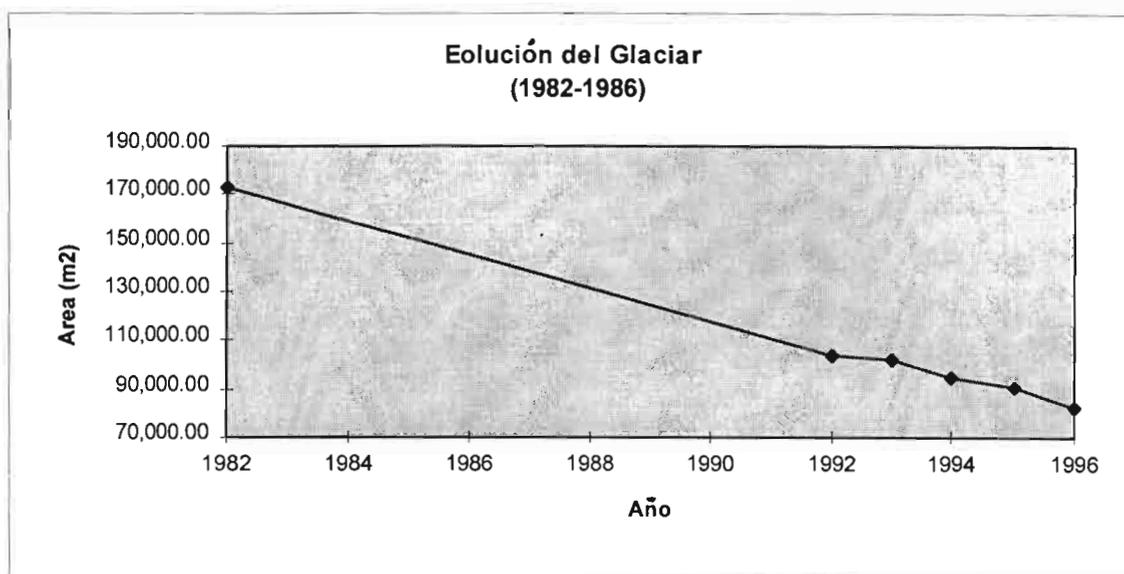


Figura 4.8. : Evolución del area del glaciar de 1982 a 1996

Para el período correspondiente a 1992-1996, el Glaciar de Chacaltaya sufre una evolución más homogénea, que se explica también por el hecho de contar con información a una escala menor de tiempo (1 año). Sin embargo, el no contar con un registro mas largo, solamente es posible proporcionar una posible tendencia pues para poder brindar un dato más preciso es necesario poder contar con observaciones de más años.

Los resultados obtenidos se expresan en el Cuadro 4.7 el cual muestra además la relación de pérdida de superficie en porcentaje para un periodo de análisis de 5 años.

Año	Area (m ²)	%	Perdida %
1992	103 787.55	100.0	0.0
1993	102 079.08	98.4	1.6
1994	94 806.11	91.3	8.7
1995	90 714.64	87.4	12.6
1996	82 133.02	79.1	20.9

Cuadro 4.8 : Evolución del Glaciar en el periodo 1992-1996

De este análisis se observa que en el transcurso de 5 años, tomando en cuenta como dato de comparación el correspondiente al año 1992, el glaciar de Chacaltaya ha perdido alrededor del 21% de su superficie, lo cual muestra que en los últimos años se ha acelerado el retroceso del glaciar.

En la figura 4.9 se muestra en forma gráfica dicha tendencia.

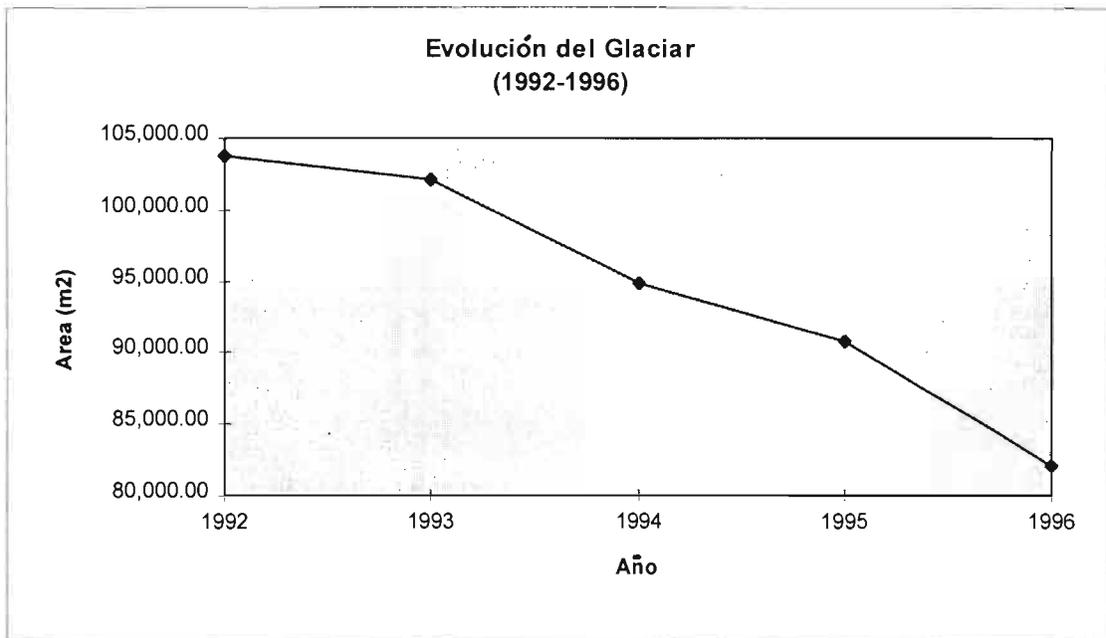


Fig. 4.9. Evolución del area del glaciar de 1992 a 1996

4.3.2 Pérdidas de volúmenes de hielo entre 1940 y 1996

Una otra información que permite conocer la evolución del glaciar corresponde al análisis de los volúmenes de la masa de hielo pertenecientes al glaciar. Para ello y de acuerdo a la metodología de cálculo de dichos volúmenes, explicada en los acápites anteriores, se ha realizado un análisis considerando en forma similar al caso de las áreas: un análisis global tomando en cuenta como dato de comparación el correspondiente a 1850, una primera evolución, con año origen en 1940, una segunda a partir de 1982 y una tercera con dato origen en 1993. Si bien se ha realizado la determinación de los volúmenes para los respectivos años los cuales cuentan con un dato de area, no se han utilizado los mismos en su totalidad, ya que de acuerdo al caso de estas areas, el glaciar de Chacaltaya tendría una tendencia a disminuir con el tiempo; aspecto que en algunos casos no se encuentra al analizar la serie de datos correspondientes a los volúmenes.

De acuerdo al análisis de cuantificación de volúmenes, se han obtenido los siguientes valores:

Año	Volumen (m ³)
1850	18 460 630.70
1940	4 787 284.58
1982	2 844 038.90
1992	766 767.04
1993	770 673.95
1994	761 399.18
1995	686 738.61
1996	703 071.52

Cuadro 4.9 : Volúmenes del Glaciar de Chacaltaya

Como se puede apreciar del cuadro anterior, existen valores que que discrepan respecto a la tendencia observada en el análisis de áreas. En tal sentido, se suprimieron los valores correspondientes a 1992 y a 1995 tomando en cuenta que si se tuviera que suprimir el año 1993 se tendría que suprimir también el año 1996 lo cual no tendría sentido ya que el mismo se constituye principalmente en el valor más preciso con el que actualmente se cuenta por haberse realizado un levantamiento topográfico a detalle. Es en tal sentido se decidió suprimir el año 1992 considerando que el mismo no cuenta con una topografía completa, es decir que la parte alta del glaciar no se encuentra bien definida y es precisamente en este sector donde se consideran los mayores espesores del glaciar. Consecuentemente, al suprimir el año 1992 se debe suprimir también el año 1995. De acuerdo a las anteriores consideraciones se realiza un primer análisis tomando en cuenta el total de la serie.

Los resultados obtenidos se expresan en el cuadro 4.9 en el cual se muestra de igual manera la relación de pérdida de volumen en porcentaje.

Año	Volumen (m ³)	%	Pérdida %
1850	18 460 638.70	100.00	0.00
1940	4 787 284.58	25.93	74.07
1982	2 844 038.90	15.41	84.59
1993	770 673.95	4.17	95.83
1994	761 399.18	4.12	95.88
1996	703 071.52	3.81	96.19

Cuadro 4.10 : Evolución de los volúmenes del Glaciar de Chacaltaya (1850-1996)

Del cuadro anterior se observa que en un lapso de tiempo de 90 años tomando en cuenta como dato de comparación el correspondiente a la pequeña edad de hielo, el glaciar de Chacaltaya ha tenido una pérdida en volumen de cerca del 74% y que hasta nuestros días, el mismo ha perdido alrededor del 96%; claro está en un período de casi siglo y medio.

En forma similar al análisis de la evolución del glaciar respecto a su superficie, se han establecido las tres evoluciones correspondientes a los períodos: de 1940 a 1996, de 1982 a 1996 y de 1993 a 1996.

Así mismo, en la figura 4.10 se muestra gráficamente la evolución que ha sufrido el Glaciar de Chacaltaya desde el siglo pasado hasta nuestros días.

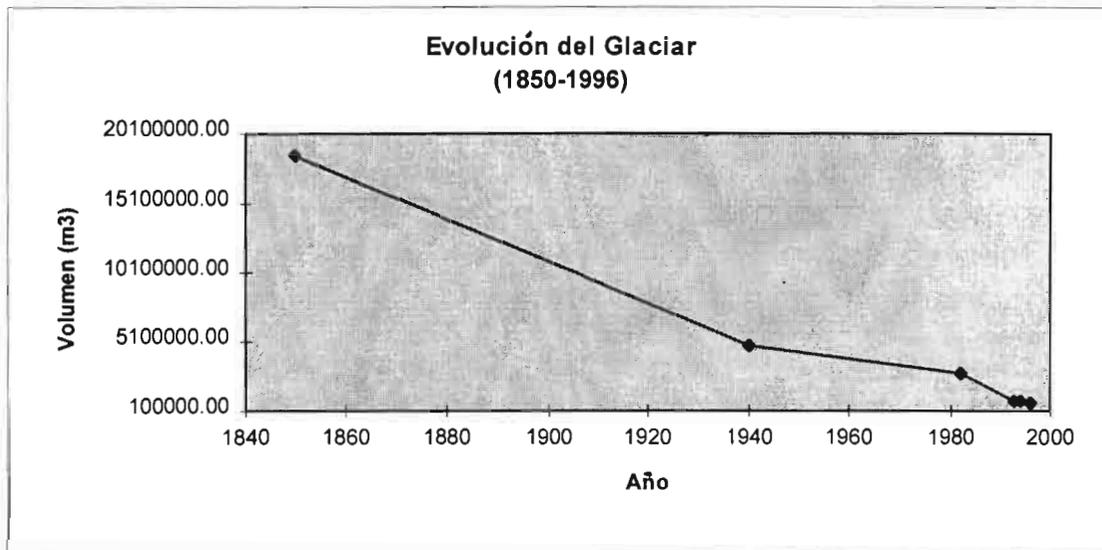


Figura 4.10. : Evolución del volumen del glaciar desde 1850

Para el período comprendido entre 1940 y 1996, se muestra el cuadro 4.11 a continuación.

Año	Volumen (m3)	%	Pérdida %
1940	4 787 284.58	100.00	0.00
1982	2 844 038.9	59.41	40.59
1993	770 673.95	16.10	83.90
1994	761 399.18	15.90	84.10
1996	703 071.52	14.69	85.31

Cuadro 4.11 : Evolución del volumen de Glaciar de Chacaltaya (1940-1996)

De acuerdo al cuadro anterior, se observa que en el lapso de 42 años desde 1940, el glaciar de Chacaltaya ha perdido en volumen alrededor del 40%. Luego, esta pérdida se ha ido incrementando y acelerando en los años siguientes, teniendo así que hasta nuestros días, en un lapso de 56 años, Chacaltaya ha tenido una pérdida en volumen de alrededor del 85%.

Así mismo, la figura 4.11 muestra en forma gráfica la tendencia de evolución del glaciar para este periodo considerado.

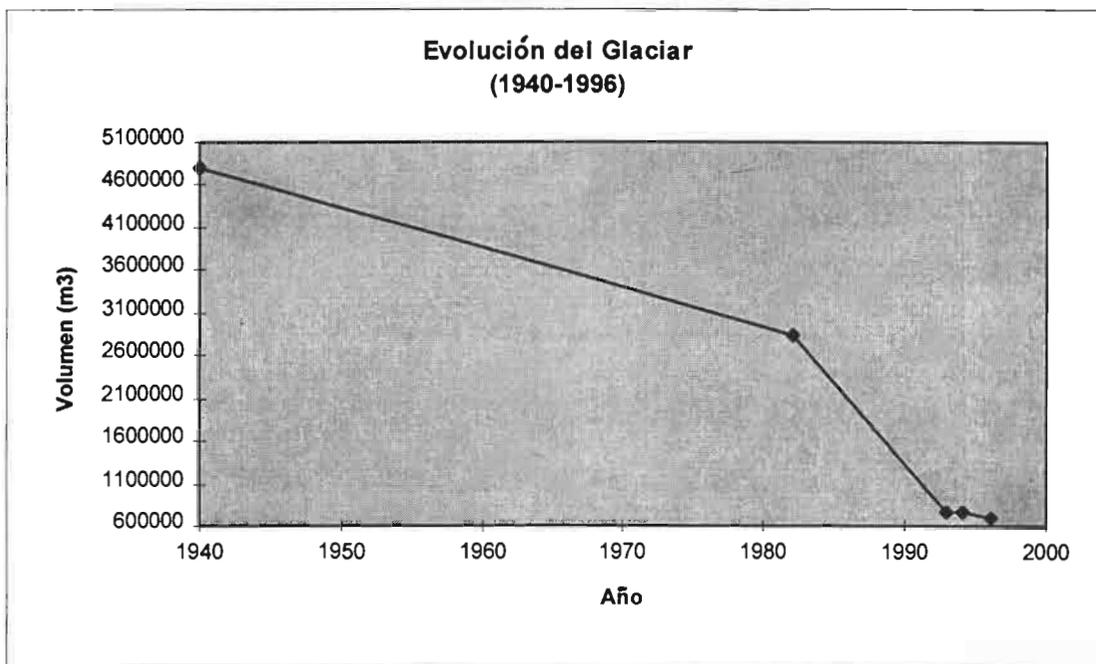


Figura 4.11. : Evolución del volumen del glaciar desde 1940

Tomando como año de referencia 1982, en un lapso de 11 años, el glaciar ha sufrido una pérdida en volumen de casi un 73%. Observándose que en los años posteriores hasta nuestros días, el glaciar ha perdido en volumen alrededor de un 75%.

Los resultados de este análisis son mejor comprendidos a través del cuadro 4.12 donde se encuentran los valores de volumen calculados para los distintos años estudiados, así como sus respectivas pérdidas expresadas en porcentaje.

Año	Volumen (m³)	%	Pérdida %
1982	2 844 038.9	100.00	0.00
1993	770 673.95	27.10	72.90
1994	761 399.18	26.77	73.23
1996	70 307.52	24.72	75.28

Cuadro 4.12 : Evolución del volumen del Glaciar de Chcalataya (1982-1996)

Con los datos del anterior cuadro se ha construido una curva la cual permite apreciar la tendencia de evolución del glaciar en función al parámetro volumen (figura 4.12).

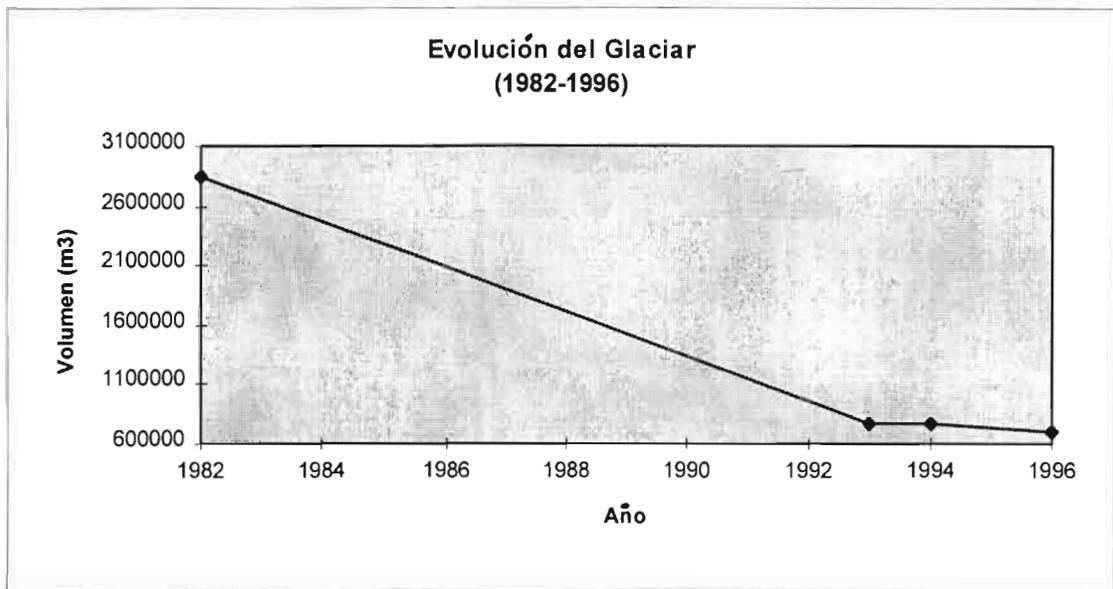


Figura 4.12. : Evolución del volumen del Glaciar de Chacaltaya desde 1940

Analizando el caso de los años más recientes 1993-1996, y bajo las consideraciones realizadas con la supresión de algunos datos no confiables, se han obtenido las respectivas pérdidas expresadas en porcentajes que se muestran en el cuadro 4.13.

Año	Volumen (m ³)	%	Pérdida %
1993	770 673.95	100.00	0.00
1994	761 399.18	98.80	1.20
1996	703 071.52	91.23	8.77

Cuadro 4.13 : Evolución del volumen del Glaciar de Chacaltaya de 1993 a 1996

La figura 4.13 muestra de forma gráfica la tendencia de evolución del volumen del glaciar correspondiente a este periodo.

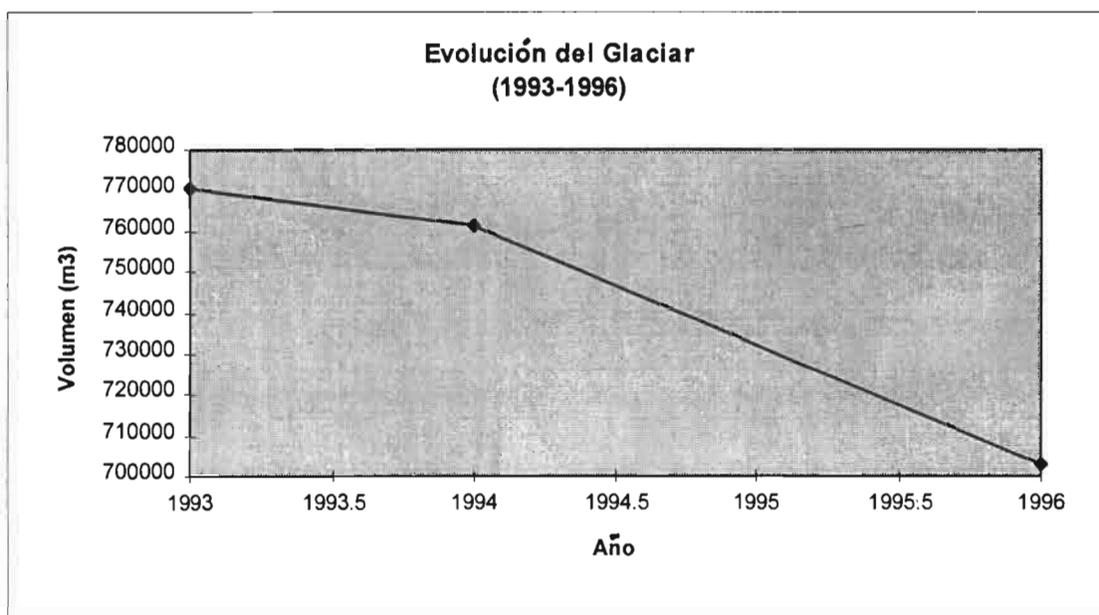


Fig. 4.13. Evolución del volumen del Glaciar de Chacaltaya de 1993 a 1996

4.4 Escenarios de evolución futura del glaciar considerando las pérdidas anteriores.

Se realiza a continuación un estudio sobre la evolución futura del Glaciar de Chacaltaya extrapolando las tendencias del mismo desde los años 1940. El hecho de que este glaciar se ha reducido mucho desde un siglo, y que no existe actualmente una zona de acumulación permanente, permite construir un modelo simple de evolución. Al no considerar que hay una transferencia de masa desde la parte alta del glaciar hacia la parte baja, se puede considerarlo como un tanque que se vacía o se llena de una cantidad de agua equivalente al balance.

Esta evolución simple es característica de los denominados *glaciers réservoirs* (Llibourtry, 1965).

Como parámetro de entrada del modelo, se utiliza el espesor máxima del glaciar obtenida por sísmica refracción (párrafo 4.5 del presente capítulo), y la pérdida de espesor (Δ_h) en función del tiempo, utilizando para calcular la misma la ecuación siguiente (cuadro 4.14) :

$$\Delta_h = \Delta_v / \Delta_s$$

donde :

Δ_h : pérdida de espesor entre 2 fechas

Δ_v y Δ_s , las pérdidas de volumen y de superficie entre las mismas fechas, respectivamente.

años (1)	Δ_s (2)	Δ_v (3)	Δ_h (4)	B_n (5)	$B_n we$ (6)
1940-1996	- 140 976.3	- 4 084 213.0	- 29.0	- 0.518	- 0.466
1940-1982	- 50 508.3	- 1 943 245.6	- 38.5	-0.917	- 0.825
1982-1996	- 90 468.6	- 2 140 967.4	- 23.7	- 1.693	- 1.524
1993-1996	- 19 946.1	- 67 602.4	- 3.39	- 1.130	- 1.017

1. evolución del glaciar entre la dso fechas

2. en m^2

3. en m^3

4. en metros

5. balance neto específico en m/año de hielo

6. balance neto específico en m/año de agua (con densidad del hielo = 0.9 g/cm^3).

Cuadro 4.13. Perdidas de area, de volumen, de espesor y balances netos correspondientes (1940-1996)

Se consideraron solamente los datos de 1940, 1993 y 1996, que tienen el mayor grado de confiabilidad. Basados sobre esos datos, se proponen 2 escenarios para el futuro de este glaciar (cuadro 4.15).

Escenarios	B_n (1)	Tiempo de permanencia del glaciar a partir de 1996 (2)	Fecha probable de extinción total del glaciar
Escenario 1 (1940-1996)	- 0.52	39	2035 AD.
Escenario 2 (1993-1996)	- 1.13	18	2014 AD

(1) balance neto específico (en m de hielo por año)

(2) en años, considerando la espesor máxima de 20 m determinada por sísmica refracción (capítulo 4.5).

Cuadro 4.15. Escenarios de evolución futura del Glaciar de Chacaltaya tomando en cuenta 2 tipos de balances

Por lo tanto, si se considera la serie total 1940-1996, este glaciar podría desaparecer totalmente en unos 40 años. Si se toma en consideración la aceleración reciente de la pérdida de volumen observada sobre este glaciar, comprobada por la mediciones directas mediante las balizas (serie 1991-1996, ver capítulo 3), el glaciar tendría que desaparecer en menos de 20 años. *Considerando los balances netos actualmente medidos, esta fecha correspondiente al año de 2014 para la desaparición total del glaciar, parece más probable.*

4.5 El desplazamiento de las balizas y la velocidad superficial del glaciar

Las balizas, al igual que en el caso de las mediciones de acumulación, son de gran utilidad para el conocimiento de la dimámica del glaciar en lo referente a su movimiento. Es decir que el glaciar no es estático sino más bien dinámico. La masa de hielo se desplaza hacia abajo

dejando a su paso ciertos rastros tales como estrías sobre la roca a consecuencia de la fricción entre partículas sólidas incrustadas en el hielo y el lecho rocoso (*bedrock*).

4.5.1 Metodología

La manera de cuantificar el desplazamiento del glaciar, parte de la instalación de balizas sobre las superficies del mismo en puntos representativos. Para el caso de Chacaltaya se ha dispuesto una red de balizas, de las cuales, las primeras que fueron colocadas, estuvieron dispuestas a lo largo de una línea en forma longitudinal sobre el lado derecho del glaciar.

La forma en que se mide el desplazamiento de dichas balizas, se realiza a partir de la determinación de su posición a diferentes épocas para luego definir la distancia existente entre los puntos P_0 y P_1 , los que corresponderían a la posición inicial y la posición final respectivamente. Ya que las balizas en su conjunto no se desplazan en forma homogénea ni en una misma dirección, la determinación de la posición de las mismas se realiza partiendo de la definición de un sistema de coordenadas lo que permite calcular a partir de geometría analítica básica (distancia entre dos puntos) la distancia de desplazamiento sufrida por cada baliza en particular. Esto llevado a la práctica, se traduce en definir previamente un sistema de coordenadas referenciado, que en nuestro caso corresponde al sistema de coordenadas absolutas (coordenadas UTM) establecida para el caso de Chacaltaya el año 1996 a partir de su referenciación realizada por el Instituto Geográfico Militar (IGM) con ayuda de Sistemas de Posicionamiento Global satelital (GPS).

De esta manera, definiendo la ubicación de las respectivas balizas a partir de un levantamiento topográfico al inicio de una temporada respecto a un sistema de coordenadas común y realizando este mismo levantamiento al final de la temporada, se tienen las dos posiciones anteriormente mencionadas a partir de lo cual se determina la distancia de desplazamiento correspondiente. Tomando en cuenta que los desplazamientos que se producen son muy pequeños (del orden de algunos centímetros solamente) es imprescindible la realización de levantamientos topográficos de precisión, ya que el tener errores de centímetros distorsionan notablemente este análisis.

Para facilitar el manejo de estos datos, para el caso de Chacaltaya una vez realizados los respectivos levantamientos, estos fueron introducidos a un software gráfico que para nuestro caso fue AutoCAD, el cual permite realizar en forma directa el cálculo de las distancias de desplazamiento.

Normalmente el período de tiempo entre medición y medición es de un año, estando por lo tanto expresadas las velocidades de las balizas en cm/año. Considerando que la incorporación de una poligonal base de apoyo para la realización de levantamientos topográficos referenciados a un origen común fué realizada en 1995, solamente se pueden determinar los desplazamientos correspondientes a partir del período siguiente, es decir, a partir de 1996.

Es así que el año 1996 se realizó en principio la referenciación de la poligonal base al sistema de coordenadas absolutas para posteriormente homologar las ubicaciones de las balizas, lo que permitió posteriormente el respectivo cálculo de los desplazamientos y las correspondientes velocidades.

A fin de poder conocer el comportamiento del glaciar a diferentes niveles, las balizas instaladas se encuentran dispuestas sobre las cotas: 5250, 5235, 5220, 5200, 5190, 5170 y 5150 respectivamente; este primer grupo de balizas referenciadas en el levantamiento topográfico de 1995 corresponden respectivamente a las balizas: 16B, 17A, 18B, 18, 19, 20 y 21 respectivamente, cuya ubicación se aprecia en la figura referente al Mapa de Velocidades medidas entre 1995 y 1996 (figura 4.14).

4.5.2. Los resultados

Una vez realizada la topografía de 1996 y homologada con la de 1995 se calcularon los desplazamientos respectivos de lo cual se obtuvieron los siguientes valores (cuadro 4.16 y figura 4.14).

Baliza No.	Altitud msnm	Desplazamiento cm/año
16B	5250	27.8
17A	5235	41.2
18B	5220	39.7
18	5200	25.9
19	5190	11.4
20	5170	26.3
21	5150	11.7

Cuadro 4.16 : Desplazamiento de 7 balizas (1995-1996)

Estas magnitudes se representan adicionalmente en forma gráfica (figura 4.14) a través de vectores de desplazamiento, lo cual permite tener una idea más objetiva de dichos movimientos a diferentes niveles del glaciar, es decir en la parte media-alta, media y baja.

Sin embargo como se puede apreciar en el gráfico respectivo, las balizas utilizadas solamente reflejan lo que ocurre en un solo lado del glaciar y no precisamente toda la extensión del glaciar, es decir que con las balizas iniciales no se tenía cuenta de lo que ocurría en la parte alta de la cuenca, es decir a partir de la cota 5250 aproximadamente hacia arriba.

Para salvar esta falencia, en 1996 al final de la temporada y durante la época de reemplazo de balizas, se adicionaron además un nuevo grupo de ellas tratando de abarcar tanto el lado izquierdo del glaciar como la parte alta del mismo. La disposición de las nuevas balizas se muestra de igual manera en la figura referente a la ubicación de balizas. Las nuevas balizas implementadas en 1996 corresponden a la: 16A, 16, N10, N4, 20D, 23, 24, 25 y 26 respectivamente. El año 1997 se han incorporado adicionalmente 4 nuevas balizas correspondientes a la: 17C, 19D, 20C y 21C. La determinación de las velocidades de desplazamiento del período 1996-1997 se encuentra aun en proceso de cálculo.

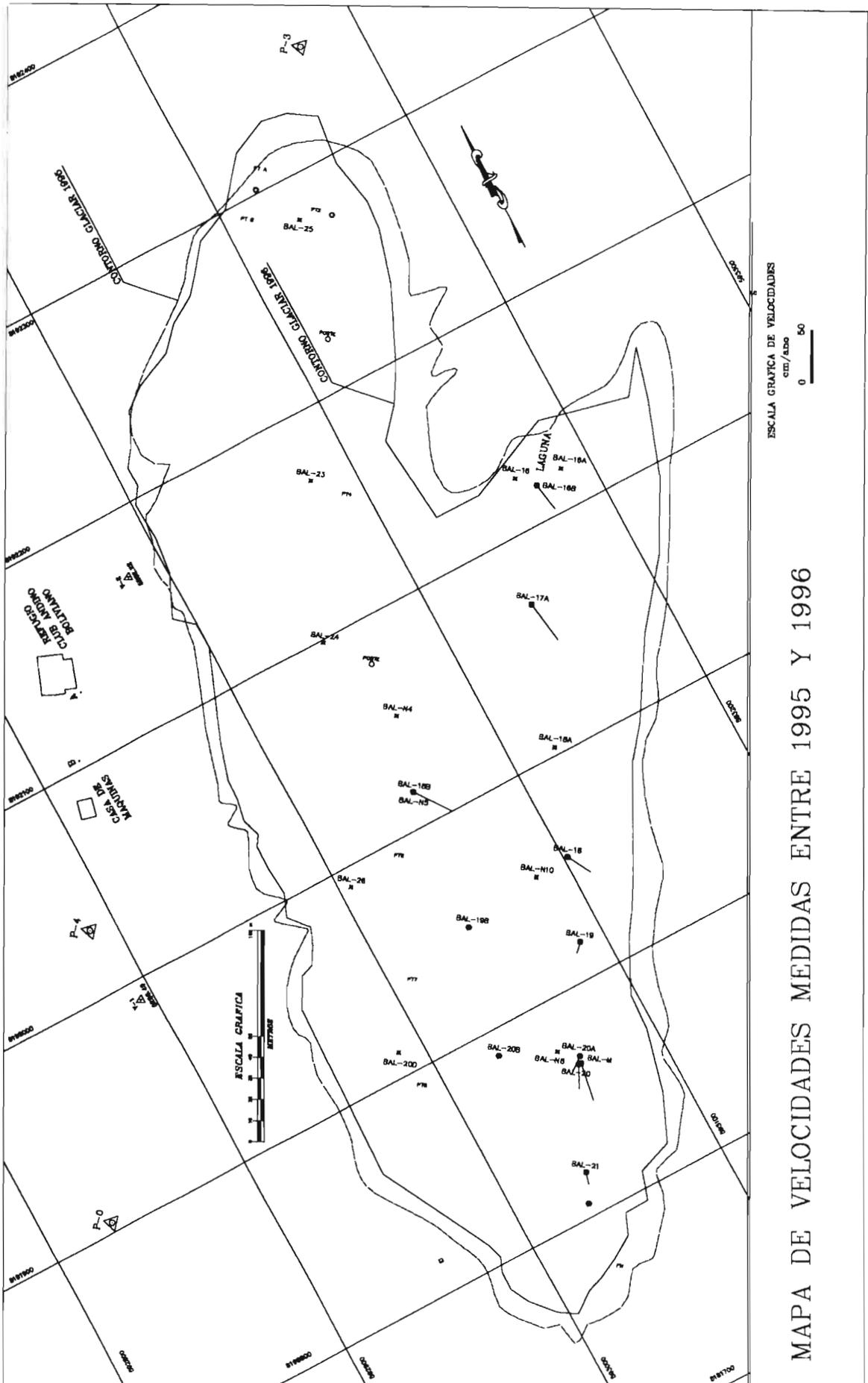


Figura 4.14. Mapa de velocidades de balizas, medidas entre 1995 y 1996

4.6 La determinación del espesor del glaciar por proyección geofísica.

4.6.1. Previos intentos

La determinación del espesor de un glaciar representa una información necesaria para caracterizar su estado y pronosticar su evolución en los años futuros. Esta información permite monitorear la evolución de la masa total de glaciar y evaluar el volumen de agua que contiene. Varios métodos existen, los mas corrientes siendo los métodos geofísicos : geo-electricidad, sísmica refracción, geo-radar.

En junio de 1995, con la colaboración de L.G.Thompson, se midieron los espesores del glaciar de Chacaltaya en su eje central con un radar de pulsación corta (*short-pulse radar*). Este radar, construido por el Byrd Polar Research Center consiste en un emisor que genera algunas centenas de voltos y cuenta con dos antenas idénticas para emitir y recibir la señal. Estas antenas son colocadas directamente sobre la superficie del hielo, separadas entre sí por 50 metros. El nivel de la señal siendo muy fuerte, es recibido por la antena receptora la cual está acoplada a un osciloscopio. El gráfico obtenido por dicho osciloscopio se fotografía sobre una película Polaroid. Este sistema proporciona normalmente resultados satisfactorios sobre los nevados donde ha sido utilizado previamente (con un 5% de error), ya que el espesor real pudo ser comprobado por la perforacion. En Chacaltaya, se han determinado a través de este método espesores de hielo muy importantes : un mínimo de 56 metros y un maximo de 90 metros en el eje central. Estos valores no guardan conformidad con la topografía del glaciar, ya que un corte a través del glaciar muestra que se tendría un lecho rocoso muy deprimido, lo que no parece realista (fig. 4.15).

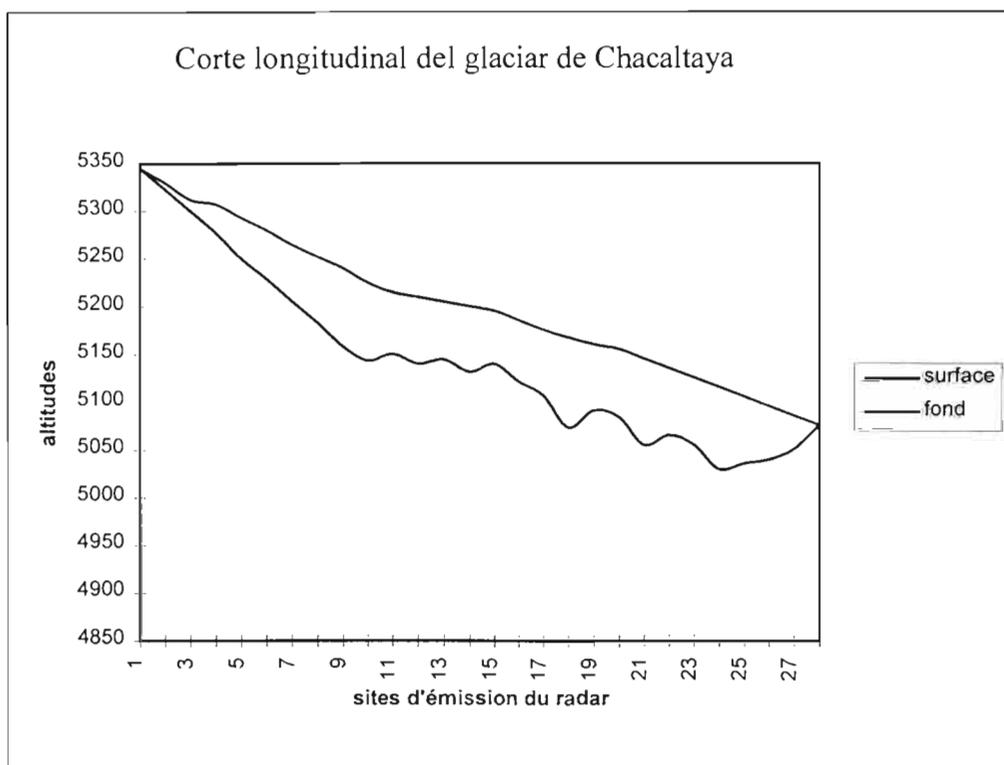


Figura 4.15. Corte del glaciar de Chacaltaya a partir de los datos del geo-radar.

Después de otro intento insatisfactorio con el método geo-eléctrico en 1996, se decidió en 1997 aplicar el método clásico de *sísmica refracción*.

4.6.2. *La sísmica refracción : las mediciones de junio de 1997*

Para dicha mediciones, se solicitó el apoyo del gabinete GEOSTUDI Servicios, una empresa especializada en estudios geofísicos en La Paz. Las mediciones tuvieron lugar durante los últimos días de mayo bajo la responsabilidad del Ing. Juan Larrea y con la participación de nuestro equipo. Cabe señalar que un primer ensayo también insatisfactorio había sido realizado en marzo del mismo año.

- Método y ubicación :

El método de refracción sísmica permite determinar el espesor de la capa superior en función a las velocidades producidas por una onda elástica artificialmente producida. Este método es especialmente valioso para reconocimientos en áreas cuya estructura tiene gran relieve y donde exista por lo menos una capa de referencia de alta velocidad cubierta por formaciones o capas de baja velocidad.

Para este propósito, se utilizó un cable de geófonos de 100 m de longitud, al que se conectaron once geófonos espaciados cada 10 m. Los puntos de explosión P.E. (*Shot Point*) se situaron a 40 m de los extremos de los geófonos terminales G2 y G7, en los cuales se colocaron 4 y 6 unidades de dinamita respectivamente con un concentrado del 80% (200 gr. de peso por unidad). Así mismo se ha ejecutado un tiro a punto de explosión en la parte media de los geófonos G6 y G7 (parte media del tendido de cable), con el propósito de determinar la velocidad de la capa o cubierta superficial. Este último disparo se ejecutó con 3 unidades de dinamita (80%). En el caso de los disparos extremos se ubicó la carga explosiva a 1.20 m de profundidad, es decir en contacto con el hielo, esto significó pasar la capa delgada de 0.70 m de espesor. Por ello, se hizo uso del perforador SIPRE. Para caso de los geófonos, se limitó a excavar la capa de nieve de 0.70-0.80 m. de espesor para colocarlos al contacto con el hielo subyacente.

La línea fue trazada sobre el eje central del glaciar, es decir 40 m. al oeste de la baliza 17 y 30 m. al oeste de la baliza 20, sobre una longitud total de 180 m., con un perfil de registro de 100 m. y 11 geófonos. Las cotas en los puntos de explosión Sur y Norte son de 5185 m y 5225 ms.n.m. respectivamente. La línea corresponde a la línea trazada por L.G. Thompson con el radar. Considerando la topografía superficial del glaciar, se espera un máximo de espesor sobre el eje longitudinal del glaciar que corresponde a su longitud máxima y que se caracteriza por una pequeña cresta sobresaliente de unos 5 a 10 m. de altura sobre la zona del sondeo. Este aspecto debe ser tomado en cuenta para la extrapolación de los espesores encontrados sobre esta línea a toda la superficie del glaciar.

- Equipos :

Se utilizó un equipo PS-10 Handy Seis Sismógrafo portable de OYO Corporation de 12 canales modelo 1170, con un blaster de alto voltaje modelo 1340. El registro fue realizado sobre película Kodak linagraph Standart tipo 1895 sensible a la luz de xenón.

- Métodos de interpretación :

Dos metodos han sido utilizados con el propósito de compatibilizar los resultados obtenidos.

1. *El método de Hagedoorn (Plus-Minus) y sus resultados :*

Este método asume un refractor o contacto horizontal con poca variación del relieve. Para este propósito se ha utilizado la siguiente ecuación :

$$Z_c = [(t_{ca} + t_{cb} - t_{AB})/2] [(V_1 * V_2) / \sqrt{(V_2^2 - V_1^2)}]$$

donde :

- tca y tcb son los tiempos de arribo de la señal a los geófonos para los puntos de explosión A y B, en nuestro caso P.E. 40 m. N = A.
- tAB intersección de los tiempos de viaje de las velocidades para los puntos de explosión A y B ; para este caso se promedia tAB = .00041 seg.
- V1 y V2 las velocidades de la capa superior y de la capa u horizonte de mayor velocidad o refractor Zc Valor obtenido del espesor o potencia de la cubierta o capa superficial obtenido en metros.

Los resultados obtenidos mediante este método determinan la profundidad al contacto y/o espesor de la capa de hielo entre los 10.20 m a 11.77 m según el cuadro 4.17, y 10.90 m según el cuadro 4.18.

Las velocidades consideradas (u) son :

- capa superficial : $u_s = 3030 - 3333 \text{ m s}^{-1}$
- capa refractante : $u_r = 5070 - 5000 \text{ m s}^{-1}$

Geof.No	tca	tcb	tAB	B1+C1-D1/	V1	V2	(V2-V1)	Zc=Prof.(m)
1	0.008	0.034	0.0406	0.0007	3030	5070	4064.97	2.65
2	0.011	0.033	0.0406	0.0017	3030	5070	4064.97	6.42
3	0.015	0.031	0.0406	0.0027	3030	5070	4064.97	10.20
4	0.017	0.028	0.0406	0.0022	3030	5070	4064.97	8.31
5	0.020	0.026	0.0406	0.0027	3030	5070	4064.97	10.20
6	0.020	0.025	0.0406	0.0022	3030	5070	4064.97	8.31
7	0.023	0.023	0.0406	0.0027	3030	5070	4064.97	10.20
8	0.028	0.022	0.0406	0.0047	3030	5070	4064.97	17.76
9	0.027	0.019	0.0406	0.0027	3030	5070	4064.97	10.20
10	0.029	0.017	0.0406	0.0027	3030	5070	4064.97	10.20
11	0.031	0.015	0.0406	0.0027	3030	5070	4064.97	10.20
12	0.033	0.010	0.0406	0.0012	3030	5070	4064.97	4.53

Cuadro 4.17 : Resultado de estudio de refracción sísmica (Método de Hagedoorn) para velocidades V1=3030 y V2=5070

Geof.No	tca	tcb	tAB	B1+C1-D1/	V1	V2	(V2-V1)	Zc=Prof.(m)
1	0.008	0.034	0.0406	0.0007	3333	5170	3952.22	3.05
2	0.011	0.033	0.0406	0.0017	3333	5170	3952.22	7.41
3	0.015	0.031	0.0406	0.0027	3333	5170	3952.22	11.77
4	0.017	0.028	0.0406	0.0022	3333	5170	3952.22	9.59
5	0.020	0.026	0.0406	0.0027	3333	5170	3952.22	11.77
6	0.020	0.025	0.0406	0.0022	3333	5170	3952.22	9.59
7	0.023	0.023	0.0406	0.0027	3333	5170	3952.22	11.77
8	0.028	0.022	0.0406	0.0047	3333	5170	3952.22	20.49
9	0.027	0.019	0.0406	0.0027	3333	5170	3952.22	11.77
10	0.029	0.017	0.0406	0.0027	3333	5170	3952.22	11.77
11	0.031	0.015	0.0406	0.0027	3333	5170	3952.22	11.77
12	0.033	0.010	0.0406	0.0012	3333	5170	3952.22	5.23

Cuadro 4.17 (Continuación): Resultado de estudio de refracción sísmica (Método de Hagedoorn) para velocidades V1=3333 y V2=5170

Geof.No	tca	tcb	tAB	B1+C1-D1/	V1	V2	(V2-V1)	Zc=Prof.(m)
1	0.008	0.034	0.041	0.0005	3030	5070	4064.97	1.89
2	0.011	0.033	0.041	0.0015	3030	5070	4064.97	5.67
3	0.015	0.031	0.041	0.0025	3030	5070	4064.97	9.45
4	0.017	0.028	0.041	0.0020	3030	5070	4064.97	7.56
5	0.020	0.026	0.041	0.0025	3030	5070	4064.97	9.45
6	0.020	0.025	0.041	0.0020	3030	5070	4064.97	7.56
7	0.023	0.023	0.041	0.0025	3030	5070	4064.97	9.45
8	0.028	0.022	0.041	0.0045	3030	5070	4064.97	17.01
9	0.027	0.019	0.041	0.0025	3030	5070	4064.97	9.45
10	0.029	0.017	0.041	0.0025	3030	5070	4064.97	9.45
11	0.031	0.015	0.041	0.0025	3030	5070	4064.97	9.45
12	0.033	0.010	0.041	0.0010	3030	5070	4064.97	3.78

Geof.No	tca	tcb	tAB	B1+C1-D1/	V1	V2	(V2-V1)	Zc=Prof.(m)
1	0.008	0.034	0.041	0.0005	3333	5170	3952.22	2.18
2	0.011	0.033	0.041	0.0015	3333	5170	3952.22	6.54
3	0.015	0.031	0.041	0.0025	3333	5170	3952.22	10.90
4	0.017	0.028	0.041	0.0020	3333	5170	3952.22	8.72
5	0.020	0.026	0.041	0.0025	3333	5170	3952.22	10.90
6	0.020	0.025	0.041	0.0020	3333	5170	3952.22	8.72
7	0.023	0.023	0.041	0.0025	3333	5170	3952.22	10.90
8	0.028	0.022	0.041	0.0045	3333	5170	3952.22	19.62
9	0.027	0.019	0.041	0.0025	3333	5170	3952.22	10.90
10	0.029	0.017	0.041	0.0025	3333	5170	3952.22	10.90
11	0.031	0.015	0.041	0.0025	3333	5170	3952.22	10.90
12	0.033	0.010	0.041	0.0010	3333	5170	3952.22	4.36

Cuadro 4.18 : Resultado de estudio de refracción sísmica (Método de Hagedoorn)

Geof.No	tca	tcb	tAB	B1+C1-D1/	V1	V2	(V2-V1)	Zc=Prof.(m)
1	0.008	0.034	0.0405	0.0008	2916	5000	4061.64	2.69
2	0.011	0.033	0.0405	0.0018	2916	5000	4061.64	6.28
3	0.015	0.031	0.0405	0.0028	2916	5000	4061.64	9.87
4	0.017	0.028	0.0405	0.0023	2916	5000	4061.64	8.08
5	0.020	0.026	0.0405	0.0028	2916	5000	4061.64	9.87
6	0.020	0.025	0.0405	0.0023	2916	5000	4061.64	8.08
7	0.023	0.023	0.0405	0.0028	2916	5000	4061.64	9.87
8	0.028	0.022	0.0405	0.0048	2916	5000	4061.64	17.05
9	0.027	0.019	0.0405	0.0028	2916	5000	4061.64	9.87
10	0.029	0.017	0.0405	0.0028	2916	5000	4061.64	9.87
11	0.031	0.015	0.0405	0.0028	2916	5000	4061.64	9.87
12	0.033	0.010	0.0405	0.0013	2916	5000	4061.64	4.49

Cuadro 4.18 (Continuación): Resultado de estudio de refracción sísmica (Método de Hagedoorn)

2. El método Barthelmes y sus resultados :

Este método consiste esencialmente en calcular gráficamente los tiempos de retardo para cada geófono y tratando las variaciones de tiempos de retardo como resultados de las variaciones en la profundidad del refractor. Si las profundidades al punto de tiro y detector no son iguales, a causa de cualquier inclinación o cambios de elevación, el tiempo t para que la onda viaje del punto de tiro al detector bajo la distancia crítica, para el caso de dos capas está dado por la siguiente ecuación :

$$t = [(x / V2) + (Zs \cos i) / V1 + (Zd \cos i) / V1] \cos Q$$

donde :

x = distancia horizontal del punto de tiro al detector (geófono)

$V1$ = velocidad sísmica de la capa superior

$V2$ = velocidad sísmica en la capa mas baja

Zs = profundidad al contacto debajo el punto de explosión

Zd = profundidad debajo el detector

i = ángulo de incidencia crítica

Q = ángulo de inclinación de la interfase o contacto.

Este método asume una variación de la capa refractante con inclinación de hasta 25° como máximo. En este caso, para el cálculo de las profundidades y/o espesor de la capa de hielo se ha efectuado el cálculo por separado a los puntos de explosión Norte y Sur. El promedio de estos determina las siguientes profundidades :

Velocidades :

capa superficial : 2916 - 3030 m s⁻¹
 capa refractante : 5070 m s⁻¹

Espesor de la capa de hielo Z_d = 10.55 m. - 12.55 m.

Para profundidades en los puntos de tiro Z_{s-1} = 8.8 m. y 10.6 m (cuadro 4.19).

P.E. Punto de Explosión = 40 m. Norte

Geof.No	X(m)	t(seg)	COS ic	COS Q=15°	V1	V2	Zs-1	Zd=Prof.(m)
1	30	0.008	0.80177	0.965926	3030	5070	8.8	0.138
2	40	0.011	0.80177	0.965926	3030	5070	8.8	4.421
3	50	0.015	0.80177	0.965926	3030	5070	8.8	12.617
4	60	0.017	0.80177	0.965926	3030	5070	8.8	12.988
5	70	0.020	0.80177	0.965926	3030	5070	8.8	17.272
6	80	0.020	0.80177	0.965926	3030	5070	8.8	9.818
7	90	0.023	0.80177	0.965926	3030	5070	8.8	14.101
8	100	0.028	0.80177	0.965926	3030	5070	8.8	26.209
9	110	0.027	0.80177	0.965926	3030	5070	8.8	14.843
10	120	0.029	0.80177	0.965926	3030	5070	8.8	15.214
11	130	0.031	0.80177	0.965926	3030	5070	8.8	15.585
12	140	0.033	0.80177	0.965926	3030	5070	8.8	15.956

P.E. Punto de Explosión = 40 m. Sur

Geof.No	X(m)	t(seg)	COS ic	COS Q=15°	V1	V2	Zs-1	Zd=Prof.(m)
1	150	0.0340	0.823501	0.965926	2916	5140	10.6	10.70
2	140	0.0330	0.823501	0.965926	2916	5140	10.6	13.93
3	130	0.0310	0.818049	0.965926	2916	5070	10.6	12.40
4	120	0.0280	0.818049	0.965926	2916	5070	10.6	8.36
5	110	0.0260	0.818049	0.965926	2916	5070	10.6	8.01
6	100	0.0250	0.818049	0.965926	2916	5070	10.6	11.35
7	90	0.0230	0.818049	0.965926	2916	5070	10.6	11.00
8	80	0.0220	0.818049	0.965926	2916	5070	10.6	14.34
9	70	0.0190	0.818049	0.965926	2916	5070	10.6	10.30
10	60	0.0170	0.818049	0.965926	2916	5070	10.6	9.95
11	50	0.0150	0.818049	0.965926	2916	5070	10.6	9.60
12	40	0.0130	0.818049	0.965926	2916	5070	10.6	9.25

Cuadro 4.19 : Resultados del Método de Barthelmes (Perfil P-2)

	Prof.-Norte (m)	Prof.-Sur (m)	Prof. Total (m)
Geof.-2	4.421	13.93	9.17
Geof.-3	12.617	12.40	12.51
Geof.-4	12.988	8.36	10.67
Geof.-5	17.272	8.01	12.64
Geof.-6	9.818	11.35	10.58
Geof.-7	14.101	11.00	12.55
Geof.-8	26.209	14.34	20.28
Geof.-9	14.843	10.30	12.57
Geof.-10	15.214	9.95	12.58
Geof.-11	15.585	9.60	12.59

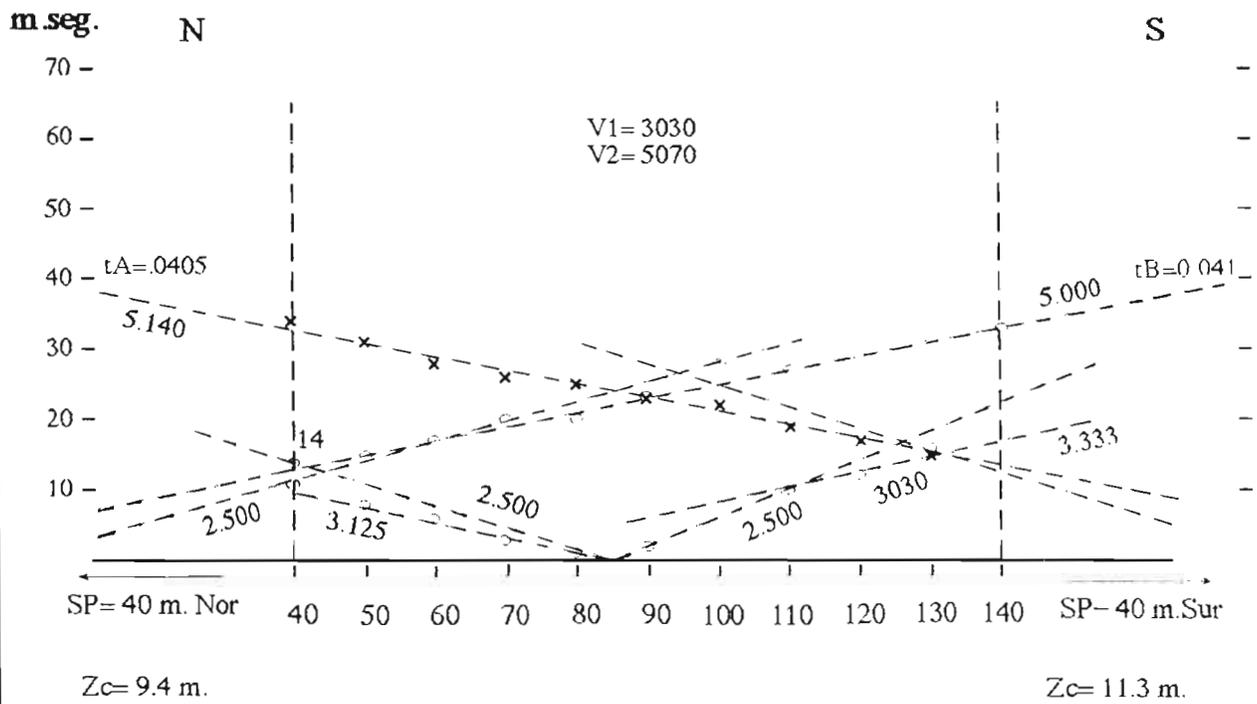
Cuadro 4.19 (Continuación): Resultados del Método de Barthelmes (Perfil P-2)

Se debe observar un sector de mayor profundidad que ha sido registrado mediante el geófono G8, con un valor de 19.0 M. a 20.0 m.

Para el cálculo de velocidades y profundidades en los puntos de explosión, se han utilizado los programas LNFT BAS, que están basados en las velocidades del refractor y capa superficial.

La figura 4.16 presenta el gráfico tiempo-distancia, con las velocidades V1 y V2. En este gráfico, se muestra los valores para los puntos de explosión P.E. = 40 m. N, y P.E.=40 m. S así como las velocidades obtenidas mediante el programa LNFT BAS.

Proyecto Nev. Chacaltaya Gráfico Tiempo-Distancia



Escalas: Hz. 1: 1000
 Vr. 1cm. = 10 ms.

Figura 4.16 : Gráfico Tiempo-Distancia para las velocidades V1 y V2

Estos resultados determinan para los puntos de explosión Norte y Sur las siguientes valores :

P.E.N. = 9.4 m.

P.E.S. = 11.3 m.

Estos datos se han utilizado para el procesamiento de datos con el método Barthelmes, donde se obtienen valores para la interfase entre los 10 y 14 m. (cuadro 4.19) En ángulo « Q » de la pendiente considerada en este análisis es de 15°.

Un segundo análisis determina valores mínimos de profundidad para velocidades comprendidas entre 3030 m s⁻¹ y 2916 m s⁻¹ de la capa superficial, donde se obtienen como resultados los siguientes valores :

P.E. N. = 8.8 m.

P.E. S. = 10.6 m.

P.E. Punto de Explosión = 40 m. Norte

Geof.No	X(m)	t(seg)	COS ic	COS Q=15°	V1	V2	Zs-1	Zd=Prof.(m)
1	30	0.008	0.80177	0.965926	3030	5070	9.4	-0.462
2	40	0.011	0.80177	0.965926	3030	5070	9.4	3.821
3	50	0.015	0.80177	0.965926	3030	5070	9.4	12.017
4	60	0.017	0.80177	0.965926	3030	5070	9.4	12.388
5	70	0.020	0.80177	0.965926	3030	5070	9.4	16.672
6	80	0.020	0.80177	0.965926	3030	5070	9.4	9.218
7	90	0.023	0.80177	0.965926	3030	5070	9.4	13.501
8	100	0.028	0.80177	0.965926	3030	5070	9.4	25.609
9	110	0.027	0.80177	0.965926	3030	5070	9.4	14.243
10	120	0.029	0.80177	0.965926	3030	5070	9.4	14.614
11	130	0.031	0.80177	0.965926	3030	5070	9.4	14.985
12	140	0.033	0.80177	0.965926	3030	5070	9.4	15.356

P.E. Punto de Explosión = 40 m. Sur

Geof.No	X(m)	t(seg)	COS ic	COS Q=15°	V1	V2	Zs-1	Zd=Prof.(m)
1	150	0.0340	0.80177	0.965926	3030	5070	11.3	9.91
2	140	0.0330	0.80177	0.965926	3030	5070	11.3	13.46
3	130	0.0310	0.80177	0.965926	3030	5070	11.3	13.09
4	120	0.0280	0.80177	0.965926	3030	5070	11.3	8.80
5	110	0.0260	0.80177	0.965926	3030	5070	11.3	8.43
6	100	0.0250	0.80177	0.965926	3030	5070	11.3	11.97
7	90	0.0230	0.80177	0.965926	3030	5070	11.3	11.60
8	80	0.0220	0.80177	0.965926	3030	5070	11.3	15.14
9	70	0.0190	0.80177	0.965926	3030	5070	11.3	10.86
10	60	0.0170	0.80177	0.965926	3030	5070	11.3	10.49
11	50	0.0150	0.80177	0.965926	3030	5070	11.3	10.12
12	40	0.0130	0.80177	0.965926	3030	5070	11.3	9.75

Cuadro 4.20 : Resultados del Método de Barthelmes (Perfil P-2)

	Prof.-Norte (m)	Prof.-Sur (m)	Prof. Total (m)
Geof.-2	3.82	13.46	8.64
Geof.-3	12.02	13.09	12.55
Geof.-4	12.39	8.80	10.59
Geof.-5	16.67	8.43	12.55
Geof.-6	9.22	11.97	10.59
Geof.-7	13.50	11.60	12.55
Geof.-8	25.61	15.14	20.37
Geof.-9	14.24	10.86	12.55
Geof.-10	14.61	10.49	12.55
Geof.-11	14.98	10.12	12.55

Cuadro 4.20 (Continuación): Resultados del Método de Barthelmes (Perfil P-2)

La velocidad de 2916 m s^{-1} que es un promedio de la velocidades de $2500 + 3333$ obtenida de la dromocrona del gráfico (fig . 4.16).

Las profundidades determinadas al contacto con rocas paleozoicas son de 10.0 m. a 12.0 m. con una depresión del paleorelieve en el sector de 20.30 m registrado según geofono G.8.

La sección sísmica obtenida muestra una relacion de los valores de profundidad determinados que se encuentran entre los 10.70 m. a 12.60 m. con una depresión del relieve registrado según el geófono G.8, hasta una profundidad de 20.30 m (fig. 4.17). La sección sísmica obtenida muestra una relación de los valores de profundidad determinados que se encuentran entre los 10.20 m. a 11.70 m según el método de Plus-Minus, y de 10.60 m.a 12.55 m. según el método de Barthelmes.

4.6.3 Extrapolación de los resultados de la sísmica refracción a todo el glaciar

Siendo el tamaño del glaciar insuficiente para trazar líneas transversas, se deben extrapolar los espesores promedio del glaciar a partir de esta única línea. Es posible encontrar una solución realista con este método, ya que el lecho rocoso del glaciar no parece muy compejo.

Considerando la variación de la topografía de la superficie, se propone un pequeño modelo de 3 espesores (fig. 4.18).

- una zona central corespondiente al eje longitudinal mayor del glaciar con un promedio de 20 m de profundidad ;
- una aureola de 15 a 30 m. siguiendo el bordo del glaciar donde la espesor promedio alcanza 5 m. ;

- una zona de mayor superficie entre las dos zonas precedentes donde el espesor promedio está en conformidad con lo medido sobre la línea de sismica refracción, es decir 10 m.

Obviamente, este modelo admite una incertidumbre notable, pero el mismo no parece superar un 10 a 15 %. Un intento para comprobar las espesores de hielo encontradas por sismica refracción fue hecho cuando se realizó el cambio de balizas en agosto 1997. A nivel de la baliza 21, el bedrock fue alcanzado con la sonda al vapor a un poco más de 10 metros de profundidad. Tratándose de la única prueba, se ha previsto para junio 1998 realizar un nuevo intento con otro radar, lo cual permitirá contar con otras líneas para obtener una imagen más precisa del bedrock de este glaciar.

El cálculo del volumen del glaciar y el método correspondiente han sido presentados en los capítulos 4.1 a 4.3..

La figura 4.19. presenta un modelo tridimensional del bedrock del glaciar derivado del sondeo geofísico.

4.7. Conclusión del capítulo 4.

A pesar del trabajo efectuado, principalmente desde 1996, algunas incertidumbres persisten y necesitan aún mediciones adicionales :

- una estimación de los volúmenes perdidos entre 1963 y 1996 podrá ser efectuada mediante el método de restitución fotogramétrica (trabajo en curso en Düsseldorf efectuado por uno de los autores) ;
- otros sondeos geofísicos son necesarios para confirmar los resultados de la sismica refracción y precisar la topografía del bedrock, una campaña para la medición con radar será efectuada en 1998 ;
- la próxima medición del desplazamiento de balizas, utilizando la red ampliada de 1996, permitirá proporcionar una imagen más completa de la velocidad superficial del glaciar.

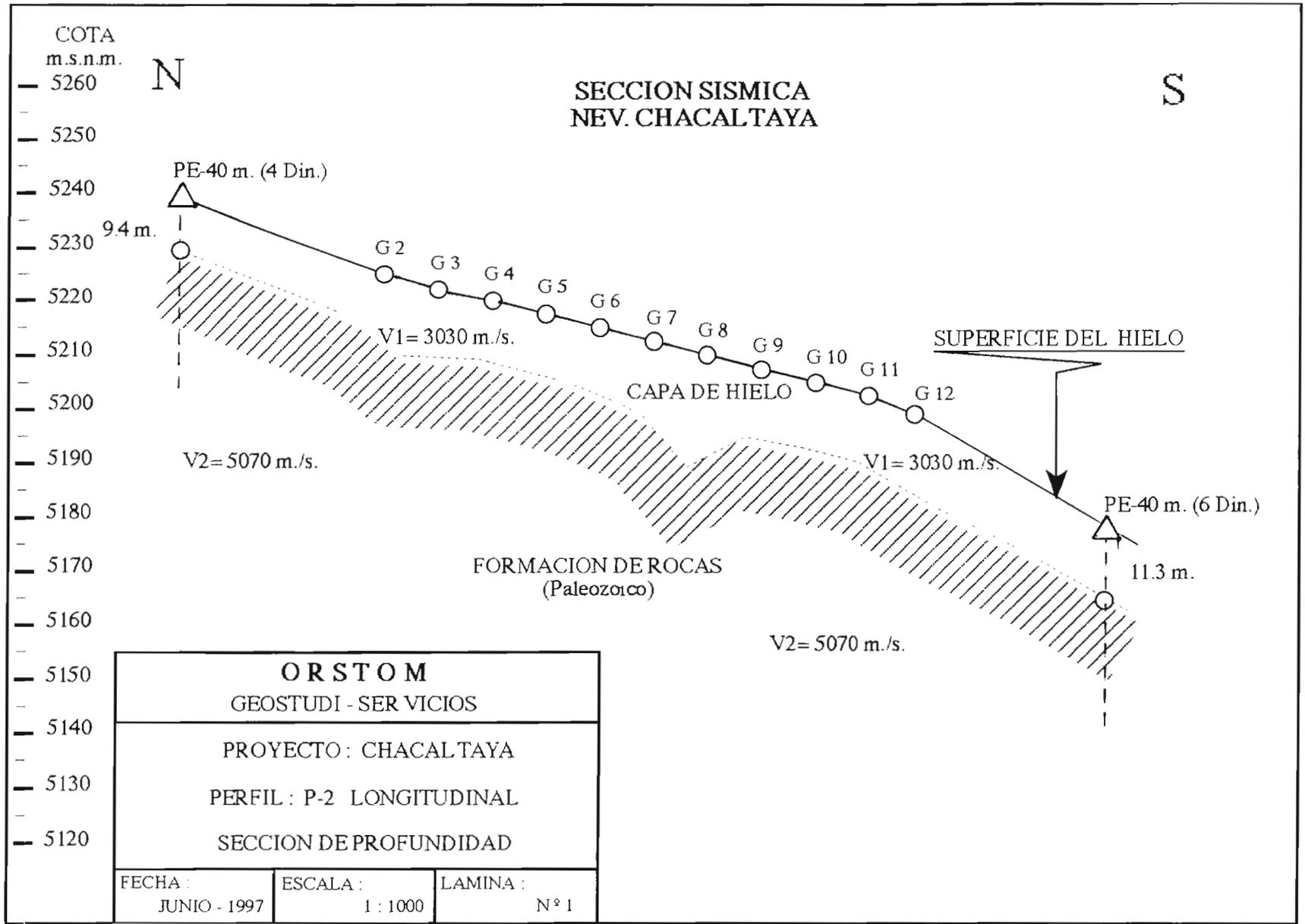


Figura 4.17: Perfil Longitudinal del Galciar de Chacaltaya según el estudio de sísmica-refracción

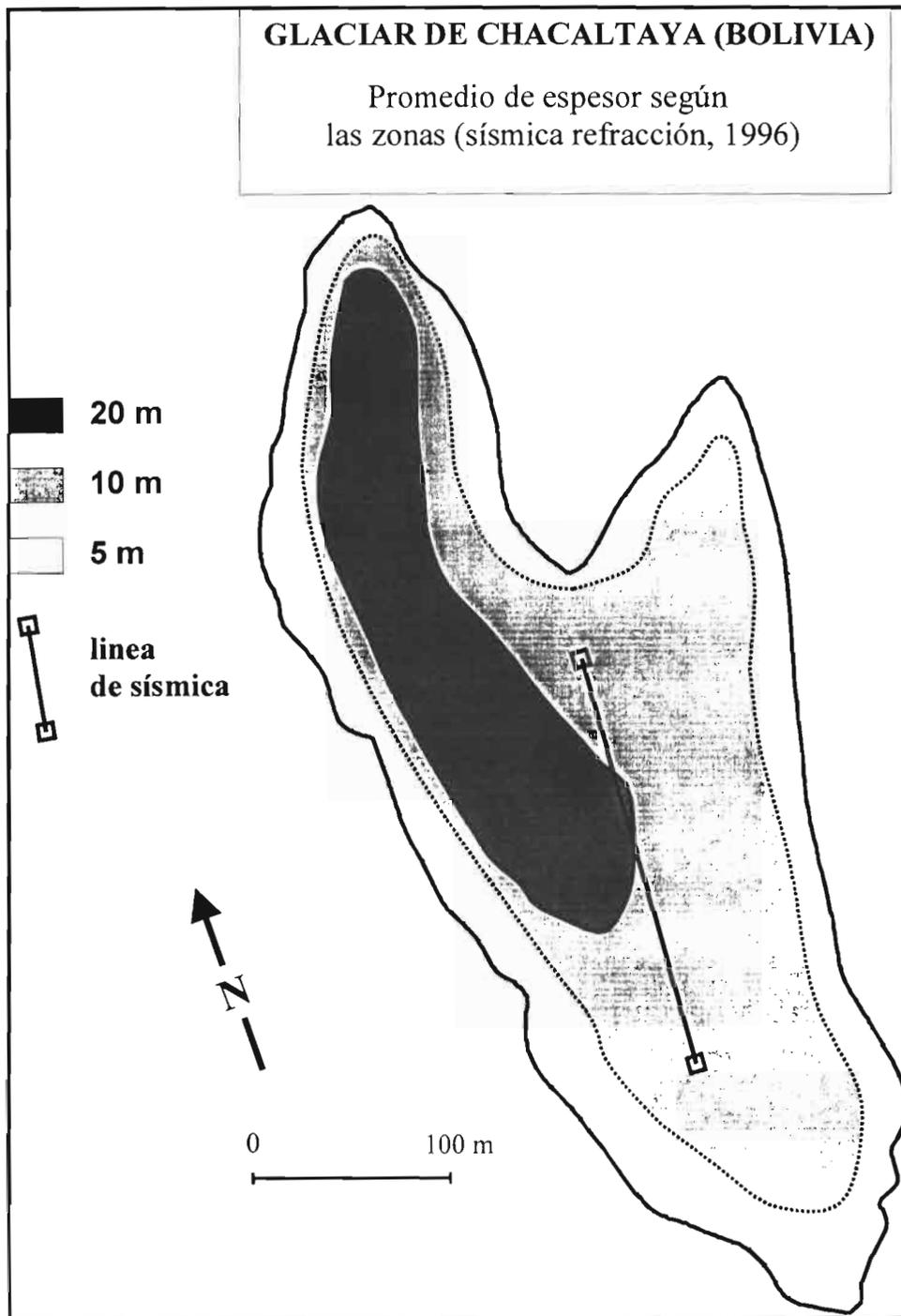


Figura 4.18. Zonas de igual espesor promedio en el Glaciar de Chacaltaya

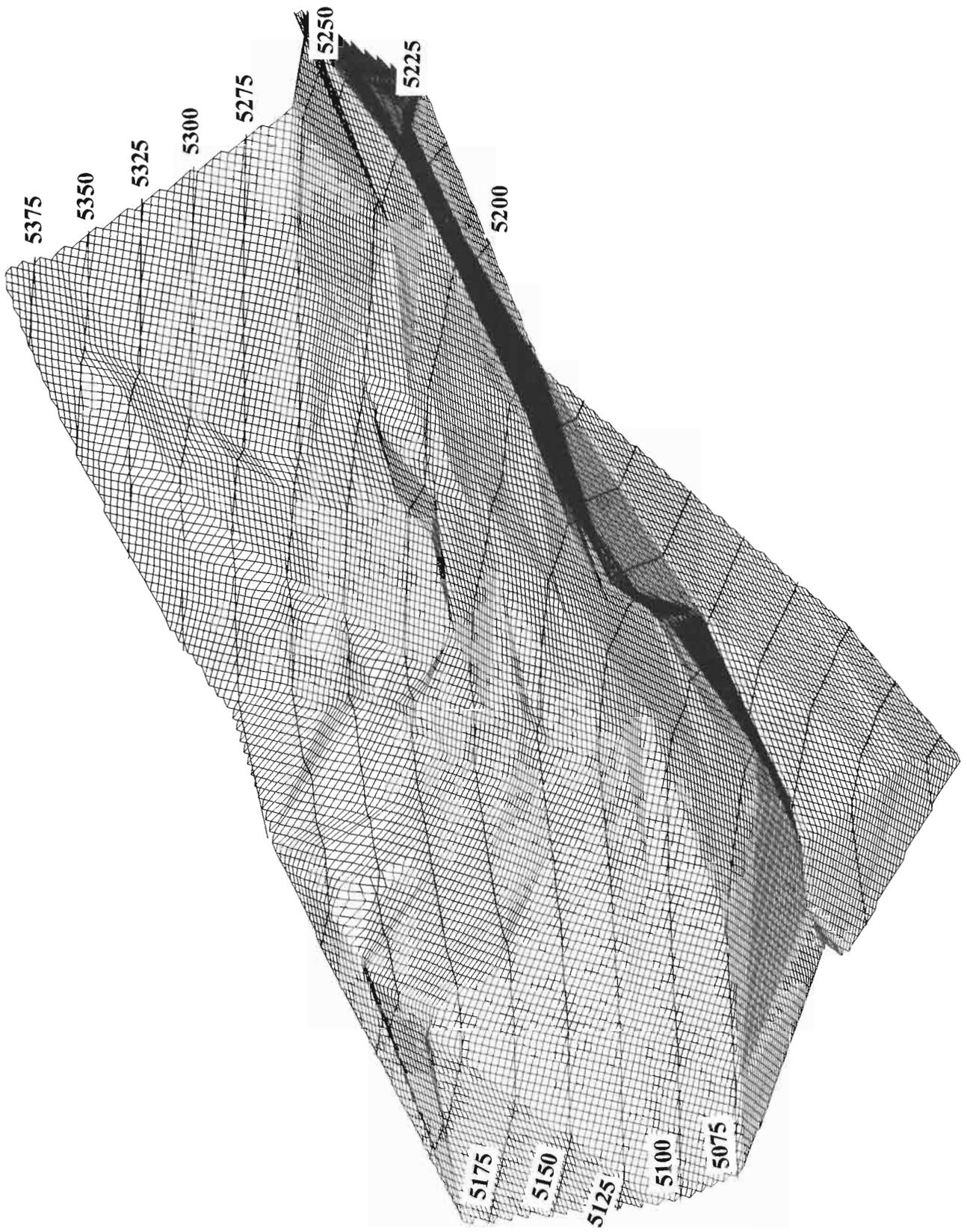


Figura 4.19 : Modelo Numérico de Terreno del lecho del glaciar de Chacaltaya

5. DATOS METEOROLOGICOS DEL OBSERVATORIO DE CHACALTAYA.

5.1. Historial e instrumentación de la estación Chacaltaya

En septiembre de 1942, se instaló sobre el nevado de Chacaltaya una de las estaciones de la red meteorológica a cargo del Dr. Ismael Escobar, la cual estando en dependencia del Laboratorio de Física de la Universidad Mayor de San Andrés fué equipada con el material básico para la medición de : Precipitación, temperaturas, humedad relativa y viento (dirección y velocidad). Solamente la precipitación y la temperatura fueron monitoreadas a largo plazo en condiciones de confiabilidad relativa.

La estación se encuentra sobre el parking del Observatorio ubicado a 16°19'S, 68°10' y 5240 msnm. El termógrafo semanal de marca THIES está ubicado en un abrigo meteorológico de madera pintado de blanco cuyas dimensiones son: 102x102x66cm, incluyendo 2 termómetros de alcohol y mercurio para la medición de la máxima y la mínima.

La precipitación se colecta en un pluviómetro clásico de 314 cm² de boca ubicado a 150 cm del suelo. Este pluviómetro es medido diariamente mediante una probeta interna al pluviómetro, la cual colecta el agua precipitada. Dicha probeta tiene las siguientes dimensiones: diámetro 6 cm y altura 21cm.

En agosto de 1993, se instaló un pluviómetro totalizador de gran capacidad (200 l) de 2000 cm³ de abertura denominado P7, del mismo tipo de los que el programa utilizan en Bolivia, Perú y Ecuador. Un otro totalizador, denominado P6, se instaló en la misma fecha en la cuenca del glaciar, en un montículo de piedra utilizado en los años 1940 como base para el primer skilift del Club Andino, el cual marca el límite del glaciar hasta esa fecha. Se encuentra a 5079 msnm a poco más de 150 m del frente del glaciar. Estos 2 totalizadores son medidos el 1ro de cada mes a través de un flexómetro. La superficie esta cubierta de una capa de aceite de 1 cm. A pesar de esta capa de aceite (aceite para motor de grado 40) se observa durante los meses sin precipitaciones una evaporación que puede alcanzar un máximo de 15 cm en el mes. Considerando que la evaporación pudiendo estar en parte relacionada con la temperatura, se decidió pintar la nueva generación de pluviómetros totalizadores con pintura de color aluminio. El pluviómetro P9 instalado en diciembre de 1996 en la nueva estación meteorológica, tiene dicho aspecto. A pesar de una pequeña evaporación y una posible pérdida por sublimación, durante los meses más fríos de junio-agosto, la parte superficial del agua y del aceite se congelan durante algunos días, se considera entonces que los datos obtenidos por esos totalizadores tienen un error máximo de menos del 5%. Se presenta más adelante una correlación entre los valores mensuales obtenidos por el pluviómetro clásico y el P7 del Observatorio que demuestra la buena calidad de los datos. La buena correlación que también existe entre el pluviómetro P7 y el P6 muestra la buena homogeneidad de las precipitaciones en los alrededores del glaciar.

El nuevo pluviómetro totalizador P9 fue instalado en diciembre 1996.

La estación del Observatorio, sin contar con una malla, ubicada sobre un parking y estando próxima a otros aparatos que podrían tener un efecto perturbador (principalmente sobre las temperaturas) no ofrece todas las garantías para la recolección datos confiables. Es así que se decidió la creación de una otra estación en un perímetro de menos de 200 metros más abajo del Observatorio.

5.2. Características de las series y procedimientos efectuados

Las series de temperatura y precipitación registradas en las estaciones meteorológicas de Chacaltaya y El Alto, fueron evaluadas a través de un análisis cuantitativo, empleando métodos estadísticos paramétricos (análisis de la varianza) y no paramétricos (método de Helmert) para la evaluación de la consistencia de la información con el 5% de significancia.

5.2.1. Temperaturas

Las series de temperaturas media ambiente, máxima y mínima registradas en la estación de Chacaltaya tienen una longitud de 45 años de observación discontinua, existiendo meses y años donde no se realizaron observaciones, correspondiendo los mismos a las siguientes fechas:

Temperatura media ambiente:

Enero, Febrero, Abril	1957
Septiembre, Diciembre	1958
Enero - Diciembre	1959
Diciembre	1961
Julio	1966
Diciembre	1970
Agosto - Mayo	1985
Junio - Diciembre	1993
Febrero - Marzo	1994
Mayo - Agosto	1994
Octubre - Noviembre	1994

Temperatura máxima media:

Enero - Junio	1955
Diciembre	1961
Agosto	1985
Septiembre - Noviembre	1985
Enero - Mayo	1986
Enero, Junio - Diciembre	1993
Febrero - Marzo	1994
Mayo - Agosto	1994
Octubre, Noviembre	1994
Enero, Mayo	1997

Temperatura máxima extrema:

Enero, Febrero	1957
Diciembre	1958
Enero - Diciembre	1959
Diciembre	1961
Julio	1966
Diciembre	1970
Agosto - Noviembre	1984

Enero - Mayo	1985
Enero	1992
Junio - Diciembre	1992
Febrero, Marzo	1993
Mayo - Agosto	1993
Octubre, Noviembre	1993
Enero - Mayo	1996

Temperatura mínima media:

Abril	1956
Enero	1957
Septiembre, Diciembre	1958
Agosto - Noviembre	1985
Enero - Mayo	1986
Junio - Diciembre	1993
Febrero - Marzo	1994
Mayo - Agosto	1994
Octubre - Noviembre	1994
Enero - Mayo	1997

Temperatura mínima extrema:

Septiembre - Diciembre	1953
Enero - Junio	1954
Septiembre, Diciembre	1958
Enero - Diciembre	1959
Julio	1966
Diciembre	1970
Agosto - Noviembre	1985
Enero - Mayo	1986
Enero, Junio-Diciembre	1993
Enero, Febrero	1994
Mayo - Agosto	1994
Octubre, Noviembre	1994
Enero - Agosto	1997

Para completar esta información, se empleó la siguiente ecuación :

$$T_{x'm} = \frac{T_{m-1} * 0.90}{\left(\frac{T_{x''m}}{T_{x''}}\right) * T_{x''m}} + T_{m-2} * 0.68$$

Donde :

$Tx'm$ = Temperatura del mes en que falta la información °C

$Tm-1$ = Temperatura del mes anterior °C

Tx' = Temperatura promedio del registro, del mes en que falta la información °C

Tx'' = Temperatura promedio del 2do. registro, del mes de $T'xm$

$Tx''m$ = Temperatura del 2 do registro, del mes de $Tx'm$

$Tm-2$ = Temperatura del mes antes del anterior °C

0.90 = Probabilidad del 90 %

0.91 = Probabilidad del 68 %

Así mismo se completó la información con el promedio que presenta la serie en un mes determinado Si bién la anterior ecuación se ajusta a la temperatura promedio, para las series de máxima y mínima promedio, se necesitaronn realizar ajustes con los dos métodos anteriormente mencionados.

Es importante que las series con las que se compara tengan una alta consistencia, como por ejemplo las series de El Alto y de San Calixto, que tienen más de 51 años de observación.

Las temperaturas fueron procesadas por años hidrológicos de septiembre a agosto.

5.2.2. Precipitaciones

La serie de precipitaciones de Chacaltaya con 45 años de observación solamente presenta 2 meses sin datos. Esta información se completó con el promedio de cada mes. Para este hecho se analizó la consistencia de la serie de forma individual y luego a través del método de doble acumulada con referencia a la información de la estación de El Alto y de San Calixto. No se han presentado los análisis correspondientes en este informe.

Las precipitaciones fueron procesadas por años hidrológicos de septiembre a agosto.

5.3. La evolución de las temperaturas : tendencia multidecenal (1952-1996)

5.3.1. El promedio de temperatura

El promedio de las temperaturas (figura 5.1.) tiene una evolución inversa entre 1952 y el fin de los años 1970 (descenso) y el principio de los años 1980 (ascenso).

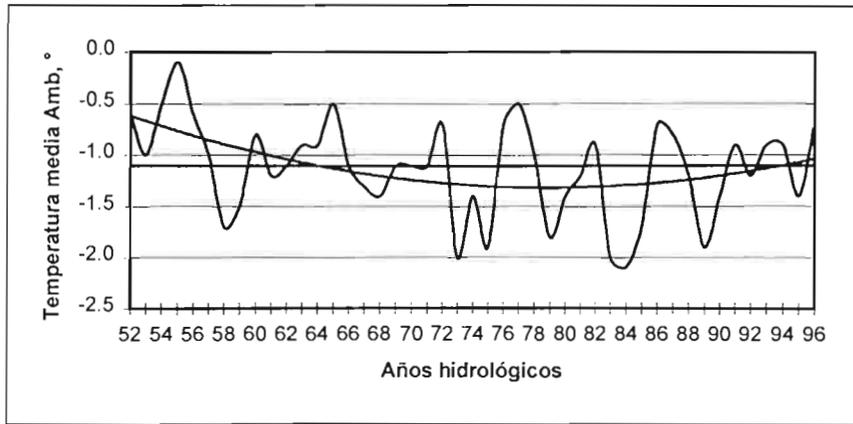


Figura 5.1 : Evolución del promedio de temperaturas en la estación de Chacaltaya-Observatorio.

5.3.2. La temperatura máxima

Se puede apreciar (figura 5.2.) una evolución global en el mismo sentido, pero con una amplitud más marcada.

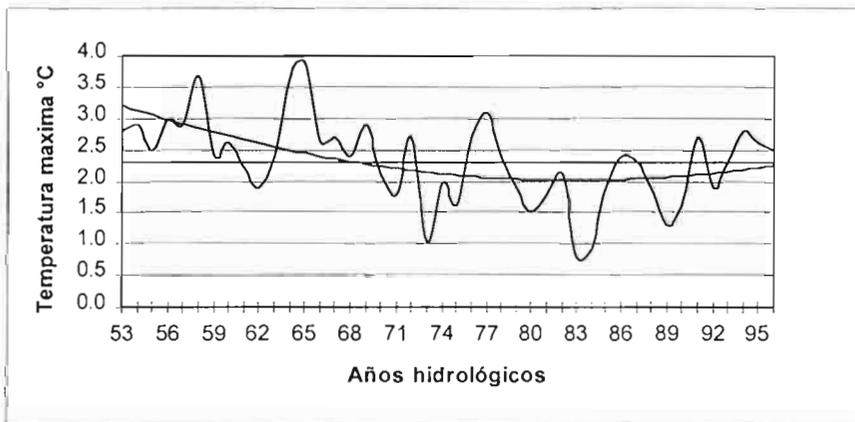


Figura 5.2 : Temperaturas máximas en la estación de Chacaltaya-Observatorio

5.3.3. La temperatura mínima :

La temperatura mínima muestra claramente una evolución positiva sobre todo el periodo (más de 1.5°C). Después de una estabilización durante el decenio 1970-1980, las mínimas vuelven a subir a partir de los años 1980 (figura 5.3.).

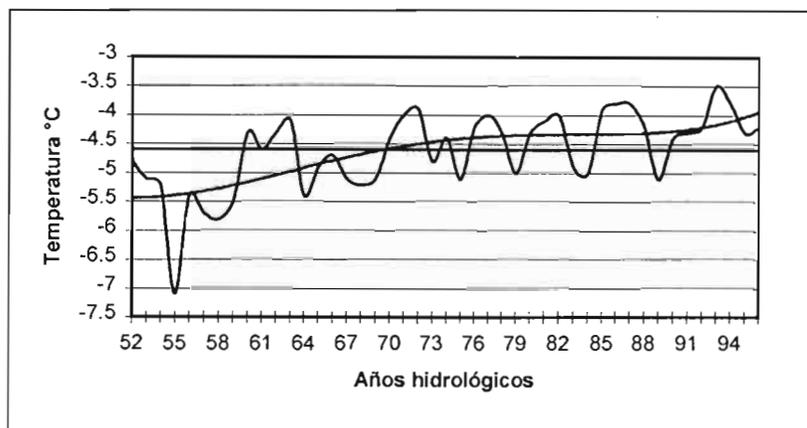


Figura 5.3 : Temperaturas mínimas de Chacaltaya-Observatorio

5.4. Evolución de las precipitaciones (1963-1996)

5.4.1. Tendencia multidecenal

Conforme a una tendencia ya observada al nivel del Altiplano (Ronchail, 1995) se observa un nítido aumento de las precipitaciones a partir de la media de los años 1970. Este aumento se estabiliza a partir de los años 1990 a un nivel cercano de los 600 mm (figura 5.4.).

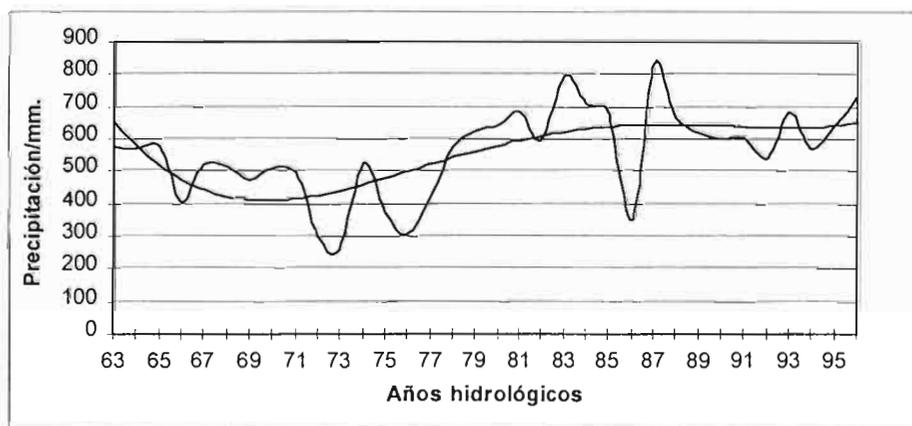


Figura 5.4 : Evolución de las precipitaciones en la estación Chacaltaya-Observatorio

5.4.2. Calibración del pluviómetro clásico de la estación de Chacaltaya-Observatorio sobre el totalizador 2000 m² P7 (escala mensual).

A pesar de una boca de pluviómetro muy diferente (314 cm² frente a 2000 cm²) y de una periodicidad de medición distinta (diaria/mensual), los dos pluviómetros del Observatorio son bastante bien correlacionados sobre el periodo 1993-1997 (figura 5.5.).

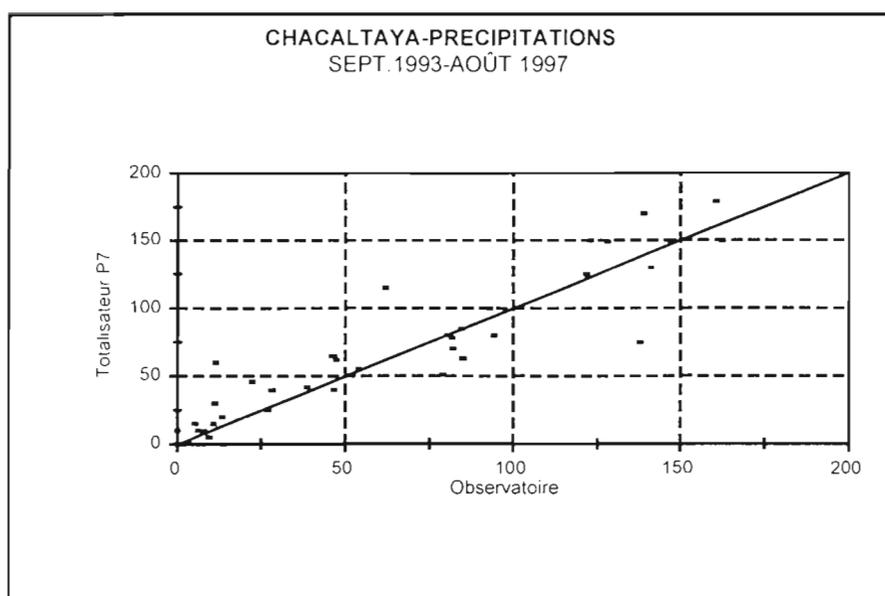


Figura 5.5. Correlación entre los totales mensuales en el pluviómetro clásico y en el totalizador P7 ($y = 6.28 + 0.95x$; $r = 0.94$; $n = 48$)

5.4.3. Precipitaciones recogidas en los pluviómetros totalizadores P6, P7 y P9

A continuación, se presentan los datos mensuales de los pluviómetros P6, P7 y P9 (cuadros 5.1 y 5.2, figuras 5.6 y 5.7).

	1993-94		1994-95		1995-96		1996-97		
	P6	P7	P6	P7	P6	P7	P6	P7	P9
SEP	46	50	25	30	40	45	60	55	-
OCT	80	75	55	62	10	5	20	20	-
NOV	42	45	65	88	51	72	100	115	-
DEC	179	210	115	100	149	108	125	125	-
JAN	63	20	130	140	150	185	170	125	180
FEB	150	160	70	90	80	80	75	140	110
MAR	78	90	150	150	85	40	150	155	150
APR	62	75	30	50	65	55	40	55	45
MAY	5	5	0	0	10	0	15	10	0
JUN	0	0	10	0	0	0	0	0	0
JUL	0	0	0	10	0	20	40	0	5
AUG	0	10	15	0	0	0	0	0	0
TOTAL	705	730	640	710	640	600	790	800	-

Cuadro 5.1. Precipitaciones recogidas en los totalizadores P6 (Observatorio), P7 (glaciar) y P9 (« nueva estación ») : totales mensuales

	1993-94		1994-95		1995-96		1996-97		
	P6	P7	P6	P7	P6	P7	P6	P7	P9
SEP	46	50	25	30	40	45	60	55	-
OCT	126	125	80	92	50	50	80	75	-
NOV	168	170	145	180	101	122	180	190	-
DEC	347	380	260	280	250	230	305	315	-
JAN	410	400	390	420	400	415	475	440	180
FEB	560	560	460	510	480	495	550	580	290
MAR	638	650	610	660	565	535	700	735	440
APR	700	725	640	710	630	590	740	790	485
MAY	705	730	640	710	640	590	755	800	485
JUN	705	730	640	710	640	590	750	800	485
JUL	705	730	640	710	640	600	790	800	485
AUG	705	730	640	710	640	600	760	800	485
TOTAL	705	730	640	710	640	600	790	800	485

Cuadro 5.2. Precipitaciones recogidas en los totalizadores P6 (Observatorio), P7 (glaciar) y P9 (« nueva estación ») : totales mensuales acumulados.

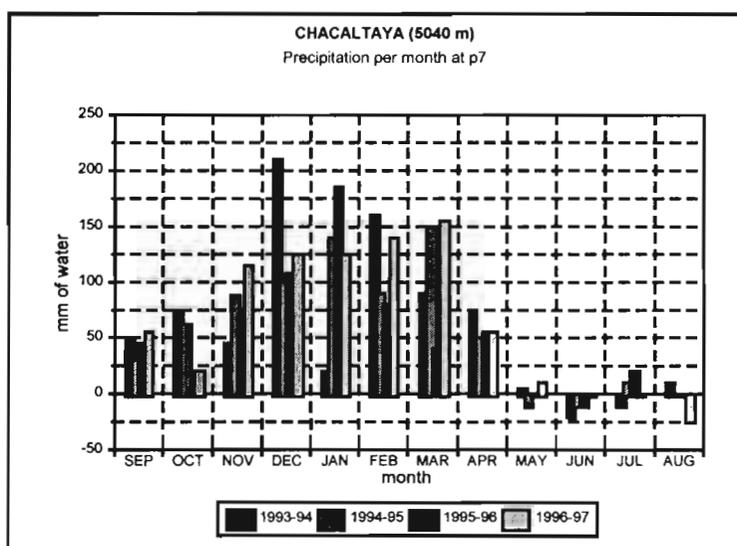


Figura 5.6 : Totales mensuales en el pluviómetro P7 (Glaciar)
Los valores negativos corresponden a precipitaciones de valor nulo con un poco de evaporación

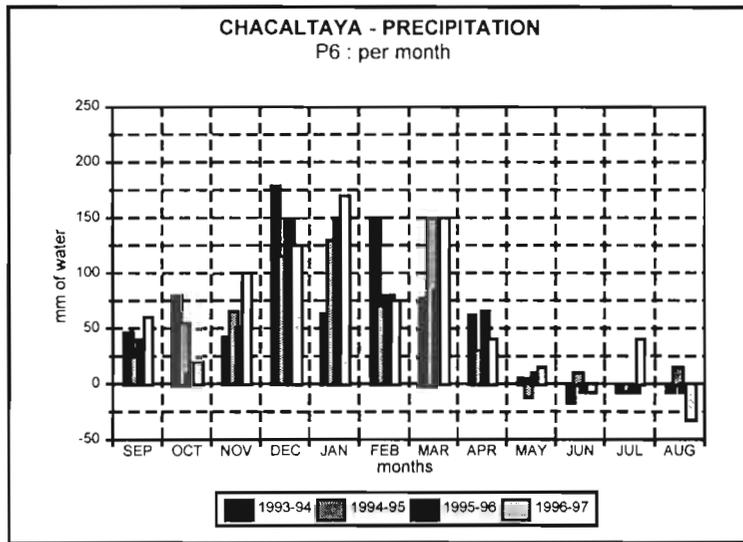


Figura 5.7 : Totales mensuales en el pluviómetro P6 (Observatorio)
Los valores negativos corresponden a precipitaciones de valor nulo con algo de evaporación

A pesar de una ubicación diferente, los 2 pluviómetros totalizadores 2000 cm² muestran una buena correlación ($r = 0.93$) sobre los 48 meses de medición (figura 5.8).

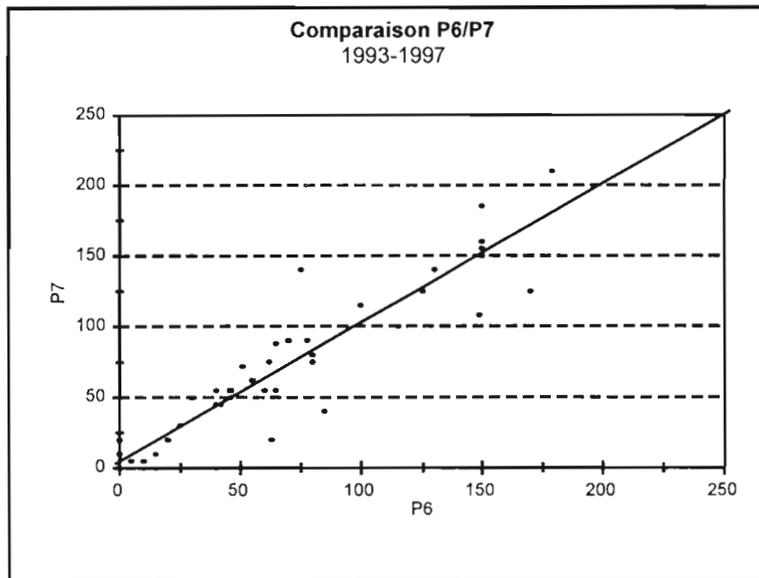


Figura 5.8 : Correlación entre los totales mensuales de los pluviómetros P6 (Observatorio) y P7 (Glaciar) [$y = 1.634 + 0.995x$; $r = 0.93$; $n = 48$]

5.5. Variabilidad interanual de las temperaturas y de las precipitaciones de Chacaltaya : relación con el ENSO [Índice de Oscilación Sur (SOI) y la temperatura superficial del Pacífico (SST)].

El SOI y el SST proporcionan índices que permiten identificar los eventos ENSO (SOI negativo y SST positivo) y los eventos fríos (SOI positivo, SST negativo). Los años 1951, 1953, 1957-58, 1965, 1972-73, 1976-77, 1982-83, 1987, 1991-1995, 1997 fueron eventos ENSO más o menos intensos, mientras que los años 1954-56, 1964, 1967-68, 1970-71, 1974-1976, 1985-86, 1989, 1996 fueron eventos fríos más o menos marcados (figuras 5.9 y 5.10).

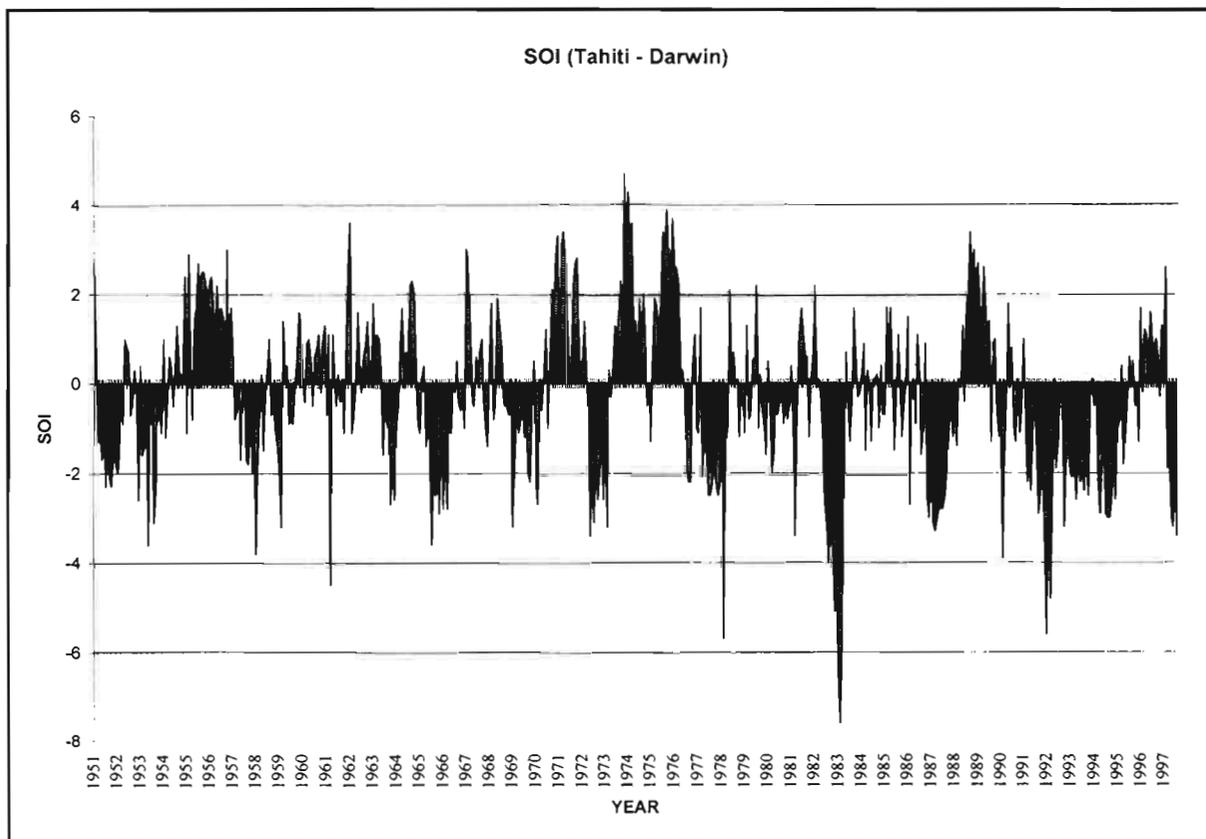


Figura 5.9 : Índice de Oscilación Sur (Tahiti-Darwin) para el periodo 1951-1997.

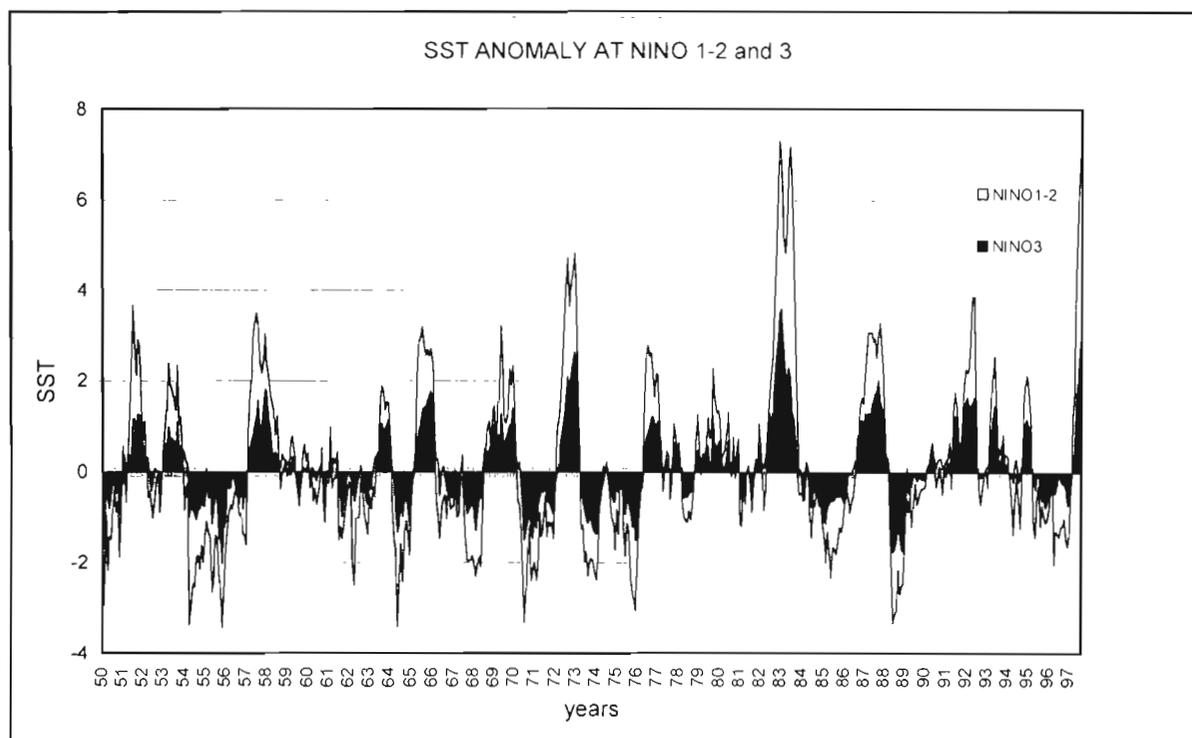


Figura 5.10 : Temperatura superficial del Pacífico (SST) en los bloques Niño 1-2 y Niño 3

Al nivel de las temperaturas (fig. 5.1, 5.2 y 5.3), se observa una respuesta positiva a los años ENSO, particularmente durante los eventos 1965, 1972-73, 1977, 1982-83, 1987 y 1991-94. La respuesta resulta más fuerte con las temperaturas mínimas. Al nivel de las precipitaciones, los años ENSO 1972-73, 1976-77, 1982-83, 1986-87, 1992-94 presentan una cierta disminución de los totales (figura 5.7). Son resultados que confirman tendencias ya observadas en Perú y Bolivia.

5.6. Calibración de los años de medición del balance (1991-1997)

Los años del inicio del monitoreo del glaciar han correspondido con El Niño de larga duración (uno de los más largos del siglo) 1991-1995.

Las temperaturas máximas y mínimas estuvieron generalmente por encima del promedio (cuadro 5.3). Siendo las mínimas las que registraron la desviación positiva más amplia.

Años	T. Máximas (1)	T. Mínimas (1)	Precipitaciones (3)
1991-92	0.6	0.4	+45.9
1992-93	-0.6	0.6	-21.9
1993-94	0	1.6	+129.8
1994-95	0.7	1.2	+12.9
1995-96	0.4	0.4	+84.5
1996-97	0.3	0.6	+173.4

(1) desviación estandar de la serie 1952-96 : $\sigma = 0.7^{\circ}\text{C}$.

(2) desviación estandar de la serie 1952-96 : $\sigma = 0.7^{\circ}\text{C}$.

(3) desviación al promedio de la serie 1963-1996 : $m = 558.3 \text{ mm}$

Cuadro 5.3. Calibración de las temperaturas y precipitaciones de los años 1991-1997.

Las precipitaciones, relacionadas con el promedio de la serie total 1963-1996 han estado generalmente en excedente. Por lo tanto, comparando este periodo con los años 1980, el periodo 1991-1997 incluye 3 años deficitarios. Solo el último ciclo 1996-97 ha sido lo suficientemente húmedo.

5.7. Conclusiones

La temperatura muestra desde más de 40 años una tendencia al aumento, sobre todo apreciable a nivel de las mínimas. Esto podría estar relacionado con un aumento sensible de la humedad atmosférica, la cual se traduce en una subida notable de las precipitaciones desde el inicio de los años 1980.

La variabilidad climática parece por parte estar controlada por los eventos hidro-climáticos del Pacífico y sus teleconexiones. Como en otras estaciones de los Andes Centrales, se observa un aumento notable de la temperatura atmosférica durante las fases negativas de la Oscilación del Sur.

Este forzamiento parece ser un poco menos claro sobre las precipitaciones, el déficit pluviométrico a nivel de los totales anuales siendo menos evidente que en otros sectores del Altiplano.

Dévido a su ubicación en la altura, fuera de las influencias urbanas, la estación de Chacaltaya debe continuar recolectando este tipo de información. Sin embargo, en este momento, las condiciones para la medición de las temperaturas y las precipitaciones no son óptimas. No se puede descartar que las actividades del Observatorio perturben en forma muy sensible las mediciones de las temperaturas. Por tales razones, se decidió instalar una nueva estación más abajo del Observatorio, en un lugar cerrado y alejado de la carretera.

Por el interés que presenta el sitio de Chacaltaya para la medición meteorológica, se recomienda la implementación de los aparatos adecuados para la medición de las radiaciones globales y netas, la humedad, el viento y las temperaturas del suelo.

El equipo permitiendo la recolección de esta información en forma automática ha empezado a ser instalado sobre el nuevo sitio.

6. CONCLUSIÓN

Este primer informe ha presentado los principales resultados alcanzados a partir de una serie de mediciones que se obtuvieron durante 6 años sobre el Glaciar de Chacaltaya. Conforme a los informes publicados por el ORSTOM y sus contrapartes sobre los glaciares estudiados en los Andes Centrales, la información está principalmente constituida por datos brutos, procesados y criticados.

Esta masa de información constituye una base para desarrollar análisis posteriores referentes al comportamiento de este glaciar, los cuales serán publicados en los próximos meses en las revistas internacionales especializadas sobre el tema.

Este informe cierra una primera etapa, cuyo objetivo fue el de implementar sobre este glaciar un dispositivo simple y robusto de monitoreo topográfico y glaciológico.

La segunda etapa prevista para 1998 prevé la instalación, sobre esta cuenca glacial, de una estación limnimétrica, que permitirá proporcionar a partir del próximo ciclo, una estimación del balance hidrológico de este glaciar, lo cual, como se sabe, forma parte de las masas de hielo permanentes de la Cordillera Real que contribuyen a abastecer la ciudad de La Paz de agua potable. Se ha considerado también la posibilidad de instalar en 1998 una estación micrometeorológica sobre el glaciar, como se lo hizo anteriormente sobre el Glaciar de Zongo y en Ecuador sobre el Glaciar 15 del Antizana. Esta estación semi-automática proporcionará los datos requeridos para estimar el balance energético del glaciar en un punto.

Completando así la red de monitoreo ya existente, estos equipos adicionales convertirán este glaciar en uno de los mejores estudiados del mundo a nivel tropical. El próximo informe presentará el monitoreo del glaciar de Chacaltaya en su configuración óptima.

7. REFERENCIAS

- Bennehart, I., 1997. Le Glacier de Chacaltaya, Bolivie. Relation avec les données climatiques
Mémoire ISTOM (non publié).
- Berton. P., Wagnon, P., Francou, B., Pouyaud, B. & Baldivieso, 1997. Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le Glacier de Zongo. Année hydrologique 1995-96.
Rapports annuels, 55. ORSTOM, La Paz, Bolivie
- Broggi. J.A., 1943. La desglaciación actual de los Andes del Perú.
Bol.Soc.Geol. del Perú, 14-15 : 59-90
- Francou, B. & Ribstein, P., 1995. Glaciers et évolution climatique dans les Andes boliviennes. Glacier de Zongo et glacier de Chacaltaya, Cordillère Royale, 16°S.
Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines, 24. 1 : 23-36.
- Jordan, E., 1991. Die Gletscher der Bolivianischen Anden.
Franz Steiner Verlag, Stuttgart.
- Lliboutry, L., 1965. Traité de glaciologie.
Masson, Paris.
- Lliboutry L., 1974. Multivariate statistical analyse of glacier anual balance.
J.Glaciology, 13, 69 : 371-392
- Müller, R., 1985. Zur Gletschergeschichte in Cordillera Quimsa Cruz, Bolivien.
Dissertation, Zürich.
- Ronchail, J., 1995. Variabilidad interanual de las precipitaciones en Bolivia.
Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines, 24, 3: 369-378.
- Sémiond, H, Francou, B., Ayabaca, E. de la Cruz, A. & Chango, R, 1997. El Glaciar 15 del Antizana.
Investigaciones Glaciológicas 1994-1997.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores hacen extensivo su agradecimiento todas las instituciones y personas que se citan a continuación, quienes colaboraron a través de la información proporcionada para la elaboración del presente informe cuyo aporte fue muy valioso.

Al Club Andino Boliviano y a su presidente Sr. Carlos Aguilar al haber proporcionado la información de archivo.

Al Instituto de Investigaciones Física de la UMSA, en particular al Señor Antonio Carasco (Técnico de Chacaltaya) por la información meteorológica de la estación Chacaltaya.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), en especial al Ing. José. Cortez por el apoyo prestado.

A Hidrología Naval

Al Instituto Geográfico Militar (IGM)

Al Dr. L.G.Thompson

ANEXOS

- *Datos meteorológicos mensuales de Chacaltaya*

ESTACION: CHACALTAYA
 PROV.: MURILLO
 DEPTO: LA PAZ

PRECIPITACION MENSUAL

LAT. 16°19'
 LONG. 68°10'
 ALTUR 5240

ANO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	TOTAL
52-53	27.7	34.2	50.1	76.0	11.0	30.5	60.1	28.2	13.6	25.7	8.4	21.3	386.8
53-54	0.0	60.6	91.4	30.8	57.7	29.6	41.4	8.2	0.0	6.2	0.0	3.5	329.4
54-55	7.4	4.0	90.0	91.0	101.0	58.0	8.9	1.4	2.7	0.5	0.3	0.0	365.2
55-56	42.0	32.1	1.0	102.7	130.6	31.4	13.0	0.0	0.0	0.0	13.1	10.2	376.1
56-57	0.0	0.0	20.0	19.8	86.9	36.0	8.0	0.5	0.0	0.0	0.0	6.0	177.2
57-58	0.0	34.0	22.8	9.0	69.5	12.0	5.5	9.0	6.0	0.0	5.0	0.0	172.8
58-59	0.0	14.9	22.7	78.5	96.2	49.6	43.8	24.9	12.3	8.9	5.0	8.5	365.3
59-60	36.5	34.9	46.0	70.1	50.7	23.8	41.2	36.4	20.5	0.0	0.0	26.5	386.6
60-61	56.2	51.6	80.9	71.9	111.9	164.7	73.1	89.8	43.4	0.0	0.0	8.4	751.9
61-62	54.3	18.8	81.3	50.5	46.4	49.3	93.3	37.2	15.7	0.8	7.5	1.2	456.3
62-63	40.9	51.1	20.0	117.5	117.5	59.6	21.9	73.2	39.4	0.0	0.0	14.4	555.5
63-64	74.6	25.3	51.3	91.6	95.7	53.1	134.9	12.6	7.5	0.0	4.0	22.1	572.7
64-65	63.7	43.1	47.1	84.1	133.4	87.9	59.2	16.0	11.0	2.5	20.6	1.5	570.1
65-66	52.3	16.7	49.2	120.0	82.4	111.8	67.1	25.9	36.3	0.0	5.0	9.1	575.8
66-67	36.7	29.1	50.7	46.1	39.9	56.5	83.3	11.5	13.9	5.1	14.0	19.7	406.5
67-68	37.0	45.1	7.0	74.5	104.3	130.7	70.8	22.7	14.2	1.4	5.2	9.2	522.1
68-69	36.0	18.4	83.3	66.0	113.9	81.4	59.4	34.6	15.8	1.5	5.9	0.0	516.2
69-70	7.2	13.9	31.6	46.2	145.7	85.7	90.6	22.0	18.6	0.0	1.7	9.2	472.4
70-71	34.3	34.5	45.6	69.7	94.7	83.5	73.7	33.2	13.9	3.7	8.8	9.9	505.5
71-72	31.5	36.0	40.8	65.8	90.6	84.7	68.5	31.5	11.6	7.3	14.1	11.8	494.2
72-73	24.8	36.4	41.0	65.0	27.5	38.2	18.5	9.0	8.9	16.6	8.0	5.8	299.7
73-74	15.8	9.6	38.0	42.6	48.9	14.3	12.0	18.0	9.0	10.0	24.9	11.1	254.2
74-75	9.0	10.0	18.0	12.0	121.5	102.6	55.6	73.0	23.0	46.1	38.5	19.4	528.7
75-76	25.0	0.0	0.0	88.2	45.8	129.0	48.0	10.0	0.0	0.0	18.0	12.0	376.0
76-77	0.0	15.0	8.0	56.8	55.0	38.0	47.5	31.5	40.0	0.0	14.1	0.4	306.3
77-78	48.6	31.2	48.5	79.7	74.1	82.8	30.0	28.0	0.6	0.5	0.3	0.4	424.7
78-79	20.5	11.5	70.3	109.2	129.0	90.0	72.5	42.5	7.0	0.0	17.0	9.0	578.5
79-80	7.0	55.5	42.0	80.0	110.5	81.0	177.0	28.5	0.0	2.0	16.0	26.8	626.3
80-81	51.0	94.0	34.5	60.5	161.5	92.9	73.6	46.1	4.5	0.0	0.0	25.0	643.6
81-82	57.0	72.2	54.1	46.0	131.6	130.0	156.0	26.0	3.2	5.0	6.0	1.3	688.4
82-83	18.9	68.0	102.5	85.0	85.0	108.0	40.0	43.0	28.5	0.0	0.0	13.0	591.9
83-84	42.0	41.0	32.0	72.5	214.8	142.5	133.5	42.0	9.0	35.6	9.0	24.5	798.4
84-85	3.0	61.0	102.3	63.4	125.1	87.5	131.0	74.2	36.0	22.5	5.0	0.0	711.0
85-86	72.1	46.0	102.0	86.9	115.5	82.0	102.0	46.5	9.5	0.0	8.5	17.0	688.0
86-87	39.5	35.0	49.0	93.5	67.5	24.5	23.0	0.0	1.5	1.4	1.3	10.0	346.2
87-88	27.7	63.0	106.8	117.8	114.2	126.7	197.6	31.4	41.8	0.0	3.1	0.0	830.1
88-89	17.3	9.7	33.4	112.1	166.7	166.5	51.8	59.1	9.2	13.7	3.8	22.5	665.8
89-90	13.9	71.6	31.5	105.8	130.8	78.8	45.6	54.2	19.1	57.9	0.3	6.8	616.3
90-91	0.0	23.4	104.7	93.4	165.7	70.0	87.2	30.2	14.1	7.6	0.7	0.0	597.0
91-92	7.3	13.5	87.3	114.7	150.8	136.9	23.9	17.3	0.0	9.0	7.3	36.2	604.2
92-93	15.1	15.4	40.4	60.7	191.7	64.5	76.6	44.7	22.4	5.2	0.0	0.0	536.7
93-94	24.4	80.4	38.5	160.6	85.3	147.0	81.8	47.3	9.4	7.5	5.9	0.0	688.1
94-95	27.0	54.1	46.7	62.0	141.4	82.0	122.9	11.1	13.9	0.0	4.9	5.2	571.2
95-96	28.2	8.0	79.0	128.1	162.4	94.3	84.5	46.1	6.2	2.1	1.0	2.9	642.8
96-97	11.4	13.5	93.1	121.5	139.0	138.0	147.7	46.7	10.8	0.0	0.0	10.0	731.7
ROMD	27.7	34.2	51.9	77.8	105.4	81.5	70.2	31.7	13.9	6.8	6.9	10.0	517.9
D. EST	20.7	23.1	30.2	31.7	44.5	41.2	46.2	21.1	12.3	12.5	7.9	9.2	25.0
C.V.	0.7	0.7	0.6	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.9	1.8	1.1	0.9	0.0
MAX	74.6	94.0	106.8	160.6	214.8	166.5	197.6	89.8	43.4	57.9	38.5	36.2	214.8
MIN	0.0	0.0	0.0	9.0	11.0	12.0	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: SENAMHI, La Paz

CUADRO A-1

ESTACION: CHACALTAYA
 PROV. MURILLO
 DEPTO. LA PAZ

TEMPERATURA MEDIA AMBIENTE °C

LAT. 16° 19'
 LONG. 68° 10'
 ALTUR 5540

ANO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	ROMD
52-53	-1.7	-0.6	-0.3	0.0	0.8	2.1	-0.6	-0.7	-1.3	-1.1	-2.5	-1.4	-0.6
53-54	0.7	-0.1	1.4	-0.4	-0.6	-0.6	-1.2	-0.8	-4.4	-2.2	-2.7	-1.4	-1.0
54-55	-1.7	-0.3	0.1	0.5	-0.9	-0.3	0.2	0.2	-0.7	-0.4	-1.1	-1.2	-0.5
55-56	-1.1	0.8	1.9	0.7	-0.1	0.7	0.9	-1.3	0.5	-0.6	-3.0	-1.0	-0.1
56-57	-0.3	1.5	1.1	0.8	0.4	-1.6	-1.9	-0.5	-1.0	-2.2	-2.1	-1.4	-0.6
57-58	0.1	0.0	-0.7	-0.4	-1.4	-1.2	-1.4	-0.8	-1.1	-2.0	-2.2	-1.0	-1.0
58-59	-0.1	-1.4	-0.9	0.2	-2.2	-1.1	-2.3	-1.1	-2.6	-3.8	-3.4	-1.9	-1.7
59-60	-2.1	-1.5	-1.3	-1.6	-0.9	-0.6	-0.5	-0.6	-2.2	-2.6	-1.8	-1.7	-1.5
60-61	-1.7	-0.5	-0.3	-0.2	0.2	-0.4	0.6	-0.3	-1.4	-1.6	-2.1	-1.8	-0.8
61-62	-1.7	-0.4	-0.5	-0.1	-0.4	-0.6	-1.0	-0.9	-1.6	-3.2	-2.1	-2.2	-1.2
62-63	-1.4	-0.6	0.4	1.0	-0.8	-1.1	-1.1	-1.3	-1.7	-2.4	-2.3	-1.3	-1.1
63-64	-2.3	-0.7	0.7	-0.4	-0.3	0.2	-0.6	-0.4	-1.6	-1.4	-2.4	-1.1	-0.9
64-65	-1.7	-0.9	-1.1	-0.7	-0.7	0.3	0.8	0.2	-0.4	-2.2	-2.7	-1.3	-0.9
65-66	-1.8	0.8	0.6	0.6	1.0	1.0	0.0	-0.3	-2.0	-2.2	-2.0	-1.5	-0.5
66-67	-1.0	-0.3	-0.9	-0.5	-1.0	-0.5	-1.4	-0.7	-1.6	-1.9	-2.5	-1.1	-1.1
67-68	-1.0	-0.5	-0.5	-1.0	-0.6	-1.0	-0.8	-1.2	-1.3	-2.3	-3.2	-2.3	-1.3
68-69	-2.0	-0.8	-0.4	-0.6	-0.7	-1.4	-2.0	-1.0	-0.8	-1.7	-2.6	-3.0	-1.4
69-70	-1.0	-0.5	-1.0	-0.5	-0.6	-0.9	-1.8	-0.1	-0.7	-1.9	-2.6	-1.5	-1.1
70-71	-0.6	0.0	0.6	-0.4	-0.3	-1.0	-0.9	-1.6	-1.4	-2.3	-2.6	-2.9	-1.1
71-72	-2.8	-1.0	0.5	1.1	-0.1	-0.4	-0.8	-1.2	-1.5	-3.1	-2.1	-1.9	-1.1
72-73	-2.6	-1.4	-0.3	-0.1	0.6	0.3	1.2	1.3	0.1	-1.9	-2.7	-2.3	-0.7
73-74	-2.2	-0.9	0.8	-1.0	-2.2	-2.0	-2.1	-2.2	-2.2	-3.0	-3.1	-3.5	-2.0
74-75	-2.7	-1.8	-1.8	-2.3	0.0	-0.2	-0.5	-0.7	-1.0	-2.5	-1.9	-1.4	-1.4
75-76	-2.4	-1.1	-0.6	0.2	-0.8	-0.9	-1.2	-1.6	-3.8	-5.4	-3.0	-2.4	-1.9
76-77	-1.8	-0.4	-0.1	-0.2	-0.1	0.5	-0.4	-0.3	-0.9	-1.8	-2.0	-1.3	-0.7
77-78	-0.4	-0.2	0.4	0.8	0.2	-0.8	0.0	-0.1	-1.1	-2.1	-1.5	-0.6	-0.5
78-79	-1.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.5	-0.4	-0.2	-0.5	-0.8	-1.5	-2.2	-1.8	-1.0
79-80	-0.7	0.1	-0.6	-3.5	-0.9	-1.8	-1.1	-0.9	-0.7	-4.0	-4.6	-3.4	-1.8
80-81	-2.6	-0.8	-0.4	-0.3	-0.4	-1.0	-0.8	-1.5	-1.5	-2.3	-2.2	-3.0	-1.4
81-82	-2.9	-0.9	0.4	0.7	-0.7	-0.4	-0.5	-1.2	-1.7	-3.1	-2.0	-2.1	-1.2
82-83	-2.6	-1.6	-0.4	-0.2	0.6	-0.1	1.8	0.7	-1.0	-3.7	-2.4	-2.1	-0.9
83-84	-2.3	-0.6	0.2	-1.8	-2.4	-2.0	-1.8	-2.2	-1.8	-2.2	-3.2	-3.8	-2.0
84-85	-3.0	-1.3	-1.3	-1.6	-1.3	-1.8	-1.1	-1.3	-1.6	-4.1	-4.4	-2.6	-2.1
85-86	-3.7	-1.2	-0.4	0.0	0.0	-0.5	-1.3	-0.2	-0.4	-4.1	-5.2	-2.8	-1.7
86-87	-2.9	-1.3	0.4	-0.1	0.0	0.8	-0.3	0.1	-1.0	-1.8	-1.3	-1.3	-0.7
87-88	-0.8	-0.7	-0.4	1.4	-0.4	-1.0	-0.3	-0.7	-1.9	-1.9	-2.0	-0.8	-0.8
88-89	-1.7	-0.2	-0.7	-0.9	-0.8	-1.0	-0.6	-1.0	-1.3	-1.5	-2.5	-2.2	-1.2
89-90	-0.8	-0.2	-1.5	-0.9	-1.2	-2.2	-1.3	-0.9	-0.8	-5.0	-4.8	-3.7	-1.9
90-91	-4.9	-0.9	-0.7	-0.9	-0.7	0.1	-0.5	-1.3	-1.2	-2.9	-2.3	-0.8	-1.4
91-92	-2.0	-0.8	-0.3	-0.5	-0.3	-0.3	-0.5	-0.4	0.4	-1.3	-1.9	-2.3	-0.9
92-93	-2.1	-0.6	-0.2	-0.7	0.0	-2.3	-1.8	-1.2	-0.7	-1.3	-1.8	-1.4	-1.2
93-94	-0.4	-0.4	0.0	-0.5	-0.5	-0.6	-0.2	-1.0	-1.5	-1.7	-2.1	-1.7	-0.9
94-95	-2.0	-0.6	-1.1	-0.5	-1.1	-0.4	-0.9	-0.7	-0.9	-2.0	-1.6	0.8	-0.9
95-96	-1.3	0.0	-0.8	-2.0	-1.3	-1.4	-0.8	-0.8	-1.5	-2.4	-2.5	-1.7	-1.4
96-97	-1.6	-0.4	-1.1	-1.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-1.3	-0.2	0.8	-0.2	-0.7
97-98													
PROMD.	-1.7	-0.6	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-1.3	-2.3	-2.5	-1.8	-1.1
D.EST	1.0	0.6	0.8	0.9	0.7	0.9	0.9	0.7	0.9	1.1	1.0	0.9	0.9
C.V.	-0.6	-1.1	-3.0	-2.3	-1.4	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.5	-0.4	-0.5	-1.2
MAX	0.7	1.5	1.9	1.4	1.0	2.1	1.8	1.3	0.5	-0.2	0.8	0.8	1.1
MIN	-4.9	-1.8	-1.8	-3.5	-2.4	-2.3	-2.3	-2.2	-4.4	-5.4	-5.2	-3.8	-3.3

uente: SENAMHI, La Paz

CUADRO A-2

ESTACION: CHACALTAYA
 PROV. MURILLO
 DEPTO: LA PAZ

TEMPERATURA MINIMA MEDIA °C

LAT. 16°19'
 LONG. 68°10'
 ALTUR 5240

ANO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	PROM
52-53	-5.4	-4.3	-3.9	-3.7	-3.8	-3.0	-4.1	-4.0	-5.2	-6.7	-7.1	-6.0	-4.8
53-54	-5.0	-4.9	-4.7	-3.8	-3.0	-4.1	-3.2	-3.6	-5.0	-8.0	-9.0	-6.6	-5.1
54-55	-5.4	-4.6	-4.4	-3.9	-5.5	-4.3	-2.9	-4.1	-4.4	-4.8	-6.6	-11.9	-5.2
55-56	-10.0	-8.0	-6.2	-5.7	-7.8	-5.3	-7.4	-5.4	-8.1	-6.5	-9.1	-6.0	-7.1
56-57	-6.2	-5.6	-6.1	-6.2	-1.3	-5.5	-7.2	-3.6	-4.8	-6.3	-6.7	-5.6	-5.4
57-58	-3.9	-4.9	-5.1	-5.6	-6.0	-5.9	-6.0	-5.1	-6.1	-7.6	-7.5	-5.1	-5.7
58-59	-3.1	-5.6	-4.8	-2.7	-6.6	-5.0	-6.6	-4.8	-7.0	-8.6	-8.9	-6.2	-5.8
59-60	-5.8	-5.0	-4.8	-5.0	-4.2	-3.6	-4.5	-4.5	-6.4	-8.1	-7.1	-6.7	-5.5
60-61	-5.5	-4.0	-3.2	-3.3	-2.9	-3.1	-2.8	-3.9	-5.1	-5.2	-6.2	-5.8	-4.3
61-62	-4.9	-4.3	-3.7	-3.2	-3.0	-3.7	-4.0	-4.0	-5.0	-7.4	-6.1	-6.4	-4.6
62-63	-4.5	-4.4	-3.6	-3.4	-3.2	-3.4	-3.5	-4.0	-4.6	-6.3	-5.6	-4.8	-4.3
63-64	-5.2	-3.6	-2.8	-3.0	-3.1	-2.4	-3.1	-3.4	-5.1	-5.4	-6.9	-5.4	-4.1
64-65	-5.6	-5.4	-5.6	-5.0	-4.6	-4.0	-4.6	-4.3	-4.8	-6.5	-7.8	-6.7	-5.4
65-66	-6.3	-4.3	-4.0	-3.6	-3.0	-3.2	-3.9	-4.9	-6.8	-7.0	-6.0	-5.8	-4.9
66-67	-3.9	-2.7	-4.1	-3.0	-4.0	-3.8	-6.0	-4.0	-6.0	-5.8	-6.9	-6.0	-4.7
67-68	-5.9	-4.6	-5.1	-4.9	-3.0	-3.6	-4.0	-3.9	-5.6	-6.6	-8.0	-6.4	-5.1
68-69	-5.1	-4.2	-4.0	-3.2	-3.3	-5.1	-7.0	-4.0	-4.6	-6.0	-7.2	-8.4	-5.2
69-70	-4.8	-5.0	-5.3	-4.0	-4.1	-5.0	-6.8	-3.2	-4.0	-5.8	-6.9	-6.0	-5.1
70-71	-4.0	-4.1	-5.0	-3.8	-2.5	-3.4	-3.0	-4.4	-4.3	-5.9	-6.6	-5.4	-4.4
71-72	-5.7	-3.8	-2.2	-1.7	-2.9	-2.8	-2.8	-3.9	-5.1	-6.6	-5.2	-5.3	-4.0
72-73	-5.8	-4.3	-3.0	-3.3	-2.2	-3.4	-1.5	-2.1	-3.3	-5.8	-7.0	-5.6	-3.9
73-74	-6.0	-4.3	-3.1	-3.8	-4.3	-4.0	-4.1	-4.3	-4.4	-6.0	-6.2	-6.9	-4.8
74-75	-5.4	-3.5	-3.5	-4.5	-3.5	-3.1	-3.2	-3.8	-5.1	-6.7	-5.1	-5.5	-4.4
75-76	-5.7	-4.4	-3.3	-3.3	-3.1	-2.7	-4.5	-4.5	-7.7	-9.5	-6.9	-5.7	-5.1
76-77	-6.1	-4.8	-3.6	-3.6	-2.4	-2.3	-3.0	-3.2	-4.4	-5.3	-5.3	-6.0	-4.2
77-78	-4.6	-4.0	-3.1	-2.5	-2.3	-4.3	-2.9	-3.7	-4.7	-5.9	-5.2	-4.4	-4.0
78-79	-5.3	-4.6	-3.9	-3.3	-3.4	-3.5	-3.1	-3.7	-4.2	-4.8	-6.1	-5.5	-4.3
79-80	-4.5	-3.4	-3.9	-3.5	-4.0	-5.2	-4.3	-4.3	-4.3	-7.0	-8.1	-7.1	-5.0
80-81	-6.1	-3.4	-3.5	-3.7	-2.2	-3.2	-2.8	-4.1	-4.6	-6.1	-6.0	-5.6	-4.3
81-82	-5.8	-3.7	-2.3	-2.0	-3.3	-2.8	-2.8	-3.9	-5.3	-6.7	-5.2	-5.5	-4.1
82-83	-5.7	-4.2	-2.9	-3.3	-2.1	-3.4	-1.2	-2.1	-3.4	-7.1	-6.2	-5.9	-4.0
83-84	-6.1	-4.3	-3.4	-3.7	-4.2	-4.0	-3.9	-4.7	-4.2	-6.2	-6.3	-7.4	-4.9
84-85	-5.1	-4.1	-3.6	-4.6	-3.8	-4.1	-3.7	-3.6	-5.2	-7.4	-8.3	-5.9	-5.0
85-86	-8.1	-3.2	-2.3	-3.7	3.7	-3.1	-2.2	-2.6	-2.0	-7.9	-8.8	-6.7	-3.9
86-87	-6.4	-4.9	-3.1	-2.7	-2.2	-1.8	-2.7	-2.9	-4.3	-5.2	-4.3	-5.4	-3.8
87-88	-4.7	-3.6	-3.0	-1.7	-2.8	-3.8	-2.6	-3.5	-4.9	-5.4	-5.4	-4.5	-3.8
88-89	-5.3	-4.2	-3.9	-3.6	-3.2	-3.4	-3.1	-3.4	-4.2	-4.7	-6.0	-5.6	-4.2
89-90	-4.1	-3.5	-5.0	-3.6	-3.9	-5.2	-4.0	-4.1	-4.4	-8.3	-8.1	-7.1	-5.1
90-91	-7.8	-3.4	-3.3	-3.6	-3.3	-2.6	-2.6	-4.0	-4.1	-6.6	-6.1	-4.8	-4.4
91-92	-5.8	-4.3	-4.1	-3.5	-3.6	-3.8	-4.2	-4.8	-3.7	-4.3	-4.7	-5.1	-4.3
92-93	-4.6	-3.9	-3.2	-3.3	-3.0	-5.1	-4.1	-3.1	-4.9	-4.2	-6.0	-5.5	-4.2
93-94	-4.0	-4.3	-3.9	-3.5	-2.8	-2.8	2.6	-2.8	-4.8	-4.4	-5.8	-5.0	-3.5
94-95	-5.3	-3.4	-4.5	-2.8	-3.3	-3.2	-3.1	-3.6	-4.3	-5.3	-4.8	-2.4	-3.8
95-96	-4.1	-3.8	-3.8	-4.5	-3.6	-3.5	-3.3	-3.0	-4.7	-5.9	-5.7	-5.1	-4.3
96-97	-5.0	-3.5	-3.6	-3.5	-3.3	-3.7	-3.7	-3.8	-4.9	-5.9	-4.2	-5.0	-4.2
97-98													
ROMD	-5.4	-4.3	-3.9	-3.6	-3.3	-3.7	-3.7	-3.8	-4.9	-6.3	-6.5	-5.9	-4.6
D. EST	1.2	0.9	0.9	0.9	1.6	0.9	1.7	0.7	1.1	1.2	1.3	1.3	1.1
C. V.	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.5	-0.3	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
MAX	-3.1	-2.7	-2.2	-1.7	3.7	-1.8	2.6	-2.1	-2.0	-4.2	-4.2	-2.4	3.7
MIN	-10.0	-8.0	-6.2	-6.2	-7.8	-5.9	-7.4	-5.4	-8.1	-9.5	-9.1	-11.9	-11.9

uente: SENAMHI, La Paz

CUADRO A-3

ESTACION: CHACALTAYA
 PROV. MURILLO
 DEPTO. LA PAZ

TEMPERATURA MINIMA EXTREMA °C

LAT. 16°19
 LONG. 68°10
 ALTUR 5240

ANO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	ROMD
54-55	-7.6	-7.3	-12.5	-7.0	-13.7	-6.5	-4.5	-6.2	-7.5	-8.2	-9.0	-13.5	-8.6
55-56	-15.9	-13.6	-12.6	-11.6	-12.0	-12.5	-15.0	-6.1	-13.4	-10.5	-12.3	-9.5	-12.1
56-57	-8.5	-6.2	-7.1	-7.1	-10.0	-6.9	-9.8	-7.0	-6.3	-8.5	-8.0	-9.5	-7.9
57-58	-5.0	-7.0	-6.2	-7.1	-9.0	-7.2	-7.5	-7.0	-8.4	-10.5	-2.2	-6.8	-7.0
58-59	-7.9	-11.8	-9.0	-5.5	-5.7	-5.8	-5.9	-6.1	-7.7	-9.2	-9.2	-9.2	-7.8
59-60	-7.9	-7.3	-6.4	-5.5	-6.0	-4.8	-6.8	-6.5	-9.5	-10.5	-10.5	-9.5	-7.6
60-61	-9.5	-8.0	-5.5	-6.1	-9.0	-4.5	-5.1	-6.5	-10.5	-7.8	-10.5	-10.3	-7.8
61-62	-6.0	-7.2	-5.1	-5.5	-4.5	-6.5	-5.6	-6.1	-8.8	-10.1	-9.1	-9.3	-7.0
62-63	-6.3	-7.8	-7.2	-5.0	-4.2	-6.0	-4.2	-6.0	-6.7	-10.5	-7.5	-8.0	-6.6
63-64	-7.5	-4.5	-7.5	-5.0	-5.0	-4.2	-4.0	-6.8	-7.9	-9.8	-9.6	-8.0	-6.7
64-65	-8.0	-8.7	-8.3	-7.0	-7.0	-6.0	-6.2	-7.5	-7.0	-9.5	-12.0	-9.4	-8.1
65-66	-9.0	-6.5	-8.2	-5.0	-4.1	-4.1	-6.0	-7.0	-9.1	-10.0	-9.2	-9.2	-7.3
66-67	-7.9	-7.3	-6.4	-5.5	-5.7	-5.8	-5.9	-6.1	-7.7	-9.2	-9.2	-9.2	-7.2
67-68	-7.9	-7.3	-6.4	-5.5	-5.7	-5.8	-5.9	-6.1	-7.7	-9.2	-9.2	-9.2	-7.2
68-69	-7.9	-7.3	-6.4	-5.5	-5.7	-5.8	-5.9	-6.1	-7.7	-9.2	-9.2	-9.2	-7.2
69-70	-7.9	-7.3	-6.4	-5.5	-5.7	-5.8	-5.9	-6.1	-7.7	-9.2	-9.2	-9.2	-7.2
70-71	-7.9	-7.3	-6.4	-5.5	-3.4	-4.8	-5.2	-6.8	-6.2	-8.4	-12.5	-9.6	-7.0
71-72	-9.3	-8.6	-4.5	-4.1	-4.5	-4.9	-4.4	-5.2	-8.7	-10.0	-8.1	-8.0	-6.7
72-73	-7.6	-6.0	-5.0	-5.0	-3.8	-5.9	-3.8	-8.7	-5.8	-8.9	-9.2	-8.4	-6.5
73-74	-8.4	-6.8	-6.0	-5.2	-6.0	-5.0	-5.9	-7.0	-8.5	-8.8	-8.0	-10.5	-7.2
74-75	-7.0	-9.0	-7.6	-5.9	-5.0	-5.2	-5.0	-5.2	-6.1	-9.2	-8.4	-8.2	-6.8
75-76	-8.1	-6.0	-5.0	-4.4	-4.8	-6.8	-5.8	-5.8	-10.0	-13.8	-10.8	-8.1	-7.5
76-77	-7.8	-6.1	-5.0	-5.2	-3.6	-3.9	-5.8	-6.0	-6.7	-6.5	-8.5	-12.0	-6.4
77-78	-6.2	-6.4	-5.4	-3.7	-3.0	-7.1	-6.0	-5.2	-7.0	-9.9	-10.0	-9.0	-6.6
78-79	-8.1	-7.9	-5.8	-6.0	-4.3	-4.1	-4.8	-4.9	-6.6	-7.3	-8.7	-7.6	-6.3
79-80	-6.5	-6.0	-5.9	-4.8	-6.8	-6.8	-5.9	-5.7	-7.7	-11.3	-11.9	-13.3	-7.7
80-81	-9.7	-5.7	-4.8	-5.9	-3.6	-4.6	-5.2	-5.8	-6.1	-9.0	-11.1	-9.2	-6.7
81-82	-9.1	-8.7	-4.6	-4.4	-4.2	-5.0	-4.9	-5.2	-8.8	-9.2	-8.1	-8.2	-6.7
82-83	-8.4	-6.7	-5.0	-5.4	-4.0	-5.6	-4.1	-5.5	-5.8	-8.8	-9.2	-9.2	-6.5
83-84	-8.1	-6.4	-5.7	-4.3	-6.0	-5.2	-5.9	-7.0	-8.4	-8.6	-8.6	-10.2	-7.0
84-85	-6.9	-7.7	-5.3	-6.3	-6.0	-6.5	-6.5	-6.0	-6.8	-11.0	-9.9	-9.2	-7.3
85-86	-8.0	-7.3	-6.4	1.1	-5.7	-5.8	-5.9	-6.1	-7.7	-9.2	-12.9	-8.6	-6.9
86-87	-8.6	-8.0	-5.6	-4.8	-3.8	-4.4	-5.7	-6.0	-6.5	-6.9	-8.7	-11.7	-6.7
87-88	-6.5	-5.9	-4.8	-4.3	-3.7	-7.2	-4.5	-5.0	-7.5	-8.3	-8.3	-9.4	-6.3
88-89	-7.7	-7.2	-6.8	-7.2	-5.1	-4.2	-5.3	-4.6	-6.9	-6.9	-8.5	-7.7	-6.5
89-90	-6.0	-7.0	-5.6	-4.4	-6.3	-8.8	-6.1	-5.1	-7.3	-11.1	-11.1	-12.8	-7.6
90-91	-11.4	-6.5	-5.0	-5.7	-4.9	-4.0	-5.7	-8.3	-6.4	-9.0	-8.3	-7.6	-6.9
91-92	-8.2	-7.6	-7.1	-6.5	-7.2	-7.1	-6.9	-6.9	-7.0	-6.2	-6.6	-8.0	-7.1
92-93	-7.0	-6.0	-5.8	-7.1	-5.7	-6.0	-7.6	-5.0	-5.6	-9.2	-9.2	-9.2	-7.0
93-94	-8.0	-7.3	-6.4	-5.5	-5.0	-5.8	-5.9	-4.8	-7.7	-9.2	-9.2	-9.2	-7.0
94-95	-7.9	-7.3	-6.4	-3.9	-5.9	-5.2	-4.9	-6.0	-7.4	-9.9	-9.6	-4.3	-6.6
95-96	-6.1	-7.6	-7.6	-7.2	-4.9	-4.9	-5.3	-4.5	-10.3	-9.4	-9.2	-8.1	-7.1
96-97	-8.7	-6.1	-6.0	-6.0	-5.7	-5.8	-5.9	-6.1	-7.7	-9.0	-7.0	-7.0	-6.8
ROMD	-8.0	-7.3	-6.4	-5.5	-5.7	-5.8	-5.9	-6.1	-7.7	-9.2	-9.2	-9.1	-7.2
D. EST	1.7	1.5	1.7	1.7	2.2	1.5	1.8	0.9	1.5	1.4	1.8	1.7	1.6
C.V.	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2
MAX	-5.0	-4.5	-4.5	1.1	-3.0	-3.9	-3.8	-4.5	-5.6	-6.2	-2.2	-4.3	1.1
MIN	-15.9	-13.6	-12.6	-11.6	-13.7	-12.5	-15.0	-8.7	-13.4	-13.8	-12.9	-13.5	-13.8

uente: SENAMHI, La Paz

CUADRO A-4

ESTACION: CHACALTAYA
 PROV. MURILLO
 DEPT. LA PAZ

TEMPERATURA MAXIMA MEDIA °C

LAT. 16° 19'
 LONG. 68° 10'
 ALTURA 5520 M.S.N.M

ANO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	PROM.
52-53	1.9	3.0	3.1	2.8	2.6	2.3	3.0	2.8	2.6	3.6	2.0	4.2	2.8
53-54	4.7	3.9	4.4	3.3	1.7	2.0	1.4	3.9	2.2	1.8	2.2	3.3	2.9
54-55	1.4	3.5	2.8	3.9	2.2	2.3	2.4	2.5	2.4	1.4	2.6	2.9	2.5
55-56	3.8	3.2	4.2	3.0	2.7	3.1	3.0	2.9	2.4	1.8	2.5	3.4	3.0
56-57	2.9	4.0	4.0	3.8	2.1	2.2	3.4	2.6	2.7	1.9	2.6	2.9	2.9
57-58	4.1	4.9	3.7	4.9	3.0	3.5	3.2	3.5	3.9	3.6	3.1	3.2	3.7
58-59	2.9	2.8	3.0	3.1	2.2	2.7	2.1	2.6	1.8	1.0	2.0	2.5	2.4
59-60	1.6	2.0	2.2	1.9	2.4	2.4	3.6	3.3	1.9	2.9	3.5	3.3	2.6
60-61	2.1	3.0	2.6	2.9	3.3	2.4	4.0	3.2	2.2	1.9	1.9	2.2	2.6
61-62	1.5	3.6	2.7	3.0	2.3	2.5	1.9	2.1	1.9	1.1	2.0	2.2	2.2
62-63	1.7	3.2	4.3	1.5	1.6	1.2	1.4	1.5	1.2	1.5	1.0	2.2	1.9
63-64	0.6	2.2	4.2	2.2	2.5	2.8	1.9	2.5	1.9	2.6	2.0	3.2	2.4
64-65	2.2	3.6	3.4	3.6	3.2	4.6	6.2	4.7	3.9	2.2	2.4	4.1	3.7
65-66	2.6	5.9	5.1	4.8	5.0	5.1	4.0	4.3	2.9	2.5	2.0	2.8	3.9
66-67	1.9	2.1	2.4	2.0	2.0	2.8	3.3	2.6	2.9	2.0	3.0	3.8	2.6
67-68	4.0	3.7	4.1	3.0	1.9	1.6	2.4	2.7	3.0	2.1	1.6	1.8	2.7
68-69	1.2	2.6	3.3	2.0	2.0	2.3	3.0	2.1	3.1	2.7	2.0	2.5	2.4
69-70	3.0	4.0	3.5	3.0	2.9	3.3	3.2	3.0	2.6	2.0	1.8	3.0	2.9
70-71	2.8	4.2	3.8	4.5	2.0	1.4	1.3	1.2	1.6	1.4	1.4	-0.4	2.1
71-72	0.1	1.9	3.1	3.9	2.8	2.1	1.2	1.6	2.1	0.4	1.1	1.6	1.8
72-73	0.7	1.6	2.5	3.1	3.3	4.0	3.9	4.6	3.5	2.0	1.6	1.1	2.7
73-74	1.6	2.6	4.7	1.9	-0.8	0.2	0.3	1.2	0.3	0.3	0.2	-0.7	1.0
74-75	0.9	0.9	0.9	1.1	3.5	2.8	2.2	2.5	3.7	1.8	1.4	2.7	2.0
75-76	1.0	2.3	2.1	3.6	1.6	0.9	2.1	1.4	0.2	-1.3	0.9	3.9	1.6
76-77	2.5	4.1	3.4	3.2	2.3	3.2	2.3	2.6	2.8	1.7	1.4	3.4	2.7
77-78	3.8	3.7	3.8	4.0	2.7	2.8	2.9	3.5	2.5	1.7	2.2	3.2	3.1
78-79	2.1	3.5	2.6	1.9	2.4	2.8	2.7	2.7	2.7	1.9	1.7	1.9	2.4
79-80	3.1	3.6	2.8	3.6	2.2	1.7	2.1	2.5	3.0	-0.9	-1.0	0.3	1.9
80-81	1.0	1.9	2.7	3.1	1.5	1.2	1.2	1.2	1.7	1.5	1.6	-0.4	1.5
81-82	0.1	2.0	3.0	3.4	1.9	2.1	1.8	1.6	2.0	0.5	1.3	1.4	1.8
82-83	0.5	1.0	2.1	2.9	3.3	3.2	4.7	3.5	1.4	-0.2	1.5	1.7	2.1
83-84	1.6	3.1	3.7	0.1	-0.6	0.1	0.4	0.6	1.8	0.0	-0.1	-0.9	0.8
84-85	1.5	0.5	1.1	1.4	1.2	0.5	1.6	1.0	2.1	-0.8	-0.5	0.7	0.9
85-86	0.7	0.8	1.5	3.7	3.7	4.0	4.7	3.0	1.2	-0.3	-1.5	1.1	1.9
86-87	0.6	2.3	3.8	2.5	2.2	3.3	2.2	3.0	2.4	1.6	1.7	2.8	2.4
87-88	3.1	2.2	2.2	4.4	2.0	1.9	2.0	2.2	1.2	1.6	1.4	2.9	2.3
88-89	1.9	3.9	2.5	1.9	1.7	1.4	1.9	1.5	1.6	1.8	1.0	1.2	1.9
89-90	2.5	3.2	2.1	1.8	1.5	0.9	1.5	2.4	2.8	-1.6	-1.5	-0.2	1.3
90-91	-1.9	1.6	1.9	1.8	1.9	2.8	1.7	1.5	1.8	0.9	1.5	3.3	1.6
91-92	1.8	2.8	3.5	2.5	3.0	3.3	3.3	4.0	4.4	1.8	1.0	0.5	2.7
92-93	0.4	2.7	2.8	1.9	2.6	0.5	0.8	1.3	2.5	1.6	2.5	2.7	1.9
93-94	3.3	3.6	3.9	2.6	2.7	1.6	2.2	1.4	1.8	1.1	1.6	1.7	2.3
94-95	2.0	2.2	2.4	2.7	1.9	3.0	2.3	3.2	3.6	2.6	2.8	5.1	2.8
95-96	2.5	4.9	4.9	1.4	1.8	1.5	2.9	2.3	2.7	1.8	1.8	2.8	2.6
96-97	2.8	3.8	2.5	1.9	2.3	2.3	2.5	2.5	2.3	2.1	3.2	1.9	2.5
97-98													
ROMD	1.9	2.9	3.1	2.8	2.3	2.3	2.5	2.5	2.3	1.4	1.6	2.2	2.3
D. EST	1.3	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2	1.0	0.9	1.2	1.1	1.4	1.1
C.V.	0.7	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.8	0.7	0.6	0.5
MAX	4.7	5.9	5.1	4.9	5.0	5.1	6.2	4.7	4.4	3.6	3.5	5.1	6.2
MIN	-1.9	0.5	0.9	0.1	-0.8	0.1	0.3	0.6	0.2	-1.6	-1.5	-0.9	-1.9

Fuente: SENAMHI, La Paz

CUADRO A-5

ESTACION: CHACALTAYA
 PROV. MURILLO
 DEPT. LA PAZ

TEMPERATURA MAXIMA EXTREMA °C

LAT. 16° 19'
 LONG. 68° 10'
 ALTUR 5520

ANO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	ROMD
53-54	6.8	6.0	8.4	8.9	7.8	4.1	6.9	5.0	3.1	2.3	4.0	5.2	5.7
54-55	4.0	6.1	7.8	7.0	5.3	5.3	5.7	5.1	5.1	4.3	4.3	5.2	5.4
55-56	4.7	6.0	6.4	5.9	5.3	5.3	5.7	5.1	5.1	4.3	4.3	5.2	5.3
56-57	4.7	6.0	6.4	5.9	5.3	5.3	7.4	4.5	5.7	3.6	4.0	4.1	5.2
57-58	5.8	6.3	6.0	6.1	7.0	6.1	5.0	6.0	6.2	5.2	5.8	4.2	5.8
58-59	3.7	4.2	5.0	5.9	5.3	5.3	5.7	5.1	5.1	4.3	4.3	5.2	4.9
59-60	4.7	6.0	6.4	5.9	6.8	5.1	5.8	6.0	4.0	6.8	6.5	9.0	6.1
60-61	5.0	4.6	5.0	8.5	7.5	6.5	9.1	8.2	6.0	4.0	3.1	5.0	6.0
61-62	4.5	7.5	5.2	5.9	5.0	5.9	3.5	5.5	6.7	3.0	4.5	5.0	5.2
62-63	5.0	6.9	8.2	5.5	4.0	5.0	3.0	4.0	4.0	6.1	4.0	4.0	5.0
63-64	3.2	6.0	10.0	4.7	6.9	5.5	4.2	4.8	4.7	5.0	4.0	6.2	5.4
64-65	2.2	7.2	7.0	7.3	7.5	8.2	12.0	8.3	6.3	4.5	5.0	6.5	6.8
65-66	6.9	11.0	9.0	10.0	8.0	10.5	6.5	7.5	8.5	5.0	4.3	5.2	7.7
66-67	4.7	6.0	6.4	5.9	5.3	5.3	5.7	5.1	5.1	4.3	4.3	5.2	5.3
67-68	4.7	6.0	6.4	5.9	5.3	5.3	5.7	5.1	5.1	4.3	4.3	5.2	5.3
68-69	4.7	6.0	6.4	5.9	5.3	5.3	5.7	5.1	5.1	4.3	4.3	5.2	5.3
69-70	4.7	6.0	6.4	5.9	5.3	5.3	5.7	5.1	5.1	4.3	4.3	5.2	5.3
70-71	4.7	6.0	6.4	5.9	4.2	5.7	2.9	3.9	3.7	3.3	4.5	3.4	4.6
71-72	3.2	5.1	6.0	8.4	4.7	5.0	4.8	3.2	3.7	3.1	5.4	5.1	4.8
72-73	4.8	5.2	5.0	5.2	6.8	8.8	9.0	7.4	6.2	5.3	4.4	4.1	6.0
73-74	5.4	7.1	10.1	5.1	7.2	5.2	5.9	4.8	5.2	4.1	5.2	3.2	5.7
74-75	3.5	3.3	5.1	5.6	2.8	3.6	2.9	2.5	2.8	1.8	5.0	3.7	3.6
75-76	4.9	7.1	7.1	5.0	4.0	5.5	4.0	6.2	4.0	3.0	3.3	5.4	5.0
76-77	5.7	5.1	5.4	5.3	4.0	4.2	3.9	5.0	5.5	4.9	4.4	6.0	5.0
77-78	5.1	6.5	4.9	4.0	4.0	4.0	6.8	4.4	4.0	4.3	4.0	3.9	4.7
78-79	5.9	6.9	3.9	4.7	4.2	3.3	4.8	5.0	6.1	4.0	2.5	4.5	4.7
79-80	4.2	4.0	5.0	6.3	3.8	5.6	4.1	3.8	3.8	3.4	4.5	3.6	4.3
80-81	3.6	4.9	6.1	7.7	3.5	6.0	4.3	3.1	3.7	3.0	3.6	5.5	4.6
81-82	5.0	5.0	5.7	4.5	6.8	8.8	9.1	5.7	3.5	2.2	4.5	4.1	5.4
82-83	5.4	7.4	10.1	1.0	0.4	2.7	2.9	4.4	4.5	3.4	3.9	3.3	4.1
83-84	3.7	3.7	5.1	3.9	5.1	2.9	7.3	4.2	4.9	3.9	1.0	5.2	4.2
84-85	4.7	6.0	6.4	7.1	5.3	5.3	5.7	5.1	5.1	2.5	1.7	5.4	5.0
85-86	3.7	4.9	7.1	7.1	4.1	6.6	5.3	5.2	4.5	4.2	5.4	6.2	5.4
86-87	5.8	5.8	3.7	8.5	4.8	4.5	4.8	7.3	5.7	5.4	4.6	6.2	5.6
87-88	5.6	7.1	7.1	5.8	4.6	4.8	6.1	4.2	4.4	4.3	4.8	3.8	5.2
88-89	5.7	6.7	3.3	4.8	4.0	2.9	5.2	4.7	6.7	4.6	2.0	5.1	4.6
89-90	3.8	4.7	5.5	5.1	5.1	5.3	6.7	3.7	5.2	7.7	4.1	9.7	5.6
90-91	5.1	5.7	6.3	6.0	5.1	5.6	6.0	5.9	7.2	3.2	6.5	4.4	5.6
91-92	2.7	5.0	6.0	5.7	5.3	1.2	3.0	4.0	2.9	4.3	4.3	5.2	4.1
92-93	4.7	6.0	6.4	5.9	5.8	5.3	5.7	3.1	5.1	4.3	4.3	5.2	5.2
93-94	4.5	6.0	6.4	5.0	6.5	6.5	5.0	6.0	5.8	5.0	5.8	6.8	5.8
94-95	6.0	8.2	7.8	4.1	6.5	4.0	10.7	6.0	8.0	5.6	4.9	6.2	6.5
95-96	6.2	8.0	7.8	6.2	5.3	5.3	5.7	5.1	5.1	4.2	4.3	5.1	5.7
96-97	4.7	6.0	6.4	5.9	5.3	5.3	5.7	5.1	5.1	4.5	5.5	5.0	5.4
PROMD.	4.7	6.0	6.4	5.9	5.3	5.3	5.7	5.1	5.1	4.2	4.3	5.1	5.3
D. EST	1.0	1.3	1.5	1.5	1.5	1.6	2.0	1.3	1.2	1.1	1.1	1.3	1.4
C.V.	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3
MAX	6.9	11.0	10.1	10.0	8.0	10.5	12.0	8.3	8.5	7.7	6.5	9.7	12.0
MIN	2.2	3.3	3.3	1.0	0.4	1.2	2.9	2.5	2.8	1.8	1.0	3.2	0.4

uente: SENAMHI, La Paz

CUADRO A-6